На правах рукописи

Hary

ЛАЧУГИН ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОСНОВАННАЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»).

Официальные оппоненты:

Долгополов Андрей Геннадьевич - доктор технических наук, открытое акционерное общество «Электрические Управляемые Реакторы», технический директор

Кужеков Станислав Лукьянович - доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВПО «Южно - Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», профессор кафедры электрические станции и электроэнергетические системы

Лямец Юрий Яковлевич - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством" (ОАО "ВНИИР"), г. Чебоксары

Защита состоится 17 июня 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. Е-mail: <u>uch_sovet@ispu.ru</u>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена <u>http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Lachugin_V.F..pdf</u> Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ <u>www.ispu.ru</u>.

Автореферат разослан «____» ____ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.064.01, доктор технический наук, доцент

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С развитием электроэнергетических систем (ЭЭС) связано постоянное совершенствование релейной защиты (РЗ), являющейся важным звеном, обеспечивающим надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей. Принципы выполнения **P3** различных электроэнергетических объектов (ЭЭО) преимущественно строятся на основе контроля токов и напряжений промышленной частоты. Проблемы, связанные с повышением сложности электрических сетей, увеличением протяженности воздушных линий (ВЛ) электропередачи и передаваемых мощностей, применением сверхвысоких напряжений (СВН), предъявляют более высокие требования к эффективности функционирования РЗ. Резкие изменения режимов работы современных ЭЭС ведут к увеличению диапазона колебаний электрических быть селективность, величин, пределах которого должна обеспечены В быстродействие и устойчивость функционирования релейной защиты. При этом уровни минимальных токов и напряжений требуют выполнения измерительных органов защиты с повышенной чувствительностью. Обеспечение необходимых запасов динамической устойчивости ЭЭС требует повышения быстродействия РЗ. Реализация указанных требований при выполнении защиты ВЛ сверхвысокого напряжения (СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ) на основе контроля электрических величин промышленной частоты сталкивается с существенными трудностями. Например, обеспечение высокой чувствительности затруднено по условиям отстройки от различного рода небалансов нормального режима, а также от длительно затухающих переходных процессов с широким спектром частот. При этом фильтрация высокочастотных составляющих связана с ограничением быстродействия.

Усложнение условий функционирования особенно проявилось при создании P3 ВЛ СВН. Так, применение на этих линиях электропередачи (ЛЭП) СВН продольной емкостной компенсации изменяет характер входного реактивного сопротивления, обусловливая возникновение фазовых искажений сигналов измерительных органов зашиты, реагирующих на электрические величины промышленной частоты. Существенные трудности возникают и при выполнении селективных защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения 6-35 кВ и на гидрогенераторах укрупненных блоков гидроэлектростанций с нейтралью, заземленной через дугогасящие реакторы, поскольку ток промышленной частоты при ОЗЗ в этом случае не может быть использован в качестве надежного источника информации.

Изложенные проблемы определили необходимость создания защит, обладающих повышенным быстродействием и чувствительностью, в частности защит, реагирующих на токи и напряжения волновой стадии электромагнитных переходных процессов. Сложность решения данной задачи связана с тем, что коммутации (включение и отключение) электрооборудования и грозовые возмущения, в том числе не приводящие к повреждениям, также являются причиной возникновения переходных процессов в ЭЭС.

Тесно связанными по принципам функционирования с релейной защитой являются способы и устройства определения места повреждения (ОМП) на ВЛ. Основная проблема реализации ОМП волновым методом двухсторонних измерений заключается в обеспечении синхронизация измерений по концам ВЛ. С спутниковых использованием систем навигации в качестве источника синхронизации измерений обеспечение требуемой точности ОМП волновыми методами связано с выделением из измеренных токов и напряжений ВЛ волновых составляющих, распространяющихся от места повреждения, и определением времени прихода их фронта в точки контроля.

Работы по созданию и исследованию устройств, реагирующих на переходные процессы, в основу которых были положены волновые методы (методы бегущей волны), инициировались в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (ЭНИН) в 1950-х годах под руководством к.т.н., с.н.с. И.Н. Попова. Огромный вклад в разработку указанного типа устройств, реагирующих на соотношение полярностей токов и напряжений в начальной стадии переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в ЛЭП 6-35 кВ и в обмотках статора гидрогенераторов укрупненных блоков, а затем И при создании быстродействующих защит воздушных линий (ВЛ) СВН внесла инженер Г.В. Соколова. Существенный вклад разных этапах разработки на К.Т.Н. быстродействующих защит ВЛ CBH внесли O.3. Керимов, К.Т.Н. А.Д. Зейналов (АзНИИЭ), д.т.н. Д.Р. Любарский, к.т.н. В.И. Козлов и В.Л. Карцев (Институт Энергосетьпроект).

Следует отметить, что независимо от ЭНИН в Ивановском энергетическом институте (ныне Ивановском государственном энергетическом университете) под руководством к.т.н., доцента О.В. Лебедева и д.т.н., профессора В.А. Шуина успешно велись разработки защит от однофазных замыканиях на землю, реагирующих на переходные процессы в электрических сетях 6-35 кВ. Большое внимание разработке методов построения волновых защит, основанных на контроле падающих волн от места КЗ на протяженных ВЛ СВН, уделялось в СибНИИЭ (к.т.н. Ю.Ф. Королюк, к.т.н. Л.М. Цыганков, В.Г. Богрунов и к.т.н. Л.Х. Райзвих). Серьезная работа по исследованию технических средств определения мест повреждения волновыми методами ведется в ООО «НПП Козлова «Бреслер» под руководством К.Т.Н. B.H. В Нижегородском И государственном техническом университете руководством под Д.Т.Н. А.Л. Куликова.

Целью диссертационной работы является разработка на основе переходных процессов, возникающих при электрических повреждениях в ЭЭС (КЗ и ОЗЗ) принципов выполнения РЗ различных объектов электроэнергетических систем. Созданные на данной основе устройства РЗ должны обладать существенными преимуществами по быстродействию и чувствительности по сравнению с традиционными устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка принципов построения, алгоритмов функционирования и внедрение быстродействующей высокочувствительной направленной защиты ВЛ СВН (500-1150 кВ) от всех видов КЗ.

2. Исследование влияния грозовых возмущений на эффективность функционирования защиты ВЛ СВН на основе волновых методов.

3. Разработка и внедрение способа ОМП на ВЛ ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений с использованием спутниковой связи.

4. Разработка принципов выполнения, алгоритмов функционирования и внедрение защиты от ОЗЗ распределительных сетей среднего напряжения 6-35 кВ, обеспечивающей селективность и устойчивость функционирования независимо от режима заземления нейтрали.

5. Разработка и внедрение усовершенствованного алгоритма селективной защиты от ОЗЗ гидрогенераторов укрупненных блоков, обеспечивающего селективность работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с трансформатором.

6. Разработка рекомендаций по повышению эффективности указанных устройств на основе анализа их опыта эксплуатации.

Методы научных исследований. Решение поставленных задач базировалось на использовании методов теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов в электрических сетях, включающей теорию волновых процессов в цепях с распределенными параметрами, методов математического и физического моделирования ЭЭО, методов экспериментальных исследований и обработки данных эксплуатации разработанных устройств РЗ.

Научная новизна работы.

1. Разработаны принципы построения направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, основанной на использовании волновых методов.

2. Исследовано влияние и разработан метод оценки воздействий грозовых возмущений на функционирование РЗ ВЛ.

3. Разработаны способ и устройство определения места повреждения на линиях электропередачи ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений.

4. Разработаны принципы построения защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанной на использовании электрических величин переходных процессов, обеспечивающей селективность и высокую устойчивость функционирования при любом режиме заземления нейтрали.

5. Разработан алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от O33 в обмотках статора, обеспечивающий селективность работы защиты при O33 в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с трансформатором.

6. На основе анализа опыта эксплуатации внедренных устройств разработаны рекомендации по повышению эффективности функционирования устройств РЗ, действующих с использованием электрических величин электромагнитных переходных процессов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы подтверждается данными многочисленных испытаний разработанных методов и устройств защиты на электродинамических и цифровых моделях элементов энергосистем, а также результатами опыта эксплуатации внедренных устройств в электрических сетях и на электростанциях.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности специальность. объединяющая исследования по «Научная СВЯЗЯМ И закономерностям при планировании развития, проектировании и эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей В рамках специальности проводятся исследования ПО развитию И совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения ... надежного производства электроэнергии, ее транспортировки»; в части области исследования – пункту 9: «Разработка методов анализа и синтеза ... релейной защиты в электроэнергетике»; пункту 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» и пункту 6: «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике».

Практическая значимость работы. Практической значимостью обладают следующие полученные в работе результаты:

– комплекс математических моделей, критериев, принципов построения и алгоритмов функционирования устройств РЗ ЛЭП, распределительных сетей и гидрогенераторов на основе волновых методов, обеспечивающий повышение эффективности функционирования РЗ указанных объектов электроэнергетических систем по сравнению с устройствами, основанными на использовании электрических величин промышленной частоты;

– алгоритм и структурная схема защиты ВЛ 500 – 1150 кВ на основе волновых методов с контролем поврежденных фаз ВЛ, позволяющая обеспечить распознавание поврежденных фаз с помощью органов направления мощности и избирателя поврежденных фаз ВЛ, с быстродействием в пределах нескольких миллисекунд;

– принцип отстройки защиты ВЛ СВН от воздействий грозовых разрядов, не проводящих к повреждениям;

 комбинированное устройство ОМП ВЛ 220-750 кВ, сочетающее функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения;

 устройство защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании волновых методов и электрических величин промышленной частоты;

 алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ в обмотке статора, эффективно действующий при любом числе генераторов блока;

 обоснование оптимального диапазона рабочих частот и методика расчета параметров срабатывания измерительных органов разработанных устройств защиты, основанных на использовании волновых методов;

– комплекс мероприятий, обеспечивающий повышение эффективности функционирования устройств РЗ, основанных на использовании электрических величин переходных процессов.

Использование результатов работы. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках, внедренных на различных объектах электроэнергетических систем:

– микроэлектронные устройства направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, выполненные по договорам с Минэнерго СССР и ПЭО Татэнерго, внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС в 1987–1997 годах;

– комбинированные устройства, сочетающие функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом ОМП на ВЛ ВН и СВН с помощью двухсторонних измерений, прошли испытания на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак «Оренбургэнерго» в 2009 году, на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская 1 – с 2012 года; в 2015 году выполнено включение этих устройств на ВЛ 220 кВ Сасово - Парская МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС»;

– микроэлектронные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от O33, основанные на использовании волновых методов, изготовлены на Рижском

опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» и успешно эксплуатируются на кабельных линиях 35 кВ Невинномысская ГРЭС – ПО «Азот» с 1992 года; 20 устройств, изготовленных на предприятии «Энергосоюз» (г. Казань), после проведения опытно-промышленных испытаний включены в 1996 – 2000 годах в эксплуатацию на ВЛ 35 кВ ПС Солнечногорская (Мосэнерго), на секции шин 6 кВ Казанской ТЭЦ 1, а также в распределительном устройстве 10 кВ Химического комбината ОАО «Славнефть» (г. Ярославль);

– микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали на основе волновых процессов, разработанные совместно с ООО «ИЦ «Бреслер», установлены в промышленную эксплуатацию на ряде ЛЭП 10 кВ ПС Ханты-Мансийская ОАО «Тюменьэнерго» в 2010 и в 2012 годах;

– микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании волновых методов и электрических величин промышленной частоты, установлены в промышленную эксплуатацию на ряде ЛЭП 6 кВ ПС Олимпийская (г. Волгоград) в ОАО «МРСК Юга» в 2013 году;

– микроэлектронные устройства селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ, изготовленные на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика», эксплуатируются на шестнадцати гидрогенераторах Нижнекамской ГРЭС с 1986 года и модернизированы в 1993 – 1997 годах.

На защиту выносятся:

1. Принципы и алгоритмы построения направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, реагирующей на токи и напряжения волновых переходных процессов в ЛЭП.

2. Методика оценки и результаты исследований воздействия грозовых возмущений на устойчивость функционирования устройств РЗ ВЛ СВН.

3. Способ и устройство ОМП на ВЛ ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений.

4. Принципы построения и алгоритмы защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании электрических величин переходных процессов.

5. Алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ в обмотке статора.

6. Методы оценки эффективности функционирования защиты, реагирующей на токи напряжения переходных процессов, на математической и динамической моделях, а также в процессе эксплуатации и результаты оценки.

7. Рекомендации по повышению эффективности устройств РЗ, основанных на использовании переходных процессов.

Личный вклад автора. В диссертации обобщены результаты исследований и разработок, выполненных в 1981-2015 годах с участием и под руководством автора. Личный вклад заключается в постановке целей и задач исследований, теоретическом и методическом обосновании путей их решения, обработки, обобщения и интерпретации результатов организации и проведения опытнопромышленной апробации разработанных алгоритмов и устройств. Внедрение полученных результатов, их анализ и выдача рекомендаций проводилось при непосредственном участии автора диссертации.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на более чем 50 отечественных и международных научно-технических семинарах, симпозиумах, конференциях и совещаниях, в т.ч. на заседаниях Ученого совета ОАО «ЭНИН».

Устройства, разработанные автором по теме диссертации, экспонировались на ВДНХ (ВВЦ), отмечены дипломами и медалями.

Опубликованные работы. Основные результаты диссертации опубликованы в двух монографиях, 71 печатной работе, включающих 22 публикации в рецензируемых научных изданиях («Электричество», «Известия PAH. «Электрические «Энергетик», Энергетика», станции», «Электро. Электротехническая Электротехника. Электроэнергетика. промышленность», «Известия вузов. Электромеханика», «Power technology and engineering», «Thermal engineering») и 24 патента на изобретения, на полезные модели и на свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 209 наименований и 12 приложений. Общий объём диссертации составляет 437 страниц, из них основной текст – 372 страницы, приложения – 65 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, поставлены задачи, подлежащие решению, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов работы, а также дана краткая характеристика работы.

В первой главе рассматриваются принципы построения защиты ЛЭП СВН от всех видов КЗ, основанной на использовании волновых методов:

– дан анализ результатов исследований и разработок устройств защиты ВЛ СВН, использующих электромагнитные переходные процессы при повреждениях;

– проанализированы особенности формирования волновых переходных токов и напряжений в месте КЗ и распространения волн по ВЛ и электрической сети и их влияние на формирование сигналов в точке контроля защиты;

 – рассмотрено формирование входных сигналов измерительных органов с контролем направления распространения волн;

– на основе расчетов и испытаний на электродинамической модели (ЭДМ) обоснованы принципы построения волновых высокочастотных направленных защит ВЛ СВН, реагирующих на переходные процессы при повреждениях, с быстродействующими избирателями поврежденных фаз.

При создании защиты ВЛ СВН, реагирующей на электрические величины переходных процессов (волновой защиты), возникает ряд задач, связанных с обеспечением ее быстродействия и чувствительности при всех видах КЗ на ВЛ независимо от изменения режимов работы энергосистемы. Для обеспечения такой независимости защита должна реагировать на изменение электрических величин в соответствии с методом наложения предшествующего режима на дополнительный, обусловленный КЗ. При исследовании токов и напряжений в широком диапазоне частот переходного процесса ВЛ СВН рассматриваются как несимметричные ЛЭП, в которых формируются независимые системы составляющих тока и напряжения.

На ВЛ СВН с заземленными тросами фазные величины преобразуются в систему "фаза средняя – две фазы крайние" (1-й волновой канал), "фаза — фаза крайние" (2-й волновой канал) и "фаза – земля" (нулевой волновой канал). Матрицы отношений токов δ и напряжений λ для указанных каналов имеют вид

$$\delta = \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 \\ \delta_{B(1)} & 0 & \delta_{B(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{array} \right\|; \qquad \lambda = \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 \\ \lambda_{B(1)} & 0 & \lambda_{B(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{array} \right\|, \tag{1}$$

где столбцы характеризуют соответственно первый, второй и нулевой волновые каналы, а строки – фазы.

Для КЗ фазы A на землю распределение токов и напряжений может быть получено при следующих граничных условиях: токи в неповрежденных фазах B и C равны нулю ($i_B = i_C = 0$), а $u_A = E_{\phi}$. С учетом (1) связь между $i_{k(s)}$ и $u_{k(s)}$ определяется следующими уравнениями:

– для фазы А (1-й провод)

$$u_A = u_{A(1)} + u_{A(2)} + u_{A(0)} = i_{A(1)} z_{A(1)} + i_{A(2)} z_{A(2)} + i_{A(0)} z_{A(0)} = E_{\phi};$$
(2)

– для фазы В (2-й провод)

$$i_B = \delta_{B(1)} i_{A(1)} + \delta_{B(0)} i_{A(0)} = 0;$$
(3)

– для фазы С (3-й провод)

$$i_C = i_{A(1)} - i_{A(2)} + i_{A(0)}. \tag{4}$$

На основании (1) – (4) для ВЛ 500 кВ

 $u_{A(1)} = u_{C(1)} = 0,128; \ i_{A(1)} = i_{C(1)} = 0,165; \ u_{B(1)} = -0,249; \ i_{B(1)} = -0,6; \ u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 0,465;$ $i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 0,5; \ u_{A(0)} = u_{C(0)} = 0,407; \ i_{A(0)} = i_{C(0)} = 0,33; \ u_{B(0)} = 0,428; \ i_{B(0)} = 0,247.$ Аналогично, при

– КЗ между крайней А и средней В фазами

 $u_{A(1)} = u_{C(1)} = 0,45;$ $i_{A(1)} = i_{C(1)} = 0,5;$ $u_{B(1)} = -1;$ $i_{B(1)} = -1;$ $u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 0,55;$ $i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 0,5;$

– КЗ средней фазы В на землю

 $u_{A(1)} = u_{C(1)} = -0,247;$ $i_{A(1)} = i_{C(1)} = -0,33;$ $u_{B(1)} = 0,558;$ $i_{B(1)} = 0,692;$ $u_{A(0)} = u_{C(0)} = 0,39;$ $i_{A(0)} = i_{C(0)} = 0,33;$ $u_{B(0)} = 0,442;$ $i_{B(0)} = 0,346;$

– КЗ между крайними фазами А и С

 $u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 1;$ $i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 1.$

Токи и напряжения волн при распространения их по однородным ВЛ СВН, характеризуются следующими данными:

– основная часть спектра коэффициента передачи первого и второго (междуфазовых) волновых каналов сосредоточена в диапазоне от 0 до 20 - 100 кГц при l = 600 км и - от 0 до 2 - 15 кГц при l = 5000 км;

– спектр коэффициента передачи нулевого канала формируется в диапазоне 0 - 10 кГц при l = 100 км и в диапазоне 0 - 2 кГц при l = 600 км.

Следовательно, уровни сигналов нулевого канала обладают более существенным затуханием по сравнению с сигналами первого и второго каналов.

Контроль направления распространения волн при различных видах КЗ может осуществляться по знаку мгновенной мощности p = ui. Построение органов направления при фазном контроле знака мощности могло быть достигнуто при прихода составляющих нулевого фиксации канала, когда завершается формирование фазных волн. Однако в процессе их формирования первичные напряжения и токи на неповрежденных фазах изменяют свои величины и знаки. Например, при однофазном КЗ на ВЛ длиной 1000 км время запаздывания составляющих нулевого канала относительно междуфазовых составляющих достигает 600 ÷ 800 мкс. Поэтому в качестве входных сигналов, в меньшей степени искажающих информацию о КЗ, предпочтительнее использовать составляющие междуфазовых волновых каналов. Контроль напряжений и токов первого и второго волновых каналов, осуществляемый соответствующими органами направления, обеспечивает их срабатывание при всех видах КЗ с частичным взаимным резервированием. Затухание сигналов в этих каналах не оказывает существенного влияния на снижение чувствительности защиты при реальных длинах защищаемых линий.

При наличии смежных линий в узле точки контроля значения напряжения $u_{np(s)}(t)$ и тока $i_{np(s)}(t)$ первых преломленных волн определяются величиной коэффициентов преломления $k_{npu(s)}$, $k_{npi(s)}$, обеспечивающих сохранение исходных

Следовательно, падающих волн $u_{\mathrm{nad}(s)}(t),$ $i_{\text{пад}(s)}(t).$ контроль направления распространения первой преломленной волны по знаку мощности *p*_{пр(s)} в волновом канале s, как и падающей – $p_{\text{пал}(s)}$, характеризует направление расположения места повреждения. При распространении волн в сети и появлении отражений от других узлов и от места повреждения величины u(s) или $i_{(s)}$ в точке контроля могут снижаться до нуля и изменять знак. Интервалы времени этих изменений определяются временами пробега волн до узлов и отраженных волн к точке контроля и месту КЗ, т. е. собственными частотами. При контроле преломленных органами направления мощности необходимо сохранение неизменного волн $u_{\Pi D(s)}(t)$ И $i_{\Pi D(s)}(t)$ В интервале соотношения знаков времени достаточной длительности, выбираемой по требованиям помехоустойчивости.

Определение форм сигналов $u_{(s)}(t)$, $i_{(s)}(t)$ на входе органа направления мощности в соответствующих частотных диапазонах осуществлялось частотным методом. При расчетах варьировались параметры угла ψ_{H} фазного напряжения в момент пробоя, индуктивность L и активное сопротивление R трансформатора (автотрансформатора), работающего в блоке с ВЛ, и длина l_{Λ} ВЛ. Расчетные кривые $u_{(s)}(t)$, $i_{(s)}(t)$ на выходе цепи из последовательно соединенных двойного Тобразного фильтра с $f_{\phi, под} = 50$ Гц и фильтра нижних частот (с варьируемой верхней граничной частотой $f_{\phi, под}$) при изменении расстояния от точки контроля до места КЗ, приведены на рис. 1.



Рис. 1. Расчетные кривые u(t), $i\{t\}$ на выходе цепи из последовательно соединенных двойного Т-образного фильтра, подавляющего 50 Гц, и фильтра нижних частот с полосой пропускания от 0 до 1 кГц (a, e, d) и от 0 до 10 кГц (b, c, e) при КЗ в точке 2 и длинах линии l = 10 км (a, b), 40 км (e, c) и 90 км (d, e); $L_{\rm T} = 0.035$ Гн; $\psi_u = 0$ и 90°

При $l_{\pi} = 40$ км ток i(t) (при $f_{\phi, \text{под}} = 10$ кГц) изменяет знак через t = 270 мкс ($f_{cof} \approx 2$ кГц), а на выходе фильтра при $f_{\phi, \text{под}} = 1$ кГц изменения знака i(t) не происходит, так как частоты 2 кГц и выше не пропускаются фильтром. Следовательно, использование фильтров нижних частот позволяет сохранить полярность входных сигналов с увеличением длительности контроля сигналов – от сотен микросекунд

до нескольких миллисекунд. С учетом приведенных данных, выбор $f_{\phi, \text{под}}$ импульсных органов направления мощности (ОНМ) представляется целесообразным в пределах 0,5 – 1 кГц. Для снижения влияния высших гармоник потребовалась установка фильтров третьей и пятой гармоник.

Чувствительность ОНМ проверяется по условиям обеспечения действия защиты при КЗ в расчётном случае – при переходе мгновенного значения напряжения в момент КЗ через нулевое значение. Определение напряжений в цепи ОНМ, включающей вышеуказанные частотные фильтры, производилось по теореме Бореля на основе операторных выражений и использования частотных характеристик элементов цепи. В частности, напряжение на выходе *n*-го элемента цепи

$$U_{_{6bxn}}(p) = U_{_{6x}}(p) \cdot H_1(p) \cdot H_2(p) \dots H_n(p),$$
(5)

где $U_{ex}(p)$ - изображение входного напряжения, $H_1(p) \cdot H_2(p) \dots H_n(p)$ - изображения передаточных функций элементов цепи. При этом напряжение на выходе *k*-го элемента цепи может быть определено по выражению

$$U_{_{ebx} _{k}}(p) = U_{_{ex} _{k}}(p) \cdot H_{_{k}}(p) \doteq \frac{d}{dt} \int_{0}^{t} U_{_{ex} _{k}}(\lambda) \cdot H_{_{k}}(t-\lambda) d\lambda .$$
(6)

Устойчивое действие защиты обеспечивается за счет использования импульсных ОНМ двухстороннего действия, реагирующих на преломленные волны, с применением каналов связи. Для ограничения влияния элементов сети, примыкающих к защищаемой линии, на формирование контролируемых сигналов могут использоваться органы направления, реагирующие на падающие волны от места КЗ.

$$u_{\text{пад}(s)} = \frac{u_{(s)} + z_{B(s)} \dot{i}_{(s)}}{2} , \qquad (7)$$

где $u_{(s)}$, $i_{(s)}$, $u_{\text{пад}(s)}$, $z_{\mathfrak{g}(s)}$ – напряжение, ток, напряжение падающей волны и волновое сопротивление канала *s* ВЛ соответственно. Однако и эти измерительные органы, реализованные в соответствии с выражением (7), требуют применения специального органа, реагирующего на преломленные волны для обеспечения селективности при внешних КЗ.

С учетом проведенных исследований было разработано устройство защиты, в котором отстройка OHM от токов и напряжений нагрузочного режима достигалась с помощью трех частотных фильтров аварийных составляющих, настроенных на подавление промышленной частоты. Для ограничения влияния высокочастотных помех и согласования частотных характеристик измерительных цепей тока и напряжения применены ФНЧ с граничной частотой на уровне 600-700 Гц. В структуру защиты включен избиратель поврежденных фаз (ИПФ), по быстродействию соответствующий времени срабатывания ОНМ. Для обеспечения требуемой чувствительности в ИПФ применено сравнение аварийных составляющих токов каждой из фаз, компенсированных током нулевой последовательности.

Коммутация ВЛ СВН сопровождается переходным процессом, который не обязательно является признаком КЗ, но ОНМ волновой защиты не всегда сможет правильно распознать КЗ при включении ЛЭП. Для этого должны использоваться вспомогательные органы защиты, например, дистанционного типа. В режиме включения ВЛ вводятся органы сопротивления, характеристика которых представляет собой окружность, смещенную на 10-15 % в третий квадрант комплексной плоскости сопротивлений для повышения чувствительности при двухфазных КЗ и КЗ на землю через переходное сопротивление.

Испытания устройств защиты, проведенные на электродинамической модели (ЭДМ), включали опыты внутренних и внешних КЗ, осуществлявшиеся с учетом наличия радиальных и замкнутых участков ВЛ длиной 40 - 500 км, а также - параллельных ВЛ. Модель с верхней граничной частотой на уровне нескольких килогерц удовлетворяла требованиям частотных характеристик измерительных органов защиты. При всех испытаниях фиксировались осциллограммы сигналов переходных процессов при КЗ и коммутациях на ВЛ.

Результаты испытаний образцов защиты на электродинамической модели (ЭДМ) показали, что

выделение аварийных составляющих для ОНМ с помощью активных трехзвенных RC-фильтров, подавляющих промышленную частоту нормального режима с учетом ее отклонения на 10%, обеспечивает уровень сигнала на выходе ОНМ при КЗ на ВЛ СВН не менее 10% от номинальных величин тока и напряжения в интервале времени до 1 мс, что соответствует полученным в соответствии с теоретическими исследованиями требованиям;

структуру измерительных цепей ОНМ целесообразно выполнять с граничной частотой фильтров низших частот (ФНЧ), не превышающей 0,5 - 1 кГц - с целью предотвращения неселективных (излишних) срабатываний волновой защиты;

характер изменения переходных аварийных напряжений и токов, передаваемых трансформаторами тока и напряжения ЛЭП и фильтрами аварийных составляющих защиты при КЗ и коммутациях и выделяемых по волновым каналам, находится в соответствии с данными расчетов.

в цикле качаний и асинхронного хода (с изменением частоты в диапазоне от 45 до 55 Гц) возможно действие защиты на блокирование;

избиратель поврежденных фаз, выполненный с контролем величин, определяемых средним по модулю значением фазного тока без учета токов нулевого канала правильно выбирал поврежденные фазы.

Во второй главе рассмотрена методика оценки влияния грозовых возмущений на надежность функционирования релейной защиты (РЗ) ВЛ:

– рассмотрен метод оценки влияния ударов молнии, не вызывающих коротких замыканий, на работу защит ВЛ СВН;

– разработан метод распознавания ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания, на передаче постоянного тока;

– представлен принцип функционирования пускового органа, предназначенного для распознавания грозовых возмущений, не приводящих к КЗ.

При грозовой деятельности, не сопровождающейся повреждениями, могут возникать напряжения и токи на ЛЭП, соизмеримые с токами и напряжениями при КЗ. Поскольку при прорывах молнии сквозь тросовую защиту ЛЭП соотношение напряжений нулевого и междуфазного каналов аналогично соотношениям при однофазном КЗ, то для отстройки волновой защиты от грозовых возмущений требуется разработка специального измерительного органа.

Амплитуда грозовой волны при пробеге расстояния 600 км по ВЛ 750 кВ уменьшается в междуфазных каналах примерно в 4 раза, а в нулевом – в 10 раз. Однако токи и напряжения грозовых волн остаются соизмеримыми по амплитуде с токами и напряжениями при КЗ в широком диапазоне длин пробега, поскольку разрядное грозовое напряжением на ВЛ СВН примерно в шесть раз превышает максимальное рабочее напряжение. Поэтому распознавание грозовых прорывов и о КЗ должно осуществляться с использованием других параметров, например, частотных и временных признаков. В диапазоне частот, близких к промышленной частоте, целесообразно использовать метод симметричных составляющих. В комплексной схеме замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей моделируют участки ВЛ. Переходные процессы в схемах четырехполюсники указанных последовательностей могут рассматриваться независимо друг от друга. Для свободных составляющих рассматриваемого диапазона частот значения индуктивности, емкости и активного сопротивления ВЛ близки к таковым на частоте. При промышленной ударе молнии отрицательной полярности напряжение любой из последовательностей в ВЛ в месте удара молнии

$$u_{\scriptscriptstyle M}(t) = \frac{I_{\scriptscriptstyle M} e^{-\delta_{\scriptscriptstyle M} t}}{|Y(-\delta_{\scriptscriptstyle M})|} \cos \theta_{\scriptscriptstyle H} + \sum_{s=1}^{m} \frac{I_{\scriptscriptstyle M} \cos \left(\frac{\pi}{2} + \psi_{\scriptscriptstyle as}\right) e^{-\delta_{\scriptscriptstyle as} t}}{(\delta_{\scriptscriptstyle as} - \delta_{\scriptscriptstyle M}) Y_{\scriptscriptstyle \Sigma}'(-\delta_{\scriptscriptstyle as})} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2I_{\scriptscriptstyle M} e^{-\delta_{\scriptscriptstyle s} t} \sin \left(\omega_{\scriptscriptstyle s} t + \psi_{\scriptscriptstyle Ts} - \xi_{\scriptscriptstyle s}\right)}{\sqrt{\omega_{\scriptscriptstyle s}^{2} + (\delta_{\scriptscriptstyle M} - \delta_{\scriptscriptstyle s})^{2}} Y_{\scriptscriptstyle \Sigma}'(p_{\scriptscriptstyle s})}.$$
(8)

В (8) первое слагаемое – принужденная составляющая, второе и третье – апериодические и периодические свободных составляющие, где I_{M} и δ_{M} – амплитуда и показатель затухания тока молнии; m – число апериодических свободных составляющих; δ_{as} и δ_{s} , ψ_{as} и ($\psi_{Ts} - \xi_{s}$), 0 и ω_{s} – показатели затухания, начальные фаза и частота апериодических и периодических свободных составляющих; p_{s} – нуль функции $Y_{\Sigma}(p)$ – входной проводимости схемы, а $Y_{\Sigma}'(p)$ – ее



Рис. 2. Комплексная схема замещения при ударе молнии в провод при Z_{kc1} , Z_{kc2} и $Y_{\kappa \pi 1}$, $Y_{\kappa \pi 2}$ — соответственно сопротивления примыкающих систем C1 к C2 и проводимости участков $l_{1 \mu} l_2$ линии длиной l_{π} для k (прямой, обратной и нулевой) последовательностей

производная при $p=p_s$, $\theta_{\rm H}$ – угол комплексной величины $Y_{\Sigma}(-\delta_{\mu}+j\omega_{\mu})$. По напряжению $u_{M}(t)$ из (8) можно определить токи i_{3s} и напряжения u_{3s} свободных составляющих в месте установки защиты в соответствии со следующими расчетными выражениями

$$u_{3s} = \frac{2I_{M}e^{-\delta_{s}t}\sin(\omega_{s}t + \psi_{Ts} - \xi_{s})\omega_{s}L_{c2}}{3\sqrt{(\delta_{M} - \delta_{s})^{2} + \omega_{s}^{2}}Az_{B}} \times \\ \times \sin\left(\omega_{s}\sqrt{L_{\pi}C_{\pi}}l_{2} + \arctan\frac{\omega_{s}L_{c2}}{z_{B}}\right)\cos\left(\arctan\frac{\omega_{s}L_{c2}}{z_{B}}\right);$$
(9)
$$A = C_{\pi}l_{\pi} + \frac{(L_{c1} + L_{c2})(z_{B}^{2} + \omega_{s}^{2}L_{c1}L_{c2})}{(z_{B}^{2} + \omega_{s}^{2}L_{c1}^{2})(z_{B}^{2} + \omega_{s}^{2}L_{c2}^{2})};$$
$$i_{3s} = \frac{2I_{M}e^{-\delta_{s}t}\sin(\omega_{s}t + \psi_{Ts} - \xi_{s} - 90^{0})}{3\sqrt{(\delta_{M} - \delta_{s})^{2} + \omega_{s}^{2}}Az_{B}} \times \\ \times \sin\left(\omega_{s}\sqrt{L_{\pi}C_{\pi}}l_{2} + \arctan\frac{\omega_{s}L_{c2}}{z_{B}}\right)\cos\left(\arctan\frac{\omega_{s}L_{c2}}{z_{B}}\right),$$

где z_B – волновое сопротивление, $\theta_{s1} = \omega_s \sqrt{L_{\pi} C_{\pi}} l_1$, $\theta_{s2} = \omega_s \sqrt{L_{\pi} C_{\pi}} l_2$; L_{π} и C_{π} – удельные индуктивность и емкость ВЛ.

Анализ результатов расчетов по (8) – (9) указывает, что максимальные значения токов и напряжений первой свободной периодической составляющей в месте установки защиты формируются при ударе молнии в среднюю часть ВЛ. Амплитуды токов и напряжений этой составляющей при грозовых возмущениях возрастают в значительно меньшей степени, чем при КЗ. При грозовых возмущениях частоты первых свободных составляющих ближе к промышленной

частоте, чем при КЗ, а показатели затухания больше. Значение частоты свободных составляющих не зависит от расстояния до места удара молнии. Следовательно, частотные и временные признаки имеют характерные различия при сравниваемых процессах КЗ и разрядов молнии.

Анализ функционирования защит ВЛ, реагирующих на составляющие промышленной частоты, при грозовых разрядах, не приводящих к КЗ, проведен с учетом использования в измерительных органах этих защит частотных фильтров с полосой пропускания 25–100 Гц. По данным расчетов по (8) – (9), частоты свободных составляющих ударов молнии отрицательной полярности на современных ВЛ достаточно отличаются от промышленной частоты. Однако проблема отстройки волновой защиты от токов и напряжений, вызванных прорывами молнии сквозь тросовую защиту, не приводящих к КЗ, осложняется при увеличении протяженности ВЛ, а также при длительностях грозового разряда порядка нескольких сотен микросекунд и более, в частности при грозовых разрядах положительной полярности.

При разработке алгоритмов функционирования пускового органа, предназначенного для распознавания грозовых возмущений, не приводящих к КЗ на двухцепной (двухполюсной) передаче постоянного тока (ППТ) 1500 кВ, расчет переходных процессов в ВЛ СВН с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах целесообразно проводить по методу характеристик в сочетании с решением дифференциальных уравнений в узловых точках ВЛ. Разработана программа расчетов переходных процессов для ВЛ ППТ 1500 кВ в диапазоне изменения расстояния от места удара молнии от 0 до 2400 км и длительности импульса молнии - от 35 мкс до 500 мкс. Результаты расчетов показали, что на ВЛ ППТ 1500 кВ все грозовые разряды сопровождаются формированием составляющих "все провода – земля" и "полюса – тросы". Для отличия волн КЗ от волн грозового происхождения следует рекомендовать сравнение сумм и разностей напряжений в местах установки ОМП. При грозовых возмущениях, сопровождающихся ударом молнии в опору, в оба троса и в объекты вне зоны грозозащиты ВЛ ППТ, сумма напряжений полюсов ВЛ более чем вдвое превышает их разность, в то время как при КЗ эти величины соизмеримы. Однако при ударах молнии в полюс, а также в объекты вне зоны грозозащиты без перекрытия или с перекрытием одного из тросов указанное соотношение напряжений практически совпадает с соотношением при КЗ.

Действие разработанного на основе указанных результатов расчетов пускового органа KB-1, осуществляющего распознавание грозовых возмущений, основано на контроле отношений $K_U = \frac{U_0}{U_1}$ и $K_T = \frac{T_p}{T_i}$ длительности сигнала T_i , и длительности паузы T_p напряжения U_I для фиксации грозовых возмущений без K3 $(U_0 \ u \ U_1 - \text{соответственно напряжения } U_0 = U_I + U_{II} \ u \ U_1 = U_I - U_{II}$, где $U_I \ u U_{II} -$ напряжения I и II полюсов). Орган KB-1 включает в себя блок KB_U контроля

отношения напряжений и блок $KB_{\rm T}$ контроля отношения длительностей (рис. 3). Через выпрямители VD1 и VD сигналы подаются на входы интеграторов D12 и D11, а затем сравниваются в компараторе DS. При $K_{\rm U}>2$ сигнал поступает через элемент задержки DT1 на исполнительный блок AB1. Сигнал с выхода выпрямителя VD1 поступает на входы блока длительности T_i . При грозовом возмущении без K3 срабатывают блоки контроля отношений $K_{\rm T}$ и $K_{\rm U}$ и по схеме "ИЛИ" воздействуют на исполнительный блок AB1. При K3 по принципу действия не срабатывают блоки контроля отношений $K_{\rm T}$ и $K_{\rm U}$, а срабатывает блок T_i и дополнительно действует на блок $K_{\rm T}$, исключая тем самым появление сигнала "Гроза".



Рис. 3. Структура пускового органа КВ-1

В третьей главе, посвященной разработке устройства определения места повреждения (ОМП) на ВЛ ВН и СВН

- представлена разработка способа построения ОМП волновым методом двусторонних измерений на ВЛ;

- обосновываются структура и параметры устройства ОМП.

В связи с активным использованием спутниковых радионавигационных систем (GPS и ГЛОНАСС) возрастает актуальность практической реализации волнового метода двухсторонних измерений для ОМП. Определение фронта волны основано на измерении аварийных составляющих токов и напряжений по концам линии с помощью методов математической статистики, позволяющих уменьшить влияние помех на вычисление времени прихода фронта волны к концу ВЛ. Значения фазных токов и напряжений вторичных цепей ТН и ТТ преобразуются в токи и напряжения волновых каналов с выделением падающей волны по выражению (5). Для фиксации времени прихода фронта волны аварийных составляющих падающих волн целесообразно использовать коэффициент эксцесса для междуфазных волновых каналов, имеющих наименьшую степень искажения

формы волны, который является мерой остроты пика распределения случайной величины и рассчитывается по выражению

$$K_E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \qquad (10)$$

где μ_4 и σ – четвертый и второй центральные моменты статистического распределения.

В качестве обоснования эффективности использования коэффициент эксцесса рассматривался пример расчета токов и напряжений в 50 км от места КЗ при КЗ на землю фазы А ВЛ 220 кВ с треугольным расположением проводов марки АС 240/32 и длиной 100 км при представлении ВЛ 220 кВ моделью Бержерона. На рис. 4 зафиксировано резкое возрастание коэффициента (10) эксцесса в момент появления волны КЗ в точке контроля, что позволяет четко определить факт начала формирования фронта волны, распространяющейся от места КЗ. На рис. 5 также отмечено резкое увеличение коэффициента эксцесса в момент скачка напряжения на осциллограмме реального КЗ на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак.



Рис. 4. Напряжение падающей волны первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим при КЗ на ВЛ 220 кВ

Предложенные методы определения расстояния до места повреждения с применением статистического анализа реализованы в многофункциональном устройстве (МФУ) ЭНИС, разработанном по заказу ОАО «ФСК ЕЭС». Это устройство помимо ОМП позволяет проводить измерения мгновенных значений напряжения и тока каждой фазы ЛЭП, синхронизируемые во времени с помощью глобальной системы позиционирования GPS, регистрировать процессы в ЛЭП и измерять показатели качества электроэнергии. Опытно-промышленные образцы МФУ ЭНИС (рис.6) были введены в эксплуатацию на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово.



Рис. 5. Напряжение первого волнового канала и коэффициент эксцесса при КЗ на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак



Рис. 6. Внешний вид опытно-промышленного образца МФУ

Четвертая глава посвящена разработке волновых защит распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ:

– анализируются результаты моделирования и экспериментальных исследований импульсной защиты от ОЗЗ на воздушных и кабельных ЛЭП 6-35 кВ;

– обосновывается целесообразность сочетания способов определения поврежденного присоединения для устройства селективной защиты от ОЗЗ в распределительной сети 6-35 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

При ОЗЗ в сети 6-35 кВ

$$u_{A} = z_{AA} i_{A} + z_{AB} i_{B} + z_{AC} i_{C};$$

$$u_{B} = z_{BA} i_{A} + z_{BB} i_{B} + z_{BC} i_{C};$$

$$u_{C} = z_{CA} i_{A} + z_{CB} i_{B} + z_{CC} i_{C},$$

(11)

где $u_{A,B,C}$ и $i_{A,B,C}$ – мгновенные напряжения и токи в фазах трехфазной ЛЭП при волновом переходном процессе; z_{AA} , z_{BB} , z_{CC} – собственные волновые сопротивления фаз ЛЭП; z_{AB} , z_{BC} , z_{AC} – взаимные волновые сопротивления фаз ЛЭП. Напряжения и токи междуфазных и нулевых волновых каналов (при учете ЛЭП как симметричных)

$$u_{a} = -\frac{2u_{n}z_{\phi}}{2z_{\phi} + z_{0}}; \quad i_{a} = -\frac{2u_{n}}{3z_{\phi} + z_{0}};$$

$$u_{b} = u_{c} = -\frac{u_{a}}{2} = \frac{u_{n}z_{\phi}}{2z_{\phi} + z_{0}}; \quad i_{b} = i_{c} = -\frac{i_{a}}{2} = \frac{u_{n}}{2z_{\phi} + z_{0}};$$

$$u_{0} = -\frac{u_{n}z_{0}}{2z_{\phi} + z_{0}}; \quad i_{0} = -\frac{u_{n}}{2z_{\phi} + z_{0}}.$$
(12)

Данные осциллограмм токов и напряжений переходного процесса в нулевом канале, в соответствии с (12), полученные при экспериментальных исследованиях O33 в воздушных и кабельных сетях 6-35 кВ, указывают (рис. 7) на высокую крутизну начального фронта разрядных волн переходного процесса при O33, близких к месту установки защиты, а также на колебания тока *i* и напряжения *u* с частотой порядка единиц и десятков килогерц, определяемые нарушениями однородности волнового сопротивления, и на различия начальных знаков мощности p = ui при O33 в зоне и вне зоны на входе фазочувствительной схемы OHM.



Рис. 7. Осциллограммы переходного процесса в цепях импульсного органа направления мощности при внешнем ОЗЗ (метки через 200 мкс); *I* и *II* – напряжения на входе фазочувствительной схемы по цепи тока и по цепи напряжения

Структурная схема устройства защиты от ОЗЗ типа ИЗС приведена на рис. 8. Защита содержит ОНМ (*KW*), реагирующий на начальный знак мгновенной мощности переходного процесса. В состав КW входят частотные двойные Т-образные RC-Z2. фильтры Z1И подавляющие промышленную частоту, с входными трансформаторами каналов тока 3i₀ и напряжения 3u₀, кольцевая фазочувствительная схема U1 на диодах, определяющая знак мощности, исполнительный одновибратор D2, срабатывающий при O33 в зоне защиты и подающий сигнал от реле KW на элемент И (D5), одновибратор D1, осуществляющий кратковременное блокирование КW при внешних ОЗЗ. Действие КW осуществляется совместно с пусковым органом (ПО) КV нулевой последовательности для отстройки от переходных процессов, не связанных с ОЗЗ.



Рис. 8. Структурная схема защиты типа ИЗС

Исследования устройства защиты типа ИЗС и модернизированного устройства защиты типа УЗС проведены в Ивановском государственном энергетическом университете на физической модели электрической сети 6-35 кВ с различными режимами нейтрали. Моделировались ОЗЗ в сети, содержащей нескольких кабельных длиной от 100 до 500 м и ВЛ длиной до 10 км, с изменением переходного сопротивления в месте повреждения, начальной фазы мгновенного напряжения при ОЗЗ. С целью оценки влияния переходных сопротивлений и изменения протяженности защищаемых ЛЭП на чувствительность защиты выполнена серия экспериментальных исследований УЗС на ПС Солнечногорск в сети 35 кВ. Металлические и дуговые ОЗЗ проводились на ВЛ 35 кВ Солнечногорск-Волково и ВЛ 35 кВ Волково – Васькино в транзитном и тупиковом режимах при токе и напряжении срабатывания ОНМ соответственно 0,1 - 0,05 А и 1 В и напряжении срабатывания ПО 15 В. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Устройства защиты при всех внешних ОЗЗ как на модели сети, так и при экспериментальных исследованиях действовали на блокировку, а при внутренних – на отключение при реальных сопротивлениях в месте ОЗЗ.

Создание аналогово-цифровых преобразователей, обеспечивающих обработку данных переходного процесса с требуемым быстродействием, позволили ОАО «ЭНИН» совместно с ООО «ИЦ «Бреслер» по заказу ОАО «Тюменьэнерго» разработать устройство селективной защиты от ОЗЗ типа ИЗН для воздушных и кабельных линий 6-35 кВ. Устройство действует как на сигнал, так и на отключение, имеет встроенный осциллограф и регистратор событий. Устройство подключается к трансформаторам тока и напряжения нулевой последовательности (ТТНП и ТННП) и устанавливается на каждое присоединение. При отсутствии ТТНП устройство может подключаться на сумму токов трех фаз.

Натурные испытания устройства ИЗН (рис. 9 и 10) проводились на ряде кабельно-воздушных ЛЭП 10 кВ ПС Ханты-Мансийская. Для контроля селективности ОНМ в устройстве ИЗН разработан специальный элемент,

вводимый при включении ЛЭП, с помощью которого по направлению мгновенной мощности переходного процесса при разновременном замыкании контактов выключателя ЛЭП (рис. 11) определяется правильность контроля полярности в ОНМ.

Таблица 1

| | | УЗС | | | | Контроль изоляции | |
|--------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-------|----------------------|-------|
| Опыты ОЗЗ | Расположение провода | Требуе- мые срабаты- вания | Фактиче- ские срабаты- вания | Блоки- ровка | Отказ | Сраба- тывания | Отказ |
| Метал- лические | на контуре заземления | 23 | 23 | - | - | 23 | - |
| Контакт- ные | на поверхности земли | 11 | 11 | - | - | 11 | - |
| Дуговые | на высоте 1 см над поверх- ностью земли | 4 | 3 | 1 | - | 4 | - |
| | на высоте 10 см над поверх- ностью земли | 4 | 2 | 2 | - | 4 | - |
| | на высоте 40 см над поверх- ностью земли | 10 | 2 | 5 | 3 | 7 | 3 |
| | Итого | 52 | 41 | 8 | 3 | 49 | 3 |





Рис. 9. Устройство ИЗН

Рис. 10. Устройство ИЗН в ячейке ЛЭП

Искусственные ОЗЗ устраивались путем включения ЛЭП на устройство переносного заземления. При всех искусственных и возникшем естественном ОЗЗ устройства работали правильно. На рис. 12 приведены осциллограммы $3u_0$ и $3i_0$ искусственного ОЗЗ на ЛЭП РП-12-1, а на рис.13 – осциллограмма естественного замыкания на ЛЭП «ОАО-1».



Рис. 11. Осциллограмма токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$ при включения выключателя

Как показали проведенные исследования, для повышения эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся ОЗЗ требуется использование электрических величин установившегося процесса при ОЗЗ. В результате исследований разработано устройство ТОР 110-ОЗЗ защиты, предназначенное для сетей с изолированной нейтралью, с заземлением нейтрали через резистор или дугогасящий реактор и с комбинированным заземлением нейтрали, выполняющее функции селективной защиты на кабельных, воздушных и кабельно-воздушных ЛЭП напряжением 6-35 кВ и обеспечивающее фиксацию всех разновидностей ОЗЗ - устойчивых через переходное сопротивление и металлических, дугу, том числе В кратковременных самоустраняющихся и прерывистых.



Рис. 12. Осциллограммы искусственного ОЗЗ: а) ЛЭП РП-12-1, б) ЛЭП Базьяны



Рис. 13. Осциллограмма замыкания на ЛЭП ОАО-1

Функциональный блок этого устройства с волновым модулем контроля направления распространения волн при ОЗЗ, реагирующий на соотношение знаков тока и напряжения волн, возникающих при ОЗЗ, представлен на рис.14.



Рис. 14. Функциональный блок с волновым модулем направленности

При испытаниях функционального блока устройства TOP 110-O33 с помощью программных средств MATLAB/Simulink и устройства PETOM-61 моделировались O33 в начале, середине и конце защищаемой и смежной ЛЭП. Сопротивление в месте O33 варьировалось от 0 до 2000 Ом. На рис.15 приведена расчетная осциллограмма O33 в обратном, а на рис. 16 - в прямом направлениях. При замыкании в обратном направлении мощность аварийной составляющей имеет положительный знак, а при замыкании в прямом направлении – отрицательный. Фиксация установления O33 в волновой защите осуществляется по факту возникновения установившегося напряжения нулевой последовательности. В режиме работы сети с изолированной нейтралью используется также модуль направленности РНМНП (рис.17 а), реагирующий на угловые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности промышленной частоты (рис.17 б). В модуле направленности ток точной работы равен 0,01 А, а угол максимальной чувствительности - 65°. Контроль наличия

O33 в сети осуществляет орган, реагирующий на действующее значение напряжения нулевой последовательности (порог срабатывания 15 В).



Рис. 15. Внешнее замыкание



Рис. 16. Замыкание в прямом направлении

В пятой главе анализируются особенности выполнения селективной защиты гидрогенераторов от O33 с применением волновых методов:

 анализируется возможность неправильных действий селективной защиты гидрогенератора укрупненного блока при неполнофазных отключениях выключателей гидрогенераторов; – рассматривается селективность работы селективной защиты гидрогенератора укрупненного блока в режиме блока генератор–трансформатор.

Результаты разработки защиты от O33 распределительных сетей, содержащей орган направления мощности, реагирующий на начальный знак мгновенной



Рис. 17. Логическая схема модуля направленности по промышленной частоте (а) и угловые соотношения между током и напряжением при ОЗЗ в режиме работы сети с изолированной нейтралью (б)

мощности переходного процесса, позволили обосновать принцип контроля переходного процесса при ОЗЗ для селективной защиты статорных обмоток гидрогенераторов укрупненных блоков ГЭС от ОЗЗ, в которых несколько генераторов работают на общую обмотку повышающего трансформатора.

Функциональная схема устройства импульсной направленной защиты типа ИЗГ приведена на рис. 18. Устройство ИЗГ включает импульсный орган направления мощности *KW*, импульсное реле тока *KC*, реле напряжения *KV*, логическую часть, содержащую элемент ИЛИ *DW1*, элемент И *DX1*, элемент задержки на срабатывание *KT1*, а также счетчики *PC1* и *PC2*, выходное реле *KL1* и лампу *KH*. Реле *KW*, реагирующее на начальный знак мгновенной мощности p=ui переходного процесса, обеспечивает селективность действия защиты при O33 в любой точке обмотки статора защищаемого генератора. Оно срабатывает при поступлении на его измерительные входы разнополярных сигналов тока $3i_0$ и напряжения $3U_0$ нулевого канала (O33 в зоне) и блокируется при однополярных сигналах (O33 вне зоны), принимая устойчивое состояние на время 0,22-0,27 с, после чего возвращается в исходное состояния.

Исследовалось влияние неполнофазных коммутаций выключателей генераторов блоков ГЭС на вероятность ложных срабатываний устройства ИЗГ, так как за время его эксплуатации произошло несколько случаев не предусмотренного эксплуатацией отключения одного из гидрогенераторов блока от совместного действия ЗЗГ и ИЗГ при недоотключении одной из фаз

выключателя выводимого в резерв генератора другой пары того же блока в режиме без ОЗЗ.



Рис. 18. Функциональная схема защиты ИЗГ

Эти результаты подтвердились во время опытов на Нижнекамской ГЭС. Так, в режиме подключения к сети только фазы А генератора № 3 в режиме с отключенным генератором № 4 первой пары генераторов и включенными в сеть другой пары генераторами № 1 и 2 - произошло срабатывание не только ЗЗГ генераторов № 1, 2 и 3, но и действие на отключение ИЗГ этих же генераторов. При этом отмечено увеличение напряжения $3U_0$ в нулевом канале в цепи ГГ № 3 до уровня 15 В, достаточного для срабатывания ИЗГ, вследствие увеличения напряжения на фазе А после ее включения. Чем больше наблюдалось различие в угловых скоростях напряжений сети и генератора в момент коммутации выключателя, тем большего уровня достигало напряжение 3U₀ и тем выше оказывалась вероятность срабатывания ОНМ и РН ИЗГ. Экспериментальные исследования показали также, что режимы двухфазных включений и однофазных отключений при любом числе параллельно работающих с сетью генераторов не приводит к формированию $3U_0$ и $3i_0$, способных привести к срабатыванию защиты от замыканий на землю в цепи обмотки статора генератора - 33Г и ИЗГ.

В диссертации исследовалась также возможность селективной работы ИЗГ в режиме блока генератор-трансформатор. Результаты расчетов, проведенных волновым методом, показали, что при ОЗЗ в зоне ИЗГ на выводах генератора в схеме одиночного блока ток $3i_0$ в отличие от напряжения $3U_0$ носит высокочастотный характер. Причем длительность начального совпадения их

знаков определяется пробегом волны по фазной обмотке низшего напряжения трансформатора. Эти данные хорошо соотносятся с осциллограммами, полученными СибНИИЭ и ЭНИН при испытаниях на Братской и Новосибирской ГЭС, где ток $3i_0$ также носил высокочастотный характер, определявший собственными частотами обмотки НН. Пороги срабатывания ОНМ, из условия обеспечения достаточной чувствительности при ОЗЗ вблизи нейтрали генератора, находятся в пределах 0,1 - 1% от номинальных значений. Поэтому формируемые на входе ОНМ высокочастотные токи при ОЗЗ в схеме блока генератор - трансформатор вполне соизмеримы с его порогами срабатывания.

Результаты экспериментальных исследований и расчетов, приведенные в диссертации, показали, что при O33 в зоне защиты гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором (при отключении других генераторов этого же блока) или на холостом ходу, *KW* не действовало на отключение поврежденного генератора из-за особенностей распространения сигналов в электрической цепи «фазы генератора, соединенные в звезду, - фазы повышающего трансформатора, соединенные в треугольник». Для отключения генератора в этом режиме в устройстве могла быть использована цепь С*рабатывание без KW* (рис. 18), предназначенная для выполнения резервной ступени устройства ИЗГ.

Решение задачи обеспечения чувствительности и селективности ИЗГ в режимах работы генератора укрупненного блока при отключении других генераторов этого же блока основывалось на модернизации цепи Срабатывание без KW при обязательном запрете действия при ОЗЗ вне зоны защиты генератора с целью селективного отключения поврежденного ГГ при кратковременном (в течение примерно 15 мкс) формирования мощности переходного процесса при ОЗЗ в зоне ИЗГ. В случае ОЗЗ в обмотке статора ГГ из-за отсутствия сигнала с выхода D4 блокировка цепи срабатывание без KW не производится и, следовательно, нет препятствий для отключения поврежденного ГГ от KV.

На рис. 19 представлен фрагмент функциональной схемы устройства ИЗГ, в части которого произведена модернизация алгоритма его работы. Для повышения эффективности функционирования ИЗГ в схему устройства введены три дополнительных элемента - два одновибратора и один формирователь импульсов. Одновибратор DT4 осуществляет согласование действий цепей срабатывания от KV и цепей блокирования от ИРМ, а одновибратор DT5 выполняет функции блокирования цепи *Срабатывание без КW* при замыкании вне зоны ИЗГ. Формирователь импульсов D7 обеспечивает однократный пуск РН по цепи *Срабатывание без KW* при внешних O33.



Рис. 19. Фрагмент функциональной схемы ИЗГ с введенными дополнительными элементами *D7*, *DT4* и *DT 5* и связями (выделено)

В шестой главе анализируются результаты опыта эксплуатации

– волновой направленной релейной защиты ВЛ СВН и пускового органа, предназначенного для распознавания грозовых возмущений на ВЛ СВН;

- устройства ОМП ВЛ с применением двухсторонних измерений;

- селективной защиты от ОЗЗ в сети 6-35 кВ.

С целью определения эффективности функционирования в условиях эксплуатации устройства волновой направленной высокочастотной защиты были включены на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС. Действия защиты, полученные от регистраторов аварийных событий, установленных на ПС Киндери и Заинской ГРЭС, проанализированы при многочисленных случаях КЗ на защищаемой ВЛ. Указанные данные сопоставлялись с оперативной информацией по аварийным отключениям и переключениям элементов энергосистем, входящих в ЕЭС страны. Срабатывания органов блока контроля грозовых возмущений сопоставлялись также с данными метеостанций. Не отмечено ложных срабатываний устройства защиты в нормальных режимах работы энергосистемы. Срабатывания ОНМ на блокировку связана с внешними КЗ в сети 110 - 750 кВ. Действие органа контроля грозовых возмущений соответствовало интенсивности грозовых разрядов вблизи защищаемой ВЛ. Число срабатываний органа контроля было существенно

меньшим, чем общее число гроз в местности, включающей защищаемую ВЛ. Наиболее активная работа органа контроля отмечена в апреле – мае и в августе – октябре. Избиратель поврежденных фаз правильно работал при КЗ на защищаемой ВЛ. Отмечено отсутствие действия ИПФ при грозовых возмущениях, не связанных с КЗ, что обусловлено выбранной длительностью его времени срабатывания. Это свойство ИПФ использовано для повышения надежности защиты в период грозовой деятельности. Защита селективно работала при всех КЗ на защищаемой ВЛ, в том числе и при неуспешных АПВ, в частности при семи КЗ в 40 км от ПС Киндери, происходивших в течение одного часа. Другие успешные действия волновой защиты были обусловлены однофазными КЗ, вызванными сильными порывами ветра, падением грозотроса на одну из фаз линии, касанием проводов ВЛ порослями и транспортными средствами, а также падением легкомоторного самолета на провода защищаемой ВЛ, сопровождавшегося переходом двухфазного КЗ на землю в трехфазное КЗ.

При этих КЗ были продемонстрированы преимущества волновой защиты по быстродействию (на 20-60 мс, табл. 2) и чувствительности над измерительными органами дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) – основной защиты этой ВЛ при порогах срабатывания ОНМ 5% -на блокировку и 10% - на отключение от номинального напряжения, так как были зафиксированы действия ОНМ в защищаемом направлении при КЗ, находящихся на расстоянии порядка 800-1000 км от ПС Киндери, на которые ДФЗ не реагировала. Опыт эксплуатации пускового органа КВ -1 на ВЛ СВН показал, что он четко отличает волны КЗ от волн других коммутаций.

Таблица 2

| Расстояние | | Работа | Работа | Преимущество |
|-------------|----------------------------------|----------|-------------|---------------|
| (км) от ПС | | OHM | измеритель- | ОНМ по быстро |
| Киндери | Вид повреждения | волновой | ных органов | действию, мс |
| до места КЗ | | защиты | ДФЗ | |
| 440 | Низовой пожар | да | да | 50 |
| 300 | Дуговое перекрытие | да | да | 20 |
| 208 | Повреждение фазы вблизи шин | да | да | 20 |
| | электростанции | | | |
| 580 | Металлическое замыкание фазы на | да | да | 50 |
| | шинах подстанции | | | |
| 500 | Дуговое замыкание фазы | да | да | 60 |
| 570 | Повреждение фазы на шинах ГЭС | да | нет | |
| 260 | Неуспешное включение ВЛ | да | да | 20 |
| 370 | КЗ у шин подстанции | да | да | 20 |
| 490 | Дуговое замыкание на ВЛ во время | да | да | 20 |
| | грозы вблизи шин подстанции | | | |
| 410 | Неуспешное АПВ ВЛ | да | да | 60 |

Для иллюстрации эффективности волнового метода ОМП двусторонних измерений проанализирован переходный процесс при двухфазном КЗ на ВЛ «Пугачи-Акбулак» 25 октября 2009 года. Разница во времени Δt прихода волн к ПС «Пугачевская» и к ПС «Акбулакская», зафиксированная прототипом ЭНИС, составляет 242 мкс. Время продвижения фронта волны в междуфазовом канала ВЛ от ПС Пугачевская до ПС Акбулакская составляет 438 мкс. Применяя допущение о том, что скорость распространения фронта волны по междуфазному каналу близка к скорости света, получим расстояние до места повреждения от ПС Пугачевская

$$L_{1} = \frac{(T - \Delta t)}{2} \times V = \frac{(438 \times 10^{-6} - 242 \times 10^{-6})}{2} \times 299 \times 10^{6} = 29,30 \text{ км.}$$
(13)

Результаты опытно-промышленную эксплуатации устройства ЭНИС на ВЛ 220 кВ Сасово – Парская показали, что погрешность разработанного устройства в части ОМП на основе волнового метода двусторонних измерений при КЗ на этой ВЛ не превышает 0,1 % от длины ВЛ.

Микропроцессорными устройствами селективной защиты от ОЗЗ типа ИЗН в процессе эксплуатации ЛЭП 10 κВ ПС Ханты _ Мансийская на было 1000 зафиксировано более O33, большая часть которых носила самоустраняющийся характер, отличающийся достаточно быстрым пробоем изоляции с ее либо весьма непродолжительным восстановлением (рис. 20 а), либо с существованием ОЗЗ в течение времени до нескольких сотен миллисекунд (рис. 20 б).



Рис. 20. Самоустраняющиеся ОЗЗ

Зафиксированы медленно развивающиеся O33 (рис. 21 а), вызванные пробоем воздушного промежутка и плавно переходящие в устойчивое O33, быстро развивающиеся O33 с фиксируемыми частичными пробоями изоляции в месте замыкания (рис. 21 б), а также более редкие - перемежающиеся замыкания (рис. 22)

постепенно переходящие в устойчивое ОЗЗ. Около 10% устойчивых ОЗЗ перешли в двойные замыкания на землю.



Рис. 22. Перемежающееся ОЗЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны принципы построения направленной высокочастотной защиты линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ), реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, обладающей существенными преимуществами по сравнению с

традиционными устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты, по быстродействию, чувствительности и селективности.

2. Выполнена оценка воздействия грозовых возмущений на надежность функционирования устройств релейной защиты ВЛ СВН и методы отстройки защиты от указанных воздействий. Показано, что с увеличением протяженности электрической сети и длины защищаемых ЛЭП увеличивается вероятность ложного срабатывания защит, реагирующих на электрические составляющие промышленной частоты, при грозовых возмущениях, не приводящих к КЗ.

3. Разработаны способ и устройство определения места повреждения на электропередачи BH CBH линиях И волновым методом двусторонних синхронизированных обеспечивающий измерений, точность нахождения поврежденного элемента ЛЭП, не превышающей десятой доли процента от протяженности ЛЭП.

4. Разработаны принципы построения защиты распределительной сети 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали сети, объединяющие все положительные свойства устройств указанной защиты.

5. Разработан алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, позволяющий использовать волновой метод при любом количестве работающих генераторов блока.

6. Даны рекомендации по повышению эффективности устройств релейной защиты, основанных на контроле переходных процессов, в части использования

– методологического комплекса математических моделей, критериев, методов и алгоритмов синтеза устройств релейной защиты линий электропередачи, распределительных сетей и гидрогенераторов, что позволяет повысить быстродействие и чувствительность этих устройств по сравнению с устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты;

– алгоритмов и структурной схемы защиты ВЛ 500 -750 кВ на основе использования токов и напряжений переходных процессов с контролем поврежденных фаз ЛЭП, что позволяет обеспечить повышенную избирательность к повреждениям как на самих ЛЭП, так и на их фазах с целью сокращения паузы автоматического повторного включения и улучшении надежности работы энергосистемы;

– принципов отстройки защиты ВЛ СВН от отрицательного воздействия грозовых разрядов, не проводящих к повреждениям;

– комбинированных устройств ВЛ 220-750 кВ, сочетающих функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения с помощью двухсторонних измерений;

 индивидуальных устройств защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, сочетающих волновые методы и контроль электрических величин промышленной частоты;

 алгоритмов селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, надежно действующих при любом числе генераторов блока;

– оптимизации диапазона рабочих частот и параметров срабатывания по току и напряжению измерительных органов разработанных устройств защиты;

– мероприятий, направленных на повышение эффективности устройств релейной защиты, основанных на использовании переходных процессов.

7. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках и внедрены на различных электроэнергетических объектах страны. В числе этих разработок:

– микроэлектронные устройства направленной высокочастотной защиты линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ), реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, выполнялись по договорам с Минэнерго СССР и ПЭО Татэнерго и были внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС в 1987- 1997 годах;

– комбинированные устройства, сочетающие функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения на ВЛ ВН и СВН с помощью двусторонних измерений, испытывались и находились в опытной эксплуатации в 2009 году на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак «Оренбургэнерго», а также (по заказу ОАО «ФСК ЕЭС») – находятся в эксплуатации на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская 1 с 2012 года. С 2015 года эти устройства успешно эксплуатируются на ВЛ 220 кВ Сасово-Парская МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС»;

– микроэлектронные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, реагирующие на полярность токов и напряжений переходных процессов, изготовлены на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» (по заказу Невиномысской ГРЭС) и успешно эксплуатируются на кабельных линиях 35 кВ Невинномысская ГРЭС - ПО «Азот» с 1992 года; около 20 устройств, изготовленных на предприятии «Энергосоюз» (г. Казань) после проведения опытно-промышленных испытаний включены в 1996 – 2000 годах в эксплуатацию на ВЛ 35 кВ ПС Солнечногорская (Мосэнерго), на секции шин 6 кВ Казанской ТЭЦ 1, а также в распределительном устройстве 10 кВ химического комбината ОАО «Славнефть» (г. Ярославль);

– микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, реагирующие на полярность токов и напряжений переходных процессов, в результате совместной разработки с ООО «ИЦ «Бреслер», установлены в промышленную эксплуатацию на ЛЭП 10 кВ ПС Ханты-Мансийская в 2010 и в 2012 годах по заказу ОАО «Тюменьэнерго», а также на ЛЭП 6 кВ ПС Олимпийская – в «Волгоградэнерго» ОАО «МРСК Юга» в 2013 г.;

– микроэлектронные устройства селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, изготовленные на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» эксплуатировались на 16 гидрогенераторах Нижнекамской ГРЭС с 1986 года с модернизацией в 1993 – 1997 годах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в монографиях и книгах

1. Попов И.Н., **Лачугин В.Ф.**, Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 248 с.

2. Терминологический справочник по электроэнергетике / Антипов К.М., Гаврилов Е.И., Карташев И.И., **Лачугин В.Ф.**, Ляшенко В.С., Фишов А.Г. и др. / М.: Типография «КЕМ». 2008, 912 с.

В рецензируемых изданиях

3. Лачугин В.Ф., Попов И.Н., Соколова Г.В., Зейналов А.Д. Исследование волновых процессов для релейной защиты линий сверхвысокого напряжения // Электричество. 1983. № 3. С. 1-7.

4. Лачугин В.Ф., Левиуш А.И. Влияние на работу высокочастотной защиты ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания ВЛ // Электричество. 1985. №3. С. 11-18.

5. Yermolenko V.M., Lachugin V.F., Lubarskiy D.R., Popov I.N., Sokolova G.V. High-speed wave directional relay protection of UHV lines. Paris. CIGRE. 34-11.1988.

6. Ilyinichnin V.V., Hoetsian K.V., **Lachugin V.F.**, Leviush A.I., Strelkov V.M., Rashkes V.S., Dunaev A.I. Service experience and field tests summaring of the protection and control devices improvement in EHV-UHV transmissions. Paris. CIGRE. 34-102. 1992.

7. Ilyinichnin V.V., Katunian V.I., Lachugin V.F., Leviush A.I., Ujegov V.T. Existing 110-1150 kV transmission line protection performance improvement under operating conditions and network structure changes. Paris. CIGRE. 34-202.1994.

8. **Лачугин В.Ф.** Направленная импульсная защита от замыканий на землю // Энергетик. 1997. № 9. С. 21-22.

9. Lachugin V.F. Evaluating EHV protection systems. Transmission and distribution. July 1999. Vol. 51. № 7. C. 52-55.

10. Лачугин В.Ф. Устройство защиты от замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ // Энергетик. 2004. № 7. С. 30-31.

11. Лачугин В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных сетей с компенсированной нейтралью // Электрические станции. 2005. № 8. С. 58-63.

12. Лачугин В.Ф. Опыт эксплуатации волновой быстродействующей направленной релейной защиты ВЛ СВН // Электрические станции. 2010. № 9. С. 27-34.

13. Краснышов С.В., Манжелий М.И., **Лачугин В.Ф.**, Сидорук С.В., Джангиров В.А., Бояркин И.Е. Опыт использования регистраторов синхронизированных измерений токов и напряжений на ВЛ 110 кВ // Электрические станции. 2010. № 9. С. 42-47.

14. Lachugin V.F. Experience in using traveling-wave high-speed directional relay protection of ultrahigh-voltage overhead transmission lines // Power technology and engineering. 2011. Vol. 44. N_{2} 6. PP. 484-491.

15. Krasnyshov S.V., Manzhelii M.I., Lachugin V.F., Sidoruk S.V., Dzhangirov V.A., Boyarkin I.E. Experience in using recorders of synchronized current and voltage measurements on 110 kV overhead power lines // Power technology and engineering. 2011. v. 44. № 6. PP. 492-497.

16. **Лачугин В.Ф.**, Тамазов А.И. Требования к системе измерений параметров режимов энергосистем // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. 2012. № 2. С. 8-13.

17. Лачугин В.Ф. Опыт разработки импульсных защит от замыканий на землю // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 77-79.

18. **Лачугин В.Ф.**, Кононенко В.Ф. Устройства защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ ОАО «МРСК Юга» и необходимость разработки требований по учету работы этих защит // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 86-88.

19. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Рывкин А.А., Шимина А.О. Многофункциональное устройство регистрации процессов, контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи // Электрические станции. 2013. № 8. С. 29-36.

20. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 6. С.137-146.

21. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N., Obraztsov S.A., Shimina A.O., Ryvkin A.A. A multifunctional device for recording the monitoring of electric power quality and for fault finding on electric transmission lines // Power technology and engineering. 2014. vol. 47. No 5. PP. 386-392.

22. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N. Implementation of a wave technique for fault localization in the power transmission lines using statistic data analysis methods // Thermal Engineering. Vol. 61. No. 13. 2014. PP. 982-988.

23. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Куликов А.Л., Рывкин А.А, Обалин М.Д. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 4. С. 28-37.

24. Куликов А.Л., **Лачугин В.Ф.**, Ананьев В.В., Вуколов В.Ю., Платонов П.С. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения // Электрические станции. 2015. № 7. С. 45-53.

В авторских свидетельствах и патентах на изобретения, патентах на полезные модели и свидетельствах о государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин

25. А.С. СССР № 1055301. Н 02 Н 3/30. Устройство для волновой направленной защиты линии электропередачи с высокочастотной блокировкой / Попов И.Н., Лачугин В.Ф.; заявл. 10.12.1981; опубл. 15.07.1983.

26. А.С. СССР № 1055302. Н 02 Н 3/30. Устройство для волновой направленной защиты линии электропередачи с высокочастотной блокировкой / Попов И.Н., **Лачугин В.Ф.**; заявл. 17.12.1981; опубл. 15.07.1983.

27. А.С. СССР № 1045800. Н 02 Н 3/30. Устройство для волновой направленной защиты линии электропередачи с высокочастотной блокировкой / Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В., Зейналов А.Д., Керимов О.З.; заявл. 15.01.1982; опубл. 01.06.1983.

28. А.С. СССР № 1190900. Н 02 Н 3/00. Устройство для релейной защиты линии электропередачи 110 кВ и выше от повреждений / Попов И.Н., Лачугин В.Ф.; заявл. 25.03.1983; опубл. 08.07.1985.

29. А.С. СССР № 632023. Н 02 Н 3/06. Способ однофазного автоматического повторного включения линии электоропередачи / Соболев В.Н., Лачугин В.Ф., Лысков Ю.Н., Каган В.Г.; заявл. 07.04.1977; опубл. 05.11.1978.

30. Патент Швеции № 453038. Н 02 Н 7/26. Anordning for riktat skydd av en kraf- toverforing-sledning genom relaande medelst bararstrom / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 27.10.1986; опубл. 04.01.1988.

31. Патент Швеции № 453039. Н 02 Н 7/26. Anordning for vagorienterat skydd av en kraftledning forsedd med hogfrekvens-blockering. Lachugin V.F., Popov I.N., Sokolova G.V., Zeinalov A.D.; заявл. 28.11.1986; опубл. 04.01.1988.

32. Патент Швеции. № 455557. Н 02 Н 7/26. Forfarande for identifiering av externt inducerade spanningar I en kraftoverforingslendning med horisontell / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 27.10.1986; опубл. 18.07.1988.

33. Патент Австралии № 589694. G 01 R 019/165, H 02 H 003/22, H 02 H 003/26. Identification of induced voltages in power transmission lines / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 22.10.1986; опубл. 28.04.1988.

34. Патент Австралии. № 593294. Н 02 Н 003/30 Н 02 Н 001/04, Н 02 Н 003/26. Directional protection of power transmission line / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 22.10.1986; опубл. 28.04.1988.

35. Патент Индии № 10609. Device for directional protection of power transmission lines with carrier-current relaying / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 17.10.1986; опубл. 12.04.1990.

36. Патент Индии. № 10754. Apparatus for identifying externally induced voltages in a power transmission line with horizontal arrangement of phase conductors / Popov I.N., Lachugin V.F.; заявл. 17.10.1986; опубл. 18.05.1990.

37. Патент Индии. № 13180. Device for surge directional protection of transmission line employing with carrier-current relaying / Lachugin V.F., Popov I.N., Sokolova G.V., Zeinalov A.D.; заявл. 17.10.1986; опубл. 14.09.1990.

38. А.С. СССР № 1688204. МПК G 01 R 31/08, Н 02 Н 3/20. Способ распознавания грозовых возмущений на линиях постоянного тока с компенсирующими реакторами / Лачугин В.Ф., Соколова Г.В., Брауде Л.И., Лесник В.А., Чекарьков Д.М.; заявл. 12.07.1989; опубл. 30.10.1991.

39. А.С. СССР № 1800543. МПК Н 02 Н 3/00. Устройство дифференциальной токовой защиты шин сети с изолированной или компенсированной нейтралью / **Лачугин В.Ф.**, Степанов Ю.А.; заявл. 28.02.1990; опубл. 07.03.1993.

40. Патент РФ на изобретение № 2480882. МПК Н 02 Н 3/26. Устройство импульсной защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ / Лачугин В.Ф., Серединский С.А., Иванов С.В., Буров А.В., Жуков В.В.; заявл. 16.11.2011; опубл. 27.04.2013.

41. Патент РФ на изобретение № 2472169. МПК G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места повреждения линии электропередачи / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Сидорук С.В., Краснышов С.В., Манжелий М.И., Денисов Д.В., Образцов С.А., Смирнов А.Н.; заявл. 31.05.2011; опубл. 10.01.2013.

42. Патент РФ на изобретение № 2475768. МПК G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / Панфилов Д.И., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., Образцов С. А., Смирнов А.Н., **Лачугин В.Ф.**, Сидорук С.В., Краснышов С.В., Манжелий М.И., Денисов Д.В.; заявл. 24.10.2011; опубл. 20.02.2013.

43. Патент РФ на полезную модель № 113016. МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения места повреждения на линии электропередачи / Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., Сидорук С.В., Смирнов С.Н., Лачугин В.Ф., Образцов С.А., Панфилов Д.И.; заявл. 24.10.2011; опубл. 27.01.2012.

44. Патент РФ на полезную модель № 128341. МПК G 01 R 31/00. Многофункциональное устройство регистрации процессов на линии электропередачи / Панфилов Д.И., **Лачугин В.Ф.**, Смирнов А.Н., Образцов С.А., Ахметов И.М., Рывкин А.А, Шимина А.О. Артемьев И.Ф., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А.; заявл. 08.02.2013; опубл. 20.05.2013.

45. Патент РФ на изобретение № 2519277. МПК Н 02 Н 3/00, Н 02 Н 3/26. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределенных сетей 6-35 кВ / **Лачугин В.Ф.**, Панфилов Д.И., Иванов С.В., Белянин А.А.; заявл. 18.02.2013; опубл. 10.06.2014.

46. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612374. Программное обеспечение сервера и автоматизированного рабочего места ЭНИС (ПО ЭНИС-АРМ) / Панфилов Д.И., Артемьев И.Ф., Смирнов А.Н., **Лачугин В.Ф.**; заявл. 26.02.2013; опубл. 20.06.2013.

47. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612409. Встроенное метрологическое программное обеспечение ЭНИС (ПО ЭНИС-метр) / Панфилов Д.И., Артемьев И.Ф., Образцов С.А., Смирнов А.Н., Лачугин В.Ф., Рывкин А.А, Шимина А.О.; заявл. 29.12.2013; опубл. 20.06.2013.

48. Патент РФ на изобретение № 2550348. Н 02 Н 3/26. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ / Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А.; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.05.2015.

ЛАЧУГИН Владимир Федорович РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОСНОВАННАЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано в печать 14.03.16 Объем 2,0 усл.п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 569 Отпечатано в типографии «Реглет» г. Москва, Ленинский проспект, д.2 (495) 978-66-63, <u>www.reglet.ru</u>