

На правах рукописи



Бобров Сергей Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-
ФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 110-220 кВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2011

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина» и ЗАО «РАДИУС-Автоматика».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шуин Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Савельев Виталий Андреевич

кандидат технических наук, доцент
Серов Вячеслав Ананьевич

Ведущая организация: Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей ОАО «Институт «Энергосетьпроект»

Защита состоится «20» мая 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. С авторефератом – на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «19» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, профессор



Мошкарин А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные требования к работе устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС) в части технического совершенства заставляют искать новые пути к усовершенствованию алгоритмов работы УРЗА. Последние достижения в повышении технического совершенства УРЗА – селективности и устойчивости функционирования связаны с внедрением микропроцессорной (МП) техники, позволяющей программно реализовать сложные алгоритмы работы защит без значительного увеличения их стоимости. Подобное сочетание объема выполняемых функций и цены МП терминала РЗА предопределяет тенденцию в развитии УРЗА.

Надежность функционирования УРЗА линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 110 кВ и выше с двусторонним питанием в соответствии нормативных документов ОАО «ФСК ЕЭС» обеспечивается установкой двух комплектов защит: основной и резервной. В качестве основной защиты воздушных линий электропередачи (ВЛ) в отечественной практике релейной защиты традиционно используется дифференциально-фазная высокочастотная защита (ДФЗ). Значительный вклад в разработку принципов работы и усовершенствование алгоритмов работы ДФЗ внесли советские и российские ученые: Е.Д. Сапир, Э.И. Басс, Я.С. Гельфанд, Н.И. Овчаренко, Г.И. Атабеков, А.И. Левиуш, Н.А. Дони. Попытки создания ДФЗ были предприняты за рубежом, в частности, в 1944 – 1945 гг. устройства ДФЗ выпускались американскими фирмами Вестингауз и Дженерал Электрик. Кроме этого, в это же время велись разработки образцов ДФЗ в Швеции и Франции. Однако зарубежные исполнения ДФЗ имели существенные недостатки по сравнению с отечественным, проявлявшиеся прежде всего при сложных видах повреждений на ВЛ, что привело к практически полному отказу от применения подобных защит за рубежом.

Г.И. Атабековым были выявлены недостатки работы ДФЗ, связанные возможностью отказов срабатывания защиты по принципу ее действия при однофазном коротком замыкании (КЗ) с обрывом фазы. Исследования работы ДФЗ при сложных видах повреждений были продолжены в работах А.Б. Чернина. В частности, им была показана возможность отказа защиты при определенных параметрах сети. В работах А.И. Левиуша и Н.А. Дони указано на смещение и увеличение зоны блокировки ДФЗ, связанные с использованием высокочастотного канала связи для передачи информации.

С учетом сказанного выше задачи совершенствования алгоритмов функционирования ДФЗ актуальны и связаны прежде всего с обеспечением селективности защиты при сочетании неполнофазного режима и внутреннего КЗ; обеспечением динамической устойчивости функционирования защиты в переходных режимах; повышением быстродействия защиты; исключением влияния элементов высокочастотного тракта и высокочастотных помех на работу защиты; обеспечением возможности совместной работы различных исполнений ДФЗ на концах защищаемой линии. Проведенный анализ известных исполнений ДФЗ привел также к выводу о целесообразности реорганизации функционально-логической схемы ДФЗ и совершенствования существующих алгоритмов работы основных функциональных узлов ДФЗ.

Устойчивость работы ЭЭС при нарушениях нормального режима работы, связанных с КЗ, во многом зависит не только от эффективности функционирования основной защиты, но и автоматики ЛЭП. Актуальность такого взаимодействия возрастает на сильно загруженных магистральных ЛЭП, на которых отключение при КЗ вызывает скачкообразные нарушения баланса мощностей, что может привести к развитию аварии. Применение эффективных устройств автоматического повторного включения (АПВ) ЛЭП совместно с быстродействующей основной защитой позволяет избежать развития аварии. На ЛЭП с двусторонним питанием, как правило, необходимо применение АПВ с контролем синхронизма. В настоящее время в отечественной практике получили применение МП УРЗА, в составе которых имеется функция АПВ с ожиданием синхронизма (АПВОС), обеспечивающая возможность включения линии при частоте скольжения до 0,4 Гц. Функция АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС) встречается в некоторых МП терминалах зарубежных производителей и возможность ее применения ограничена частотой скольжения в пределах 0,2 - 1 Гц. В отечественной практике имеются решения, заключающиеся в использовании для целей АПВУС синхронизатора с постоянным временем опережения. Однако известные синхронизаторы подобного типа обеспечивают возможность включения выключателя при частоте скольжения до 1 Гц и максимальном угле опережения до 120 град, что приемлемо для целей синхронизации генераторов, но недостаточно для целей АПВУС ЛЭП. Поэтому совершенствование алгоритма функционирования АПВ с контролем синхронизма для ЛЭП с двусторонним питанием также является актуальной задачей.

Цели работы:

1. Совершенствование алгоритмов функционирования и разработка МП дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий 110-220 кВ.
2. Совершенствование алгоритма функционирования АПВ с контролем синхронизма линий 110-220 кВ с двусторонним питанием.

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

1. Сравнительный анализ известных исполнений ДФЗ.
2. Разработка функционально-логической схемы и общего алгоритма функционирования микропроцессорной ДФЗ.
3. Совершенствование алгоритмов функционирования основных функциональных органов ДФЗ для повышения быстродействия и устойчивости функционирования защиты.
4. Разработка и исследование методов обеспечения устойчивого срабатывания ДФЗ при наложении неполнофазного режима и внутреннего однофазного КЗ.
5. Исследование и разработка алгоритма функционирования АПВ с контролем синхронизма для линий 110-220 кВ с двусторонним питанием.
6. Разработка, исследование и внедрение микропроцессорных исполнений ДФЗ и АПВ с контролем синхронизма для линий 110-220 кВ.

Основные методы научных исследований. Для решения поставленных задач использовались: теория электрических цепей, теория электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, современные методы математического моделирования электрических цепей, аналитические и численные методы с использованием ЭВМ, экспериментальные исследования на МП устройствах УРЗА.

Научная новизна и значимость полученных результатов, по мнению автора, заключается в следующем:

1. Разработан принцип действия и функционально-логическая структура блока, обеспечивающего селективность и устойчивость функционирования ДФЗ при обрыве фазы с КЗ на землю.

2. Разработан алгоритм функционирования органа манипуляции ДФЗ, обеспечивающий повышение динамической устойчивости функционирования защиты.

3. Предложен метод отстройки органа сравнения фаз ДФЗ от помех в высокочастотном канале связи, основанный на выделении за период импульсов заданной длительности и обеспечивающий повышение быстродействия защиты.

4. Разработан алгоритм коррекции фазной характеристики ДФЗ, обеспечивающий компенсацию погрешностей, вносимых элементами высокочастотного тракта.

5. Разработан новый алгоритм улавливания синхронизма для АПВ линий с двусторонним питанием, учитывающий угловую погрешность, вносимую периодом измерения угла между синхронизируемыми напряжениями.

Достоверность результатов и обоснованность основных научных положений, полученных в диссертационной работе, подтверждается исследованиями и экспериментами, выполненными как на физических и математических моделях, так и в условиях действующих электроэнергетических объектов.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки), объединяющей исследования по связям и закономерностям при планировании развития, проектировании и эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей и систем электроснабжения, в диссертационном исследовании разработаны функционально-логическая схема и алгоритмы функционирования, обеспечивающие повышение технического совершенства быстродействующей дифференциально-фазной защиты линий электропередачи, и усовершенствованный алгоритм функции автоматического повторного включения ЛЭП с контролем синхронизма, обладающий более широкой областью применения по сравнению с известными алгоритмами.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки): по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества, а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки) соответствуют разработанные автором с использованием современных средств моделирования модели электроэнергетических систем для исследования работы алгоритмов функционирования дифференциально-фазной высокочастотной защиты в установившихся и переходных аварийных режимах; математическая модель для исследования функции АПВ с улавливанием синхронизма, а также результаты исследований, выполненных с применением разработанных моделей;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработанные автором алгоритм функционирования органа манипуляции, способ отстройки органа сравнения фаз от помех в высокочастотном канале связи, метод коррекции фазной характеристики дифференциально-фазной защиты, дополнительный блок общей функционально-логической схемы, обеспечивающий селективность защиты при внутренних однофазных КЗ с обрывом поврежденной фазы на защищаемой линии, усовершенствованный алгоритм АПВ с улавливанием синхронизма.

Практическая ценность представляют следующие основные результаты работы:

1. Результаты опытно-конструкторской работы и сертификации в ОАО «ФСК ЕЭС» терминала ДФЗ «Сириус-3-ДФЗ-01», переданного для промышленного внедрения.

2. Результаты опытно-конструкторской работы и сертификации в ОАО «ФСК ЕЭС» терминала резервных защит и автоматики управления выключателем линий 110-220 кВ «Сириус-3-ЛВ-03», переданного для промышленного внедрения.

3. Результаты исследования на математической модели электрической сети 110-220 кВ выполненной в системе MATLAB, статических и динамических режимов функционирования ДФЗ и АПВУС.

4. Обоснование состава пусковых органов различных типов и схемы их логического взаимодействия в дифференциально-фазных защитах, обеспечивающих наибольшую чувствительность при внутреннем КЗ на линиях 110-220 кВ различной конфигурации.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований и разработок использованы автором при создании устройств микропроцессорных защит «Сириус-3-ДФЗ-01» и «Сириус-3-ЛВ-03». Данные терминалы выпускаются серийно на предприятии ЗАО «РАДИУС Автоматика» с 2008 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Принцип действия и функционально-логическая структура блока, обеспечивающего селективность и устойчивость функционирования ДФЗ при однофазном КЗ с обрывом фазы.

2. Способ компенсации частотной зависимости фазы тока посредством изменения числа выборок при цифровой фильтрации мгновенных значений первой гармоники косинусным фильтром.

3. Алгоритм коррекции фазы тока, основанный на способе «зеркального» отображения сигнала.

4. Способ отстройки ДФЗ от влияния высокочастотных помех в канале связи, основанный на выделении базовых периодов во входном сигнале органа сравнения фаз.

5. Метод коррекции фазной характеристики ДФЗ, исключаяющий угловую погрешность, обусловленную влиянием элементов высокочастотного тракта.

6. Алгоритм АПВУС для линий с двухсторонним питанием, учитывающий угловую погрешность, вносимую периодом измерения угла между синхронизируемыми напряжениями.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке алгоритма обработки мгновенных значений тока манипуляции с использованием косинусного фильтра, способа коррекции фазы тока, алгоритма отстройки ДФЗ от высокочастотных помех в канале связи, алгоритма коррекции фазной характеристики ДФЗ, функционально-логического блока, обеспечивающего селективную работу защиты при внутреннем однофазном КЗ с обрывом фазы, исследовании работы ДФЗ при сочетании неполнофазного режима и внутреннего КЗ на землю, разработке усовершенствованного алгоритма АПВУС.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались:

– на «XVIII Научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2008», Москва, ВВЦ, 2008 г.;

– на «XIX Научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2009», Москва ВВЦ, 2009 г.;

– на научно-технической конференции в рамках выставки «Электрические сети России - 2009»;

– на «XVI научно-технической конференции «Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала», Екатеринбург, 2010 г.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 13 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 41 наименования и 4 приложений. Основной текст включает 160 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается общая характеристика работы.

В первой главе произведен анализ существующих защит абсолютной селективности, применяемые для защиты линий электропередачи с двусторонним питанием, дана оценка достоинств и недостатков каждой из них. Проанализирована функционально-логическая структура и алгоритмы работы основных функциональных узлов различных исполнений ДФЗ; рассмотрены тенденции в развитии ДФЗ в МП терминалах; приведена общая функционально-логическая схема ДФЗ. Проанализирована структура современного УРЗА, реализующего функции резервной защиты и автоматике управления выключателя линии; рассмотрена структура функции АПВ в составе МП терминала; указаны пути модернизации функции АПВ.

В работе проанализированы существующие виды продольных защит линий абсолютной селективности, к числу которых относятся следующие: продольная дифференциальная защита линии (ДЗЛ), ДФЗ, направленная высокочастотная защита (НВЧЗ). Среди указанных защит наибольшей надежностью и техническим совершенством обладают ДЗЛ и ДФЗ, использующие принцип сравнения токов и фаз токов по концам защищаемой линии.

В отечественной практике релейной защиты более широкое применение получила ДФЗ ввиду невысокой стоимости, простоты выполнения и возможно-

сти работы с использованием только информации о токе. Однако при принятом принципе действия защиты и способе передачи информации о фазе тока на противоположный конец защищаемой линии возможны излишние срабатывания защиты при внешних КЗ или отказы срабатывания при сочетании неполнофазного режима и внутреннего КЗ. Решение задачи повышения селективности ДФЗ и устойчивости функционирования ДФЗ в настоящей работе предлагается обеспечить путем усовершенствования алгоритмов функционирования основных функциональных органов и функционально-логической схемы ДФЗ.

МП исполнение ДФЗ обеспечивает повышение надежности, селективности и устойчивости функционирования по сравнению с аналогами на электромеханической базе за счет совершенствования функционально-логической схемы и алгоритмов основных функциональных узлов.

На рисунке 1 представлена общая функционально-логическая схема ДФЗ.

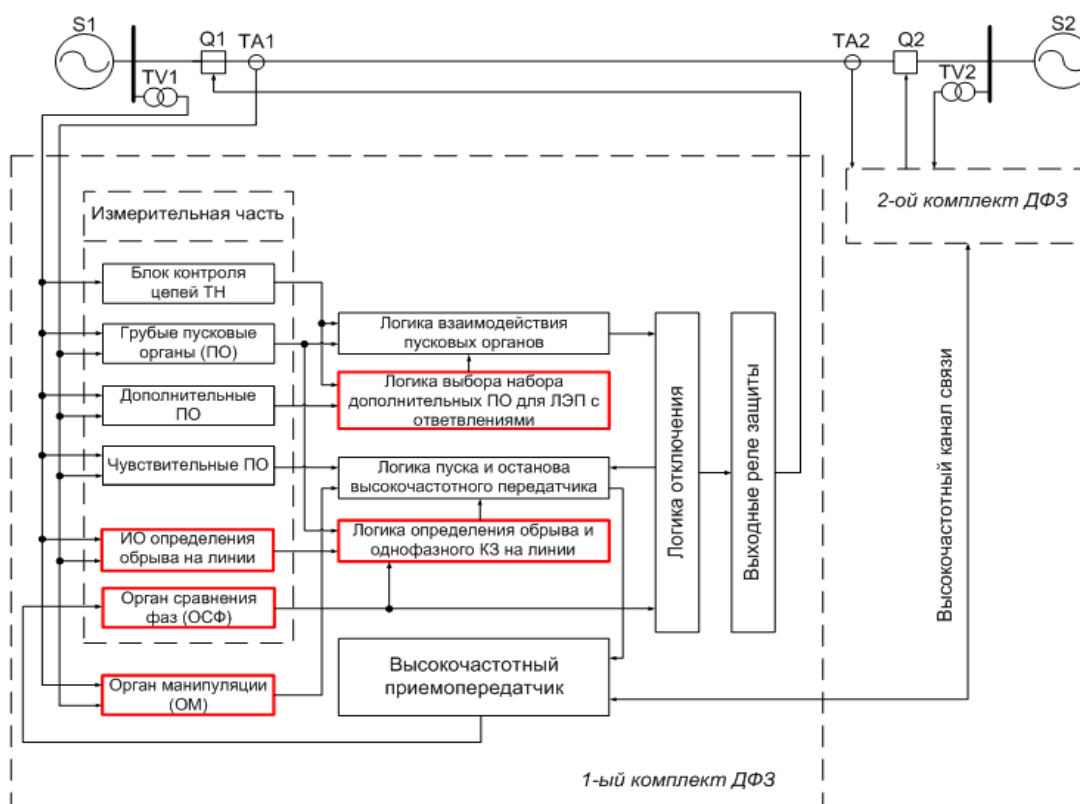


Рисунок 1 – Упрощенная функциональная схема ДФЗ

На общей схеме выделены функциональные узлы и органы, задачи совершенствования алгоритмов функционирования которых решались в данной работе. К ним относятся, в частности: измерительный орган определения обрыва на линии, орган сравнения фаз (ОСФ), орган манипуляции (ОМ), логика выбора набора дополнительных пусковых органов (ПО) для ЛЭП с ответвлениями, логика определения обрыва и однофазного КЗ на ЛЭП.

Использование усовершенствованной функции АПВУС вместе с ДФЗ в качестве основной защиты на ЛЭП обеспечивает повышение статической и динамической устойчивости ЭЭС. Однако имеющиеся исполнения АПВУС позволяют сформировать сигнал на включение выключателя при частоте скольжения не более 1 Гц и максимальном угле опережения до 120 град, что может затянуть процесс синхронизации и снизить устойчивость работы ЭЭС в целом. Для

реализации АПВУС в МП терминале предлагается применить алгоритм, основанный на принципе работы синхронизатора с постоянным временем опережения, но обеспечивающий повышение точности и уменьшение времени синхронизации по сравнению с известными исполнениями.

Во второй главе подробно рассмотрены алгоритмы работы ДФЗ отечественных и иностранных производителей. Разработаны алгоритмы функционирования ОМ и ОСФ, обеспечивающие повышение устойчивости работы защиты в различных режимах работы ЭЭС с учетом помех в высокочастотном канале, оказывающих влияние на обмен сигналами между полуккомплектами защиты. Предложено дополнение к функционально-логической схеме защиты, обеспечивающее повышение надежности и устойчивости работы защиты на линиях с ответвлениями при внутренних КЗ.

При разработке ДФЗ на МП базе отечественными и позднее иностранными фирмами-производителями УРЗА была предпринята попытка учесть недостатки, связанные с работой ДФЗ на линиях разной конфигурации, работой на разные типы нагрузки, с исключением ложных срабатываний защиты при реверсе мощности. В разделе 2.1 подробно проанализированы технические решения, реализованные при разработке ДФЗ различными производителями УРЗА. Анализ исполнений ДФЗ проведен по каждому функциональному блоку. По результатам проведенного анализа определены пути для совершенствования алгоритмов основных функциональных органов.

В разделе 2.2 рассмотрен алгоритм функционирования ОМ. При разработке ОМ в МП ДФЗ были поставлены и решены следующие задачи:

- компенсация частотной зависимости фазы тока при использовании для цифровой фильтрации мгновенных значений первой гармоники косинусного фильтра;
- измерение частоты по сигналу тока;
- коррекция фазы тока манипуляции в положительную и отрицательную стороны.

Выполнение поставленных задач предполагает определенную последовательность в алгоритме работы ОМ, блок-схема которого показана на рисунке 2.

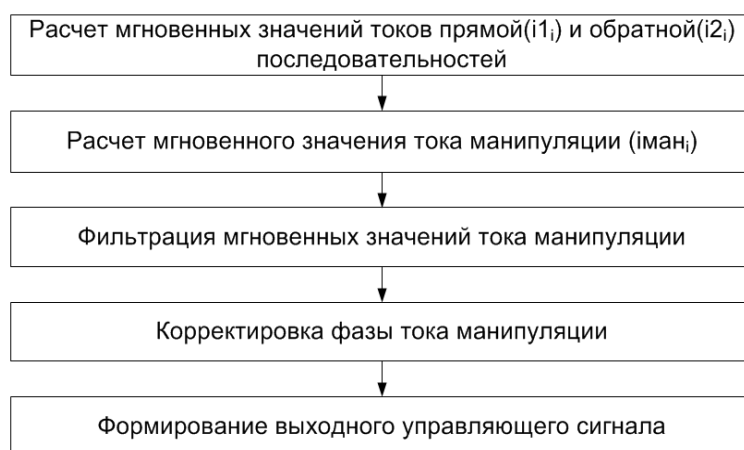


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритм органа манипуляции МП ДФЗ

Расчет мгновенных значений токов прямой и обратной последовательности и тока манипуляции производится по выражениям (1) – (3):

$$i1_i = \frac{i_{A_i} + i_{B_{i-2 \cdot N2}} + i_{C_{i-N2}}}{3}; \quad (1)$$

$$i2_i = \frac{i_{A_i} + i_{B_{i-N2}} + i_{C_{i-2 \cdot N2}}}{3}; \quad (2)$$

$$i_{\text{МАН}_i} = i1_i + k \cdot i2_i, \quad (3)$$

где i_{A_i} , i_{B_i} , i_{C_i} – мгновенные значения токов фаз А, В и С соответственно; N – число отсчетов на период текущей частоты; $N2$ – расчетное значение, равное $N/3$; k – коэффициент манипуляции.

В целях исключения влияния аperiodической составляющей и насыщения трансформатора тока, в работе предложен косинусный фильтр для цифровой фильтрации мгновенных значений первой гармоники тока манипуляции. Общее выражение для косинусного фильтра записывается следующим образом:

$$i_{\text{ВЫХ}_i} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{h=0}^{N-1} i_{\text{ВХ}_{i-N+h}} \cdot \text{CFC}_h, \quad (4)$$

где $i_{\text{ВХ}_i}$ – мгновенные значения тока входного тока; CFC_h – коэффициенты косинусного фильтра, которые находятся по выражению:

$$\text{CFC}_h = \cos\left(2 \cdot \frac{\pi \cdot h}{N}\right). \quad (5)$$

На рисунках 3, 4 иллюстрируется работа фильтра в переходном режиме, характеризуемом наличием аperiodической составляющей и насыщением ТТ.

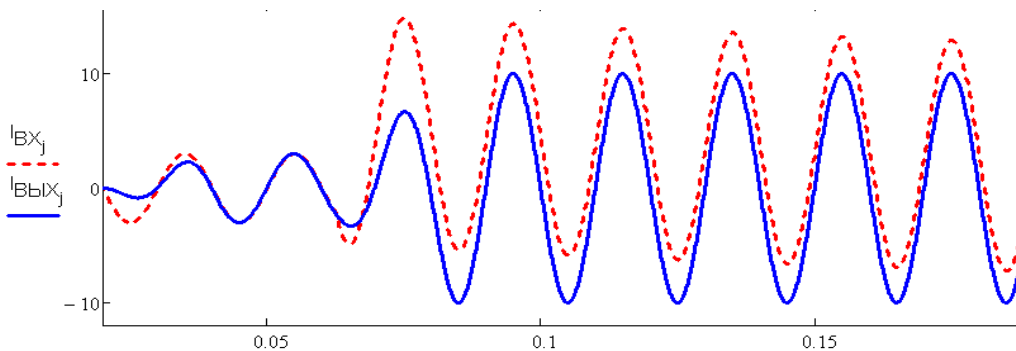


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы косинусного фильтра при наличии аperiodической составляющей

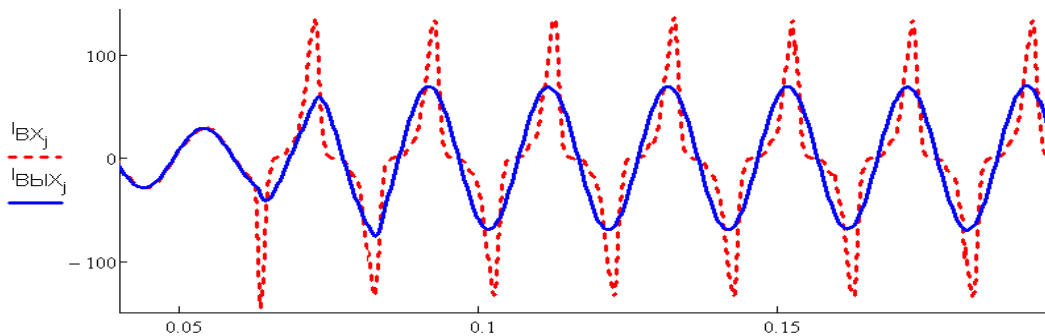


Рисунок 4 Временная диаграмма работы косинусного фильтра при насыщении ТТ

На рисунке 5 представлена фазо-частотная характеристика цифрового косинусного фильтра, отражающая разность фаз между входным и выходным сигналом при отклонении от 50 Гц с постоянным числом выборок на период текущей частоты N .

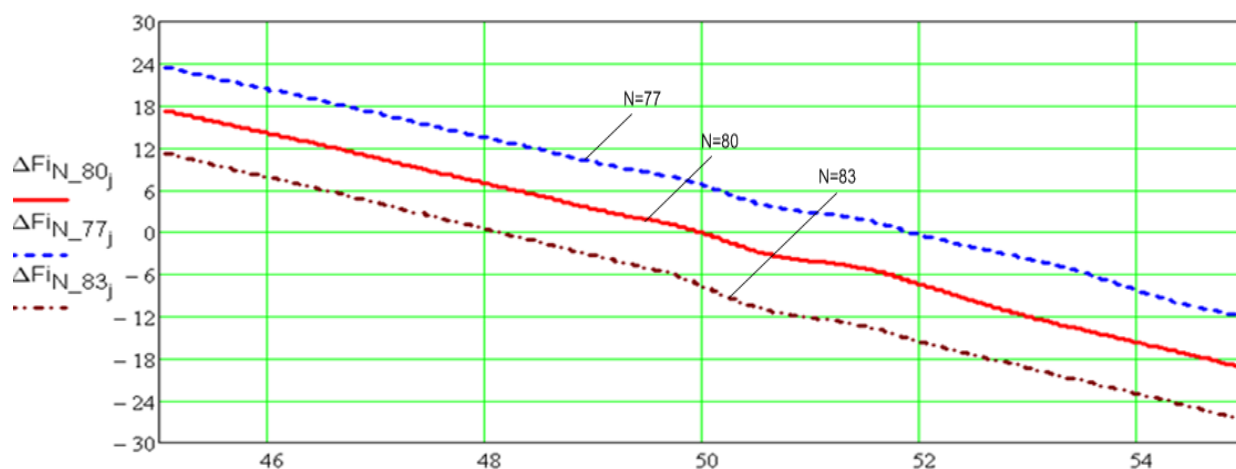


Рисунок 5 – Фазо-частотная характеристика косинусного фильтра для различных значений N

Из полученных характеристик видно, что изменение числа выборок на период текущей частоты обеспечивает компенсацию частотной зависимости косинусного фильтра. Для расчета N было принято следующее выражение:

$$N = \frac{f_{\text{ДИСКР}}}{f_{\text{ТЕК}}}, \quad (6)$$

где $f_{\text{ДИСКР}}$ – частота дискретизации АЦП.

В разработанном алгоритме органа манипуляции предполагается использование двух вариантов расчета текущей частоты входного сигнала: по напряжению, измеренному на шинах (линии), или по току линии.

Первый из указанных методов применяется всегда, кроме случаев возникновения неисправностей в цепях ТН. Второй метод предусматривает оценку частоты входного сигнала по мгновенным значениям тока, пропущенным через косинусный фильтр, и включает в себя следующие этапы расчета:

1) цифровая фильтрация мгновенных значений первой гармоники тока прямой последовательности косинусным фильтром с фиксированным числом выборок на период, соответствующим частоте 50 Гц;

2) расчет частоты тока по длительности интервала между одноименными переходами через ноль;

3) исключение тех расчетных значений частоты, которые резко отличаются от предыдущих, сделанных в течение предыдущего периода.

Проверка на моделируемых сигналах тока с изменяющейся частотой подтвердила возможность измерения частоты по данному методу с требуемой точностью даже в условиях влияния переходных процессов и насыщения магнитопровода ТТ (например, рисунок 6).

Результаты моделирования показали, что при уменьшении и увеличении частоты входного сигнала погрешность измерения не превышает 0,7%, что соответствует фазовой погрешности не более 2 град.

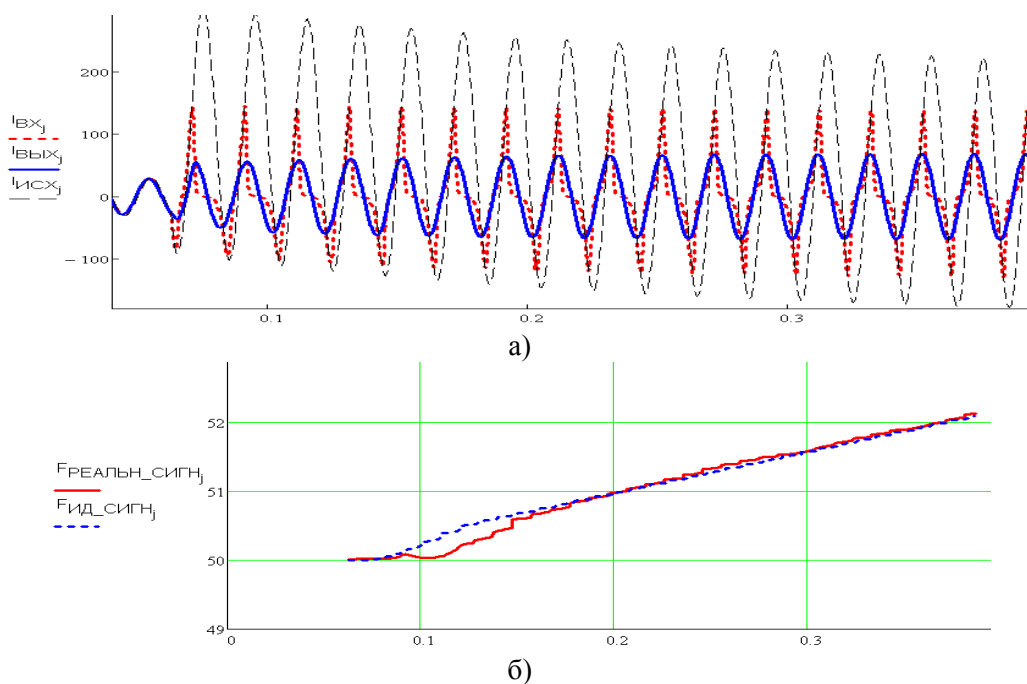


Рисунок 6 Временные диаграммы: а) сигнал тока при изменении частоты от 50 до 52,2 Гц; б) измеренные значения основной частоты тока на заданном временном интервале

Корректировка фазы тока манипуляции как в положительную, так и в отрицательную сторону в диапазоне от -90^0 до $+90^0$ необходима при применении по концам защищаемой линии разных исполнений ДФЗ. Реализация смещения сигнала тока в отрицательную сторону обеспечивается замещением текущего отсчета на отсчет, рассчитанный Δt время назад. Коррекция фазы тока манипуляции на положительную величину представляет большие трудности и требует разработки специального алгоритма смещения.

К алгоритму смещения синусоидального сигнала в сторону опережения автором были определены требования, выполнение которых исключает излишних срабатываний ДФЗ при внешних КЗ и обеспечивает устойчивость срабатываний при внутренних КЗ. В качестве способов коррекции фазы тока манипуляции были рассмотрены следующие:

- замещение искомой точки аналогичной, полученной период назад;
- способ линейной экстраполяции к известным мгновенным значениям тока;
- использование «зеркального» отображения сигнала относительно максимумов и минимумов синусоиды.

Большую устойчивость функционирования в переходных режима обеспечивает алгоритм смещения синусоидального сигнала в сторону опережения, основанный на «зеркальном» отображении сигнала относительно линий, проведенных перпендикулярно к оси времени через максимумы синусоиды. На рисунке 7 приведена поясняющая схема работы алгоритма смещения сигнала.

Алгоритм опробован на математической модели электроэнергетической сети, в которой моделируется внешнее КЗ. Результаты исследования показали, что применение указанного алгоритма не вызывает излишних срабатываний ДФЗ при внешних КЗ.

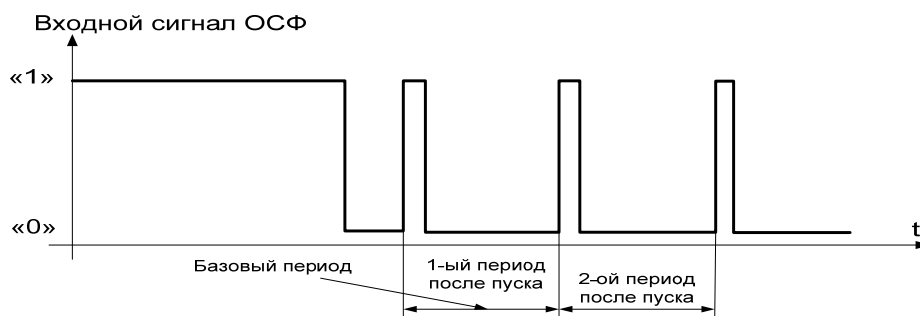


Рисунок 9 Принцип разделения входного сигнала ОСФ на базовые периоды

По измеренной длительности импульса во входном сигнале ОСФ и известной частоте входного сигнала угол блокировки рассчитывается по выражению:

$$\varphi_{БЛ.ИЗМЕР} = t_{ИЗМЕР} \cdot 360 \cdot f_{ТЕК}, \quad (7)$$

где $t_{ИЗМЕР}$ -длительность единичного импульса в базовый период; $f_{ТЕК}$ - измеренная частота сигнала входного тока или напряжения.

Если в течение одного базового периода будут иметь место несколько импульсов длительностью более 2 мс, параметр $t_{ИЗМЕР}$ в (7) определяется по выражению:

$$t_{ИЗМЕР} = t_{ИМП_1} + t_{ИМП_2} + \dots \quad (8)$$

Для исключения действия защиты при реверсе мощности в алгоритме ОСФ использован принцип весовых коэффициентов для формирования сигнала отключения. Так при каждом сравнении расчетного угла блокировки с заданной уставкой определяется весовой коэффициент и суммируется с предыдущими. В случае, если указанная сумма равна или превышает значение 1,5, формируется сигнал срабатывания ОСФ. Весовые коэффициенты определяются по выражению:

$$\begin{cases} K = -2, \text{ если } \varphi_{БЛ.ИЗМЕР} \leq \varphi_{БЛ.УСТ}; \\ K = 1,5, \text{ если } \varphi_{БЛ.ИЗМЕР} > \varphi_{БЛ.УСТ}. \end{cases} \quad (9)$$

На основании имеющихся данных для отстройки от режима реверса мощности интегральная сумма должна иметь запас в два периода.

Оценка эффективности работы разработанного алгоритма ОСФ была проведена на основе данных, полученных при моделировании перехода внешнего КЗ во внутреннее на защищаемой линии (рисунок 10). Во входной сигнал ОСФ были искусственно введены помехи, расположение которых соответствует моментам возникновения помех, рассмотренных ранее.

В работе предложена усовершенствованная функционально-логическая схема блока дополнительных ПО для работы ДФЗ на линиях с ответвлениями. Автором предложен способ построения логики дополнительных ПО, при котором надежность работы защиты не снижается при выявлении неисправностей в цепях ТН и обеспечивается максимальная чувствительность при наличии информации о напряжении. Указанный способ заключается в переходе от схемы № 2, использующей реле сопротивления и орган направления мощности нулевой последовательности, к схеме № 1, включающей только токовые ПО, при выявлении неисправностей в цепях напряжения (рисунок 11).

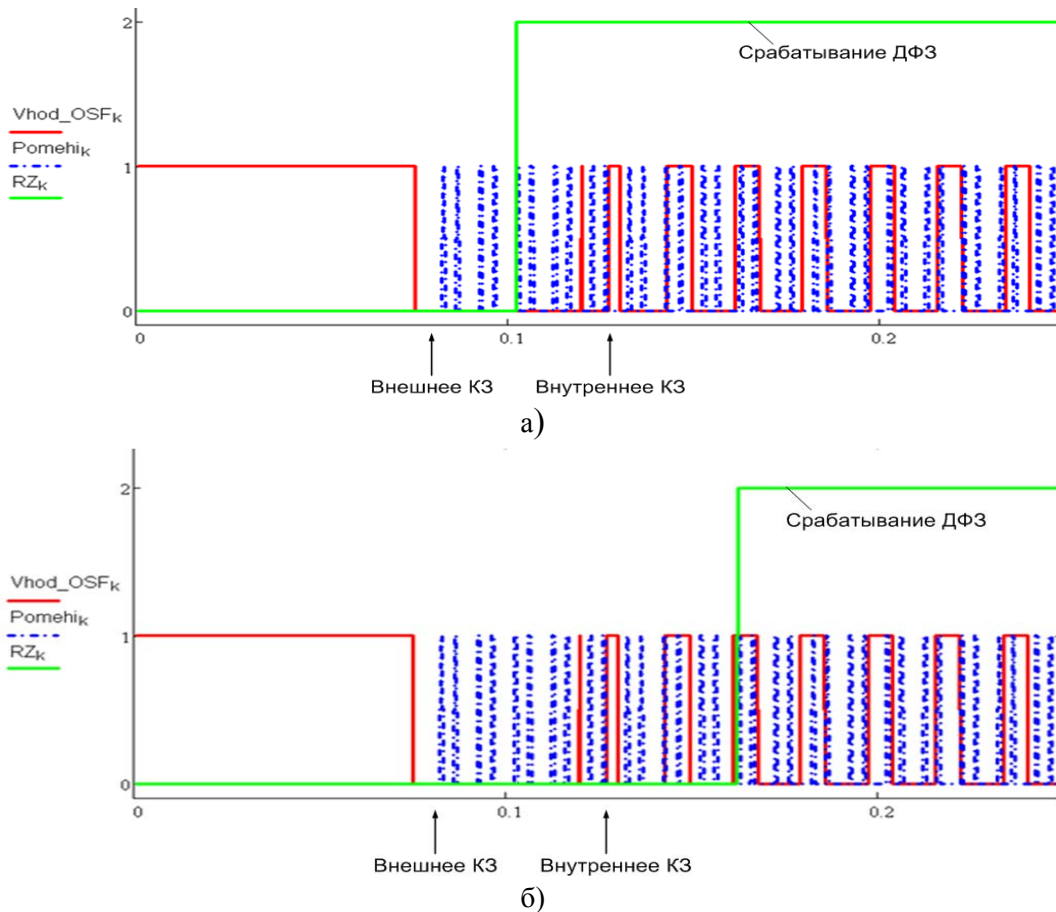


Рисунок 10 Временные диаграммы работы ДФЗ: а) без отстройки от ВЧ помех в канале связи; б) с отстройкой от ВЧ помех

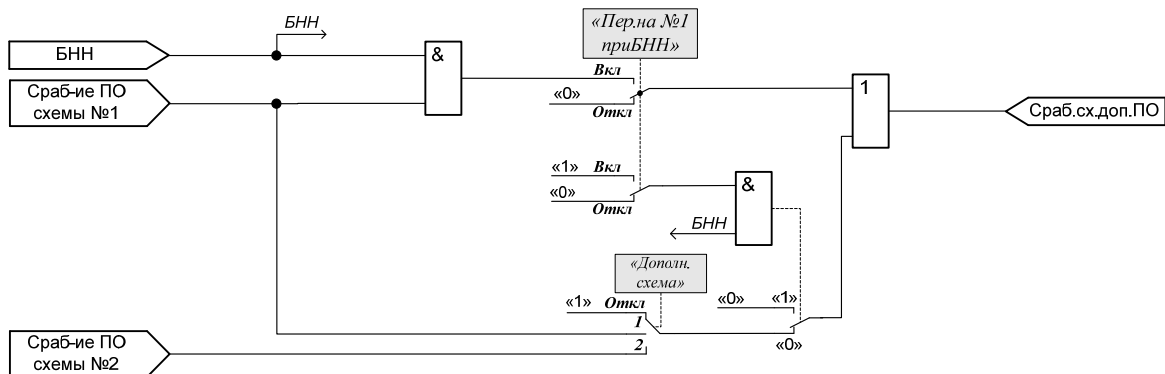


Рисунок 11 Усовершенствованная функционально-логическая схема ДФЗ при использовании на линиях с ответвлениями

В третьей главе приведены результаты исследования работы ДФЗ при неполнофазных режимах сети. Рассмотрены методы и алгоритмы, работы ОМ и ОСФ, обеспечивающие чувствительность и быстродействие защиты при сложной несимметрии в сети. В частности, предложен метод восстановления фазной характеристики ДФЗ, существенно уменьшающий время срабатывания защиты при сочетании КЗ и неполнофазного режима работы сети. Предложены также дополнения к общей функционально-логической схеме работы устройства ДФЗ, позволяющие обеспечить селективность защиты при внутреннем однофазном КЗ с обрывом фазы.

В работе проведены исследования работы ДФЗ при сочетании разных видов КЗ и обрыва фазы А, одновременных обрывов фаз В и С. В качестве методов исследования использовались аналитическое решение задачи для упрощенной схемы замещения сети с использованием метода симметричных составляющих и математическое моделирование в системе «MATLAB». При моделировании были учтены угловые погрешности, обусловленные ВЧ приемопередатчиком типа ПВЗУ-Е и каналом связи на линии протяженностью 100 км.

По результатам исследований были получены следующие результаты:

– количество повреждений со временем срабатывания ОСФ менее 20 мс от общего рассмотренного числа составляет 91 % (без учета погрешности ВЧ канала связи);

– количество повреждений, при которых ДФЗ не срабатывает – 9%;

– при учете угловой погрешности, обусловленной влиянием ВЧ канала связи, количество повреждений, при которых ДФЗ не срабатывает, увеличивается на 30%.

На основании полученных данных установлено, что влияние ВЧ канала связи и расстояние до места КЗ на конечное значение угла блокировки наиболее отчетливо прослеживается в режим обрыва двух фаз, например, В и С, и КЗ на землю на опережающей фазе В.. Для рассмотренного вида сложного повреждения характерно увеличение числа отказов срабатывания ДФЗ – на 28,8% от общего числа рассматриваемых случаев с учетом угловой погрешности, создаваемой ВЧ каналом связи.

В работе предложен способ по исключению угловой погрешности, связанной с работой ВЧ канала связи и ВЧ оборудования (рисунок 12).

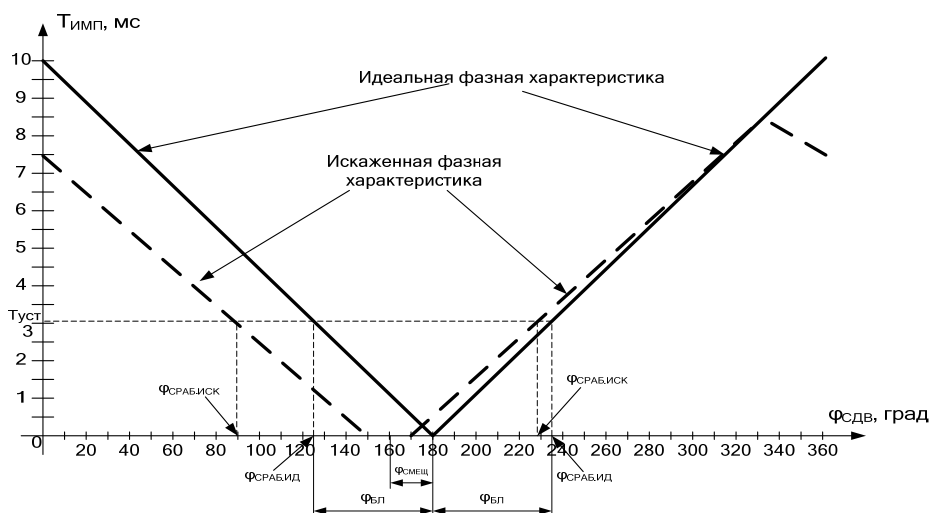


Рисунок 12 – Влияние угловой погрешности, обусловленной ВЧ каналом связи, на фазную характеристику ДФЗ

Искаженная фазная характеристика является смещенной нормальной характеристикой. Причем смещение по оси абсцисс происходит на угол, обусловленный конечной скоростью распространения электромагнитной волны, и определяется по выражению:

$$\varphi_{\text{смест}} = \frac{6 \cdot l_{\text{ЛЭП}}}{100}, \quad (10)$$

где $l_{\text{ЛЭП}}$ -длина защищаемой линии, км.

Смещение и изменение угла наклона правой и левой частей фазной характеристики связано с удлинением принимаемого ВЧ пакета приемником. Для современных ВЧ приемопередатчиков, позволяющих работать с полупроводниковыми защитами, удлинение заднего фронта при приеме ВЧ сигнала от «своего» передатчика составляет ~1500 мкс.

Действительные углы между токами манипуляции по концам защищаемой линии, соответствующие срабатыванию ОСФ, отличаются от заданного порога. Следует заметить, что для разных ветвей искаженной фазной характеристики углы срабатывания ОСФ получаются различными и зависят от взаимного расположения токов манипуляции.

В работе предложен метод коррекции фазной характеристики ДФЗ, цель работы которого состоит в коррекции измеренного угла блокировки.

Рассматриваемый алгоритм коррекции фазной характеристики предполагает два этапа:

1) измерение требуемых параметров, необходимых для проведения коррекции фазной характеристики;

2) компенсация расчетного угла блокировки на основании измеренных параметров и соотношений между входными и выходными сигналами.

Измерение параметров компенсации проводится в автоматическом режиме между двумя полуккомплектами защиты. К числу требуемых параметров относятся следующие:

- время задержки ВЧ сигнала по каналу связи, $T_{\text{зад.сигн}}$;

- время удлинения заднего фронта ВЧ сигнала, принятого приемником от «своего» передатчика, $T_{\text{удл.сигн.п/к1}}$;

- время удлинения заднего фронта ВЧ сигнала, принятого приемником от передатчика противоположного конца линии, $T_{\text{удл.сигн.п/к2}}$.

Расчет конечного значения угла блокировки происходит на основе соотношения между входным сигналом ОСФ и выходным ОМ. Если соотношение между ВЧ сигналами от разных полуккомплектов, установленных по концам защищаемой линии, соответствует рисунку 14, а), расчетный угол блокировки находится на правой ветви фазной характеристики по следующему выражению:

$$\varphi_{\text{БЛ.УТОЧН}} = \varphi_{\text{БЛ.РАСЧ}} - \varphi_{\text{ЗАД.СИГН}} + \varphi_{\text{УДЛ.СИГН.П/К1}} \quad (11)$$

где $\varphi_{\text{БЛ.РАСЧ}}$ – расчетный угол блокировки, значение которого пропорционально длительности единичного импульса во входном сигнале ОСФ; $\varphi_{\text{ЗАД.СИГН}}$ – величина угла, пропорциональная времени задержки ВЧ сигнала по каналу связи; $\varphi_{\text{УДЛ.СИГН.П/К1}}$ – значение угла, прямо пропорциональное времени удлинения заднего фронта ВЧ сигнала, принятого приемником от «своего» ВЧ передатчика.

На рисунке 13, б показаны соотношения, при которых расчетный угол блокировки находится на левой ветви фазной характеристики и, следовательно, коррекция расчетного угла блокировки осуществляется по выражению:

$$\varphi_{\text{БЛ.УТОЧН}} = \varphi_{\text{БЛ.РАСЧ}} + \varphi_{\text{ЗАД.СИГН}} + \varphi_{\text{УДЛ.СИГН.П/К2}} \quad (12)$$

где $\varphi_{\text{УДЛ.СИГН.П/К2}}$ – значение угла, прямо пропорциональное времени удлинения заднего фронта ВЧ сигнала, принятого приемником от передатчика противоположного конца линии.

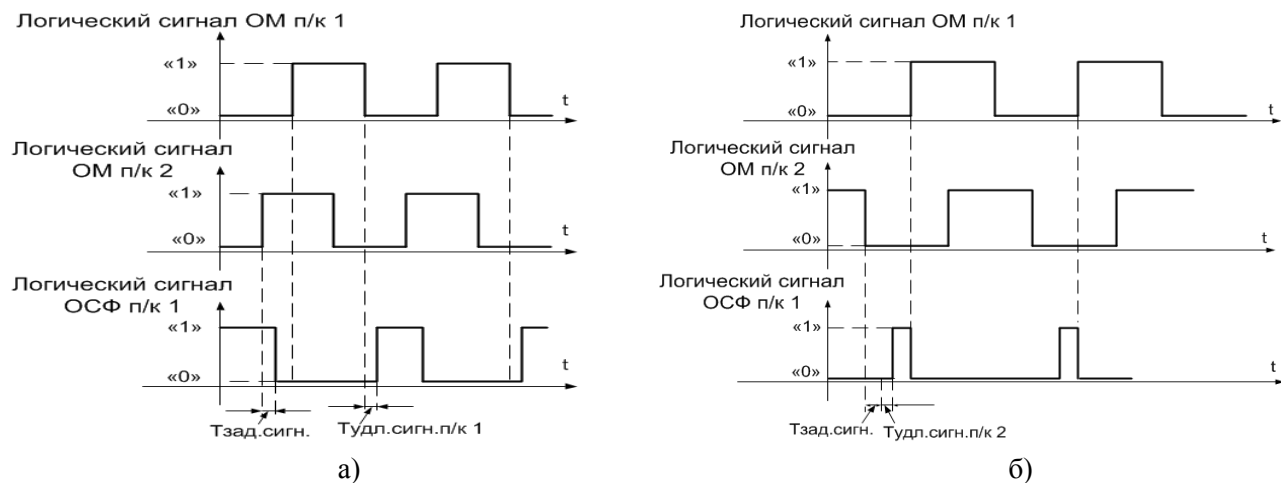


Рисунок 13 – Временные диаграммы, поясняющие работу алгоритма коррекции фазной характеристики в МП устройстве ДФЗ: а) расчетный угол блокировки лежит на правой ветви фазной характеристики; б) расчетный угол блокировки лежит на левой ветви фазной характеристики

В работе рассмотрена одна из наиболее актуальных задач, возникающих при разработке ДФЗ, которая заключается в обеспечении селективной работы защиты при однофазном КЗ с одновременным обрывом поврежденной фазы. Для решения поставленной задачи предложено формировать воздействие на останов ВЧ передатчика со стороны обрыва. Для выявления обрыва автором предложено использование дополнительного измерительного органа, уставка которого выбирается по выражению:

$$I_{уст} \geq K_{отс} \cdot I_{уд.емк} \cdot l_k, \quad (13)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,05; $I_{уд.емк}$ – удельный емкостный ток на 1 км защищаемой линии; l_k – длина защищаемой линии.

ИО, квалифицирующий обрыв фазного провода, срабатывает, если величина фазного тока меньше значения уставки, рассчитанной по выражению (13). Кроме этого, в качестве критерия, определяющего обрыв фазного провода, предложено использовать ИО, реагирующий на изменение фазы тока, образованного разностью фазных токов неповрежденных фаз. Указанный ИО является измерительным органом минимального действия и срабатывает при отсутствии изменения фазы тока. С использованием метода симметричных составляющих в работе показано отсутствие изменение фазы тока, образованного разностью токов неповрежденных фаз, при однофазном КЗ с обрывом фазы.

На рисунке 14 приведены функционально-логические схемы дополнительных блоков ДФЗ, обеспечивающих селективное действие защиты при однофазном КЗ с обрывом фазы.

В четвертой главе рассмотрены вопросы автоматизации управления выключателем как функционально-логического блока МП УРЗА. Описаны современные подходы при разработке функции автоматического повторного включения. Приведен разработанный алгоритм АПВ с улавливанием синхронизма, основанный на принципе синхронизатора с постоянным временем опережения. Показаны результаты исследования работы функции АПВУС на математической модели и в МП УРЗА.

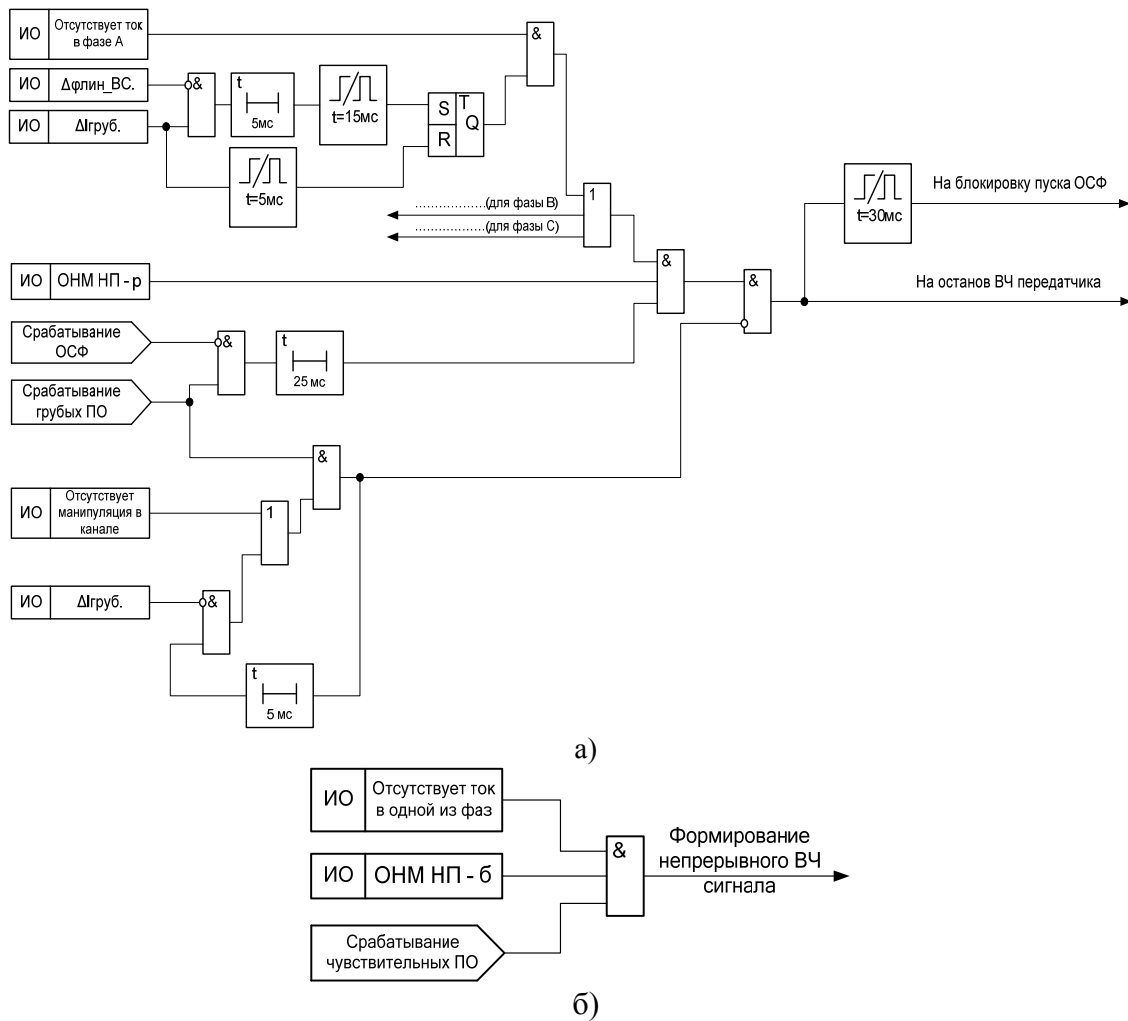


Рисунок 14 – Функционально-логические схемы дополнительных блоков ДФЗ:
 а) блок останова ВЧ передатчика; б) блок пуска ВЧ передатчика при выявлении обрыва на смежной линии

При разработке алгоритма АПВУС решались следующие задачи
 – разработка алгоритма расчета максимальной частоты скольжения;
 – определение условий, описывающих действие синхронизатора с постоянным временем опережения;
 – исследование работы функции АПВ УС на математической модели.

Решение указанных задач обеспечивается функционально-логической схемой, представленной на рисунке 15.

Формирование сигнала срабатывания АПВУС определяется следующими параметрами и неравенствами:

– частота скольжения между синхронизируемыми напряжениями меньше максимально допустимой:

$$f_{S.ТЕК} < f_{S.МАКС}; \quad (14)$$

– разность векторов напряжений не превышает допустимую величину:

$$\Delta U_{ТЕК} < \Delta U_{ДОП}; \quad (15)$$

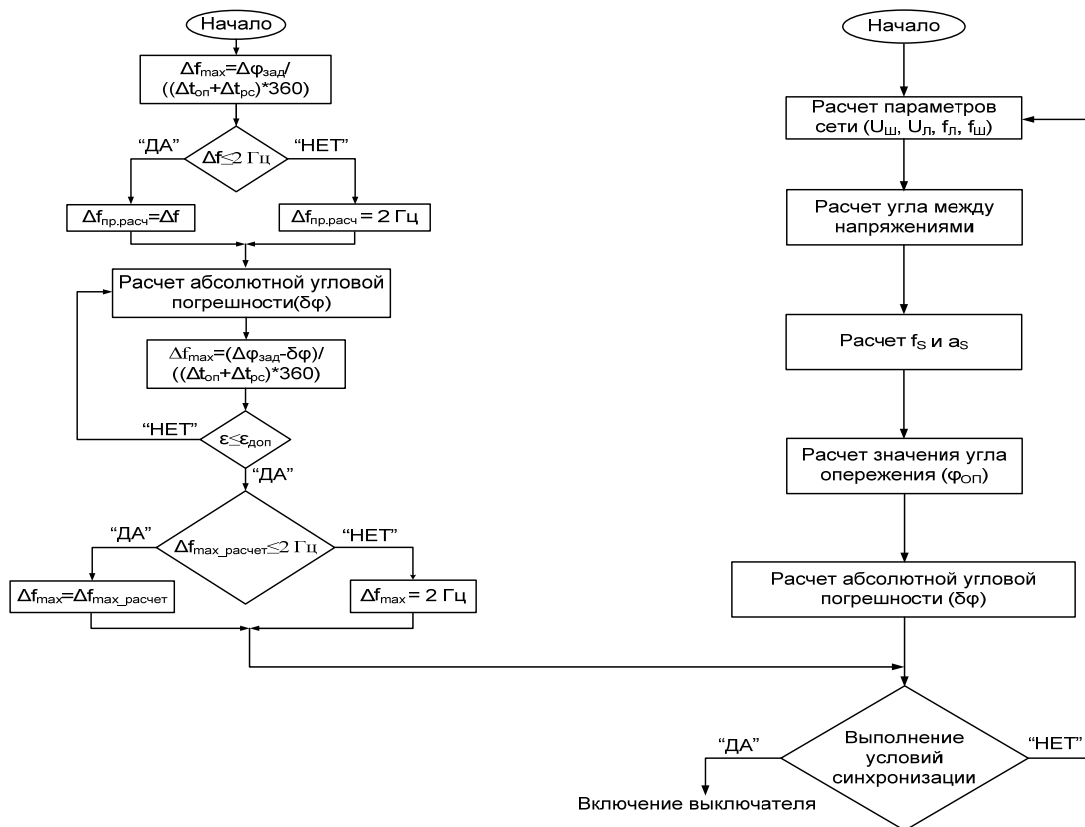


Рисунок 15 – Блок-схема разработанного алгоритма АПВУС

- угол между векторами синхронизируемых напряжений уменьшается:

$$\frac{d\varphi}{dt} < 0 \quad (16)$$

- измеренный угол между синхронизируемыми напряжениями удовлетворяет неравенству:

$$2\pi - \delta\varphi \leq \delta + \frac{d\delta}{dt} \cdot t_B + \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \frac{t_B^2}{2} \leq 2\pi + \delta\varphi. \quad (17)$$

В целях контроля конечного угла между векторами напряжений в момент включения выключателя в выражение (17) была введена абсолютная допустимая угловая погрешности при синхронизации $\delta\varphi$. Указанная погрешность является величиной изменения угла между синхронизируемыми напряжениями за период вычислений, принятый равным 10 мс. Рассматриваемая погрешность рассчитывается по выражению:

$$\delta\varphi = 180 \cdot \frac{\left| \frac{1}{f_H} - \frac{1}{f_H + f_S} \right|}{\frac{1}{f_H}}, \quad (18)$$

где f_H – номинальная частота равная 50 Гц; f_S – частота скольжения.

Разработанный алгоритм АПВУС был исследован на математической модели и с помощью проверочных устройств в составе МП УРЗА. Результаты исследований показали, что погрешность при включении выключателя не превышает ± 5 град., что является допустимым.

В пятой главе рассмотрена работа функционально-логической схемы и разработанных алгоритмов функционирования основных узлов ДФЗ на макетном образце МП терминала с использованием специально разработанных проверочных стендов; приведены результаты сертификации МП терминала ДФЗ «Сириус-3-ДФЗ-01» и МП терминала резервной защиты с АУВ «Сириус-3-ЛВ-03» в ОАО «ФСК ЕЭС».

Опытный образец МП терминала ДФЗ был испытан согласно программе и методике испытаний микропроцессорного устройства дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110-220 кВ «Сириус-3-ДФЗ-01». Цель испытаний заключалась в подтверждении соответствия устройства требованиям, изложенным в технических условиях на МП терминалы серии «Сириус-3».

Для комплексной проверки функционально-логической схемы и основных функциональных узлов ДФЗ был разработан проверочный стенд, структурная схема которого приведена на рисунке 16.

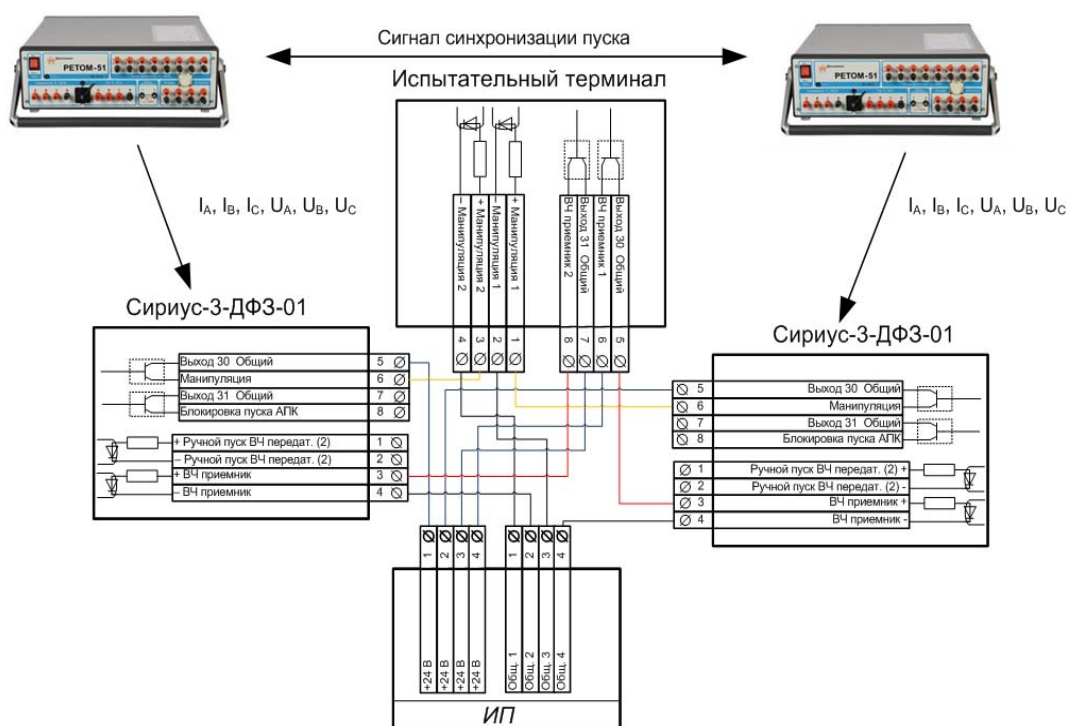


Рисунок 16 – Структурная схема стенда для проверки работы ДФЗ с использованием испытательного терминала

Испытательный терминал, моделирующий работу всех элементов высокочастотного тракта и выполняет следующие задачи:

- фиксация сигналов, формируемых органами манипуляции МП терминалов ДФЗ;
- моделирование работы ВЧ приемника путем формирования входных сигналов ОСФ для каждого МП терминала ДФЗ;
- моделирование влияния ВЧ помех в ВЧ канале связи на входной сигнал ОСФ;
- моделирование передачи сигнала по ВЧ каналу связи путем изменения длительности импульсов во входном сигнале ОСФ.

Работа опытного образца МП терминала была также проверена с использованием ВЧ передатчиков ПВЗУ-Е (рисунок 17).



Рисунок 17 – Структурная схема стенда для проверки работы ДФЗ с использованием ВЧ приемопередатчиков ПВЗУ-Е

В качестве примера приведены результаты проверки алгоритма коррекции фазной характеристики, которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1 Результаты проверки алгоритма коррекции фазной характеристики ДФЗ

Истинное значение угла блокировки, град.	Фаза тока проверяемого устройства, гр.	Значение угла блокировки МП ДФЗ при выведенной функции, град.	Погрешность, град.	Значение угла блокировки МП ДФЗ при введенной функции восстановления фазной хар-ки, град.	Погрешность, град.
180	0	162	18	180	0
140	40	116	24	141	1
100	80	76	24	101	1
60	120	36	24	63	3
10	170	2	8	2	8
0	180	2	2	2	2
10	190	4	6	13	3
50	230	45	5	51	1
90	270	87	3	92	2
130	310	126	4	130	0
170	350	162	8	169	1
180	360	162	18	180	0

Данные таблицы 1, полученные при работе разработанного алгоритма, показывают практически полное восстановление характеристики в рабочем диапазоне. Вне рабочего диапазона, где работа алгоритма блокируется из-за отсутствия входного сигнала ОСФ, значения расчетного угла блокировки приблизительно равны нулю.

В целях использования разработанных МП терминалов ДФЗ «Сириус-3-ДФЗ-01» и резервных защит с АУВ «Сириус-3-ЛВ-03» на объектах ОАО «ФСК ЕЭС» проведена сертификация МП терминалов.

Проверка работы функции ДФЗ проводилась на стенде, показанном на рисунке 17, где использовались данные расчета токов и напряжений в месте установки защиты, полученные на математической модели сети 110-220 кВ с эффективно заземленной нейтралью и записанные в формате COMTRADE. Работа защиты была проверена при следующих режимах функционирования ЭЭС: внешнее и внутреннее КЗ, качания, включение на холостой ход, реверс мощности.

По итогам проведенной проверки излишних срабатываний проверяемой защиты при внешних КЗ, ложных срабатываний в режимах качаний, включения линии на холостой ход и реверса мощности в линии и отказов срабатывания при внутренних КЗ не выявлено.

Основные результаты работы

1. На основе анализа известных исполнений разработана общая функционально-логическая схема ДФЗ. Выполнен анализ известных способов выполнения алгоритмов функционирования основных функциональных узлов ДФЗ: органа манипуляции и органа сравнения фаз.

2. Предложена логическая схема взаимодействия дополнительных пусковых органов для линии с ответвлениями, обеспечивающая повышение устойчивости и надежности функционирования ДФЗ при внутренних КЗ.

3. Разработан принцип действия и функционально-логическая структура блока, обеспечивающего селективность и устойчивость функционирования ДФЗ при обрыве фазы с КЗ на землю.

4. Разработан алгоритм функционирования органа манипуляции ДФЗ, обеспечивающий повышение динамической устойчивости функционирования защиты.

5. Предложен способ компенсации частотной зависимости фазы тока посредством изменения числа выборок при цифровой фильтрации мгновенных значений первой гармоники косинусным фильтром.

6. Разработан алгоритм коррекции фазы тока манипуляции, необходимый при применении на концах защищаемой линии разных исполнений ДФЗ, основанный на способе «зеркального» отображения сигнала.

7. Для повышения надежности функционирования ДФЗ при нарушениях в цепях напряжения предложено внести в структурную схему ДФЗ блок измерения частоты сигнала по току.

8. Разработан способ отстройки ДФЗ от влияния высокочастотных помех в канале связи, основанный на выделении базовых периодов во входном сигнале ОСФ.

9. Предложен метод коррекции фазной характеристики ДФЗ, исключающий угловую погрешность, обусловленную влиянием высокочастотного тракта.

10. Проведены исследования работы ДФЗ в различных режимах функционирования на комплексной математической модели «ЭЭС-ДФЗ», разработанной в системе MATLAB. Результаты моделирования подтвердили эффективность функционирования различных функционально-логических схем и алгоритмов функционирования основных узлов.

11. Разработан новый алгоритм АПВУС для линий с двусторонним питанием, учитывающий угловую погрешность, вносимую периодом измерения угла между синхронизируемыми напряжениями.

12. Результаты исследования и разработки реализованы в микропроцессорном терминале ДФЗ типа «Сириус-3-ДФЗ-01» и терминале резервных защит и автоматики управления выключателем «Сириус-3-ЛВ-03».

13. Разработанные микропроцессорные терминалы прошли сертификацию в ОАО «ФСК ЕЭС».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Алгоритм органа манипуляции дифференциально-фазной высокочастотной защиты на микропроцессорной базе для линий напряжением 110-220 кВ/ В.А. Шуин, С.Е. Бобров. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 6. – Иваново, 2005. – С. 90-94.

2. Разработка и исследование алгоритма восстановления фазной характеристики дифференциально-фазной защиты/ С.Е. Бобров. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 5. – Иваново, 2006. – С. 305-309.
3. Исследование алгоритма улавливания синхронизма в микропроцессорном устройстве «Сириус-3-ЛВ-03» для линий 110-220 кВ/ С.Е. Бобров. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 4. – Иваново, 2008. – С. 57-61.
4. Разработка и исследование алгоритма работы органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110-220 кВ/ С.Е. Бобров. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – Иваново 2009. – С. 97-101.
5. Оценка работы дифференциально-фазной защиты при сочетании короткого замыкания и доаварийного неполнофазного режима работы сети/ С.Е. Бобров. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – Иваново 2010. – С. 41-47.

Публикации в других изданиях

6. Сравнительный анализ исполнений дифференциально-фазной высокочастотной защиты для линий 110-220 кВ/ С.Е. Бобров., В.А. Шуин. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студ. и асп./ ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2008. – Т.3. – С. 37-43.
7. Тенденции развития отечественных микропроцессорных защит типа ДФЗ линий напряжением до 220 кВ/ С.Е. Бобров., В.А. Шуин., Е.А. Аржанников – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студ. и асп./ ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2008. – Т.3. – С. 51-53.
8. Новые устройства РЗА класса напряжения 110-220 кВ производства ЗАО «Радиус-Автоматика»/ Антонов Д.Б., Бобров С.Е. Релейная защита и автоматика энергосистем: Сб. докл. XVIII науч.-техн. конф. – Москва, 2008. – С. 145-147.
9. Исследование алгоритмов работы дифференциально-фазной защиты линий электропередачи на математической модели участка электрической сети в среде MATLAB/ С.Е. Бобров, В.А. Шуин. – Труды ИГЭУ. Вып. 9. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 473-480.
10. О принципах выполнения дифференциально-фазной высокочастотной защиты на микропроцессорной элементной базе для линий напряжением 110-220 кВ/ С.Е. Бобров. – Труды ИГЭУ. Вып. 9. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 481-483.
11. Совершенствование работы дифференциально-фазной защиты при однофазном коротком замыкании с обрывом фазы/ С.Е. Бобров. – Труды ИГЭУ. Вып. 9. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 484-490.
12. Разработка дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110-220 кВ на примере устройства микропроцессорной защиты «Сириус-3-ДФЗ»/ С.Е. Бобров. – Релейная защита и автоматика энергосистем: Сб. докл. XIX науч.-техн. конф. – Москва, 2009. – С. 49-50.
13. Цифровая реализация защит с абсолютной селективностью линий 110-220 кВ/ Д.Б. Антонов, С.Е. Бобров. – Тез. докл. – XVI науч.-техн. конф. «Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала». – Екатеринбург, 2010.