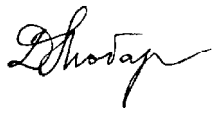
*На правах рукописи*



ЛЮБАРСКИЙ ДМИТРИЙ РОМАНОВИЧ

# ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 05. 14. 02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново 2006

Работа выполнена в «Проектно-изыскательском и научно-исследовательском институте по проектированию энергетических систем и электрических сетей» ОАО «Институт «Энергосетьпроект»

| | |
|---|---|
| Научный консультант | доктор технических наук,<br>профессор<br>Мисрихан Шапиевич Мисриханов |
| Официальные оппоненты: | доктор технических наук,<br>профессор<br>Александр Ильич Левиуш |
| | доктор технических наук,<br>профессор<br>Евгений Александрович Аржанников |
| | доктор технических наук,<br>профессор<br>Николай Ильич Овчаренко |
| Ведущая организация: | Открытое акционерное общество<br>«Энергетический институт<br>им. Г.М. Кржижановского» |

Защита состоится « 02 » марта 2007г. в 11 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) 38-57-59 , факс: (4932)38-57-01
E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 200 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.064.01
доктор технических наук, профессор  А.В. Мошкарин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Обеспечение надежности и устойчивости работы отдельных и объединенных энергосистем, а также ЕЭС России в целом в определяющей мере связано с функционированием релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА), предназначенными осуществлять быструю и селективную автоматическую ликвидацию повреждений и аварийных режимов в электрической части энергосистем.

Одним из основных показателей технического совершенства устройств релейной защиты и, в частности, дистанционных защит (ДЗ) и их измерительных дистанционных органов (ДО) является устойчивость их функционирования, которая характеризует способность сохранять основные характеристики - величину уставки защищаемой зоны и время срабатывания при воздействии ряда факторов, приводящих к искажению этих характеристик. Для рассматриваемых ДЗ к такого рода факторам, например, относятся интенсивные медленнозатухающие электромагнитные переходные процессы (ЭМПП), имеющие место при различных динамических возмущениях в электрических системах и, в первую очередь, при коротких замыканиях (КЗ). Функционирование не только ДЗ, но и ряда других важных задач: различных видов автоматического повторного включения (АПВ), определения места повреждения (ОМП) связаны с необходимостью выбора повреждения и поврежденных фаз (ВППФ). Вместе с тем известные алгоритмы определения вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ) имеют ограниченную область применения, связанную с недостаточной чувствительностью и, в том числе, при удаленных коротких замыканиях через переходное сопротивление на сильно загруженных линиях электропередачи.

Произошедший за последние годы скачок в техническом совершенствовании средств РЗ, выразившийся в появлении микропроцессорных (МП) устройств РЗ, определяет необходимость ориентации на широкое внедрение в практику проектирования и эксплуатации современных МП устройств. Использование такой техники позволит перейти к качественно новому поколению устройств, которые в отличие от электромеханических и статических (полупроводниковых и микроэлектронных) устройств имеют возможности реализации более сложных и совершенных алгоритмов, обладают расширенной самодиагностикой и практически неограниченными возможностями интеграции с АСУ ТП энергообъектов.

В связи с недостаточной готовностью отечественных производителей начавшийся процесс внедрения микропроцессорных устройств РЗ зарубежных, в основном, европейских) фирм (ABB, SIEMENS, AREVA и др.) связан с необходимостью зачастую принимать дорогостоящие и не всегда эффективные решения. Это связано с тем, что такие устройства ориентированы на реализацию существенно иных, нежели свойственных нашей стране, принципов релейной защиты энергосистем. Кроме того, уровень сопроводительной технической документации этих устройств (включая качество технических переводов) затрудняет возможности детализированного освоения их возможностей и особенностей.

Осуществление функций ПА до настоящего времени связано, в основном, с использованием электронной и часто электромеханической аппаратуры, характеризующейся ограниченными функциональными возможностями и недостаточными показателями надежности. Недостатки существующей системы ПА и современные возможности в области телекоммуникаций и программно-технических

средств определяют необходимость дальнейшего развития методов и аппаратного оснащения ПА, которое также, как и для систем РЗ, должно быть направлено на полный переход на микропроцессорную технику и связанное с этим кардинальное изменение принципов взаимодействия и номенклатуры программно-технических средств ПА.

Для такой большой энергосистемы, как ЕЭС России, целесообразна многоуровневая иерархическая структура с максимальной передачей задач ПА на наиболее низкий (локальный) уровень управления, повышающий надежность и упрощающий систему управления. Локальный уровень ПА наиболее «массового» системного элемента - воздушной линии электропередачи (ВЛ) связан с выполнением задач: фиксации отключения линии (ФОЛ), фиксации перегрузки (ФП), автоматического ограничения повышения напряжения (АОПН), автоматической ликвидации асинхронного режима (АЛАР). В последние годы разработчики устройств ПА, не только отечественные, но и зарубежные, практически не имеющие опыта использования систем ПА, пошли по пути прямого копирования алгоритмов традиционных (электромеханических и электронных) устройств. Вместе с тем традиционные алгоритмы устройств ПА нижнего уровня в определяющей мере были связаны с ограниченными возможностями технических средств для их реализации.

В рамках иерархической системы ПА одной из важных является задача автоматической дозировки управляющих воздействий (АДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности выдачи или приема мощности. Эти функции реализуются за счет формирования и выдачи устройством АДВ команд противоаварийного управления при аварийных возмущениях в энергосистеме. Поэтому важной задачей, с учетом существующего недостаточного уровня телекоммуникаций и каналов связи, является обеспечение повышенной надежности и точности дозировки управляющих воздействий, которые определяют эффективность работы системы противоаварийного управления в целом.

**Связь работы с государственными и отраслевыми научно - техническими программами, темами.**

Исследования по данной проблеме проводились автором в рамках комплексных программ ГКНТ ОЦ.026.01.08 «Создать и ввести в действие в ЦДУ систему автоматического управления и регулирования по частоте и активной мощности нормальных режимов работы объединенных энергетических систем»; 0.01.06.Ц.05.02.Н3 «Разработать технические предложения по повышению надежности и устойчивости работы ЕЭЭС»; отраслевых программ Министерства энергетики СССР, Министерства промышленности и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России», ОАО «ФСК ЕЭС».

**Цель работы.** Исследование, разработка и внедрение новых методов и средств систем релейной защиты и противоаварийной автоматики локального уровня, а также совершенствование математического, алгоритмического и программного обеспечения этих систем, расширяющего их функциональные возможности для обеспечение надежности и устойчивости работы электроэнергетических систем.

Для достижения поставленной цели решен следующий комплекс задач:

1. Исследование функционирования ДЗ при ЭМПП на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, имеющих место при различных динамических возмущениях в электрических системах и, в первую очередь, при КЗ.

2. Исследование свойств частотно-избирательных колебательных звеньев 2-го порядка для формирования ортогональных составляющих входных напряжений и токов в измерительных органах ДЗ с целью повышения устойчивости функционирования этих защит при ЭМПП.

3. Анализ характеристик ПО дистанционных защит и разработка алгоритмов ПО, обладающих необходимой чувствительностью, быстродействием и отстройкой от режимов качаний.

4. Анализ известных алгоритмов определения вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ) и разработка новых алгоритмов и средств ВППФ для расширения области применения, и в том числе, при удаленных коротких замыканиях через переходное сопротивление на сильно загруженных линиях электропередачи.

5. Оценка влияния различных факторов на погрешность определения места повреждения с целью возможного упрощения алгоритмов одностороннего определения места повреждения (ООМП), к которым, в частности, относятся: токи промежуточных (ответвительных) подстанций; взаимоиндукция электромагнитно-связанных линий; неоднородность воздушной линии электропередачи; неточность задания сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов (в основном, на промежуточных подстанциях); реактивная (емкостная) проводимость ВЛ и т.п.

6. Исследование алгоритмов наиболее распространенных программно-технических средств ООМП и обобщение многолетнего (с 1994г.) опыта их эксплуатации.

7. Разработка методов и средств решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности выдачи или приема мощности.

8. Разработка алгоритмов функционирования и структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) на примере задач устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ).

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются методы и программно-технические средства дистанционных защит и устройств противоаварийной автоматики локального уровня. Предметом исследования является повышение технического совершенства устройств РЗ и ПА с целью обеспечения устойчивости и надежности функционирования энергосистем.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях, теория электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах, методы математического и физического моделирования, теория вероятности, экспериментальные исследования на физических и цифровых моделях и в условиях реальных энергообъектов.

**Достоверность и обоснованность результатов работы.** Достоверность предложенных в работе решений подтверждается многочисленными испытаниями на электродинамических и цифровых моделях энергосистем, а также опытом эксплуатации на многих энергообъектах страны.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** заключается в совершенствовании методов и средств реализации элементов и структур РЗ и ПА локального уровня и состоит в следующем:

1. Исследовано функционирование дистанционных защит (ДЗ) при ЭМПП на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, имеющих место при различных динамических возмущениях в электрических системах и, в первую очередь, при КЗ, показавшее необходимость разработки методов синтеза их измерительных органов с целью повышения устойчивости функционирования ДЗ при ЭМПП.

2. Исследованы свойства частотно-избирательных колебательных звеньев 2-го порядка и показано, что на их основе могут быть сформированы взаимноортогональные составляющие входных напряжений и токов, которые целесообразно использовать, в том числе, для цифровых измерительных органов ДЗ с целью повышения устойчивости функционирования этих защит при ЭМПП.

3. На основе анализа известных алгоритмов определения вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ) показано, что существенное улучшение их технических характеристик может быть достигнуто при использовании: аварийных составляющих токов в качестве основного критерия, характеризующее повреждение фазы, а также современных программно-технических средств, позволяющих осуществлять синхронные измерения на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи и обеспечивающих эффективное решение задачи определения ВППФ.

4. Разработаны методы и средства решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании резервированного локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности выдачи или приема мощности.

5. Исследован, разработан и реализован на базе программно-технических средств алгоритм автоматической ликвидации синхронного режима (АЛАР).

6. Исследован, усовершенствован и реализован на базе программно-технических средств алгоритм автоматического ограничения повышения напряжения (АОПН) с учетом ресурса изоляции защищаемого оборудования.

7. На основе анализа известных критериев оценки тяжести коротких замыканий (КЗ), не всегда достоверно характеризующих тяжесть КЗ, предложен и разработан алгоритм фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ), в котором в качестве представительного критерия оценки тяжести КЗ для выбора управляющих воздействий ПА по условиям динамической устойчивости предложено использовать величину сброса активной мощности прямой последовательности.

**Практическая ценность работы.**

1. Результаты исследований и предложенный метод синтеза измерительных органов дистанционных защит и их частотно-избирательных звеньев позволили реализовать в промышленном исполнении ДЗ линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, устойчиво функционирующие в условиях интенсивных ЭМПП.

2. Выявлены пути для повышения эффективности средств ООМП, связанные с: повышением количества, качества и надежности каналов связи (с использованием ВОЛС, беспроводных, в том числе спутниковых линий связи); уточнением параметров ВЛ; организацией необходимого взаимодействия локальных средств ООМП с системой регистрации и осциллографирования на энергообъекте (в рамках интеграции с АСУ ТП энергообъекта).

3. Разработанные методы и средства решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании резервированного локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ) позволяют обеспечить надежность выдачи или приема мощности.

4. Предложенные алгоритмы функционирования и структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) используются при реализации устройств противоаварийной автоматики локального уровня, например, устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ).

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных исследований и разработок:

1. Рекомендованы рабочей группой НТК при ГКНТ СССР к промышленному внедрению в части быстродействующих ступеней с комбинированными характеристиками срабатывания панелей дистанционной защиты от междуфазных замыканий линий напряжением 500-750 кВ типа ПДЭ-2001, в настоящее время серийно выпускаемой промышленностью.

2. Внедрены в ОАО «Институт «Энергосетьпроект» при выполнении:

- разработки технических требований к дистанционным защитам линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения;

- проектов ПА с использованием программно-технических средств локального уровня (микропроцессорное устройство повышенной надежности ЛАДВ; микропроцессорное устройство автоматики ограничения повышения напряжения типа АОПН-М; микропроцессорное устройство ликвидации асинхронных режимов типа АЛАР-М);

- разработки и проектирования системы измерения комплекса управления перетоками активной мощности (СИ КУРМ) на электропередаче Россия – Финляндия (Выборгский преобразовательный комплекс МЭС Северо-Запада).

3. В МЭС Северо-Запада (Выборгский преобразовательный комплекс) при внедрении в эксплуатацию ПТК СИ КУРМ.

4. Во многих энергосистемах страны (Кубаньэнерго, Колэнерго, Архэнерго и др.) при внедрении в эксплуатацию микропроцессорных индикаторов расстояния типа МИР (МИР-1, МИР-3, МИР-Р).

5. В учебном процессе кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем ПЭИпк (г. Санкт-Петербург) по учебной дисциплине «Определение места повреждения на линиях электропередачи».

6. В учебном процессе МЭИ (ТУ) по учебной дисциплине «Автоматика электроэнергетических систем».

7. В ОАО «Вологдаэнерго» для реализации электроэнергетических задач АСУ ТП (ПС «Усть-Алексеево») в составе программно-технического комплекса (ПТК) «Космотроника-Э».

8. В НПП «Энергоизмеритель» (г. Москва) при серийном выпуске устройств типа МИР, ЛАДВ, АЛАР-М, АОПН-М.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований функционирования дистанционных защит ДЗ при ЭМПП на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, имеющих место при различных динамических возмущениях в электрических системах и, в первую очередь, при КЗ**.**

2. Результаты исследований свойств частотно-избирательных колебательных звеньев 2-го порядка, которые целесообразно использовать, в том числе, для цифровых измерительных органов ДЗ для формирования взаимноортогональных составляющих входных напряжений и токов, и предложенный метод синтеза измерительных органов ДЗ и их частотно-избирательных звеньев с целью повышения устойчивости их функционирования при ЭМПП.

3. Методы и средства решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании резервированного локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности выдачи или приема мощности.

4. Структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) используются при реализации устройств противоаварийной автоматики локального уровня, например, устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ).

5. Результаты исследований и реализация на базе программно-технических средств алгоритма автоматическое ограничение повышения напряжения (АОПН) с учетом ресурса изоляции защищаемого оборудования.

6. Результаты исследований критериев оценки тяжести коротких замыканий (КЗ) и предложенный алгоритм задачи фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ), в котором в качестве представительного критерия оценки тяжести КЗ для выбора управляющих воздействий ПА по условиям динамической устойчивости предложено использовать величину сброса активной мощности прямой последовательности.

**Личный вклад соискателя.** Приведенные в диссертации результаты являются составной частью научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, выполненных в лаборатории релейной защиты и автоматики энергосистем (НИЛ РЗА) ОАО «Институт «Энергосетьпроект» под руководством и при участии автора, а также ряда инициативных работ. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит постановка задач, разработка теоретических и методических положений, физических и математических моделей и методов, обобщение результатов и рекомендации по применению предложенных решений.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на международных, всесоюзных и всероссийских семинарах и конференциях, в том числе: на республиканской научно-технической конференции РТУ (Рига, 1986г.); на всесоюзной научно-технической конференции Союзтехэнерго «Опыт разработки, внедрения и эксплуатации устройств защиты и автоматики на микроэлектронной основе с использованием микропроцессорной техники» (Москва, 1989г.); на всероссийской научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 96» (Москва, 1996г.); на всероссийской XIV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2000» (Москва, ВВЦ, 2000г.); на научно-практической конференции, посвященной 70-летию Отделения релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования (ОРЗАУМ) Института «Энергосетьпроект» (Москва, 2001г.); на всероссийской XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2002» (Москва, ВВЦ, 2002г.); на Ш Международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими» (Новочеркасск, ЮРГТУ, 2003г.); на международной научно-технической конференции «POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING» (Рига, Рижский технический университет, 2003г.); на международной научно-технической конференции «Проблемы сучасноі электротехнікі» (Киев, Национальная академия наук Украины, 2004г.); на 41$^{st}$ CIGRE Session, SC B5 «Protection and Automation», 2006.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 63 печатные работы, в том числе 22 авторских свидетельства и патента на изобретения. После получения ученой степени кандидата технических наук опубликовано 48 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка и 4 приложений. Общий объем работы составляет 305 страниц, в том числе основного текста 274 страницы, включая 50 рисунков и 17 страниц библиографического списка (166 наименований), а также содержит приложения общим объемом 26 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

***Во введении*** отмечена актуальность темы диссертации с точки зрения обеспечения надежности и устойчивости работы отдельных и объединенных энергосистем, а также ЕЭС России в целом за счет исследования, разработки и внедрения новых методов и средств систем релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Сформулированы задачи исследования, связанные с: исследованием функционирования ДЗ при ЭМПП на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения; исследованием свойств частотно-избирательных колебательных взаимноортогональных звеньев 2-го порядка; исследованием и разработкой методов и средств пуска ДЗ при КЗ и их блокирования при качаниях; исследованием и разработкой методов и средств эффективного решения задачи выбора вида повреждения и поврежденных фаз на базе использования аварийных составляющих токов, а также синхронных измерений на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи; получением расчетных выражений для количественной оценки влияния различных факторов на погрешность определения места повреждения с целью возможного упрощения алгоритма ООМП; исследованием алгоритмов наиболее распространенных устройств ООМП и обобщением опыта эксплуатации программно-технических средств ООМП; разработкой методов и средств решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ); обоснованием и предложением ряда алгоритмических и программно-технических решений для обеспечения высокого уровня надежности выполнения задачи АДВ; анализом и предложением новых алгоритмов функционирования и структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств АПНУ на примере задач устройств ПА ВЛ.

Отмечены научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, а также структура представленной работы.

**В первой главе** рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости функционирования дистанционных защит (ДЗ) при электромагнитных переходных процессах: проанализированы известные методы анализа измерительных органов дистанционных защит (ДЗ); приведен метод синтеза, учитывающий особенности измерительных органов дистанционных защит, являющихся органами отношения напряжения и тока в месте установки защиты на линии электропередачи; предложены измерительные органы дистанционных защит с комбинированными характеристиками срабатывания; даны примеры анализа динамических характеристик измерительных органов ДЗ при физическом моделировании ЭМПП на протяжённых линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения.

Повышение устойчивости функционирования ДЗ при ЭМПП может быть достигнуто увеличением отношения полезный сигнал – помеха для электрических величин (напряжений и токов), «участвующих» в осуществлении алгоритмов из-

мерительных органов ДЗ. Это может быть достигнуто за счет использования в цепях последних частотно-избирательных звеньев, определяющих в большой мере собственные динамические свойства измерительных органов ДЗ, влияние которых на функционирование ДЗ должно непременно учитываться. Большой вклад в решение указанных проблем внесли советские и российские ученые В.Л. Фабрикант, Ю.Я. Лямец, Н.И. Овчаренко, В.А. Сушко, В.Ф. Коротков, В.В. Будкин, Э.М. Шнеерсон, В.М. Шевцов и др. Известные методы анализа поведения ДЗ в условиях ЭМПП либо осложняют выявление общих закономерностей, необходимое на этапе синтеза, либо предполагают предъявление завышенных требований к измерительным органам ДЗ с точки зрения выявления их быстрой и селективной работы при ЭМПП. В настоящей работе предложен метод синтеза быстродействующих измерительных органов ДЗ и их частотно-избирательных элементов, учитывающий особенности функционирования ДЗ. Специфика их измерительных органов, являющихся органами отношения напряжения и тока в месте установки защиты, определяет необходимость анализа не столько абсолютных погрешностей, сколько погрешностей отношения величин на выходах частотных фильтров в цепях напряжения и тока в переходном режиме. Это обстоятельство положено в основу предложенного автором метода синтеза частотно-избирательных звеньев в цепях измерительных органов ДЗ, т. е. к выбору их постоянной времени *T* или коэффициента затухания *b=1/T*. При этом в качестве базовых приняты частотные фильтры 2-го порядка – полосовой фильтра (ПФ2) и фильтр низких частот (ФНЧ2) с частотой собственных колебаний, близкой к промышленной, и передаточными функциями, определяемыми следующими выражениями соответственно:

$$H_{П}(p)=\frac{H_0 b_1 p}{1+b_1 p+b_2 p^2}, \quad (1) \qquad H_{Н}(p)=\frac{H_0}{1+b_1 p+b_2 p^2} \ . \quad (2)$$

Для рассматриваемых взаимноортогональных высокодобротных фильтров ФНЧ2 и ПФ2 с нулевыми начальными условиями при подключении на их вход сигнала промышленной частоты величина выходного напряжения стремится к своему установившемуся значению по закону $k(t)=1-e^{-bt}$, а фаза этого напряжения равна фазе установившегося сигнала. Напряжение и ток «на зажимах» измерительного органа ДЗ при таком переходном процессе соответственно:

$$\dot{U}(t)=\dot{k}_U(t)\dot{U}, \qquad (3) \qquad \dot{I}(t)=\dot{k}_I(t)\dot{I}, \qquad (4)$$

где $\dot{U}$ , $\dot{I}$ – напряжение, ток на зажимах» измерительного органа ДЗ в установившемся режиме; $\dot{k}_U(t)=k_U(t)\dot{k}_U$, $\dot{k}_I(t)=k_I(t)\dot{k}_I$; $\dot{k}_U$, $\dot{k}_I$ – постоянные коэффициенты пропорциональности; $k_U(t), k_I(t)$ – коэффициенты, характеризующие закон изменения напряжения, тока соответственно в переходном режиме. Если $k_U(t)$ и $k_I(t)$ изменяются идентично, т.е. $k_U(t)=k_I(t)=k(t)=1-e^{-bt}t$, сопротивление «на зажимах» измерительного органа ДЗ при таком переходном процессе можно представить в виде

$$\dot{Z}(t)=\dot{U}(t)/\dot{I}(t)=\dot{k}_U(t)\dot{U}/\dot{k}_I(t)\dot{I}=k_U(t)\dot{k}_U\dot{U}/k_I(t)\dot{k}_I\dot{I}\ . \quad (5)$$

Из последнего выражения следует, что «замер» измерительного органа ДЗ при таком переходном процессе не зависит от переходного процесса и определяется параметрами установившегося режима ($\dot{U}$ , $\dot{I}$ , $\dot{k}_U$ , $\dot{k}_I$).

По аналогии со статическим режимом принято характеризовать степень подавления помехи с частотой $\omega$ по отношению к составляющей основной частоты $\omega_0$ в любой момент времени $t$ переходного режима относительным динамическим коэффициентом подавления помехи частоты $\omega$ - $q_Д(\omega,t)$, представляющим собой отношение модулей огибающих переходной функции при синусоидальных воздействиях с частотами $\omega$ и $\omega_0$ - $q_Д(\omega,t)=\dfrac{q(\omega_0,t)}{q(\omega,t)}$.

Относительный динамический коэффициент подавления $q_Д(\omega,t)$ при $t=\infty$ совпадает со статическим коэффициентом подавления $q_{СТ}(\omega)$, представляющем собой модуль отношения передаточной функции при $\omega_0$ к передаточной функции при $\omega$. Закон изменения $q_Д(\omega,t)$ во времени может быть различным, но определяющей при оценке избирательных свойств фильтров в переходном режиме может служить величина

$$q_{Дмин}(\omega,t)=\frac{q(\omega_0,t)_{мин}}{q(\omega,t)_{макс}}. \qquad (6)$$

Как показано в работе, динамический коэффициент подавления гармонических составляющих $q_{Д\,мин}(\omega,t)$ в начальные моменты времени ( $bt\to 0$ ) для ФНЧ2 и ПФ2

$$q_{Дмин}(\omega,t)\approx\frac{t(\omega-\omega_0)}{2}, \qquad (7) \qquad\qquad q_{Дмин}(\omega,t)\approx\frac{t(\omega^2-\omega_0^2)}{4\omega} \qquad (8)$$

соответственно.

Динамический коэффициент подавления апериодической составляющей $q_Д(0,t)$ в начальные моменты времени ( $bt\to 0$ ) для ФНЧ2 и ПФ2

$$q_{Дмин}(0,t)\approx\frac{t\omega_0}{4} \quad , \quad (9) \qquad\qquad q_{Дмин}(\omega,t)\approx\frac{t(\omega^2-\omega_0^2)}{4\omega} \qquad (10)$$

соответственно.

Как видно из (7) - (10) в начале переходного процесса значение $q_{Дмин}$ прямо пропорционально времени $t$ и не зависит от коэффициента затухания частотного фильтра. На основании изложенного следует, что в начале переходного процесса, когда наиболее проявляется влияние составляющих - помех на функционирование ДО, динамические подавляющие свойства частотных фильтров в цепях ДО не зависят от их коэффициента затухания. Однако следует иметь ввиду, что выражения , на основании которых сделаны выводы о независимости $q_{Дмин}$ от $b$, выведены при допущении $\omega >> b$. Это обстоятельство указывает на нецелесообразность "бесконечного" уменьшения коэффициента затухания $b$ фильтров, так как при выполнении условия $\omega >> b$ дальнейшее уменьшение $b$ практически не даёт эффекта с точки зрения усиления динамических избирательных свойств частотных фильтров.

Дистанционные защиты сложных сетей могут быть построены только на таких принципах действия, которые обеспечивают их срабатывание при повреждениях на ограниченных участках сети. Ограничение её зоны действия достигается соответствующим выбором уставок дистанционных органов (ДО) минимального сопротивления, что обеспечивает селективность только при металлических КЗ.

Исследования, выполненные в настоящей работе, показали, что зона действия дистанционных защит существенно зависит от тока нагрузки и переходного сопротивления в месте повреждения. Поэтому актуальной проблемой повышения устойчивости функционирования дистанционных защит является обеспечение необходимой чувствительности ДО при КЗ через переходное сопротивление $R_{П}$. Для этого характеристика ДО в комплексной плоскости сопротивления должна охватывать не только защищаемый участок электропередачи, но и прилегающие области. В работе предложено эффективное средство повышения устойчивости функционирования ДЗ при ЭМПП, основанное на различных требованиях быстродействия для металлических и дуговых замыканий в защищаемой зоне - выполнение ДО с комбинированными характеристиками срабатывания в комплексной плоскости сопротивления. Такие алгоритмы ДО с характеристиками в виде комбинации двух областей срабатывания – внутренней, быстродействующей и внешней, замедленной позволяют (рис. 1): отключать с малым временем металлические КЗ во внутренней, более узкой области характеристики срабатывания, обеспечивающей хорошие динамические свойства ДО; повысить чувствительность за счет наличия внешней, более широкой области характеристики к замыканиям через переходное сопротивление дуги, которая возникает в течение времени, большего, чем требуемое время срабатывания быстродействующих ступеней ДЗ.

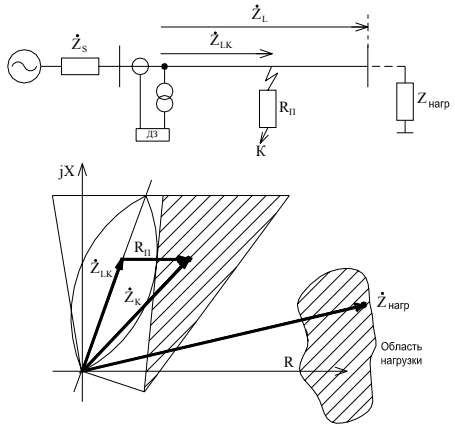



Рис.1. Комбинированные характеристики срабатывания ДО

Эффективность предложенных решений подтверждена многочисленными испытаниями на электродинамических моделях протяженных линий электропередачи сверхвысокого напряжения.

Измерительные органы с комбинированными характеристиками срабатывания используются в качестве быстродействующих ступеней панелей и шкафов дистанционных защит от междуфазных замыканий линий напряжением 500-750 кВ (ПДЭ-2001, ШЭ2703) в настоящее время серийно выпускаемых промышленностью.

**Во второй главе** приведен анализ методов и средств пуска ДЗ и их блокирования при качаниях; рассмотрен предложенный алгоритм пускового органа ДЗ, основанный на n-кратном выделении приращения вектора тока обратной последовательности; охарактеризованы известные принципы распознавания вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ); показано, что совершенствование принципов распознавания ВППФ может быть достигнуто при использовании: аварийных составляющих токов в качестве основного критерия, характеризующего повреждение фазы, а также современных программно-технических средств, позволяющих осуществлять синхронные измерения на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи.

Известно, что дистанционные защиты подвержены ложным срабатываниям при качаниях и асинхронных режимах в системах. В нашей стране получил распространение принцип, основанный на кратковременном пуске защиты при возникновении несимметрии, связанной с появлением составляющих напряжения или тока обратной последовательности, а также их сочетания с составляющими нулевой последовательности.

С целью совершенствования блокировки при качаниях для ДЗ электропередач высокого и сверхвысокого напряжения была выполнены многочисленные исследования и разработки, в том числе, выполненные под руководством и при участии автора. Эти исследования показали, что наиболее эффективным и необходимым мероприятием для обеспечения быстрого и селективного функционирования дистанционных защит и их измерительных дистанционных органов (ДО) при электромагнитных переходных процессах (ЭМПП) является создание в нормальном режиме нулевых начальных условий (ННУ) для частотно-избирательных элементов ДО. Задача создания ННУ возлагается на пусковые органы (ПО), которые после КЗ подключают аварийные параметры к частотно-избирательным элементам ДО, исключая влияние на работу последних доаварийного режима. Обычно роль ПО дистанционных защит выполняется устройством блокировки при качаниях, являющимся необходимым компонентом таких защит. Требования, предъявляемые к ПО дистанционных защит сводятся, в основном, к следующему:

- отстроенность от режимов качаний (для предотвращения пуска дистанционных защит);

- обеспечение чувствительности ПО более высокой, чем у наиболее чувствительных ступеней ДЗ;

- максимальное быстродействие ПО, т.к. время срабатывания быстродействующих ДО складывается из собственного времени их срабатывания и времени срабатывания ПО, осуществляющих ННУ для частотно-избирательных элементов ДО.

Сложность одновременного выполнения этих требований заключается в том, что первое требование, по существу, противоречиво остальным двум. Именно поэтому сложность создания ПО блокировки при качаниях с требуемыми свойствами является традиционной.

Наиболее распространенными в нашей стране являются устройства, отличающие КЗ от нормального режима и от режима качаний по появлению хотя бы кратковременной несимметрии тока или напряжения сети. Такие устройства предложены у нас в стране в 1938 г., получили широкое распространение на практике (блокировки типов КРБ-125,126) и до настоящего времени выпускаются промышленностью. Недостатком ПО такого типа является их недостаточная чувствительность, связанная с необходимостью отстройки от различных небалансов, обусловленных: расстройкой фильтров обратной последовательности из-за отклонения от номинальной частоты в сети; несимметрией линии; неидентичностью характеристик измерительных трансформаторов тока; наличием высших гармонических составляющих в токе и напряжении нормального режима (например, из-за наличия тяговых подстанций).

Недостатки рассмотренных устройств частично исключаются в устройствах, реагирующих на величину производной модуля напряжения или тока обратной последовательности. Однако и их чувствительности оказывается в ряде случаев недостаточно, особенно для режимов, когда модуль напряжения или тока при КЗ близок к таковому в нормальном режиме.

Наиболее совершенными среди устройств рассматриваемого типа являются ПО дистанционных защит, реагирующие на величину приращения (аварийную составляющую) вектора напряжения или, чаще, тока обратной последовательности. Основные трудности при использовании рассмотренного принципа связаны с тем, что при изменении частоты системы в нормальном режиме, в режиме качаний или при наличии в нормальном режиме высших гармонических составляю-

щих происходит расстройка одного из основных элементов - инерционного звена (полосового фильтра основной частоты). Эта расстройка определяется появлением небаланса, величина которого определяется практически фазочастотной характеристикой полосового фильтра:

$$U_{нбт} = 2U_{2m} \sin \frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{2} - arctg \frac{2\omega_*}{T\omega_0(1-\omega_*^2)}\right], \qquad (11)$$

где $\frac{\pi}{2} - arctg \frac{2\omega_*}{T\omega_0(1-\omega_*^2)} = \alpha$ – угол расстройки полосового фильтра

при $\omega \neq \omega_0$; $\omega_* = \omega/\omega_0$.

Наличие небалансов в нормальном режиме из-за расстройки фильтра приводит к загрублению рассматриваемого устройства. Для уменьшения указанных небалансов схему ПО дополняют обычно фильтрами высших гармонических составляющих, а также сглаживающими цепочками на выходе схемы выпрямления. Указанные мероприятия приводят не только к усложнению устройства, но и к его замедлению. Отмеченные недостатки устранены в предложенном и реализованном в настоящей работе алгоритме быстродействующего и чувствительного ПО дистанционных защит, основанном на n-кратном выделении приращения вектора тока обратной последовательности, при котором осуществляется достаточно эффективное уменьшение напряжения небаланса при отклонении частоты в системе или в режимах качаний до величины $U^n_{нбт} = 2U_{2m} \sin^n 0{,}5\alpha$. Принципы многократного выделения приращения вектора тока обратной последовательности релизованы в ПО блокировок при качаниях микроэлектронных ДЗ типа ПДЭ-2001 и микропроцессорных защит типа ШЭ2710.

При реализации ряда важных функций релейной защиты и автоматики высоковольтных линий электропередачи возникает задача определения вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ). К такого рода функциям относятся:

- Дистанционная защита, у которой алгоритмы вычисления сопротивления до места повреждения организуются в зависимости от ВППФ.

- Автоматическое повторное и однофазное автоматическое повторное включение, функционирование которых (выбор вида повторного включения и коммутируемой фазы) производится в соответствии с результатом определения ВППФ.

- Определение расстояния до места повреждения (алгоритмы вычисления расстояния зависят от ВППФ, а при организации осмотра и ремонта линии желательно знание поврежденных фаз).

Избирательные органы (ИО), действующие по принципу регистрации возрастания токов в фазах больше заданного значения, имеют ограниченную область применения. Причиной этого является необходимость выбирать ток срабатывания ИО с учетом надежной их отстройки от токов в неповрежденных фазах, значение которых во многом определяется нагрузочным режимом, качаниями. Токи в поврежденных фазах, особенно на сильно нагруженных ВЛ большой протяженности, могут быть соизмеримы с токами неповрежденных фаз. Поэтому основным недостатком весьма простых по исполнению ИО максимального тока является во многих случаях недостаточная чувствительность.

Известно, что в зависимости от ВППФ существенно меняются соотношения между векторами фазных напряжений и токов или их симметричными составляющими. Контроль этих соотношений, как правило, является определяющим при организации алгоритмов ВППФ. Однако соотношения между векторами токов и

напряжениями в линиях электропередачи определяются не только видом повреждения, но и токами доаварийного режима. Последнее обстоятельство в ряде случаев вызывает существенные трудности при решении рассматриваемой задачи, например, при удаленных коротких замыканиях через переходное сопротивление на сильно загруженных линиях электропередачи.

Распространение получил способ решения задачи определения ВППФ, основанный на дистанционном принципе. Однако в этом случае сильное влияние оказывает переходное сопротивление в месте короткого замыкания и при значительных сопротивлениях такой способ оказывается неработоспособным.

Существенное повышение чувствительности ИО ожидается при использовании аварийных составляющих токов в качестве основного критерия, характеризующее повреждение фазы. Как показали исследования автора, эффективным является принцип пофазного сравнения аварийных составляющих фазных токов с минимальным из них.

Новые возможности эффективного решения задачи определения ВППФ, рассматриваемые далее в настоящей работе, связаны с использованием в энергосистемах синхронных измерений на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи. Синхронизация измерений может осуществляться путем передачи синхронизирующих импульсов по каналам связи, либо на основе использования системы единого времени. Таким образом при коротком замыкании на линии KL ток в месте повреждения может быть определен как сумма синхронно измеренных токов с двух сторон по концам контролируемого участка (K и L). При этом удается полностью исключить влияние токов нагрузки (доаварийного режима) и, используя граничные, не зависящие от сопротивлений в месте повреждения уравнения, связывающие токи симметричных составляющих в месте повреждения, можно получить представленные в табл. 1 уравнения, которые могут служить основой определения ВППФ.

Таблица 1

| Вид повреждения | Граничные уравнения | Условия идентификации вида повреждения (фазовые соотношения) |
|---|---|---|
| ***1*** | ***2*** | ***3*** |
| ABC | $I_0 = 0, I_2 = 0$ | $\lvert I_1\rvert > K_1\lvert I_2\rvert + K_2\lvert\ I_0\ \rvert$ |
| AB | $I_0 = 0, I_{2C}=-I_{1C}$ | $\lvert I_2\rvert > K\lvert I_0\rvert,$ $-60^o < \arg(I_{2C} / I_{1C}) < 60^o$ |
| BC | $I_0 = 0, I_{2A}=-I_{1A}$ | $\lvert I_2\rvert > K\lvert I_0\rvert,$ $-60^o < \arg(I_{2A} / I_{1A}) < 60^o$ |
| CA | $I_0 = 0, I_{2B}=-I_{1B}$ | $\lvert I_2\rvert > K\lvert I_0\rvert,$ $-60^o < \arg(I_{2B} / I_{1B}) < 60^o$ |
| ABO | $I_0\neq0, I_{1C}+I_{2C}+I_0=0,$ $I_2\neq0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_{2C} / I_o) < 105^o$ $+90^o < \arg(I_{1C} / I_{2C} < 270^o$ |
| BCO | $I_0\neq0, I_{1A}+I_{2A}+I_0=0,$ $I_2\neq0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_{2A} / I_o) < 105^o,$ $+90^o < \arg(I_{1A} / I_{2A} < 270^o$ |

Продолжение Таблицы 1

| Вид повреждения | Граничные уравнения | Условия идентификации вида повреждения (фазовые соотношения) |
|---|---|---|
| ***1*** | ***2*** | ***3*** |
| САО | $I_0 \neq 0,\ I_{1B}+I_{2B}+I_0=0,$ $I_2 \neq 0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_{2B}/I_o) < 105^o,$ $+90^o < \arg(I_{1B}/I_{2B} < 270^o$ |
| АО | $I_0 \neq 0,\ I_{1A}=I_{2A}=I_0,$ $I_2 \neq 0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_2/I_o) < 105^o,$ $-90^o < \arg(I_{1A}/I_{2A} < 90^o$ |
| ВО | $I_0 \neq 0,\ I_{1B}=I_{2B}=I_0,$ $I_2 \neq 0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_2/I_o) < 105^o,$ $-90^o < \arg(I_{1B}/I_{2B} < 90^o$ |
| СО | $I_0 \neq 0,\ I_{1C}=I_{2C}=I_0,$ $I_2 \neq 0$ | $K\lvert I_0\rvert > \lvert I_2\rvert,$ $-15^o < \arg(I_2/I_o) < 105^o,$ $-90^o < \arg(I_{1C}/I_{2C} < 90^o$ |

**В третьей главе** рассмотрены методы и средства формирования технологических параметров для задач РЗ и ПА электроэнергетических систем: характеристика входных информационных процессов в устройствах РЗ и ПА энергосистем; метод уменьшения погрешности измерения комплексных значений векторов токов; алгоритмы формирования технологических параметров в микропроцессорных устройствах РЗ и ПА; принципы формирования, структурная схема, программно-технические средства и технические характеристики контроллера нижнего уровня (КНУ), разработанного под руководством и при непосредственном участии автора.

Функционирование автоматических устройств РЗ ПА основано на использовании обширной априорной и получаемой при переходных процессах в электроэнергетических системах информации о режимных параметрах. Входными сигналами таких устройств являются, как правило, гармонические составляющие промышленной частоты с изменяющейся амплитудой, фазой и частотой выходных напряжения и тока первичных измерительных трансформаторов трех фаз, являющихся источниками информации. Поэтому необходимость иметь в составе устройств РЗ и ПА измерительных преобразователей переменных токов и напряжений в требуемый набор технологических параметров не вызывает сомнений. Доступная техническая информация о терминалах как зарубежных (ABB, Siemens и др.), так и отечественных (ЭКРА, Механотроника и др.) позволяют судить о наличии на выходе этих преобразователей ортогональных составляющих входных электрических величин, но не более того. Другая сколько-нибудь существенная информация, касающаяся программно-технической реализации измерительных блоков, в документации отсутствует. К тому же известные данные, относящиеся к архитектуре этих устройств в целом, показывают, что они представляют собой закрытые платформы, а значит используемые в них решения по входным преобразователям не могут быть полностью совместимы с другими платформами, в том числе и с наиболее распространенной IBM PC подобной архитектурой.

Вместе с тем, при разработках устройств ПА в институте «Энергосетьпроект», напротив, ориентация делалась на открытые платформы, которые разрабатываются в рамках известных стандартов. Хорошо известно, что на рынке наибо-

лее широко представлены процессорные и периферийные модули для открытых платформ, что существенно облегчает и оптимизирует выбор комплектного оборудования. Однако, как вскоре стало очевидным, на отечественном и зарубежном рынке отсутствуют модули аналогового ввода переменных токов и напряжений с функцией формирования ортогональных составляющих, и это обстоятельство потребовало выполнить весь комплекс НИОКР с освоением в производстве модулей аналогового ввода с сигнальным процессором (МАВСП) в виде плат стандартов Micro-PC и PC-104.

При переходных процессах, особенно электромагнитных, в токах и напряжениях электроэнергетических объектов возникают свободные затухающие апериодические и колебательные составляющие. Кроме того, первичные измерительные преобразователи (трансформаторы и трансреакторы) создают дополнительные помехи (свободные и гармонические составляющие). В предположении линейности и безинерционности первичных измерительных преобразователей, т.е. при рассмотрении непосредственно первичных электромагнитных переходных процессов, входной информационный процесс измерительной части автоматического устройства можно представить в виде тока i(t) [напряжения u(t)], описываемого следующей функцией времени:

$$\begin{aligned} i(t) &= i_c(t) + i_{an}(t) + i_{кп}(t), \\ i(t) &= i_c(t) + i_n(t) \end{aligned} \qquad (12)$$

где: $i_c(t)$ - информационная составляющая промышленной частоты; $i_{an}(t)$ - апериодическая свободная составляющая; $i_{кп}(t)$ - колебательные составляющие с неизвестными параметрами (начальной амплитудой, частотой и постоянной времени затухания) - помехи.

Так как входные сигналы содержат «шумовую» составляющую, то для их обработки и преобразования широко применяется спектральный анализ, который позволяет характеризовать частотный состав наблюдаемого информационного процесса.

Преобразование Фурье является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал с его представлением в частотной области. Измерительные преобразователи, реализующие фильтрацию с помощью разложения Фурье с целью вычисления ортогональных составляющих переменных токов и напряжений, стали объектом исследований и разработки, выполненной в НИЛ РЗА ОАО «Институт «Энергосетьпроект» под руководством и при участии автора. В результате был разработан модуль аналогового ввода с сигнальным процессором (МАВСП), реализующий один из алгоритмов фильтрации Фурье. Особенностью МАВСП является то обстоятельство, что он соответствует стандарту шины ISA и используется с IBM PC совместимыми модулями центральных процессоров и одноплатными компьютерами в стандартах Micro PC (фирм Fastwell и OctagonSystems) и PC/104.

На основе рассмотренных в работе принципов формирования технологических параметров из ортогональных составляющих представлены алгоритмы: различных вариантов сглаживания ортогональных составляющих; вычисления составляющих ***1, 2, 0*** последовательностей фазы ***A*** в комплексном виде; вычисления ортогональных составляющих фаз ***B*** и ***C*** по ортам фазы ***A*** в декартовых координатах; вычисления второй и третьей гармоник аналогового сигнала; определения

действующих значений входных аналоговых сигналов; вычисления активных и реактивных мощностей; цифровой фильтрации мгновенных значений напряжения прямой последовательности; измерения длительности периода контролируемого сигнала; определения частоты синусоидального сигнала по мгновенным значениям взаимноортогональных составляющих. Предложенные алгоритмы составляют основу формирования входных режимных параметров, необходимых для функционирования различных устройств РЗ и ПА.

В общем случае программно-технический комплекс контроллера, на базе которого предполагается решать ряд задач автоматики нижнего уровня, должен объединять в себе две группы алгоритмов. Первая связана с цифровой обработкой входных сигналов в соответствии с их моделями и преобразованием обработанных сигналов в набор режимных параметров, необходимых для формирования технологического алгоритма. Вторая группа представляет собой технологический алгоритм, соответствующий конкретному назначению устройства автоматики. Такой принцип архитектуры программно-технического обеспечения позволяет рассматривать контроллер как универсальную базу для создания различных устройств противоаварийной автоматики энергосистем нижнего уровня.

Электрические цепи, используемые для формирования входных аналоговых сигналов, несущих информацию о контролируемых токах, содержат линейные элементы (резисторы, конденсаторы) и нелинейные элементы, каковыми являются трансформаторы тока (ТТ). Вносимые линейными элементами токовые и угловые погрешности практически не зависят от контролируемого тока и могут быть приняты постоянными, в то время как погрешности ТТ существенно зависят от силы тока. В работе предложен метод коррекции погрешности измерения комплексных значений векторов токов, сущность которого заключается в том, что в широком диапазоне кратностей тока (при отсутствии насыщения магнитопровода) зависимости токовой и угловой погрешностей ТТ от действующего значения контролируемого первичного тока с достаточной для практики точностью можно аппроксимировать гиперболами общего вида. Такого вида зависимость пригодна для аппроксимации как токовой $f_T$ и угловой $\delta_T$ погрешностей, так и погрешностей всего тракта формирования входных аналоговых сигналов каналов измерения тока $I_1$.

В работе получено соотношение для компенсации погрешностей тракта:

$$I_1 = \frac{I_2 \cdot n_T}{1 + f_T} \approx I_2 \cdot n_T (1 - f_T), \quad (13) \qquad \varphi_1 = \varphi_2 - \delta_T, \quad (14)$$

где $I_2$, $\varphi_2$ – измеренные значения модуля и аргумента тока на выходе тракта; $fm = fm(I_2)$ и $\delta m = \delta m(I_2)$ – токовая и угловая погрешности тракта, определяемые по зависимостям вида $f_T = \frac{I_{2nT}}{I_1} - 1$ с коэффициентами аппроксимации, рассчитанными по данным калибровочных испытаний тракта в рабочем диапазоне измерений тока. Предложенный метод позволяет выполнять плавную коррекцию погрешностей, обеспечивая наиболее высокую точность результатов.

Для реализации устройств РЗ и ПА с расширенными по отношению к традиционным устройствам функциональными возможностями, повышающими надежность функционирования энергосистем, разработан специализированный программируемый контроллер нижнего уровня (КНУ). Разработанная архитектура КНУ, рассматриваемого как базовый элемент при формировании устройств РЗ и

ПА нижнего уровня электроэнергетических систем, позволила реализовать: устройства одностороннего определения мест повреждения высоковольтных линий электропередачи (МИР-Р); микропроцессорные устройства выявления и ликвидации асинхронного режима (АЛАР-М); микропроцессорное устройство автоматики ограничения повышения напряжения (АОПН). Дальнейшее использование КНУ предполагается для реализации на его основе, устройства фиксации отключения линии (ФОЛ), устройства фиксации перегрузки (УФП) и т.п.

**Четвертая глава** посвящена анализу алгоритмов функционирования и опыта эксплуатации средств определения места повреждения (ОМП) воздушных линий электропередачи; оценке погрешностей одностороннего измерения расстояния до места короткого замыкания; реализации микропроцессорных средств определения места повреждения на линиях электропередачи на базе разработанного контроллера нижнего уровня (КНУ).

Одна из важных задач повышения надежности функционирования электроэнергетических систем связана с совершенствованием методов и средств определения мест повреждений на линиях электропередачи. Большой вклад в решение этих проблем внесли А.И. Айзенфельд, Е.А. Аржанников, А.Е. Аржанникова, Я.Л. Арцишевский, Ю.Я. Лямец, А.С. Малый, М.Ш. Мисриханов, А.-С.С. Саухатас, Г.М. Шалыт, И.В. Якимец, а также другие отечественные и зарубежные ученые.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы и средства определения места повреждения (ОМП), основанные на получении и обработке параметров принужденных составляющих токов и напряжений аварийного режима. Использование микропроцессорной элементной базы позволило придать принципиально новые свойства средствам ОМП (непосредственная фиксация расстояния до места повреждения в километрах, фиксация времени возникновения повреждения и т.п.). При этом специфика функционирования средств ОМП (по сравнению с другими видами РЗ и ПА энергосистем) стимулирует использование микропроцессорной техники. Действительно, при КЗ на контролируемом объекте средства ОМП должны осуществлять в темпе процесса лишь существенно ограниченные функции - фиксация и запоминание токов и напряжений аварийного режима. Обработка результатов измерения допустима уже после отключения объекта и может занимать значительные промежутки времени. Отмеченная особенность позволяет вести поиск алгоритмов функционирования измерительных органов (ИО) средств ОМП, не отбрасывая относительно сложные и непригодные на сегодняшний день, но перспективные в будущем алгоритмы.

К наиболее совершенным отечественным средствам одностороннего ОМП относятся микропроцессорные индикаторы расстояния типа МИР (Энергоизмеритель) и ИМФ (НПФ «Радиус»), имеющие близкие алгоритмы и программы. По сравнению с известными фиксирующими индикаторами аналогичного назначения индикаторы МИР и серии ИМФ обеспечивают более удобный диалог с оператором, фиксируют параметры не одной, а нескольких аварийных ситуаций. Устройства, как правило, оснащены встроенным тестовым контролем исправности и не требуют использования каких-либо дополнительных приборов при вводе в эксплуатацию.

Базовый алгоритм вычисления расстояния до места повреждения в таких индикаторах обеспечивается путем предварительного решения ряда вспомогательных задач:

- самозапуска индикатора в случае возникновения аварийного режима на контролируемой линии;

- фиксации значений токов и напряжений контролируемой линии в аварийном режиме;

- фильтрации (подавлении помех экспоненциальных и высших гармонических составляющих) зафиксированных значений токов и напряжений;

- определения вида КЗ.

Учет многих влияющих факторов при определении мест повреждений ВЛ за счет возможностей реализации сложных и громоздких алгоритмов средствами современной вычислительной техники не всегда оправдан. Поэтому использование упрощенных алгоритмов расчета должно быть обосновано оценкой соответствующих погрешностей. К основным факторам, оценку влияния которых следует предварительно определять с целью возможного упрощения алгоритма ОМП, относятся: токи промежуточных (ответвительных) подстанций; взаимоиндукция электромагнитно-связанных линий; неоднородность воздушной линии электропередачи; неточность задания сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов (в основном, на промежуточных подстанциях); реактивная (емкостная) проводимость ВЛ и т.п. В работе получены расчетные выражения для количественной оценки влияния указанных факторов на погрешность определения места повреждения с целью возможного упрощения алгоритма одностороннего ОМП.

В работе проанализирован опыт использования индикаторов типа МИР, реализующих упрощенный алгоритм определения места повреждения на базе разработанного под руководством и при участии автора контроллера нижнего уровня (КНУ).

Опыт применения приборов микропроцессорных индикаторов расстояния с 1992 года показал как их достаточно высокую эффективность, так и выявил ряд организационно-технических проблем. Одни из них связаны с необходимостью совершенствования аппаратно-программных решений микропроцессорных устройств ОМП в части:

- защиты индикаторов от электромагнитных полей, бросков напряжения или высших гармоник в оперативных цепях, особенно при отключении вводного автомата АБ, включении тяжелых выключателей и т.п.;

- отстройки пуска индикаторов от КЗ за трансформаторами с фиксацией замера при включении короткозамыкателя после работы защиты трансформаторов (АТ).

Вторая группа проблем связана с организацией эксплуатации микропроцессорных устройств ОМП, которую можно проиллюстрировать на основе оценки погрешности замеров при ОМП в 1997-2002 годах в ОАО «Кубаньэнерго», приведенной в табл. 2 (анализировалась работа 193 приборов).

Очевидно, что по мере роста опыта эксплуатации и повышения квалификации персонала, число точных замеров (до 1,5%) выросло в 2 раза, а число грубых замеров (более 10%) снизилось до 0.

Таблица 2

| Погрешность | до 1,5% | от 1,5% до 3% | от 3% до 5% | от 5% до 10% | более 10% | всего случаев |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1997 г | 31,7 | 24,4 | 15,1 | 16,1 | 12,7 | 205 |
| 1998 г | 35,6 | 33,6 | 9,0 | 11,1 | 10,7 | 234 |
| 1999 г | 41,3 | 24,5 | 9,7 | 18,1 | 6,4 | 298 |
| 2000 г | 63,9 | 25,7 | 8,7 | 1,7 | --- | 241 |
| 2001 г | 63,4 | 26,6 | 9,0 | 1,0 | --- | 199 |
| 2002 г | 65,1 | 26,8 | 4,8 | 3,3 | --- | 251 |

Безусловно положительный опыт эксплуатации программно-технических средств ОМП выявил, что для повышения эффективности таких средств необходимо:

- повысить качество и надежность каналов связи, а также обеспечить их достаточное количество для целей ОМП и РЗА с использованием ВОЛС, беспроводных, в том числе спутниковых (с учетом последующего внедрения цифровой РЗА);
- произвести уточнение параметров ВЛ;
- обеспечить организацию необходимого взаимодействия локальных средств ООМП с системой регистрации и осциллографирования на энергообъекте (интеграция в АСУ ТП энергообъекта).

**В пятой главе** рассмотрены основные задачи противоаварийного управления, приведен пример реализации задачи противоаварийного управления, а именно задачи автоматической дозировки управляющих воздействий (АДВ) энергосистем на базе программно-технического комплекса (ПТК) «Космотроника-Э» с использованием разработанных автором блоков устройства связи с объектом (УСО), приведены данные о технических средствах и программном обеспечении этого комплекса.

Осуществление функций противоаварийной автоматики (ПА) до настоящего времени связано, в основном, с использованием электронной и часто электромеханической аппаратуры, характеризующейся ограниченными функциональными возможностями и недостаточными показателями надежности. Недостатки существующей системы ПА и современные возможности в области телекоммуникаций и программно-технических средств определяют необходимость дальнейшего развития методов и аппаратного оснащения ПА, которое также, как и для систем релейной защиты (РЗ), должно быть направлено на полный переход на микропроцессорную технику и связанное с этим кардинальное изменение принципов взаимодействия и номенклатуры программно-технических средств ПА.

Для такой большой энергосистемы, как ЕЭС России, целесообразна многоуровневая иерархическая структура с максимальной передачей задач ПА на наиболее низкий (локальный) уровень управления, повышающий надежность и упрощающий систему управления.

В рамках иерархической системы ПА одной из важных является задача автоматической дозировки управляющих воздействий (АДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности выдачи или приема мощности. Эти функции реализуются за счет формирования и выдачи устройством АДВ команд противоаварийного управления при аварийных возмущениях в энергосистеме. Поэтому важной задачей, с учетом существующего недостаточного уровня телекоммуникаций и каналов связи, является обеспечение повышенной надежности и

точности дозировки управляющих воздействий, которые определяют эффективность работы системы противоаварийного управления в целом.

С появлением микропроцессорной элементной базы появились возможности реализации программно-технического комплекса автоматической дозировки управляющих воздействий, отвечающего необходимым требованиям. Одним из таких устройств является программно-технический комплекс локальной автоматической дозировки управляющих воздействий энергосистем (ПТК ЛАДВ), разработанный в ОАО «Институт «Энергосетьпроект» под руководством и при участии автора. Аппаратная часть ПТК выполнена ЗАО «ПИК-Прогресс» на базе семейства комплексов «Космотроника-Э» по техническому заданию и при участии Энергосетьпроекта.

ПТК ЛАДВ позволяет решать задачи противоаварийного управления, связанные со значительными объемами вводимой информации об объекте управления и выводимых управляющих воздействий (УВ). Он предназначен для автоматической выдачи команд противоаварийного управления с целью предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и имеет два режима работы:

- автоматическая дозировка воздействий (АДВ) - определение и выдача управляющих воздействий при поступлении аварийных сигналов от пусковых органов (ПОР);

- автоматическое запоминание дозировки (АЗД) - выдача дозировки УВ в соответствии со значениями, передаваемыми в ПТК АДВ от устройства противоаварийной автоматики (ПА) верхнего уровня по каналам связи.

В нормальном режиме при отсутствии аварийных сигналов ПТК ЛАДВ в режиме АДВ осуществляет следующие функции:

- циклический (время цикла 0.2 с) прием и проверку достоверности местной и телемеханической информации о схеме и режимных параметрах сети;
- идентификацию текущей схемы сети;
- определение по таблицам текущих значений УВ, необходимых для сохранения устойчивости в данной схеме и текущем режиме для всех заданных аварийных возмущений, возможных в данной ситуации;
- контроль и диагностику программных и технических средств;
- выполнение вводимых персоналом оперативных команд;
- выполнение поступающих по каналам связи с верхнего уровня системы ПА команд задания и запоминания значений УВ и перевода устройства из режима АДВ в режим АЗД;
- формирование по запросу персонала сообщений о текущих дозировках УВ.

Время срабатывания устройства с момента появления входного пускового сигнала о возникновении аварийной ситуации до момента появлений команды на выполнение УВ (выходного сигнала) не превышает 15 мс.

Работа ПТК основана на использовании табличного алгоритма выдачи дозировок УВ, в соответствии с которым в ЛАДВ заносятся сочетания схем, аварийных возмущений и режимных параметров, для которых требуется противоаварийное управление. Как правило, таблицы с необходимыми данными имеются в распоряжении персонала служб ПА в энергосистемах, и их ввод в ПТК производится с помощью инструментального комплекса ЛАДВ.

Повышенная надежность ПТК обеспечивается организацией дублирования двух полукомплектов, которые работают в режиме взаимного резервирования (рис 2).

Промышленный компьютер (ПрК) реализован на базе модуля центрального процессора CPU686E фирмы Fastwell. Связь ПрК с устройствами сопряжения с объектом (УСО) производится через плату ИПП (интерфейс пользователя параллельный). Для ввода сигналов переменного напряжения и тока от измерительных

трансформаторов напряжения и тока энергообъекта с последующим преобразованием их в текущие значения активной мощности предназначен модуль аналогового ввода с сигнальным процессором (МАВСП), а также модули согласующих трансформаторов тока и напряжения МТТ и МТН. Для ввода нормированных сигналов постоянного тока от датчиков мощности предусмотрен модуль МАВ.

Для приема дискретных сигналов уровня 220 В – аварийных и ремонтных - служат модули дискретного ввода МДВ с гальванической развязкой входов. Модули реле предназначены для вывода 8-ми релейных сигналов и содержат 16 реле, объединенных в пары для предотвращения несанкционированных срабатываний и осуществления полноценного тестирования каждого реле.

Программное обеспечение (ПО) ПТК ЛАДВ состоит из следующих частей:

- инструментальный комплекс ЛАДВ (ИК ЛАДВ), функционирующий на персональном компьютере;
- рабочее ПО, функционирующее на ПрК;

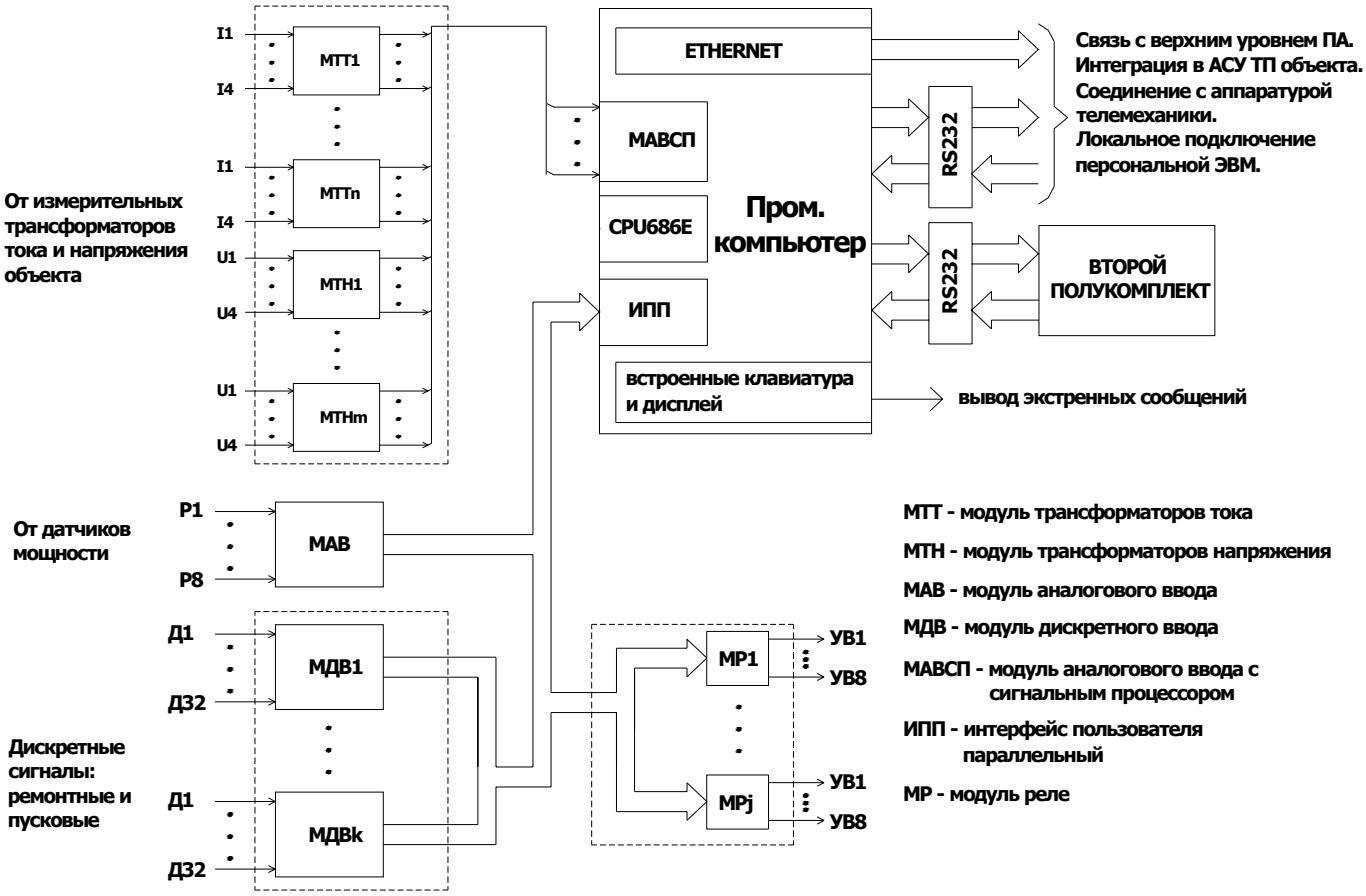



Рис.2 Структурная схема полукомплекта ПТК ЛАДВ

- подсистема общения с оператором на рабочей станции или отдельном ПК;
- программа автоматизированного выбора границ ввода ступеней УВ.

При разработке микропроцессорных систем наибольшие затраты труда приходятся на разработку и отладку программного обеспечения. При этом могут быть допущены редко проявляющиеся ошибки, для выявления которых в условиях эксплуатации требуются годы. Ошибки могут быть допущены на любом этапе разработки, по этой причине внесение даже небольших коррекций программ требует проведения повторных подробных испытаний. Поэтому необходимым компонентом современных микропроцессорных систем должны быть специально разработанные программные инструментальные средства, обеспечивающие, в том числе, проверку работоспособности устройств без использования сложной и дорогостоящей техники моделирования входных сигналов.

Для обеспечения высокого уровня надежности ПТК АДВ решающими являются следующие используемые мероприятия: организация функционирования дублированного ПТК АДВ; непрерывный контроль и диагностика; контроль исправности цепей управления выходными реле (включая контакты этих реле); специальные алгоритмы достоверизации информации; отображение состояния объекта, выполняемых команд и истории развития контролируемых процессов (мониторинг).

**Шестая глава** связана с анализом алгоритмов и синтезом программно-технических средств для локальных устройств противоаварийной автоматики; характеристикой состава задач пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости; предложенными алгоритмами решения задач: фиксации тяжести коротких замыканий, автоматики ограничения повышения напряжения, автоматики ликвидации асинхронных режимов.

Среди задач пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) важное и определяющее место занимают задачи устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ), которые традиционно определяют следующие функции:

- фиксация отключения линии;
- фиксация перегрузки линии или группы линий по активной мощности или по углу между векторами напряжений по концам контролируемого участка электропередачи;
- автоматическая ликвидация асинхронного режима (АЛАР);
- автоматическое ограничение повышения напряжения (АОПН).

Последняя функция традиционно связана с защитой оборудования от повышенного напряжения. Вместе с тем задача фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ), хотя и не относится к задачам ПА ВЛ, но занимает важное место для реализации функций АПНУ.

В настоящей работе рассматриваются выполненные под руководством и при участии автора разработки технологических алгоритмов и программно-технических средств задач АОПН, АЛАР, ФТКЗ.

Фиксация тяжести коротких замыканий Динамическая устойчивость электроэнергетических систем зависит от тяжести коротких замыканий (КЗ), нагрузки генераторов в предшествующем режиме и от условий послеаварийного режима.

Для динамической устойчивости тяжесть КЗ определяется его видом, местом и продолжительностью. Возникающее при КЗ ускорение вращения генераторов, которое может привести к нарушению динамической устойчивости, определяется в конечном счете сбросом электромагнитного момента на валу генератора, который непосредственно определять не представляется возможным. Поэтому для фиксации тяжести КЗ используют, как правило, доступные для измерения величины, связанные со сбросом электромагнитного момента на валу генератора, в частности, сброс полной трехфазной активной мощности и напряжения прямой последовательности, а также их продолжительность. Именно на основе таких измерений выполняются традиционные устройства фиксации тяжести КЗ, используемые для автоматической дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики по условиям сохранения динамической устойчивости энергосистем.

Вместе с тем указанные величины не всегда достоверно характеризуют тяжесть КЗ. Поэтому важной задачей является исследование и выбор наиболее представительных параметров для автоматического ранжирования тяжести КЗ различных видов и более точной дозировки весьма ответственных управляющих воздействий противоаварийной автоматики энергосистем.

Указанная задача является актуальной в связи с широким внедрением для целей управления в электроэнергетике современных программно-технических средств, которые позволяют использовать более представительные критерии для оценки тяжести возмущений режимов электроэнергетических систем при различных видах КЗ. При этом становится возможной более точная дозировка управляющих воздействий противоаварийной автоматики, основанная на «интеллектуальных» возможностях программируемых устройств.

В настоящей работе выполнен анализ способов оценки тяжести КЗ для выбора управляющих воздействий для предотвращения нарушения динамической устойчивости и предложены наиболее представительные параметры для автоматического ранжирования тяжести различных видов КЗ.

Так как величина сброса мощности генератора неоднозначно связана с уменьшением напряжения прямой последовательности, контролируемого в каком-то узле (даже если этот узел – шины генератора), то оценка снижения напряжения *U1* далеко не всегда годится в качестве критерия тяжести КЗ. Так при трехфазном КЗ в середине длинной линии электропередачи, соединяющей две станции, напряжение *U1* на шинах обеих станций изменится незначительно, хотя произойдет полный сброс передаваемой по линии мощности и может быть нарушена устойчивость параллельной работы этих двух станций или подсистем ЭЭС. Поэтому необходима проверка «представительности» величины $\Delta U1$ снижения напряжения прямой последовательности для оценки по нему тяжести КЗ и определения необходимой дозы УВ. Такую проверку выполняют расчетным путем, определяя зависимости предельной передаваемой мощности в предшествующем режиме $P^{1}_{пер}$ от величины $\Delta U1$, варьируемой изменением сопротивления трехфазного индуктивного шунта в месте измерения $\Delta U1$.

Для измерений сброса мощности в промышленных установках фиксации тяжести КЗ используют датчики полной трехфазной активной мощности *P*, которая в установившемся режиме КЗ равна алгебраической сумме активных мощностей составляющих тока и напряжения прямой (*P1*), обратной (*P2*) и нулевой (*P0*) последовательностей:

$$P = P1 + P2 + P0. \qquad (15)$$

Однако электромагнитный момент вращения на валу генератора определяется не полной активной мощностью *P* (в общем случае несимметричных КЗ), поскольку воздействие на генератор токов прямой, обратной и нулевой последовательностей качественно разное. Соответственно различным должен быть и их учет.

Ток нулевой последовательности не протекает в обмотках генераторов, поскольку генераторы имеют изолированную или заземленную через дугогасящий реактор нейтраль, и, кроме того, присоединение генераторов к сети выполняется через трансформаторы с соединением обмоток по схеме звезда/треугольник, которые отделяют генераторы в схеме нулевой последовательности от сети.

Ток обратной последовательности создает в генераторе поток обратной последовательности, вращающийся относительно ротора со скольжением 2-S, где S

– скольжение ротора относительно поля прямой последовательности. При этом в контурах ротора наводятся токи двойной частоты и возникают дополнительные составляющие электромагнитного момента генератора, основными из которых являются (выражения для дополнительных составляющих момента приведены для генератора без успокоительной обмотки):

$$M_0 = -U_2^2 \frac{x_d - x'_d}{4 x_d x'_d} \sin 2\varphi_s , \qquad (6\text{-}1а)$$

где $M_0$ - момент постоянного знака, направленный противоположно основному электромагнитному моменту машины от ее возбуждения в продольной оси;

$$M_{100} = \frac{E_Q U_2}{x_d} \cos 2t + U_1 U_2 \frac{x_d - x_q}{2 x_d x_q} \cos(\delta - 2t) - \\ - U_1 U_2 \frac{x_d - x'_d}{2 x_d x'_d} \sin \delta_0 \cos \varphi_s \sin(2t + \varphi_s) , \qquad (6\text{-}1б)$$

где $M_{100}$ - момент, пульсирующий с частотой ~100 Гц;

$$M_{200} = U_2^2 \frac{x_d - x_q}{2 x_d x_q} \sin 4t - U_2^2 \frac{x_d - x'_d}{2 x_d x'_d} \cos \varphi_s \sin(4t + \varphi_s) , \qquad (6\text{-}1в)$$

где обозначены:

$U_2 = I_2 \cdot x_2$ - напряжение обратной последовательности на зажимах генератора; $I_2 , x_2$ - ток обратной последовательности и сопротивление обратной последовательности генератора; $U_1$ - напряжение прямой последовательности на зажимах генератора; $x_d , x'_d , x_q$ - индуктивные сопротивления генератора по продольной и поперечной осям; $t$ - относительное время, в радианах (при базисном значении времени $t = 1/\omega_0$, где $\omega_0$ - синхронная угловая частота); $\delta_0$ - внутренний угол генератора в момент, предшествующий замыканию;

$$\varphi_s = arctg \frac{1}{s T'_d} , \qquad (19)$$

$T'_d$ - постоянная времени затухания переходных составляющих тока статора; $E_Q$ - фиктивная ЭДС генератора, определяемая током статора в предшествующем КЗ режиме.

Пульсирующие с частотой 100 и 200 Гц составляющие момента имеют среднее за период (или за один оборот ротора) значение, равное нулю. Постоянная составляющая $M_0$, создаваемая током $I_2$, относительно невелика. Поэтому электромагнитный момент генератора практически определяется напряжением и током прямой последовательности. Это означает, что при оценках тяжести КЗ по сбросу мощности, как при расчетах параметров настройки противоаварийной автоматики (ПА), так и при измерениях в реальном времени устройствами ПА, следует использовать активную мощность прямой последовательности, а не полную активную мощность.

Автоматика ограничения повышения напряжения Для ограничения длительности существования установившихся перенапряжений, в частности, вызванных односторонним трехфазным или однофазным отключением линии электро-

передачи высокого и сверхвысокого напряжения, предусматриваются автоматические устройства ограничения повышения напряжения (АОПН). Известны недостатки применяемых до настоящего времени электромеханических и микроэлектронных устройств АОПН, именовавшихся защитами от повышения напряжения (ЗПН).

Более совершенное и в настоящее время традиционное решение реализовано на основе микроэлектронной аппаратуры шкафа ШП 2704, в котором предусмотрены чувствительная и грубая ступени измерительных органов напряжения, а также контроль активной и реактивной мощностей защищаемой линии электропередачи. Выдержка времени грубой ступени отстраивается от времени срабатывания линейных разрядников. Выдержку времени чувствительной ступени целесообразно было бы задавать в соответствии с вольтвременной характеристикой оборудования. Однако из-за большой разницы в уставках по величине напряжения срабатывания грубой и чувствительной ступеней, в случае срабатывания последней приходится рассчитывать на наиболее тяжелый случай, когда контролируемое напряжение превышает уставку чувствительной ступени и близко по величине к уставке грубой ступени. Именно поэтому выдержка времени чувствительной ступени определяется достаточно высокой уставкой по напряжению грубой ступени. Этим и определяются излишние нежелательные коммутации защищаемого оборудования.

К существенным недостаткам традиционного исполнения АОПН на базе ШП 2704 относятся: излишние отключения защищаемого оборудования; невозможность учета накопительного эффекта воздействия напряжения и реального числа таких воздействий; невозможность контроля повышения напряжения в диапазоне до 1,1 Uф.

В настоящее время приемочной комиссией ФСК ЕЭС принята разработка микропроцессорного устройства автоматики ограничения повышения напряжения с контролем ресурса оборудования (АОПН-М), выполненная ООО «Энергоизмеритель» по техническому заданию ОАО «Институт «Энергосетьпроект». Алгоритм АОПН-М разработан в ОАО «Институт «Энергосетьпроект» под руководством и при участии автора и реализует многолетний опыт исследований и разработок средств ограничения длительности повышения напряжения для электрооборудования от 110 до 750 кВ, связанных с использованием стандартных табличных зависимостей вольтвременной характеристики (ВВХ) – «допустимое повышение напряжения - допустимое время» (ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции») (рис. 3).

Алгоритм основан на определении максимального и действующего значений напряжения и их сравнении со значениями допустимых кратковременных повышений напряжения для электрооборудования классов напряжения от 110 до 750 кВ. Расчет максимальных и действующих значений напряжения осуществляется пофазно. В течение расчета управления используется упомянутая ВВХ (ГОСТ 1516.3-96, таблица «допустимое повышение напряжения - допустимое время»), представляющая собой данные по оборудованию, для которого повышение напряжения наиболее опасно. На каждом шаге расчета определяется величина текущей допустимой длительности воздействия перенапряжения на изоляцию оборудования. При этом учитывается как отработка на данном шаге расчета, так

и «предыстория», в ходе которой напряжение могло изменяться. Величина допустимой длительности воздействия перенапряжения выбирается для наиболее «тяжелой» фазы, для которой эта величина является наименьшей (минимальная допустимая длительность перенапряжения). В алгоритме устройства предусмотрено 3 ступени управления (предварительная, первая и вторая), определяемые уровнем контролируемого напряжения. Особенности алгоритма устройства связаны с тем, что внутри каждой ступени управления, благодаря используемым программно-техническим средствам, имеется возможность реализовать поддиапазоны управления (в соответствии с ГОСТ 1516.3-96), которые позволяют осуществлять управление с учетом ресурса защищаемого оборудования.

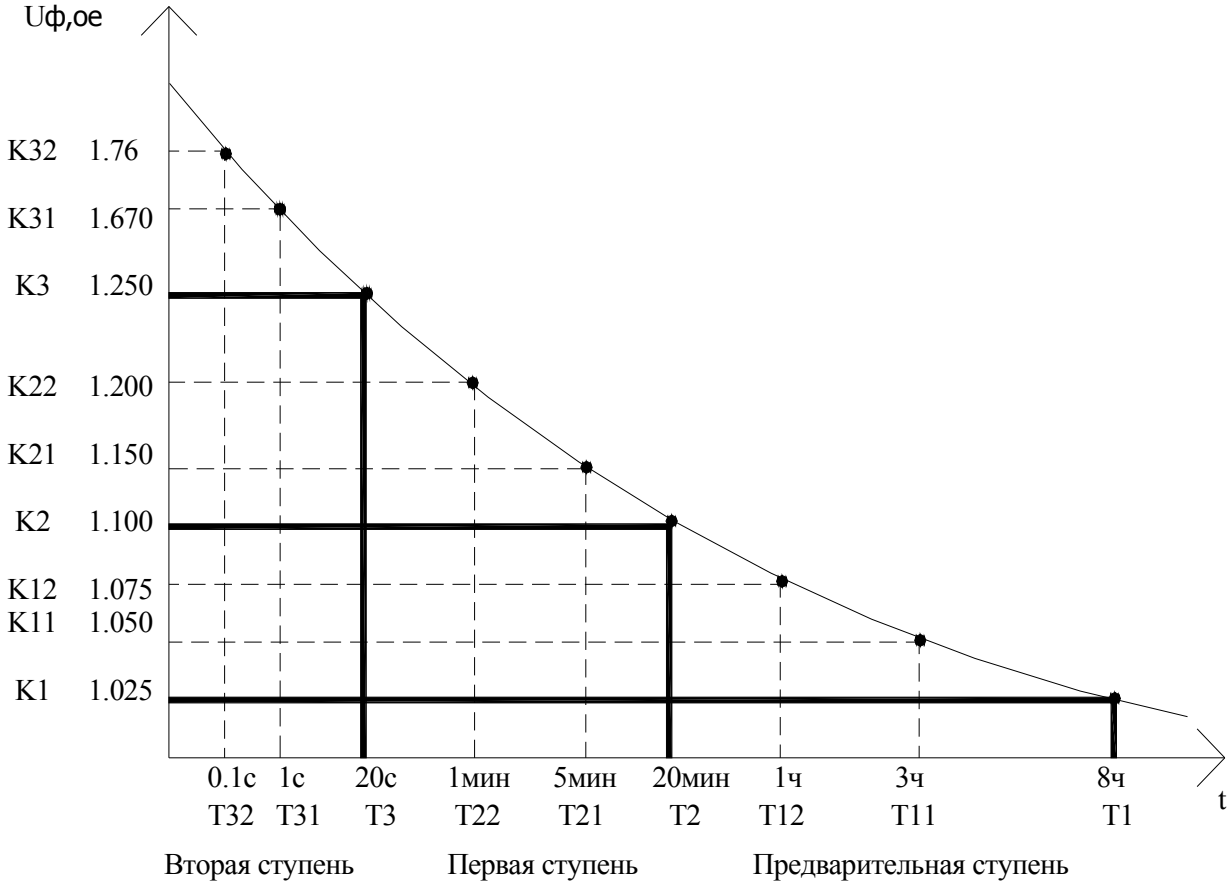



Рис. 3 Вольт-временная характеристика (ВВХ) защищаемого оборудования (ГОСТ 1516.3-96)

Принципы выявления асинхронных режимов (АР) Возникающий при нарушении устойчивости асинхронный режим (АР) представляет в общем случае серьезную опасность для энергосистемы в плане возможного развития аварии и обесточивания большого числа потребителей. В практике работы энергосистем имело место большое число аварий, причиной которых являлся непрекращающийся или своевременно не ликвидированный АР. Поэтому к надежности и эффективности устройства автоматической ликвидации АР (АЛАР) предъявляются высокие требования, причем, наличие сколь угодно развитых систем противоаварийной автоматики (ПА) не может снизить эти требования. К сожалению, ограни-

ченные возможности и несовершенство традиционной аппаратуры АЛАР в большой мере ограничивают технические показатели этих устройств. Так, для используемых до настоящего времени устройств АЛАР характерны следующие недостатки:

- невозможность выявления АР ранее момента наступления максимального значения критического угла;

- невозможность фиксации АР при большом скольжении (в наиболее тяжелом случае этого режима.), связанная с ограниченным быстродействием электромеханических реле, сравнимым с возможной длительностью АР, а также несовершенным способом выявления нарушения устойчивости на первом цикле асинхронного хода;

- сложность и недостаточная надежность согласования статических и динамических характеристик срабатывания разнотипных реле (тока, сопротивления, мощности), приводящие к отказу устройства АЛАР в некоторых возможных схемах сети, наиболее вероятному при повышенных скольжениях в условиях АР. Указанные недостатки могут быть в большой мере устранены при переходе на прямые, а не косвенные, как это имеет место в традиционных устройствах АЛАР принципы - контроль угла и скольжения для выявления и ликвидации АР.

Реализация устройства АЛАР-М на основе контроллера нижнего уровня (КНУ), разработанного под руководством и при участии автора в рамках данной работы, позволяет повысить эффективность его функционирования. При этом удалось решить две взаимосвязанные задачи:

- создать вычислительную систему, способную обрабатывать в темпе реального времени контролируемые сигналы (токи и напряжения) и принимать решения о рациональных воздействиях на энергосистему;

- реализовать более сложные и эффективные по сравнению с традиционными алгоритмы и программы распознавания асинхронного режима или угрозы его возникновения.

Таким образом разработанные структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) позволяют реализовать новые и более эффективные по сравнению с традиционными алгоритмы ряда задач устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ): автоматическую ликвидацию асинхронного режима (АЛАР); автоматическое ограничение повышения напряжения (АОПН), а также фиксацию тяжести короткого замыкания (ФТКЗ).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен комплекс исследований, позволивший научно обосновать технические решения, связанные с разработкой новых методов и средств систем релейной защиты и противоаварийной автоматики, внедрение которых вносит значительный вклад в техническое совершенствование средств противоаварийного управления электроэнергетических систем.

2. Исследовано функционирования дистанционных защит при электромагнитных переходных процессах (ЭМПП) на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, имеющих место при различных динамических возмущениях в электрических системах и, в первую очередь, при КЗ, обусловившие необходимость разработки методов и средств повышения устойчивости функционирования этих защит.

3. Впервые исследованы свойства частотно-избирательных колебательных звеньев 2-го порядка с точки зрения целесообразности их использования, в том числе, для цифровых измерительных органов ДЗ для формирования взаимноортогональных составляющих входных напряжений и токов, и предложен метод синтеза измерительных органов ДЗ и их частотно-избирательных звеньев с целью повышения устойчивости их функционирования при ЭМПП, учитывающий особенности ДО, являющихся органами отношения напряжения и тока в месте установки защиты на линии электропередачи.

4. В результате исследований показано, что конфигурация областей замеров измерительных органов дистанционных защит при дуговых замыканиях существенно зависит от режимов систем. Это обстоятельство связано с необходимостью создания структуры, обеспечивающей возможности регулирования характеристик срабатывания дистанционных органов (ДО) в комплексной плоскости сопротивления в широких пределах. Показано, что алгоритм функционирования измерительных органов дистанционных защит с комбинированными характеристиками срабатывания, основанный на обеспечении различного быстродействия при металлических и дуговых замыканиях, может значительно повысить устойчивость функционирования защиты при ЭМПП.

5. Выявлены существенные недостатки известных методов пуска при КЗ и блокирования в режимах качаний дистанционных защит, связанные с недостаточными чувствительностью, быстродействие и отстройкой от режимов качаний. В работе предложен и исследован метод пуска дистанционных защит при КЗ и их блокирования в режимах качаний, основанный на n-кратном выделении приращения вектора тока обратной последовательности, позволяющий устранить отмеченные недостатки известных методов.

6. Усовершенствованы методы и средства определения вида повреждения и поврежденных фаз, связанные с использованием: аварийных составляющих токов в качестве основного критерия, характеризующее повреждение фазы, а также современных программно-технических средств, позволяющих осуществлять синхронные измерения на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи.

7. Получены расчетные выражения количественной оценки влияния различных факторов на погрешность определения места повреждения, к которым, в частности, относятся: токи промежуточных (ответвительных) подстанций; взаимоиндукция электромагнитно-связанных линий; неоднородность воздушной линии электропередачи; неточность задания сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов (в основном, на промежуточных подстанциях); реактивная (емкостная) проводимость ВЛ и т.п. Полученные расчетные выражения определяют возможность упрощения алгоритмов одностороннего определения места повреждения.

8. Обобщен многолетний (с 1994г.) и положительный в целом опыт эксплуатации разработанных в рамках настоящей работы программно-технических средств одностороннего определения места повреждения определил пути для повышения эффективности таких средств, связанные с: повышением количества, качества и надежности каналов связи (с использованием ВОЛС, беспроводных, в том числе спутниковых линий связи); уточнением параметров ВЛ; организацией необходимого взаимодействия локальных средств ООМП с системой регистрации и осциллографирования на энергообъекте (в рамках интеграции с АСУ ТП энергообъекта).

9. Разработаны и реализованы методы и средства решения задачи АПНУ в рамках иерархической системы противоаварийного управления (ПУ) при использовании локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (ЛАДВ), основной функцией которого является обеспечение надежности

выдачи или приема мощности. Эти обстоятельства определили ориентацию на использование резервированных систем для устройств ПУ, а с появлением микропроцессорной элементной базы появились возможности реализации программно-технического комплекса автоматической дозировки управляющих воздействий, отвечающего необходимым требованиям.

10. Предложен и реализован ряд алгоритмических и программно-технических решений для повышения устойчивости функционирования задачи АДВ: организация функционирования дублированного ПТК АДВ; непрерывный контроль и диагностика; контроль исправности цепей управления выходными реле (включая контакты этих реле); специальные алгоритмы достоверизации информации; отображение состояния объекта, выполняемых команд и истории развития контролируемых процессов (мониторинг).

11. Предложены и реализованы новые алгоритмы функционирования и структуры программно-технических средств пусковых и исполнительных устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) на примере задач устройств противоаварийной автоматики воздушной линии (ПА ВЛ), которые определяют следующие функции: фиксация отключения линии (ФОЛ); фиксация перегрузки линии или группы линий (ФП); автоматическая ликвидация асинхронного режима (АЛАР); автоматическое ограничение повышения напряжения (АОПН), а также фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Моногрфии и книги

1. **Любарский Д.Р.** Программно-технические средства противоаварийного управления локального уровня. – М.: Энергоатомиздат. - 2006 - 120с. (монография).

### Научные статьи и доклады, опубликованные в изданиях по списку ВАК

2. **Любарский Д.Р.** Проблемы совершенствования средств противоаварийной автоматики локального уровня электроэнергетических систем//Электрические станции. - 2006, №9 , - с. 66-73.

3. **Любарский Д.Р.** Алгоритмы и технические средства устройств противоаварийной автоматики локального уровня// Изв. Вузов. Сев.-Кав. регион. Техн. науки. - 2006- Приложение к №2.- с.63-80.

4. **Любарский Д.Р.** Принципы функционирования программно-технических средств противоаварийного управления в энергетических системах//Энергосбережение и водоподготовка. - 2006, №5 , - с. 47-52.

5. **Программно**-технический комплекс автоматической дозировки управляющих воздействий энергосистем/Любарский Д.Р., Белотелов А.К., Россовский Е.Л. и др.//Электрические станции. – 1997, №10, - с.18-28.

6. **Алгоритмы** функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи/Любарский Д.Р., Белотелов А.К., Саухатас А.-С.С. и др. //Электрические станции. - 1997, № 12, - с.7- 12.

7. **Акинин А.А., Иванов И.А, Любарский Д.Р.** Микропроцессорное устройство автоматики ограничения повышения напряжения с контролем ресурса оборудования // Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 1, - с. 92-96.

8. **Алгоритмы** оценки тяжести короткого замыкания для реализации устройств противоаварийной автоматики энергосистем/Мисриханов М.Ш., Дмитриев К.С., Любарский Д.Р. и др.//Вестник ИГЭУ. – 2004 – Вып. 4, - с.72-79.

9. **Комплекс** измерений электрических величин для аппаратуры управления и регулирования мощностью Выборгского преобразовательного комплекса/ Россовский Е.Л., Любарский Д.Р., Косолапов А.М. и др.//Вестник ИГЭУ. – 2004 - Вып. 4, - с.80-86.

10. **Комплекс** противоаварийной автоматики повышенной надежности для автоматического предотвращения нарушения устойчивости/Мисриханов М.Ш., Россовский Е.Л., Любарский Д.Р. и др.//Вестник ИГЭУ. – 2004 -Вып. 5, - с. 72-78.

11. **Программно**-технические средства автоматики ограничения повышения напряжения/Акинин А.А., Иванов И.А., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л. //Вестник ИГЭУ. – 2004 - Вып. 5, - с.62-71.

12. **Мисриханов М.Ш., Саухатас А.С., Любарский Д.Р.** Определение вида повреждения и поврежденных фаз//Вестник ИГЭУ. – 2006 – Вып. 4, - с.61-65.

**Публикации в других изданиях**

13. **Саухатас А.С., Любарский Д.Р., Данилова М.А.** Распознавание вида повреждения и поврежденных фаз // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 6 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина – М.: Энергоатомиздат, 2003 - с.422-429.

14. **Саухатас А.С., Любарский Д.Р., Лещенко С.Н.** Программно-технические средства противоаварийного управления энергосистем Балтии // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 6 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина – М.: Энергоатомиздат, 2003 -с. 416-422.

15. **Микропроцессорные** средства противоаварийной автоматики локального уровня/ Мисриханов М.Ш., Иванов И.А, Любарский Д.Р. и др.//Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 7 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина – М.: Энергоатомиздат, 2004 - с. 436-444.

16. **Опыт** эксплуатации микропроцессорных индикаторов и цифровых регистраторов для задач определения места повреждения на линиях электропередачи/ Саухатас А.С., Мисриханов М.Ш., Иванов И.А., Любарский Д.Р., Панасюк И. Д., Степаньян С.Ю., Ясько Д.В. //Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 7 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина – М.: Энергоатомиздат, 2004 - с. 365-375.

17. **Мисриханов М.Ш., Дмитриев К. С., Любарский Д.Р.** Критерии оценки тяжести короткого замыкания для выбора управляющих воздействий противоаварийной автоматики по условиям динамической устойчивости энергосистем //Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 7 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина – М.: Энергоатомиздат, 2004 - с. 444-454.

18. **Мисриханов М.Ш., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л.** Системы визуализации и анализа регистрируемых процессов // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 7 /Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина –М.: Энергоатомиздат, 2004 - с. 454-460.

19. **Карцев В.Л., Любарский Д.Р.** Транзисторные реле сопротивления со сложными характеристиками //Тр. ин-та «Энергосетьпроект». - вып. 7. - М.: Энергия, 1976. - с. 52-62.

20. **Карцев В.Л., Любарский Д.Р.** Реле сопротивления на основе активных RC-звеньев с применением операционных усилителей //Автоматическое управление энергосистемами в аварийных режимах. - М.: Энергоиздат, 1981. - с. 140-145.

21. **Опыт** применения микропроцессорных индикаторов и цифровых регистраторов для задач определения места повреждения на линиях электропередачи/ Коробейников А.Б., Иванов И.А., Любарский Д.Р., Панасюк И.Д., Саухатас А.-С.С., Семергей Н.В., Степаньян Ю.А.//Сб. докладов Научно-практической конференции, посвященной 70-летию Отделения релейной защиты, автоматики, устой-

чивости и моделирования (ОРЗАУМ) Института «Энергосетьпроект». – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – с. 217-224.

22. **Программно**-технический комплекс автоматической дозировки управляющих воздействий/ Белотелов А.К., Россовский Е.Л., Любарский Д.Р. и др.//Сб. докладов Научно-практической конференции, посвященной 70-летию Отделения релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования (ОРЗАУМ) Института «Энергосетьпроект». – М.: Изд-во НЦ ЭНАС - 2001. – с. 151-155.

23. **Микропроцессорные** устройства противоаварийной автоматики локального уровня/Ваганов А.Б., Иванов И.А., Любарский Д.Р. и др.//Сб. докладов Научно-практической конференции, посвященной 70-летию Отделения релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования (ОРЗАУМ) Института «Энергосетьпроект». – М.: Изд-во НЦ ЭНАС - 2001. – с. 155-160.

24. **Микропроцессорное** устройство автоматической ликвидации асинхронного режима «АЛАР-М»/ Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Любарский Д.Р. и др.// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы»/Под ред. И.В.Якимца, М.Ш.Мисриханова, В.А.Шуина. – М..: Энергоатомиздат, 2002, с. 350-365.

25. **Комплекс** технических средств повышенной надежности микропроцессорного локального устройства автоматической дозировки управляющих воздействий (КТС ЛАДВ)/ Брухис Г.Л., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л. и др.// Релейная защита и автоматика энергосистем – 96: Сб. докладов научно-технической конференции. - М.: ВВЦ, 1996. - с. 41-43.

26. **Программно**-технический комплекс автоматизации управления технологическими процессами в электроэнергетике «Венец»/ Побожей А.С., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л. и др.// Релейная защита и автоматика энергосистем – 96: Сб. докладов научно-технической конференции. - М.: ВВЦ, 1996.- с. 110-113.

27. **Микропроцессорные** устройства противоаварийной автоматики локального уровня/ Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Любарский Д.Р. и др.//Релейная защита и автоматика энергосистем 2000: Сб. докладов XIV научно-технической конференции. – М.: ВВЦ, 2000. - с.138-139.

28. **Иванов И.А., Любарский Д.Р., Платов К.М.** Микропроцессорные индикаторы расстояния типа «МИР»//Релейная защита и автоматика энергосистем 2002: Сб. докладов XV научно-технической конференции. – М.: ВВЦ, 2002. - с.104-106.

29. **Косолапов А.М., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л.** Программно-технические средства автоматической дозировки управляющих воздействий энергосистем// Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы Ш Междунар. Науч.-практ. Конф., Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003. – Ч. 2 – с. 35 – 40.

30. **Акинин А.А., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л.** Средства ввода и преобразования электрических величин для микропроцессорных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем// Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы Ш Междунар. Науч.-практ. Конф., Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003. – Ч. 2 – с. 46 – 50.

31. **Running** fail-safe software and hardware tools for the instability prevention automation complex/ I. Gluskin, K. Dmitriev, D. Lubarsky a.a.//Techniques for maintaining system integrity and security during large disturbances-System Protection Schemes: 41st CIGRE Session, SC B5 «Protection and Automation», 2006 (http://www.cigre.org).

32. **Акинин А.А., Любарский Д.Р., Россовский Е.Л.** Программно-технические средства формирования технологических параметров для микропроцессорных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем//Технічна електродінамка: Тематичний випуск «Проблемы сучасної

електротехнікі», частина 3, Національна академія наук Украіни, Киів, 2004. - с. 24 – 27.

33. **Дмитриев К.С., Любарский Д.Р.** Оценка тяжести короткого замыкания для выбора управляющих воздействий противоаварийной автоматики по условиям динамической устойчивости энергосистем//Технічна електродінамка: Тематичний випуск «Проблемы сучасноі электротехнікі», частина 5, Національна академія наук Украіни, Киів, 2004. - с. 15 – 20.

34. **Любарский Д.Р.** Схемы сравнения фаз для быстродействующих дистанционных органов//Изв. АН ЛССР. Серия физ. и техн. наук. – 1980 - №2. - с. 97-104.

35. **Любарский Д.Р.** Структура построения дистанционных органов на базе активных RC-звеньев//Изв. АН ЛССР. Серия физ. и техн. наук. – 1980 - №5. - с. 114-120.

36. **Lyubarsky D.** Software-technikal means of automatic prevention of stability of parallel work// POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING: Scientific Proceedings of Riga Technical University, s. 4, 9 s, Riga, 2003. - s. 190-195.

37. **Akinin A. Lubarsky D. Rossovsky E.** Input and transformation of electric values for microprocessor devices of relay protection and emergency automatics of power supply systems// POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING: Scientific Proceedings of Riga Technical University, s. 4, 9 s, Riga, 2003. - s. 185-189.

38. **Sauhats A., Leshcenko S., Ljubarskij D.** Mikroprocessor based terminal of anti-emergency complex for the Baltic states electric power systems// POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING: Scientific Proceedings of Riga Technical University, s. 4, 9 s, Riga, 2003. - s. 23-29.

39. **Sauhats A., Vasiljev A., Ljubarskij D.** Power transformers adaptive automation// POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING: Scientific Proceedings of Riga Technical University, s. 4, 9 s, Riga, 2003. - s. 55-61.

40. **Адаптивная** релейная защита объектов 500-750 кВ/ Рудман А.А., Рибель Н.Е., Любарский Д.Р. и др.//Программируемые устройства релейной защиты и автоматики энергосистем: Тезисы докладов республиканского научно-технического семинара - Рига, 1986. - с. 9-11.

41. Предварительные итоги разработки многофункциональных микропроцессорных устройств противоаварийной автоматики/ Брухис Г.Л., Иофьев Б.И., Любарский Д.Р. и др.// Опыт разработки, внедрения и эксплуатации устройств защиты и автоматики на микроэлектронной основе с использованием микропроцессорной техники: Сб. докладов научно-технической конференции. - М.: Союзтехэнерго - 1989 г., с. 47-50.

42. **А.с. 480134 (СССР).** Реле сопротивления/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1975, №29.

43. **А.с. 489177 (СССР).** Реле сопротивления/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1975, №39.

44. **А.с. 456337 (СССР).** Устройство сравнения по фазе двух электрических величин/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р.. – Опубл. в Б.И., 1976, №1.

45. **А.с. 503186 (СССР).** Фазосравнивающее устройство/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1976, №6.

46. **А.с. 525226 (СССР).** Устройство сравнения по фазе двух электрических величин/ Лысенко Е.В., Любарский Д.Р.. – Опубл. в Б.И., 1976, №30.

47. **А.с. 526981 (СССР).** Измерительный орган дистанционной защиты/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1976, №32.

48. **А.с. 570951 (СССР).** Устройство сравнения фаз двух электрических величин/ Карцев В.Л., Лысенко Е.В., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1977, №32.

49. **А.с. 558347 (СССР).** Реле сопротивления с комбинированной характеристикой в виде выпуклого многоугольника/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1977, №18.

50. **А.с. 817844 (СССР).** Пусковой орган блокировки при качаниях/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1981, №12.

51. **А.с. 902141 (СССР).** Дистанционное реле/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1982, №4.

52. **А.с. 930717 (СССР).** Устройство тестового контроля/ Карцев В.Л., Любарский Д.Р., Мусатова Е.И. – Опубл. в Б.И., 1982, №19.

53. **А.с. 1022253 (СССР).** Фильтр симметричных составляющих/ Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1983, №21.

54. **А.с. 1108998 (СССР).** Устройство для резервной релейной защиты присоединений энергосистемы/ Любарский Д.Р., Молчанов В.В., Рибель Н.Е. и др., 1984.

55. **А.с. 1148071 (СССР).** Устройство выбора поврежденной фазы для защиты воздушной линии электропередачи/ Ермоленко В.М., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1985, №12.

56. **А.с. 1192575 (СССР).** Устройство для регулирования напряжения в линии электропередачи/Любарский Д.Р., Лысков Ю.И., Рибель Н.Е. и др. – 1985.

57. **А.с. 1358718 (СССР).** Устройство для регулирования напряжения в линии электропередачи/ Авдеева В.В., …Любарский Д.Р., Лысков Ю.И., …Рибель Н.Е. и др. – 1985.

58. **А.с. 1229896 (СССР).** Устройство выбора поврежденной фазы для защиты воздушной линии электропередачи/ Ермоленко В.М., Любарский Д.Р., Боровова Е.И. – Опубл. в Б.И., 1986, №17.

59. **А.с. 1252858 (СССР).** Реле направления мощности/ Любарский Д.Р., Плещенко И.И. – Опубл. в Б.И., 1986, №31.

60. **А.с. 1272391 (СССР).** Орган управления передатчиком высокочастотной дифференциально-фазной защиты/ Айрапетов Ю.Г., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1986, №43.

61. **А.с. 1374324 (СССР).** Устройство выбора поврежденных фаз в трехфазной электрической сети переменного тока/ Петров С.Я., Любарский Д.Р. – Опубл. в Б.И., 1988, №6.

62. **А.с. 1626174 (СССР).** Способ определения частоты синусоидального сигнала/ Саухатас А.-С.С., Любарский Д.Р., Труфанов А.В. – Опубл. в Б.И., 1991, №5.

63. **Патент №2002352 (РФ).** Устройство прекращения асинхронного хода/ Розенблюм Ф.М., Любарский Д.Р., Брухис Г.Л., Бирюкова С.А. и др. – Зарегистр. в Госреестре изобретений Зарегистр. в Госреестре изобретений 30.10.1993г.