

На правах рукописи



Федосов Денис Сергеевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ И
АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
ПРОМЫШЛЕННОЙ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ ИСКАЖЕНИЙ
ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Акционерном обществе «Россети Научно-технический центр», г. Москва.

Научный консультант:

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Официальные оппоненты:

Гвоздев Дмитрий Борисович, доктор технических наук, доцент, генеральный директор Филиала Публичного акционерного общества «Россети» – Магистральные электрические сети Центра, г. Москва;

Паздерин Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

Сацук Евгений Иванович, доктор технических наук, доцент, начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики Акционерного общества «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина**», г. Иваново.

Защита состоится «09» декабря 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 75.1.066.01, созданного на базе Акционерного общества «Россети Научно-технический центр» (АО «Россети НТЦ»), по адресу: 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж 3, зал НТС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «Россети НТЦ», URL: <https://ntc-power.ru/dissertatsionnyy-sovet/>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 75.1.066.1,
доктор технических наук, доцент



Хренников
Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные электротехнические комплексы промышленной нагрузки и транспорта напряжением 6-220 кВ функционируют в условиях систематической несинусоидальности, несимметрии и стохастичности токов и напряжений вследствие широкого применения силовой электроники, дуговых печей, электролизных установок и иных нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок. В результате в узлах промышленной нагрузки (УПН) формируются устойчивые искажения первичных электрических сигналов, систематически нарушающие требования ГОСТ 32144-2013. Под искажениями токов и напряжений в работе понимаются несинусоидальность, несимметрия трёхфазной системы и искажения амплитуды (колебания и отклонения) сигналов.

Принципиальная особенность таких узлов состоит в том, что промышленные потребители одновременно выступают в двух противоположных ролях: они являются *источниками* искажений токов и напряжений и в то же время *объектами* воздействия этих искажений через подсистему защиты и автоматики, обеспечивающую их бесперебойную работу. В каждом конкретном УПН сочетание типов нагрузки, уровня искажений и установленных устройств защиты и автоматики уникально, что делает невозможным применение универсальных типовых решений без предварительной диагностики. Именно с этих позиций (потребитель как одновременно источник и объект влияния искажений) проблема устойчивости функционирования защиты и автоматики в УПН в научной литературе до настоящего времени системно не рассматривалась. Существенно и то, что источниками искажений могут выступать не только традиционные нелинейные и несимметричные промышленные электроприёмники, но и активно вводимые в эксплуатацию объекты распределённой генерации (РГ) – фотоэлектрические станции, ветровые электростанции, а также газотурбинные установки инверторного включения.

Повышенная фоновая несимметрия снижает чувствительность защит к несимметричным коротким замыканиям (КЗ), высшие гармоники (ВГ) искажают сигналы во время переходных процессов при КЗ и провоцируют излишние срабатывания продольной дифференциальной защиты (ПДЗ) и других защит, а насыщение трансформаторов тока (ТТ) при внешних КЗ вызывает неселективные отключения. Тем самым искажения нормального режима непосредственно определяют устойчивость функционирования защиты и автоматики в аварийных режимах. Также регулярное воздействие несинусоидальности и несимметрии сокращает срок службы магнитных систем силовых трансформаторов (СТ) на питающих подстанциях (ПС) сетевых компаний, что формирует самостоятельную экономическую мотивацию для сетевых организаций к применению фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) и участию в мероприятиях по снижению искажений, а не только к переадресации ответственности на потребителя.

Существующая нормативно-техническая документация (НТД) в области защиты и автоматики и выпускаемые устройства ориентированы преимущественно на сети 110 кВ и магистральные сети Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) напряжением 220 кВ и выше. Первые находятся, как правило, в оперативном подчинении ПАО «Россети» (его дочерних и филиальных структур) и центров управления сетями иных сетевых организаций; вторые – в оперативном управлении или ведении диспетчерских центров АО «СО ЕЭС». Единственным исключением, для которого установлены отраслевые требования к защите и автоматике с учётом специфики нагрузки, является электрифицированный железнодорожный транспорт. Для иных УПН единые отраслевые требования отсутствуют. В условиях частичной передачи ответственности за искажения напряжения на потребителей (приказ Минэнерго № 690 от 28.08.2023 г. и др.) это создаёт риски повреждения оборудования и технологических сбоев.

Значительный вклад в решение вопросов, входящих в предмет исследования данной работы, внесли учёные в следующих направлениях. ***Устойчивость и надёжность функционирования защиты и автоматики*** исследовалась в работах Арцишевского Я.Л., Атабекова Г.И., Багинского Л.В., Вавина Н.В., Гельфанда Я.С., Гвоздева Д.Б., Дмитренко А.М., Дроздова А.Д., Зейлидзона Е.Д., Куликова А.Л., Лачугина В.Ф., Лямеца Ю.Я., Мокеева А.В., Нагая В.И., Нудельмана Г.С., Осинцева А.А., Папкова Б.В., Романюка Ф.А., Сацука Е.И., Смирнова Э.П., Фабриканта В.Л., Федосеева А.М., Фигурнова Е.П., Чернобровова Н.В., Шабада М.А., Шалина А.И., Якоба Д., а также зарубежных учёных Anderson P.M., Blackburn J.L., Crossley P.A., Domin T.J., Elmore W.A., Guzmán A., Horowitz S.H., Kasztenny B., Novosel D., Phadke A.G., Rockefeller G.D., Sachdev M.S., Skendzic V., Thorp J.S., Ziegler G. и другими. ***Искажения токов и напряжений в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий, свойства нагрузок УПН и разработка мероприятий по снижению искажений*** исследовались Асташевым М.Г., Булатовым Ю.Н., Бутыриным П.А., Вагиным Г.Я., Висящевым А.Н., Воротничким В.Э., Горюновым В.Н., Грачевой Е.И., Добрусиным Л.А., Довгуном В.П., Железко Ю.С., Жежеленко И.В., Закарюкиным В.П., Илюшиным П.В., Коверниковой Л.И., Корниловым Г.П., Красильниковой Т.Г., Крюковым А.В., Куликовым А.Л., Куренным Э.Г., Лоскутовым А.Б., Нагаем В.И., Наумовым И.В., Пантелеевым В.И., Панфиловым Д.И., Савиной Н.В., Севостьяновым А.А., Смирновым С.С., Сосниной Е.Н., Сусловым К.В., Тигунцевым С.Г., Тульским В.Н., Федотовым А.И., Шидловским А.К., а также Akagi H., Arrillaga J., Blaabjerg F., Bollen M.H.J., Dugan R.C., Emanuel A.E., Fuchs E.F., Grady W.M., Guerrero J.M., Heydt G.T., Masoum M.A.S., Peng F.Z., Ribeiro P.F., Watson N.R., Xu W. и другими. ***Способы определения места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП)*** разрабатывались и совершенствовались Айзенфельдом А.И., Антоновым В.И., Аржанниковым Е.А., Арцишевским Я.Л., Булычевым А.В., Вагаповым Г.В., Висящевым А.Н., Дони Н.А., Ефремовым В.А., Илюшиным П.В., Козловым В.Н., Куликовым А.Л., Лачугиным В.Ф., Лоскутовым А.А., Лямецем Ю.Я., Мисрихановым М.Ш., Наумовым В.А., Никитиным К.И., Нудельманом Г.С.,

Осокиным В.Л., Панфиловым Д.И., Петровым В.С., Подшивалиным А.Н., Романюком Ф.А., Тигунцевым С.Г., Федотовым А.И., Шалытом Г.М., Шуиным В.А., а также Girgis A.A., Guzmán A., Izykowski J., Johns A.T., Kasztenny B., Kezunovic M., Liao Y., Mynam M.V., Novosel D., Radojević Z., Rosolowski E., Saha M.M., Schweitzer E.O., Takagi T., Terzija V. и другими. ***Совершенствование функционирования защиты и автоматики, в том числе в условиях насыщения ТТ и иных искажений сигналов***, исследовалось Андреевым М.В., Антоновым В.И., Арцишевским Я.Л., Боровиковым Ю.С., Булатовым Ю.Н., Булычевым А.В., Вайнштейном Р.А., Ваниным В.К., Гвоздевым Д.Б., Глазыриным В.Е., Дегтярёвым А.А., Дони Н.А., Дроздовым А.Д., Ефремовым В.А., Засыпкиным А.С., Ивановым С.В., Илюшиным П.В., Клецелем М.Я., Климовой Т.Г., Козловым В.Н., Красильниковой Т.Г., Кужековым С.Л., Куликовым А.Л., Лачугиным В.Ф., Лебедевым В.Д., Лоскутовым А.А., Лоскутовым А.Б., Любарским Д.Р., Лямецем Ю.Я., Мокеевым А.В., Моржиным Ю.И., Нагаем В.И., Наумовым В.А., Никитиным К.И., Новашем И.В., Новожиловым А.Н., Нудельманом Г.С., Осинцевым А.А., Паздериним А.В., Подшивалиным А.Н., Полищуком В.И., Поповым М.Г., Романюком Ф.А., Рубаном Н.Ю., Румянцевым В.Ю., Рябченко В.Н., Сарры С.В., Сацуком Е.И., Фишовым А.Г., Хренниковым А.Ю., Шабаром М.А., Шалиным А.И., Шуиным В.А., а также Abur A., Benmouyal G., Kang Y.C., Kim C.-H., Phadke A.G., Popov M., Rebizant W., Sidhu T.S., Terzija V., Thorp J.S., Wiszniewski A., Zimmerman K., Zocholl S.E. и другими.

Вместе с тем существующие подходы остаются фрагментированными: методы мониторинга искажений, алгоритмы защиты и автоматики и способы ОМП разрабатываются изолированно, без системного подхода к электротехническому комплексу УПН как единому целому. Отсутствует корректная методика количественного разграничения вкладов потребителей в искажения напряжения без специальных коммутаций и без априорной информации. Не разработаны статистические критерии устойчивости защиты и автоматики применительно к стохастическим условиям УПН – коэффициент чувствительности как детерминированный показатель не позволяет в полной мере оценить вероятность ложного срабатывания при интенсивных фоновых искажениях и искажениях сигналов при внешних КЗ. Не учитывается активно-индуктивный характер переходного сопротивления при КЗ на воздушных линиях (ВЛ) с грозозащитными тросами (ГТ). Метод стохастической коррекции (дизеринга) в сочетании с малоразрядным квантованием ранее не применялся для получения информационных сигналов в задачах защиты и автоматики. Наконец, отсутствует концепция интегрированного комплекса, в котором результаты диагностики нормального режима служат основой для адаптации алгоритмов защиты в аварийных режимах.

Исследования выполнены по результатам 38 хоздоговорных и научных работ с промышленными и электросетевыми организациями, анализа более 20 объектов с проблемами искажений токов и напряжений – в том числе в слабосвязанных сетях Восточной Сибири и Дальнего Востока, на ГЭС, ТЭЦ и ПС промышленных районов, на тяговых ПС ОАО «РЖД» транзита Тайшет-

Тулун и Байкало-Амурской магистрали (БАМ), нефтеперекачивающих станциях (НПС) ООО «Транснефть-Восток», предприятиях алюминиевой и авиационной промышленности и других объектах 0,4-220 кВ, что подтверждает масштаб и воспроизводимость проблемы.

В этих условиях **актуальность** настоящего исследования обусловлена необходимостью обеспечения устойчивости функционирования защиты и автоматики УПН посредством:

- разработки интегрированных методов и средств, обеспечивающих устойчивость защиты и автоматики к искажениям сигналов в нормальных и аварийных режимах;
- создания диагностической подсистемы для количественной оценки вклада потребителей в искажения напряжения и адаптации алгоритмов защиты и автоматики комплекса, востребованной как промышленными потребителями, так и сетевыми организациями, заинтересованными в снижении темпов деградации силового оборудования;
- применения современных методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) для повышения надёжности принимаемых решений;
- объединения компонентов в единый интеллектуальный комплекс, совместимый с архитектурой цифровых ПС.

В работе защита и автоматика рассматриваются, главным образом, на примерах ПДЗ, дистанционной защиты (ДЗ), токовой защиты обратной последовательности (ТЗОП), а также алгоритмов ОМП на ЛЭП, которые по классификации ГОСТ Р 59909-2021 также относятся к защите и автоматике. Однако предлагаемые в работе методы и полученные результаты могут быть применены и к другим видам защиты и автоматики, в том числе к измерительным и пусковым органам противоаварийной автоматики и режимной автоматики, реагирующим на аналогичные виды искажений первичных сигналов.

Объект исследования – электротехнические комплексы УПН 6-220 кВ, содержащие централизованные источники питания, РГ, нелинейные нагрузки, измерительные преобразователи и средства защиты и автоматики.

Предмет исследования – методы и средства обеспечения устойчивости функционирования устройств и систем защиты и автоматики в УПН в условиях искажений токов и напряжений, вызванных нелинейностью, несимметрией и переходными процессами.

Цель работы заключается в повышении устойчивости функционирования средств защиты и автоматики электротехнических комплексов промышленной нагрузки при искажениях токов и напряжений за счёт интеграции мониторинга искажений токов и напряжений, адаптивных и робастных алгоритмов защиты и устойчивых методов ОМП.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Разработать корректную методику количественной оценки влияния потребителей на искажения напряжения (на основе автономного напряжения и коэффициента влияния) для реализации организационно-

технических мероприятий по снижению искажений с целью устойчивого функционирования защиты и автоматики в УПН.

2. Разработать критерии устойчивости защиты и автоматики и обосновать необходимость их применения в СЭС промышленных предприятий, где отсутствуют единые отраслевые требования.
3. Обеспечить устойчивость функционирования подсистемы защиты в аварийных режимах посредством создания усовершенствованных алгоритмов защит, реализующих адаптивный (коррекция уставок в условиях искажений) и робастный (обеспечение нечувствительности к искажениям напряжений и токов) подходы, разработки методов ЦОС для повышения точности измерительных органов в условиях искажений.
4. Повысить точность и устойчивость ОМП на ЛЭП за счёт учёта активно-индуктивного характера переходного сопротивления в месте повреждения при разработке новых алгоритмов.
5. Разработать и верифицировать аппаратный прототип интегрированного интеллектуального электротехнического комплекса, реализующего предложенные методы в единой программно-аппаратной архитектуре.

Методология и методы исследования. Исследование выполнено на основе системного подхода, объединяющего теоретический анализ, методы теории управления, имитационное моделирование компонентов электротехнического комплекса и экспериментальную верификацию. Использованы методы теории цепей, релейной защиты и автоматики (РЗА), математической статистики (Монте-Карло, байесовская оптимизация) и ЦОС. Моделирование выполнено в средах MATLAB и LabVIEW. Экспериментальная верификация проведена на основе обработки натурных измерений на реальных объектах (более 20 предприятий), испытаний аппаратного прототипа на платформе National Instruments (NI) CompactRIO с использованием комплексов РЕТОМ-61 и РЕТОМ-51.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложена концепция электротехнического комплекса, в котором диагностика источников искажений токов и напряжений в нормальных режимах используется как основа для адаптивной настройки алгоритмов защиты и автоматики в аварийных режимах, что обеспечивает устойчивое функционирование комплекса в условиях нелинейности, несимметрии и переходных процессов в СЭС промышленных предприятий.
2. Разработан метод выявления источников искажений несимметрии и несинусоидальности напряжений для количественной оценки влияния потребителей на искажение напряжения, основанный на понятиях автономного напряжения искажения и коэффициента влияния, отличающийся корректным учетом неаддитивности напряжения искажения и позволяющий отказаться от некорректного «долевого вклада», широко применяемого в практике.
3. Разработана система вероятностных критериев устойчивости защиты, основанная на матрице условных вероятностей, ROC-характеристике и

критерии Неймана-Пирсона, позволяющая количественно оценивать и сравнивать алгоритмы защиты в стохастических условиях искажений сигналов в УПН.

4. Введено понятие устойчивости алгоритмов ОМП как вероятности непревышения нормированного значения ошибки расчёта расстояния в условиях стохастических искажений токов и напряжений в УПН, разработана система критериев устойчивости ОМП на ЛЭП.
5. Создана усовершенствованная ПДЗ, сочетающая процентное торможение, блокировку по второй гармонике, дифференциально-фазный орган (ДФО) и блокировку по апериодической составляющей (АС) дифференциального тока, отличающаяся обеспечением абсолютной селективности при внешних КЗ и бросках тока намагничивания (БТН) даже в условиях глубокого насыщения ТТ.
6. Предложен способ восстановления формы тока при глубоком насыщении ТТ, основанный на анализе первых отсчётов до наступления насыщения и отличающийся высоким быстродействием при восстановлении периодической составляющей аварийного тока без использования априорной информации о параметрах ТТ.
7. Впервые применён метод стохастической коррекции (дизеринга) в сочетании с малоразрядным квантованием в задачах защиты и автоматики, что позволило существенно повысить точность оценки параметров искажённых сигналов напряжений и токов, устойчивость функционирования измерительных органов и алгоритмов в условиях отклонений частоты и наличия интергармоник.
8. Разработаны новые методы одностороннего ОМП ЛЭП, отличающиеся учетом активно-индуктивного характера переходного сопротивления в месте КЗ и влияние ГТ, что позволило обеспечить точность, сравнимую с двухсторонними методами ОМП.

Теоретическая значимость. Работа вносит вклад в развитие общей теории электротехнических комплексов:

- разработана корректная методика количественной оценки влияния потребителей на качество электроэнергии (КЭ), основанная на понятиях автономного напряжения и коэффициента влияния;
- предложены новые принципы устойчивой ЦОС напряжений и токов, включая применение стохастической коррекции (дизеринга) для повышения точности измерений в условиях несинусоидальности и отклонений частоты;
- развиты теоретические положения алгоритмов ОМП ЛЭП, обеспечивающих минимизацию среднего риска ошибки расчета расстояния до места повреждения при наличии стохастических искажений и реактивной составляющей переходного сопротивления в месте КЗ;
- обоснованы принципы интеграции диагностики КЭ и адаптивной защиты в единый комплекс.

Практическая значимость. Полученные результаты имеют высокую практическую ценность:

- разработанные алгоритмы восстановления тока при насыщении ТТ и усовершенствованные алгоритмы ПДЗ (с блокировкой по АС и ДФО) исключают ее излишние срабатывания в УПН при внешних КЗ;
- модифицированная ТЗОП обеспечивает повышенную чувствительность и устойчивость в сетях с несимметричными нагрузками;
- предложенный способ оценки вклада потребителей позволяет справедливо распределять ответственность за КЭ и реализовывать организационно-технические мероприятия по его улучшению;
- аппаратный прототип интеллектуального комплекса на платформе ComractRIO верифицирован на реальных электрических нагрузках и совместим с архитектурой цифровых ПС;
- результаты работы используются при проектировании и эксплуатации систем обеспечения КЭ, защиты и ОМП ЛЭП на предприятиях Иркутской области и за её пределами (акты внедрения от более чем 10 организаций).

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция электротехнического комплекса УПН, основанная на принципе двойственной роли потребителя как одновременного источника искажений токов и напряжений и объекта воздействия этих искажений через подсистему защиты и автоматики.
2. Методы локализации источников искажений синусоидальности и симметрии напряжения в нормальных режимах, основанные на экспериментальной идентификации параметров схем замещения (СЗ) потребителей по естественным изменениям первичных токов и напряжений.
3. Понятия и критерии устойчивости защиты и автоматики в условиях искажения токов и напряжений в УПН.
4. Способы обеспечения устойчивости ПДЗ при глубоком насыщении ТТ с применением восстановления формы вторичного тока и дополнительными блокировками по АС и ДФО.
5. Модифицированные алгоритмы защиты – ПДЗ с комплексной блокировкой, ТЗОП с адаптацией к фоновой несимметрии.
6. Метод стохастической коррекции (дизеринга) в сочетании с малоразрядным квантованием как средство повышения точности цифровой обработки искажённых сигналов для задач защиты и автоматики.
7. Способы повышения точности одностороннего ОМП на ВЛ, основанные на учёте активно-индуктивного характера переходного сопротивления.
8. Прототип многофункционального цифрового устройства, реализующий предложенные методы диагностики и адаптивной защиты, совместимый с архитектурой цифровых ПС и прошедший верификацию в лабораторных условиях с использованием реальных осциллограмм и наборов данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах, в числе которых Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Новосибирск, 2025), Международная научно-техническая конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2025» (Казань, 2025), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2008-2026 гг.); Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи» (Самара, 2011; Екатеринбург, 2012; Новочеркасск, 2013; Самара, 2017; Иркутск, 2019; Красноярск, 2023; Ставрополь, 2024; Иваново, 2026); Международная научно-техническая конференция «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future» (Магдебург – Иркутск, 2012); две Международные научно-технические конференции «The Power Grid of the Future» (Магдебург – Иркутск, 2013); Всероссийская научно-техническая конференция «Контроль, анализ и управление качеством электрической энергии» (Москва, 2014); Международная научно-практическая конференция «Управление качеством электрической энергии» (Москва, 2014); Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Сочи, 2015); Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2015); Всероссийские конференции «Наука. Технологии. Инновации» и «Фундаментальные и прикладные исследования» (Новосибирск, 2016); Международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2016); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017» (Иваново, 2017); Международные молодежные конференции «Relay Protection and Automation» (RPA) (Москва, 2018, 2025); Международная научно-техническая конференция «Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)» (Новосибирск, 2018); Всероссийская научно-практическая конференция «Прикладные исследования в области физики» (Иркутск, 2018, 2023); Международные конференции UralCon (Челябинск, 2019, 2020, 2021, 2025); Всероссийская конференция «Современное российское оборудование для повышения надежности, экономичности и безопасности энергетического комплекса России» (Самара, 2019); Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2021); Международная конференция и выставка «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2021» (Москва, 2021); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов» (Москва, 2022); Международная научно-техническая конференция «Инженерная наука: проблемы, идеи, перспективы (Engineer-2022)» (Пермь, 2022); Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (Чита, 2022); Региональная научно-практическая

конференция «Технико-экономические проблемы развития регионов» (Иркутск, 2022-2025 гг.); Международная научно-практическая конференция «Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов» (Москва, 2023); Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2025).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования нашли практическую реализацию в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039, тема «Методы математического моделирования и управления кибер-физическими энергетическими системами: теория и приложения») и гранта «Интеллектуальные сети (Smart Grid) для эффективной энергетической системы будущего» по постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации» (договор № 11.G34.31.0044), где соискатель участвовал как исполнитель. Научные разработки прошли широкую апробацию на объектах электроснабжения промышленных предприятий и электроэнергетических системах (ЭЭС) Иркутской области, Восточной Сибири и Дальнего Востока в рамках выполнения 38 хоздоговорных и научно-исследовательских работ с промышленными и электросетевыми организациями. В частности, материалы натурных измерений, полученные в ходе работ «Обследование и разработка технических мероприятий по приведению показателей качества электроэнергии в соответствие с ГОСТ 32144-2013 на ПС 110 кВ в транзите Тайшет–Тулун» (АО «Иркутская электросетевая компания», 2016-2017 гг.), «Исследование и разработка мероприятий по улучшению показателей качества электроэнергии в сети 35 кВ, примыкающей к ПС Видим, Шумилово, Прибойная» (АО «Братская электросетевая компания», 2018 г.), «Анализ технических решений по средствам компенсации реактивной мощности на ПС 110 кВ Албазино» (ООО «Премьер-Энерго», 2025 г.), использованы для верификации метода двух измерений, оценки автономного напряжения искажения и расчёта коэффициента влияния потребителей. Эти данные легли в основу обоснования необходимости внедрения механизма стимулирования снижения искажений через штрафные надбавки к тарифу. В 2019-2020 гг. выступал в качестве технического консультанта ООО «ПАРМА» в рамках проекта «Support to the Technical Audit for Relay Protection and Automatic of 110 kV-220 kV Substations in the Power Transmission Grid of Mongolia» при поддержке Министерства энергетики Монголии и Всемирного банка для компании «National Power Transmission Grid» SOSC.

Разработанный аппаратный прототип интеллектуального электротехнического комплекса на платформе NI CompactRIO прошёл испытания с применением комплексов РЕТОМ-51 и РЕТОМ-61 и апробирован на результатах измерений с промышленных объектов, в том числе:

- тяговые ПС ОАО «РЖД» – транзит Тайшет-Тулун, БАМ – и НПС ООО «Транснефть-Восток»;
- электрические станции в узлах промышленных нагрузок (Иркутская ГЭС, Братская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС, Усть-Илимская ТЭЦ и пр.);
- предприятия алюминиевой промышленности Иркутской области;
- иные производственные предприятия (Иркутский авиазавод, Ангарский завод полимеров, Полиметалл, Иркутская нефтяная компания и др.).

По результатам апробации от организаций получены акты о внедрении от АО «Иркутская электросетевая компания», АО «ХОЛДИНГ ЭРСО», ООО «ПАРМА», ООО «ЭН+ Гидро», ООО «Иркутская энергосбытовая компания», ООО «Инженерно-сервисный центр» (ранее – ООО «ИЦ «Иркутскэнерго»), ООО «Технотех», ООО «Премьер-Энерго», ООО «Братское монтажное управление Гидроэлектромонтаж», ЗАО «Электросетьпроект», ООО «Энергосетьпроект Иркутск» и иных организаций, подтверждающие:

- использование методики оценки вклада потребителей в искажения напряжения при анализе жалоб на КЭ;
- применение предложенных алгоритмов ЦОС, усовершенствованных защит и способов ОМП на ВЛ в качестве рекомендаций при разработке микропроцессорных терминалов защиты;
- готовность энергосбытовых компаний к внедрению механизма регулирования искажений напряжения на основе коэффициента влияния.

Кроме того, результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и используются в преподавании дисциплин «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», «Качество электрической энергии», «Релейная защита ЭЭС», «Управление качеством электроэнергии», «Электромагнитная совместимость и кибербезопасность в электроэнергетике», внедрены в учебно-исследовательский процесс и используются в реализации дополнительных образовательных программ Корпоративного учебно-исследовательского центра «ЭН+ ИРНИТУ», а также в диссертационных работах аспирантов (защищена 1 кандидатская диссертация под руководством автора), в выпускных квалификационных работах бакалавров и магистров (в том числе 4 работы, выполненные под руководством автора – призёры Всероссийского конкурса ВКР по электроэнергетической и электротехнической тематикам).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 160 научных работ, в т.ч. 21 – в журналах по списку, рекомендованному ВАК (K1 – 7, K2 – 12, K3 – 2), 13 – в изданиях и материалах конференций Scopus и Web of Science (в том числе в журналах 2 – Q1, 1 – Q2, 1 – Q3, 1 – Q4), 5 учебных пособий. Получено 13 патентов и 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических и имитационных моделей, их адекватностью реальным физическим процессам в СЭС промышленных предприятий, а также сходимостью с результатами исследований других авторов. Теоретические положения обоснованы с

использованием фундаментальных законов электротехники, теории цепей, методов теории вероятностей и математической статистики, а также принципов ЦОС. Результаты моделирования в среде MATLAB Simulink согласуются с данными натурных измерений, выполненных на объектах Иркутской ЭЭС при помощи сертифицированного оборудования («Ресурс-UF2М»), а также с осциллограммами реальных аварийных режимов. Экспериментальная верификация проведена на испытательных комплексах РЕТОМ-61 и РЕТОМ-51 и на промышленных объектах с нелинейными и несимметричными нагрузками.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в постановке научной проблемы, формулировании цели и задач исследования, разработке концепции интегрированного интеллектуального электротехнического комплекса, объединяющего диагностику искажений токов и напряжений, адаптивную защиту и устойчивое ОМП. Полученные в диссертации результаты являются частью инициативных исследований автора, проведенных им лично или с его участием. Автор разработал программные комплексы для анализа режимов ВГ, самостоятельно реализовал имитационные модели в MATLAB Simulink, совместно с программистами создал аппаратные прототипы на платформе CompactRIO в среде LabVIEW, самостоятельно выполнял замеры искажений токов и напряжений на энергетических объектах, провёл верификацию на натурных данных и осциллограммах реальных КЗ. Автор являлся исполнителем и руководителем 38 хоздоговорных работ, в ходе которых были получены исходные данные для верификации методов. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: постановка задачи исследования, обоснование основных гипотез и положений, планирование расчетов, имитационное моделирование, анализ режимов и результатов, предложения по модификации алгоритмов, подготовка обобщений и выводов. Авторские права на изобретения, программы для ЭВМ распределены между авторами поровну.

Соответствие научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по следующим направлениям:

- п. 1 «...анализ системных свойств и связей, ... моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...» – в части разработки методов локализации источников искажений, ЦОС токов и напряжений, имитационного и алгоритмического моделирования режимов промышленных электротехнических комплексов;
- п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» – в части создания усовершенствованных алгоритмов защиты и автоматики, адаптивных к фоновым искажениям, и разработки интегрированного интеллектуального электротехнического комплекса, совместимого с архитектурой цифровой ПС;
- п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных

режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов» – в части исследования функционирования защиты и средств ОМП в условиях нелинейности, несимметрии и переходных процессов, а также разработки методов диагностического анализа искажений токов и напряжений в нормальных и аварийных режимах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 543 наименований и 2 приложений. Полный объём работы – 463 стр. текста, включая текст диссертации 344 стр., список литературы – 73 стр., приложения – 46 стр., 151 рисунок (в т. ч. 56 – в приложениях) и 35 таблиц.

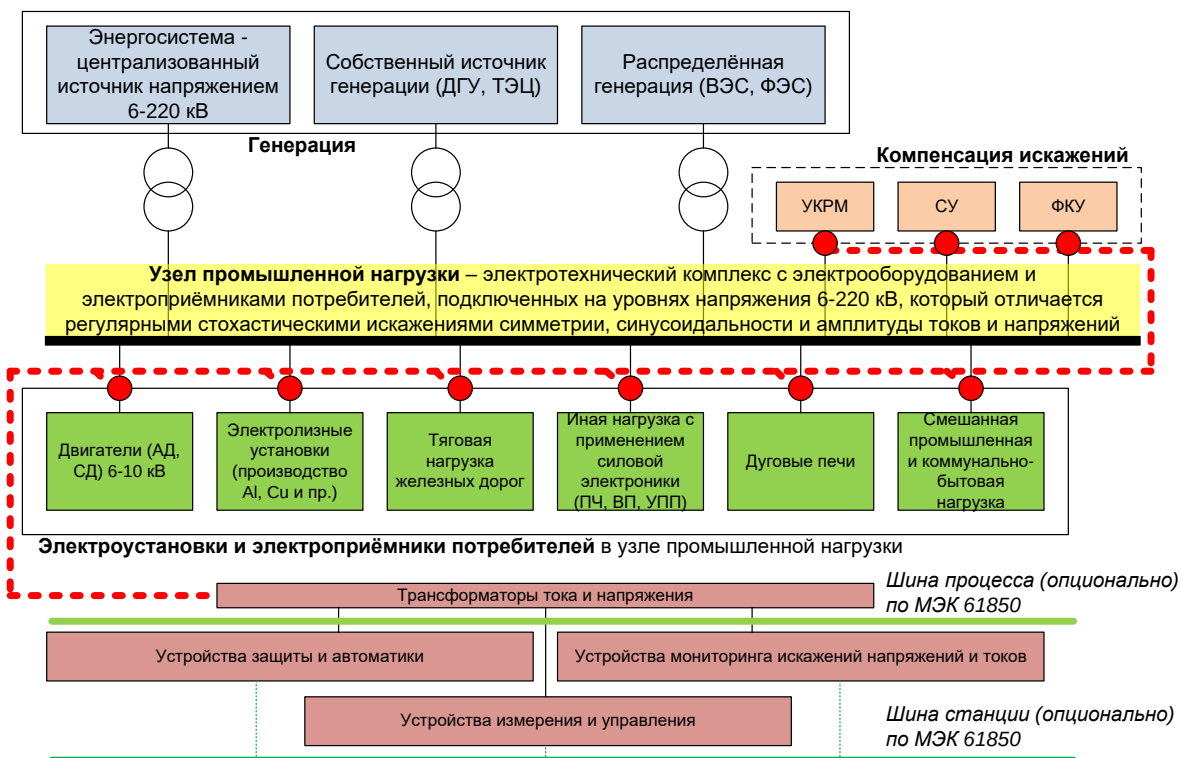
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, охарактеризована степень разработанности темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны реализация и апробация результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано описание объекта исследования и выполнен анализ состояния проблемы обеспечения устойчивости функционирования защиты и автоматики в условиях искажений напряжений и токов в УПН. Электротехнический комплекс, формируемый в УПН и рассматриваемый в работе, представляет собой точку общего присоединения – шины ПС с возможным напряжением от 6 до 220 кВ включительно, к которым подключены:

- источники централизованного питания и/или РГ – зачастую с низким уровнем токов КЗ;
- разнородные промышленные потребители с соответствующими электроустановками и электроприёмниками – асинхронные и синхронные двигатели, электролизные установки металлургических, химических и иных производств, тяговая нагрузка железных дорог, преобразовательное оборудование на базе силовой электроники, дуговые электрические печи и др.;
- устройства компенсации реактивной мощности, ФКУ и симметрирующие устройства.

Все эти электроустановки и электрооборудование вносят систематические стохастические искажения в токи и напряжения в УПН как в нормальном, так и в аварийных режимах. УПН со всеми присоединениями оснащён системой защиты и автоматики: ТТ и трансформаторы напряжения как источники информации об искажённых первичных сигналах, микропроцессорные терминалы РЗА, в том числе устройства ОМП и регистраторы аварийных событий, устройства мониторинга искажений и иные устройства измерения и управления (рисунок 1). Цифровые устройства могут работать автономно либо с объединением через шины процесса и шины станции по протоколу МЭК 61850.



ДГУ – дизель-генераторные установки; ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ВЭС – ветроэлектрическая станция; ФЭС – фотоэлектрическая станция; УКРМ – устройство компенсации реактивной мощности; СУ – симметрирующее устройство; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; АД – асинхронные двигатели; СД – синхронные двигатели; ПЧ – преобразователи частоты; ВП – вентильные преобразователи; УПП – устройства плавного пуска

Рисунок 1 – Структурная схема узла промышленной нагрузки

Принципиальное отличие такого комплекса от сетей и ПС ЕНЭС общего назначения состоит в том, что перечисленные потребители одновременно являются источниками несинусоидальности, несимметрии и флуктуаций напряжений и токов, воздействующих на тот же УПН. Системы защиты и автоматики, разрабатываемые, как правило, под требования НТД для ЕНЭС, не рассчитаны на нормальную работу в условиях искажений измеряемых сигналов в УПН. В связи с этим обеспечение устойчивости функционирования защиты и автоматики в таких условиях является актуальной проблемой.

В диссертации используется трактование устойчивости функционирования защиты в соответствии с подходом А.М. Федосеева, Э.П. Смирнова, Е.Д. Зейлидзона: как свойства между селективностью (высший уровень) и надёжностью (низший уровень), определяющего способность выполнять заданные функции с заданным эффектом при воздействии совокупности неблагоприятных факторов. Устойчивость функционирования понимается как единство чувствительности к внутренним КЗ, отстроенности от внешних КЗ и отстроенности от нормального режима. Однако методы количественных оценок устойчивости защиты и автоматики и критерии её обеспечения в научно-технической литературе разработаны не были. Также устойчивость функционирования защиты и автоматики не рассматривалась применительно к воздействию возможных искажений токов и напряжений,

характерных для условий УПН. Постепенный переход к цифровым устройствам защиты и автоматики усугубляет проблему, так как микропроцессорные устройства более чувствительны к искажениям сигналов по сравнению с аналоговыми. Структурно-логическая постановка проблемы исследования представлена на рисунке 2.

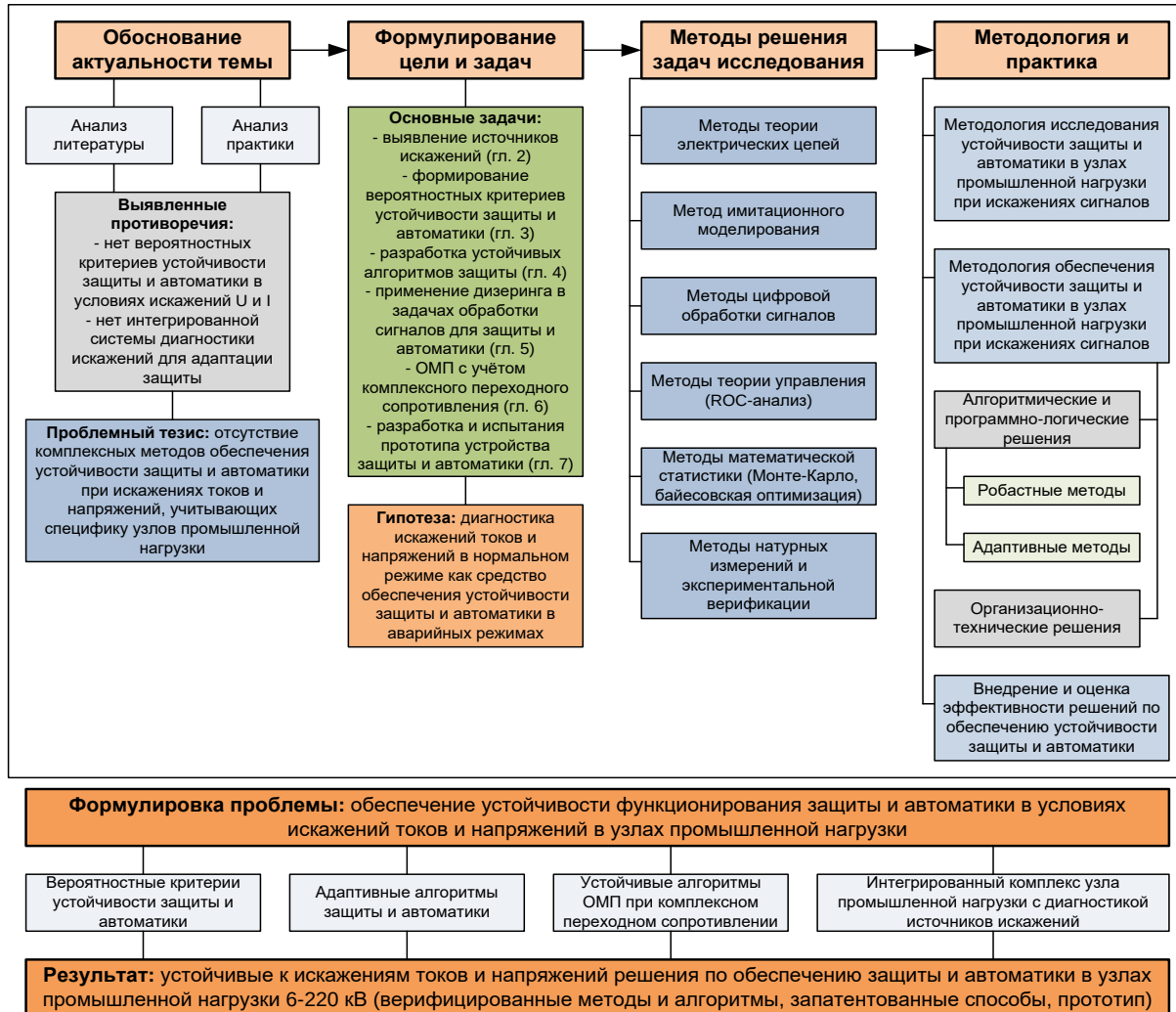


Рисунок 2 – Структурно-логическая постановка проблемы исследования

Анализ состояния проблемы и обзор публикаций охватил 4 тематических направления: устойчивость и надёжность защиты и автоматики; искажения токов и напряжений, свойства нагрузок УПН и разработка мероприятий по снижению искажений; разработка и совершенствование способов ОМП на ЛЭП; совершенствование функционирования защиты и автоматики, в том числе в условиях насыщения ТТ и иных искажений сигналов. На основании обзора выявлен ряд вопросов, не решённых в известной научно-технической литературе: отсутствие корректного метода количественного разделения вкладов потребителей в искажения напряжения в УПН; отсутствие вероятностной системы критериев устойчивости защиты и автоматики в условиях УПН; неучёт активно-индуктивного характера переходного сопротивления при функционировании защиты и ОМП на ЛЭП с ГТ; ограниченное применение альтернативных методов ЦОС к задачам измерения

параметров искаженных напряжений и токов; отсутствие концепции интегрированного комплекса, в котором мониторинг нормального режима служит входными данными для адаптации алгоритмов защиты и автоматики.

Во второй главе разработаны методы выявления источников искажений токов и напряжений в УПН в нормальных режимах. Фоновые искажения синусоидальности и симметрии в нормальном режиме формируют условия, при которых КЗ и ненормальные режимы могут стать трудноразличимыми. Выявление источников искажений является организационно-техническим мероприятием по обеспечению устойчивости защиты и автоматики.

В период 2009-2025 гг. с непосредственным участием автора выполнены натурные измерения на более чем 20 объектах УПН и ЭЭС. Примеры измерений в различных УПН показывают, что коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (ОП) K_{2U} превышает нормативное значение 2% практически на всех ПС тягового транзита (рисунок 3); в ремонтных схемах K_{2U} достигает 15% на стороне 110 кВ (в 7,5 раз выше нормы) и до 27% на стороне 27,5 кВ транзита. На шинах 220 кВ ГЭС, питающей алюминиевый завод, при отключении одного автотрансформатора суммарный коэффициент ВГ напряжения K_U возрастает с 3-4% до 9,4% при норме 2%. На шинах 10 кВ ПС, питающейся по протяжённой ЛЭП 35 кВ от одной из тяговых ПС, зафиксирован уровень K_U до 67% при норме 5% для сети 10 кВ. Такие уровни искажений делают невозможной устойчивую работу защиты и автоматики в УПН.

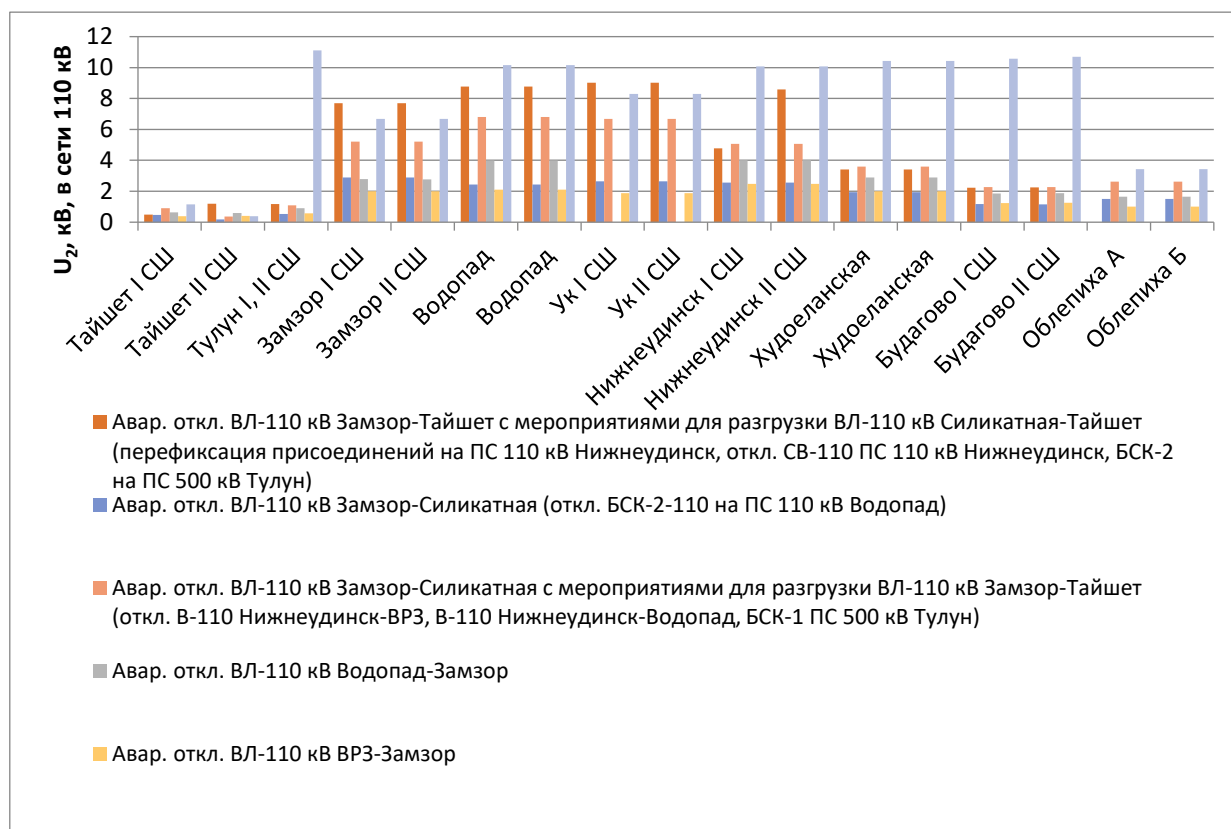


Рисунок 3 – Значения напряжений обратной последовательности в сети 110 кВ в различных режимах тягового транзита

Для разработки метода оценки влияния потребителей на искажение напряжения устранена концептуальная ошибка – применение понятия «долевого вклада» в напряжение. Аналитически доказано и подтверждено числовыми примерами, что напряжение искажения в УПН не обладает свойством аддитивности, поэтому разделение его на доли математически некорректно. Пусть в УПН подключены M потребителей со СЗ в виде активных двухполюсников, состоящих из источников тока искажения $i_{изм,k}$ и проводимости $Y_{изм,k}$, $k = 1, \dots, M$. Напряжение искажения в УПН $\dot{U}_{иск.УПН}$:

$$\dot{U}_{иск.УПН} = \frac{\sum_{k=1}^M i_{изм,k}}{\sum_{k=1}^M Y_{изм,k}}. \quad (1)$$

Поскольку $\dot{U}_{иск.УПН}$ является нелинейной функцией от совокупности $\{i_{изм,k}, Y_{изм,k}\}$, оно не обладает свойством аддитивности, т. е. $\dot{U}_{иск.УПН} \neq \sum_k \dot{U}_{иск,k}^{авт.}$ при произвольных $Y_{изм,k} \neq 0$.

Для определения параметров СЗ применён метод двух измерений. По напряжению $\dot{U}_{иск.УПН}^{(j)}$ и току $i_{T,k}^{(j)}$ потребителя k в двух режимах ($j = 1, 2$) параметры его СЗ определяются из системы:

$$i_{T,k}^{(j)} = i_{изм,k} + Y_{изм,k} \cdot \dot{U}_{иск}^{(j)}, \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

откуда:

$$Y_{изм,k} = \frac{\Delta i_{T,k}}{\Delta \dot{U}_{иск.УПН}}, \quad i_{изм,k} = i_{T,k}^{(j)} - Y_{изм,k} \cdot \dot{U}_{иск.УПН}^{(j)}, \quad (3)$$

где $\Delta i_{T,k} = i_{T,k}^{(2)} - i_{T,k}^{(1)}$ и $\Delta \dot{U}_{иск.УПН} = \dot{U}_{иск.УПН}^{(2)} - \dot{U}_{иск.УПН}^{(1)}$ – разности значений тока и напряжения искажения между двумя измерениями. На основе (3) вычисляется автономное напряжение искажения k -го потребителя $\dot{U}_{авт,k}$ – напряжение, которое создавал бы данный потребитель в УПН в одиночку:

$$\dot{U}_{авт,k} = \frac{i_{изм,k}}{Y_{изм,k}}. \quad (4)$$

Вводится коэффициент влияния $K_{вл,k}$:

$$K_{вл,k} = \frac{|\dot{U}_{авт,k}| - U_{иск,доп}}{U_{иск,доп}}, \quad (5)$$

где $U_{иск,доп}$ – допустимое значение искажения по ГОСТ 32144-2013. Коэффициент $K_{вл,k} > 0$ означает недопустимое влияние потребителя, $K_{вл,k} \leq 0$ – допустимое. Критерий применим к несинусоидальности напряжения (для каждой ВГ) и к несимметрии по ОП. Метод не требует специальных коммутаций и реализуется в виде алгоритма на рисунке 4. Верификация выполнена на 12 типах промышленных нагрузок; погрешность определения параметров СЗ не превышает 7%.

Для предварительной диагностики источников искажений в УПН разработан корреляционный метод экспресс-анализа: рассчитывается коэффициент корреляции R_{UI} между $U_{иск.УПН}$ и $I_{T,k}$

$$R_{UI} = \frac{cov(U,I)}{\sigma_U \cdot \sigma_I} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})(I_i - \bar{I})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}}, \quad (6)$$

где $cov(U, I)$ – выборочная ковариация величин $U_{иск.УПН}$ и $I_{T,k}$, σ_U и σ_I – их выборочные среднеквадратические отклонения; $\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$ и $\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i$ – средние значения выборок величин $U_{иск.УПН}$ и $I_{T,k}$ соответственно. При $|R_{UI}| < 0,6$ потребитель считается потенциально искажающим. Применение метода на данных транзита Тайшет-Тулун (таблица 1) однозначно идентифицировало тяговые ПС ОАО «РЖД» как источники несимметрии ($|R_{UI}| = 0,03 - 0,53$). Для нагрузок АО «Иркутская электросетевая компания» и ООО «Транснефть-Восток» подтверждён неискажающий характер ($|R_{UI}| = 0,65 - 0,99$).

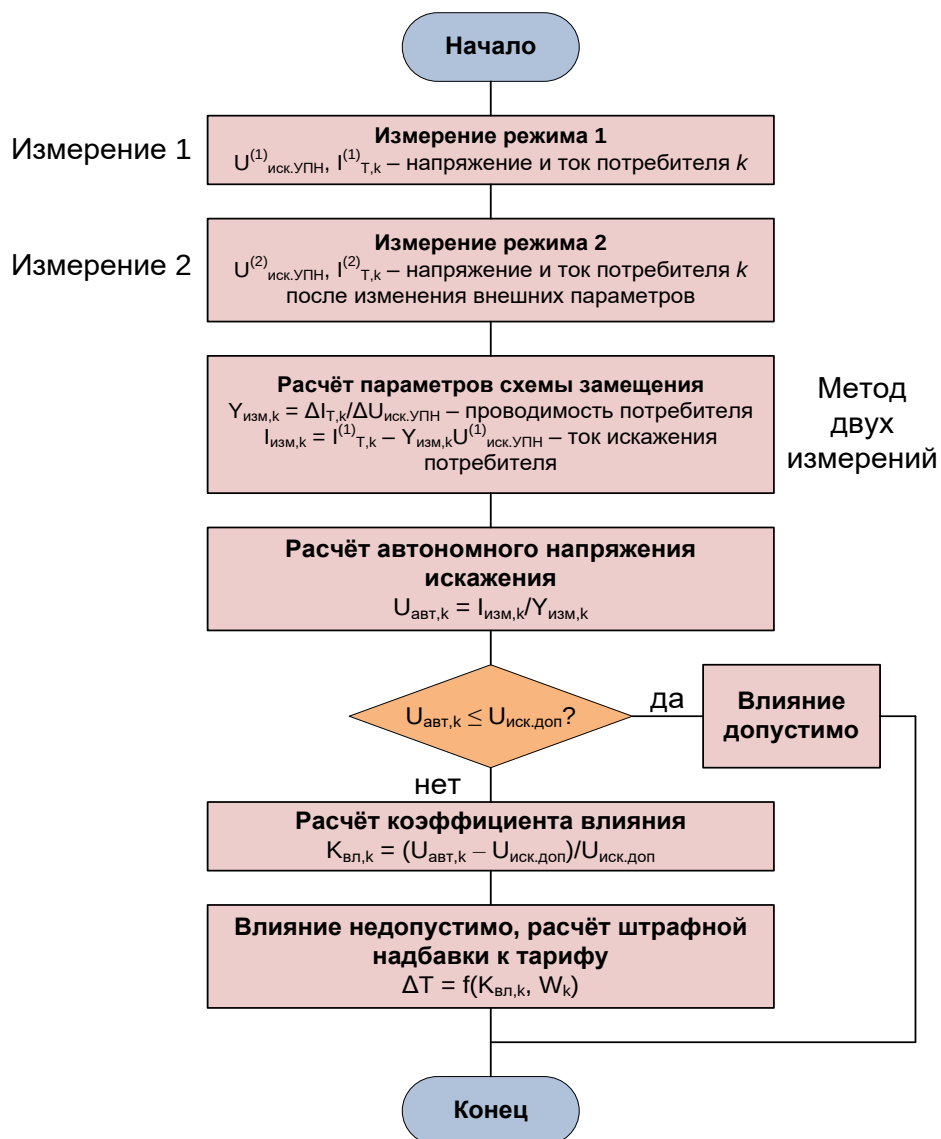


Рисунок 4 – Алгоритм количественной оценки влияния потребителя на искажение напряжения в узле промышленной нагрузки

На основе $K_{вл,k}$ разработан механизм штрафных надбавок к тарифу. Встречные компенсационные скидки для неискажающих потребителей не предусматриваются, что продиктовано неаддитивностью $\dot{U}_{иск.УПН}$ и $K_{вл,k}$. Вместо распределения компенсаций предлагается аккумулировать штрафные средства в целевом фонде энергоснабжающей организации, расходуемом исключительно на мероприятия по нормализации показателей КЭ (например, на установку

общего ФКУ в УПН) и на компенсацию подтверждённых претензий потребителей, пострадавших от нарушения КЭ. Верификация на имитационной модели УПН в MATLAB показала, что суммарный штраф с двух искажающих потребителей составит 1 187 205 руб./год при тарифе 1,05965 руб./кВт·ч (Иркутская область, 2025 г.). Срок окупаемости ФКУ (6 кВ, стоимость около 9,8 млн руб.) составляет порядка 8 лет.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции R_{UI} по несимметрии и гармоникам для подстанций транзита Тайшет–Тулун

Параметры для расчёта R_{UI}	Значения коэффициентов корреляции R_{UI} между указанными напряжениями и токами на присоединениях					
	НПС Нижнеудинская, ввод 4 СШ КРУ 6 кВ	ПС 110/35/10 кВ Шеберга, ввод 110 кВ Т-1	ПС 110/35/10 кВ Рубахино, ввод 1 СШ 110 кВ	ПС 110/27,5/10 кВ Тяг. Облепиха, ввод 27,5 кВ Т-2	ПС 110/27,5/10 кВ Тяг. Ук, ввод 27,5 кВ Т-1	ПС 110/27,5/10 кВ Тяг. Худоселье, ввод 27,5 кВ Т-2
Корреляция между напряжениями и токами ОП						
U_2, I_2	0,9882	0,8673	0,6479	0,3085	0,5334	0,4190
Корреляция между напряжениями и токами n -й ВГ						
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 3$	0,9374	0,7152	0,9328	0,0737	–0,1711	0,2923
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 5$	0,9000	0,6876	0,8489	0,0366	–0,2922	–0,1429
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 7$	0,9369	0,9280	0,9323	0,0545	–0,2576	0,0502
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 9$	0,9233	0,9398	0,9202	0,0720	–0,1765	0,0978
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 11$	0,9292	0,9178	0,8961	0,0932	–0,1231	–0,0348
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 13$	0,9386	0,8561	0,8603	0,1014	–0,0966	0,0816
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 15$	0,9149	0,8384	0,7951	0,0449	–0,0936	0,1611
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 21$	0,7944	0,8158	0,6937	0,0811	–0,1078	0,2027
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 27$	0,8280	0,9275	0,8036	0,0567	–0,1521	0,1509
$U_{(n)}, I_{(n)}, n = 33$	0,7169	0,9386	0,9289	–0,0235	–0,1009	0,0568

Совокупность результатов главы формирует методологическую основу первого блока анализа электротехнического комплекса в УПН: данные о фоновых искажениях и параметрах СЗ нагрузок используются в качестве исходной информации для формирования вероятностных критериев и адаптации алгоритмов защиты и автоматики на проектном, эксплуатационном и оперативном горизонтах с целью составления паспорта УПН с фоновыми уровнями искажений, корректировки условий для пересчёта уставок или их онлайн-адаптации в зависимости от текущего уровня искажений.

В третьей главе разработаны критерии и требования к устойчивости защиты и автоматики при искажениях напряжений и токов в УПН. Традиционный количественный показатель устойчивости функционирования защиты – коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$ – построен на учёте предельного расчётного режима и вычислении единственного значения в этих условиях. В УПН этот подход имеет ограничения: он учитывает только пороговое значение параметра, игнорируя его статистическое распределение, и не даёт ответа о

вероятности неправильного срабатывания при искажениях токов и напряжений нормального режима или внешнего КЗ.

Задача оценки устойчивости защиты формализована в терминах теории статистических решений. Пусть A_1 – событие «КЗ в зоне защиты», A_0 – событие «нормальный режим или внешнее КЗ»; $\hat{A}_1$ – решение «срабатывание»; $\hat{A}_0$ – решение «несрабатывание». Вводится матрица условных вероятностей:

$$P = \begin{bmatrix} P(\hat{A}_1|A_1) & P(\hat{A}_1|A_0) \\ P(\hat{A}_0|A_1) & P(\hat{A}_0|A_0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

в которой

$$D = P(\hat{A}_1|A_1); F = P(\hat{A}_1|A_0), \quad (8)$$

где D – вероятность правильного срабатывания (аналог чувствительности), F – вероятность ложного/излишнего срабатывания (аналог неотстроенности). Критерий оптимальной настройки уставки определяется выражениями:

$$\max_{\theta} [D(\theta) - l \cdot F(\theta)], \quad l = \frac{r_{10}}{r_{01}} \cdot \frac{P(A_0)}{P(A_1)}, \quad (9)$$

где r_{10} – стоимость ложного срабатывания, r_{01} – стоимость пропуска КЗ, θ – варьируемая уставка или алгоритм защиты. При $l = 1$ критерий совпадает с правилом Неймана-Пирсона; при известных r_{ij} для конкретного УПН должен достигаться минимум риска. Зависимость $D(\theta)$ от $F(\theta)$ при варьировании параметра θ образует ROC-кривую. Интегральная мера качества алгоритма или уставки θ – площадь под кривой AUC :

$$AUC = \int_0^1 D dF. \quad (10)$$

Процедура оценки устойчивости алгоритма защиты формализована в виде блок-схемы на рисунке 5. Алгоритм с большим AUC предпочтителен при любом значении l . Матрица условных вероятностей (7) различных исполнений защиты заполняется при помощи имитационного моделирования методом Монте-Карло ($N \geq 10\,000$ реализаций) при варьировании параметров нормального и аварийного режимов: тока КЗ питающей ЭЭС $I_{кз}$, вида и места КЗ, уровня фоновых искажений симметрии и синусоидальности, переходного сопротивления в месте КЗ, нагрузки ТТ $Z_{нагр.ТТ}$, остаточной индукции ТТ $B_{ост.ТТ}$, начального угла ЭДС φ_0 , постоянной времени затухания АС T_a и других параметров.

На примере ПДЗ СТ типа ТДН-40000/220/10 при $N = 5184$ режимах внешних КЗ с глубоким насыщением ТТ получено (таблица 2), что совместное применение ДФО и блокировки по АС обеспечивает $F = 0$ при $D = 1,0$ в рассмотренном наборе параметров, тогда как базовый алгоритм ПДЗ (процентное торможение и блокировка по 2-й гармонике) даёт $F = 0,64$. Детерминированный коэффициент чувствительности не позволяет различить эти варианты, поскольку они формально удовлетворяют условию $K_{\text{ч}} \geq 2$ при внутренних КЗ.

Таким образом, совместное применение ДФО и блокировки по АС обеспечивает $F = 0$ при внешних КЗ при всех 5184 режимах.

Детерминированный критерий не позволяет различить эти варианты – все они формально соответствуют нормативному коэффициенту чувствительности.

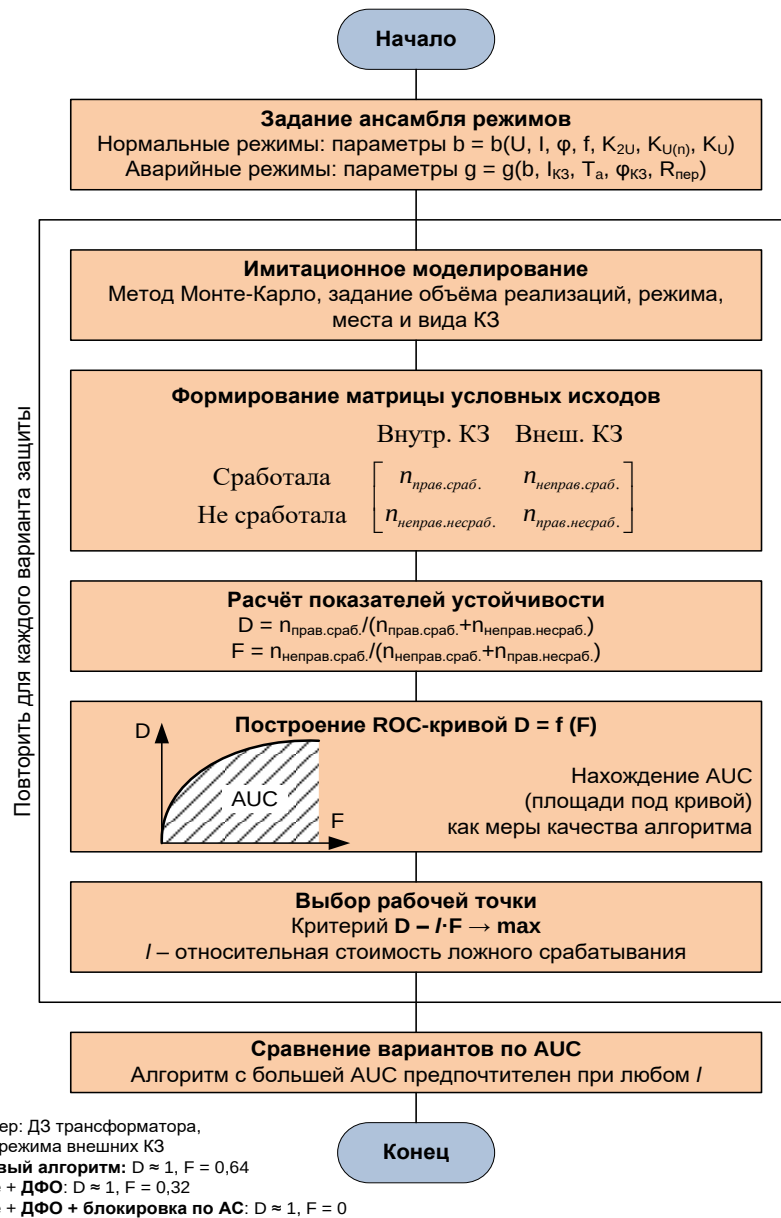


Рисунок 5 – Процедура вероятностной оценки устойчивости алгоритма защиты

Таблица 2 – Сравнение алгоритмов дифференциальной защиты по вероятностным показателям матрицы условных вероятностей

Вариант алгоритма ПДЗ	D^* , правильное несрабатывание	F , излишнее срабатывание
Только процентное торможение (= вариант 1)	24%	76%
(1) + блокировка по 2-й гармонике (= вариант 2)	36%	64%
(2) + ДФО	68%	32%
(2) + блокировка по АС	44%	56%
(2) + ДФО + блокировка по АС	100%	0%

Задача устойчивости ОМП ЛЭП также рассмотрена в вероятностной постановке. Под устойчивостью ОМП ЛЭП понимается вероятность непревышения нормированного значения ошибки расчёта расстояния в условиях искажений параметров аварийного режима (ПАР). Введены 4 критерия устойчивости: среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\text{СКВ}}$, вероятная ошибка $e_{\text{вер}} \approx (2/3) \sigma_{\text{СКВ}}$, максимальная ошибка и средний риск с квадратичной функцией стоимости отыскания повреждения от ошибки ОМП. $\sigma_{\text{СКВ}}$ при законе распределения случайной ошибки $p(e)$ определяется как

$$\sigma_{\text{СКВ}}^2 = M[e^2] = \int_{-\infty}^{\infty} e^2 p(e) de, \quad (11)$$

где $M[\cdot]$ – знак математического ожидания. Вероятность выполнения условия $|e| \leq e_0$ при произвольном e_0 для центрированного нормального закона распределения ошибки определяется через интеграл вероятности:

$$P(|e| \leq e_0) = 2\Phi\left(\frac{e_0}{\sigma_{\text{СКВ}}}\right). \quad (12)$$

Выражение (12), примененное при e_0 , равном нормированному значению ошибки (15%, 10%, 7% или 5% от длины ВЛ по п. 4.6 СТО 56947007-29.240.55.159-2013), даёт вероятностную оценку устойчивости ОМП: устойчивость есть вероятность $P(|e| \leq e_{\text{норм}})$.

Пример практического применения устойчивости ОМП приведён для группового алгоритма ОМП ВЛ. Пусть l – истинное расстояние до места КЗ, $\hat{l}_i$ – оценка i -го частного алгоритма ОМП, σ_i^2 – дисперсия его ошибки. Оптимальная (байесовская) групповая оценка $\hat{l}_{\text{опт}}$ при квадратичной функции стоимости ОМП от ошибки соответствует математическому ожиданию апостериорного распределения. При независимых нормально распределённых ошибках частных алгоритмов это даёт взвешенное среднее с весами, обратно пропорциональными дисперсиям:

$$\hat{l}_{\text{гр}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\hat{l}_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad \sigma_{\text{гр}}^{-2} = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2}. \quad (13)$$

Применяется итерационная процедура объединения: на каждом шаге k текущая групповая оценка $\hat{l}^{(k)}$ обновляется с учётом новой частной оценки $\hat{l}_k$:

$$\hat{l}^{(k)} = \hat{l}^{(k-1)} + \frac{\sigma_k^{-2}}{\sigma_{\text{гр},k-1}^{-2} + \sigma_k^{-2}} (\hat{l}_k - \hat{l}^{(k-1)}). \quad (14)$$

При этом результирующая дисперсия не превышает дисперсии ни одного из частных методов:

$$\sigma_{\text{гр}}^2 \leq \min_i \sigma_i^2. \quad (15)$$

Групповой алгоритм применён на имитационной модели ВЛ 220 кВ Луч-Нагорная (53,6 км, более 63 000 имитируемых однофазных КЗ). Верификация показала, что для трёх частных методов ОМП (ИМФ-3Р, по реактивной мощности, метод Такаги) среднеквадратичные отклонения составили соответственно $\sigma_i = 1,521/1,523/1,516$ км, а группового алгоритма $\sigma_{\text{гр}} = 0,877$ км. Таким образом, снижение погрешности ОМП ЛЭП составило 1,74 раза и

приближается теоретическому пределу для данного набора методов. На первых 85% длины ВЛ ошибка не превысила 2,2 км. Проверка на реальных аварийных осциллограммах ВЛ 220-500 кВ Нижегородской ЭЭС подтвердила средний выигрыш 3-5% по точности расстояния и 10-15% по зоне обхода, что позволило количественно оценить повышение устойчивости ОМП за счёт применения группового алгоритма.

В четвёртой главе разработаны новые методы и средства обеспечения устойчивости защиты к искажениям токов и напряжений в аварийных режимах. Характерными примерами нарушения устойчивости функционирования защит в условиях искажений токов и напряжений служит ряд инцидентов в УПН.

Так, на НПС «Нижеудинская» (2015-2017 гг.) асинхронные двигатели 6 кВ, оснащённые максимальной токовой защитой с комбинированным пуском по напряжению, систематически отключались по причине несимметрии напряжений K_{2U} , вызванной работой тяговой нагрузки транзита Тайшет-Тулун. Лабораторный эксперимент с реле РТ-40 и РСТ-11-24 подтвердил, что при номинальном токе 5 А и уставке 135% срабатывание происходит при добавлении тока 5-й гармоники 4,50 А (РТ-40) и 5,40 А (РСТ-11-24). Применение дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для фильтрации ВГ в цифровых терминалах РЗА позволяет считать, что причиной отключений является именно несимметрия и вызываемый ею перегруз двигателя токами ОП. Системное решение проблемы – устранение искажений напряжения через выявление источников методами главы 2.

В другом примере происходило неселективное срабатывание ПДЗ СТ 40 МВА при пуске двигателя на присоединении секции 6 кВ, когда АС пускового тока насытила ТТ после неуспешной попытки пуска двигателя. Примечательно то, что ток небаланса попал на начальный участок характеристики торможения ПДЗ и не являлся расчётным согласно стандартной НТД по выбору уставок. Применяемая в терминале РЗА блокировка по 2-й гармонике не была рассчитана на такой режим и работала неустойчиво.

Третий пример связан с ПС 110 кВ, питающей предприятие горнодобывающей промышленности. На ПС наблюдались два источника ВГ: 5-я гармоника из внешней ЭЭС, усиливаемая волновыми эффектами длинной ВЛ, и 2-я гармоника предположительно от управляемого шунтирующего реактора (УШР) на самой ПС. Совместная работа УШР с одной батареей статических конденсаторов (БСК) создавала условия возникновения резонанса по 2-3-й гармоникам: при токе 2-й гармоники в БСК до 48% зафиксированы её отключения защитой от повышения напряжения. Таким образом, искажения параметров предшествовавшего нормального режима формируют условия, при которых защиты, разработанные для сетей без искажений, начинают работать неправильно в условиях УПН.

На имитационной модели ПДЗ генератора в 300 сценариях внешнего КЗ с глубоким насыщением ТТ проведено сравнение 4 способов формирования тормозного тока: через полусумму $I_T = 0,5 \cdot (I_I + I_{II})$, по максимальному току плеч $I_T = \max(I_I; I_{II})$, в виде векторной полуразности $I_T = 0,5 \cdot |\dot{I}_I - \dot{I}_{II}|$ и

методом направленного торможения $I_T = \sqrt{I_I I_{II}} \cos(\alpha - 180^\circ)$ при внешнем КЗ с углом α между векторами $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$. Первые три способа дали одинаковую и неудовлетворительную долю неселективных срабатываний – 56% (168 из 300). Направленное торможение с дополнительной блокировкой B при больших кратностях сквозного тока полностью исключает неселективные срабатывания (0 из 300) ПДЗ генератора при сохранении правильного действия при внутренних КЗ. Результат показывает, что даже выбор способа формирования тормозного тока – без применения новых алгоритмических блокировок – уже определяет базовую устойчивость ПДЗ к насыщению ТТ.

Исследованы 8 типов ПДЗ (MiCOM, ЭКРА, Механотроника, Бреслер, АВВ) в 800 режимах внешних КЗ с глубоким насыщением ТТ (таблица 3). Стандартный для большинства ПДЗ алгоритм – процентное торможение с блокировкой по 2-й гармонике – даёт от 194 до 740 некорректных срабатываний из 800 в зависимости от производителя.

Таблица 3 – Анализ срабатывания дифференциальной защиты разных производителей в режимах внешних коротких замыканий

ПДЗ шин			ПДЗ СТ			ПДЗ генератора	
35 кВ, 3×12 МВт	500 кВ, 3×500 МВт	110 кВ, 3×63 МВт	ТДЦ-80000/110/10	ТЦ-630000/500/20	ТД-16000/35/6	ТГВ-500	Т-12
Тип устройства ПДЗ (реализован вид характеристики торможения и способ формирования тока торможения ПДЗ)							
MiCOM P740	ЭКРА ШЭ2710 561 (без ДФО)	Механотроника БМРЗ-ДЗШ	Бреслер ШТ2108	АВВ RET670	MiCOM P643	ЭКРА ШЭ1113	MiCOM P343
Некорректные срабатывания / общее число режимов внешнего КЗ в модели ПДЗ с торможением и блокировкой по 2-й гармонике (при её наличии)							
316 / 800	712 / 800	626 / 800	740 / 800	670 / 800	194 / 800	512 / 800	640 / 800
Некорректные срабатывания / общее число режимов внешнего КЗ в модели ПДЗ с торможением, ДФО, блокировкой по 2-й гармонике и АС							
0 / 800	0 / 800	0 / 800	0 / 800	0 / 800	0 / 800	0 / 800	0 / 800

Предложена усовершенствованная ПДЗ для режимов глубокого насыщения ТТ с двумя дополнительными органами (рисунок 6).

ДФО, который применялся только в ПДЗ шин, различает внутренние и внешние КЗ по фазовому соотношению токов на сторонах объекта: при $\cos \alpha < 0$ (угол α между векторами $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ более 90°) КЗ считается внешним, защита блокируется. Блокировка по АС дифференциального тока, которая ранее была положена в основу принципа действия реле серий РНТ-560 и ДЗТ-10 с быстронасыщающимися ТТ, воздействует на первопричину насыщения (АС тока КЗ), а не на его следствие в виде 2-й гармоники. После добавления ДФО и блокировки по АС в моделях всех 8 типов ПДЗ получено 0 некорректных срабатываний из 800 режимов (таблица 3); при 80 режимах БТН в момент включения СТ – 4 вместо 36 ложных срабатываний. Максимальное замедление срабатывания при внутренних КЗ составило 0,06 с для ПДЗ шин и СТ и 0,1 с для ПДЗ генератора в наиболее неблагоприятном режиме.

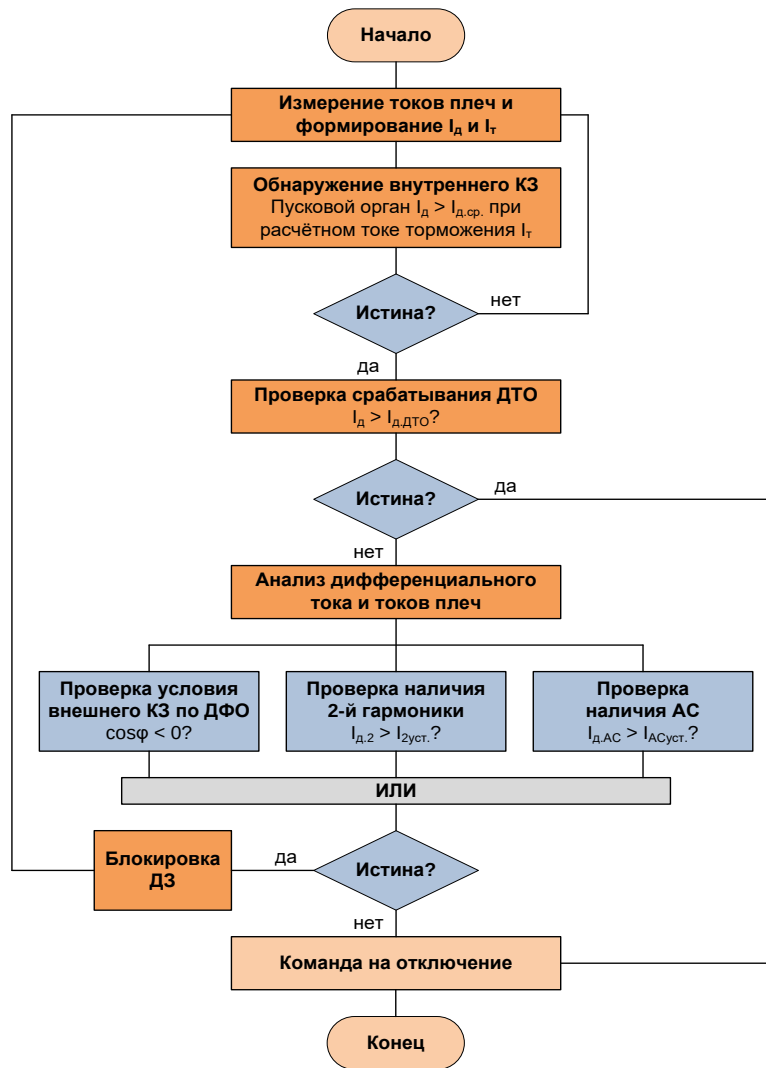


Рисунок 6 – Алгоритм принятия решения в усовершенствованной дифференциальной защите трансформатора

Также предложен способ восстановления периодической составляющей вторичного тока ТТ из трёх последовательных отсчётов на начальном интервале неискажённой трансформации, т. е. до наступления насыщения ТТ. Аналитическое решение системы трёх уравнений, описывающих мгновенные значения тока i_1, i_2, i_3 на трёх последовательных отсчётах $t_1, t_2 = t_1 + T_d$ и $t_3 = t_2 + T_d = t_1 + 2T_d$ (T_d – интервал дискретизации), взятых на участке неискажённой трансформации, даёт амплитуду I_m и начальную фазу φ_0 :

$$I_m = \frac{2\varepsilon}{\left(2\operatorname{tg}\frac{\omega t_1}{2} - \operatorname{tg}\frac{\omega t_2}{2}\right)\left(\operatorname{tg}\frac{\omega t_1}{2} - \operatorname{tg}\frac{\omega t_3}{2}\right)\left(\operatorname{tg}\frac{\omega t_2}{2} - \operatorname{tg}\frac{\omega t_3}{2}\right)}, \quad (16)$$

$$\varphi_0 = 2\arctg \left[\frac{(\cos \omega t_1 + 1)(\cos \omega t_2 + 1)(\cos \omega t_3 + 1)(2\varepsilon + \gamma)}{4(i_1 \sin \omega t_2 - i_2 \sin \omega t_1 - i_1 \sin \omega t_3 + i_3 \sin \omega t_1 + i_2 \sin \omega t_3 - i_3 \sin \omega t_2)} \right], \quad (17)$$

где ε и γ – функционалы от i_1, i_2, i_3, t_1, T_d и ω ; $\omega = 2\pi f$, f – частота электрической сети. Методическая погрешность составляет менее 1% при условии постоянства частоты в начальный момент КЗ. При применении алгоритма восстановления тока в составе имитационной модели ПДЗ шин 500 кВ при остаточной индукции ТТ до $\pm 90\%$ от индукции насыщения ток небаланса не

превышает 0,4 о.е. Способ реализуется заменой программного обеспечения существующих терминалов без доработки аппаратной части.

Разработана модифицированная ТЗОП для функционирования при несимметричных КЗ на фоне тяговой нагрузки. Анализ натурных измерений на тяговых ПС транзита Тайшет-Тулун показал: токи ОП нормального несимметричного режима и минимального КЗ на комплексной плоскости формируют перекрывающиеся области (рисунок 7 а), что не позволяет разграничить нормальный и аварийный режим даже по фазе тока ОП.

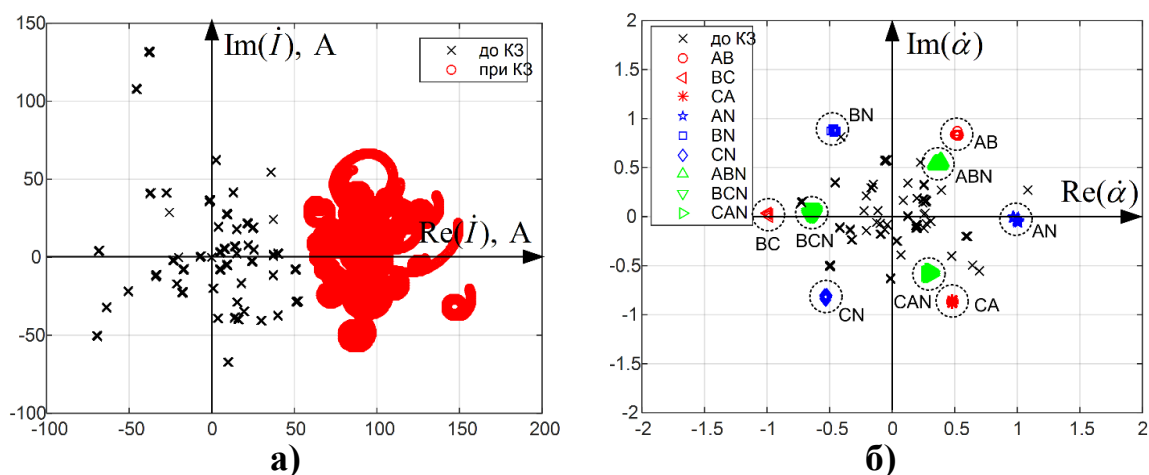


Рисунок 7 – Области векторов токов обратной последовательности в несимметричном нагрузочном режиме (X) и в режиме удалённого двухфазного короткого замыкания (O) через переходное сопротивление 10 Ом (а) и области коэффициентов $\dot{\alpha}$ в нагрузочном режиме (X) и при несимметричных коротких замыканиях любой удалённости (б)

Предложена модифицированная ТЗОП с добавлением двух условий. Применяется орган по приращению тока ОП, уставка которого отстраивается от максимально возможного наброса тока ОП тяговой нагрузки. Также в качестве критерия срабатывания предлагается использовать области срабатывания для комплексного отношения токов ОП и прямой последовательности (ПП), обозначаемого $\dot{\alpha}$:

$$\dot{\alpha} = \frac{i_2}{i_1}. \quad (18)$$

В 300 режимах включения толчком несимметричной нагрузки получено 0 излишних срабатываний защиты. Вместе с тем при всех видах несимметричных КЗ получено правильное срабатывание, а также распознавание вида повреждённых фаз при помощи областей срабатывания на комплексной плоскости коэффициента $\dot{\alpha}$ (рисунок 7 б).

В пятой главе разработан метод робастной ЦОС токов и напряжений, обеспечивающий устойчивость измерительных органов защиты и автоматики к искажениям напряжений и токов в УПН. Стандартные алгоритмы ЦОС –ДПФ, быстрое преобразование Фурье, метод наименьших квадратов и др. – предполагают синусоидальность сигнала и постоянство значений промышленной частоты. В УПН эти условия не выполняются. Например, при

воздействии двух интергармоник (75 и 125 Гц, амплитуда 15 В каждая) относительная ошибка оценки амплитуды основной гармоники стандартным ДПФ составила 11,3%; а при дополнительных отклонениях частоты до 45-55 Гц ошибки достигают 12-18%.

Впервые для задач измерения параметров тока и напряжения в устройствах защиты и автоматики применён метод дизеринга (стохастической коррекции) в сочетании с малоразрядным квантованием (рисунок 8).

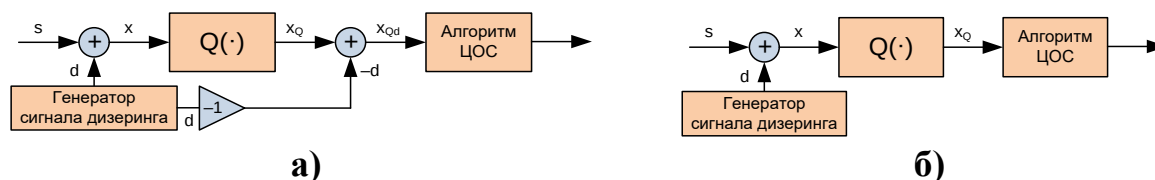


Рисунок 8 – Варианты применения дизеринга: (а) вычитаемый дизеринг; (б) невычитаемый дизеринг

Физический смысл состоит в следующем: к сигналу перед квантованием добавляется управляемый стохастический шум (дизеринг), ошибка квантования подлежит «обелению» – равномерно распределяется по всему спектру, теряет детерминированную связь с входным сигналом и при последующем усреднении (ДПФ на длинном интервале) практически полностью компенсируется. Принципиальным достоинством такой ЦОС является полная робастность: метод не требует анализа состава помех.

Исследованы искаженные сигналы напряжения длительностью 16 периодов по 128 отсчетов на период (рисунок 9): в первой строке (рисунок 9 а-в) приведён исходный сигнал $u(n)$, его амплитудный спектр в линейном и логарифмическом масштабах, далее показан тот же сигнал после малоразрядного квантования с шагом 50 В (рисунок 9 г-е), а на рисунках 9 ж-и приведён тот же сигнал после добавления стохастического равномерного дизеринга.

Анализ рисунка 9 показывает:

- введение малоразрядного квантования синусоидального сигнала приводит к появлению интенсивных высокочастотных (ВЧ) составляющих спектра, причем чем меньше разрядность квантования, тем интенсивнее становятся ВЧ составляющие. Такой эффект связан с резкими изменениями мгновенных значений сигнала при изменениях уровней квантования от отсчета к отсчету;
- применение равномерного дизеринга приводит к перераспределению и сглаживанию ВЧ составляющих. Этот эффект достигается за счет декорреляции шумов квантования малоразрядных сигналов путем использования стохастических сигналов дизеринга. В итоге указанной операции ЦОС достигается точность оценки амплитуды основной гармоники, причем точность повышается в большей степени там, где более высоким является шаг квантования;
- анализ спектров сигналов, подверженных малоразрядному квантованию, показывает, что существенным и эффективным средством повышения точности ЦОС будет являться низкочастотная (полосовая) фильтрация.

При этом исключается влияние ВЧ составляющих спектра на точность оценки параметров сигнала.

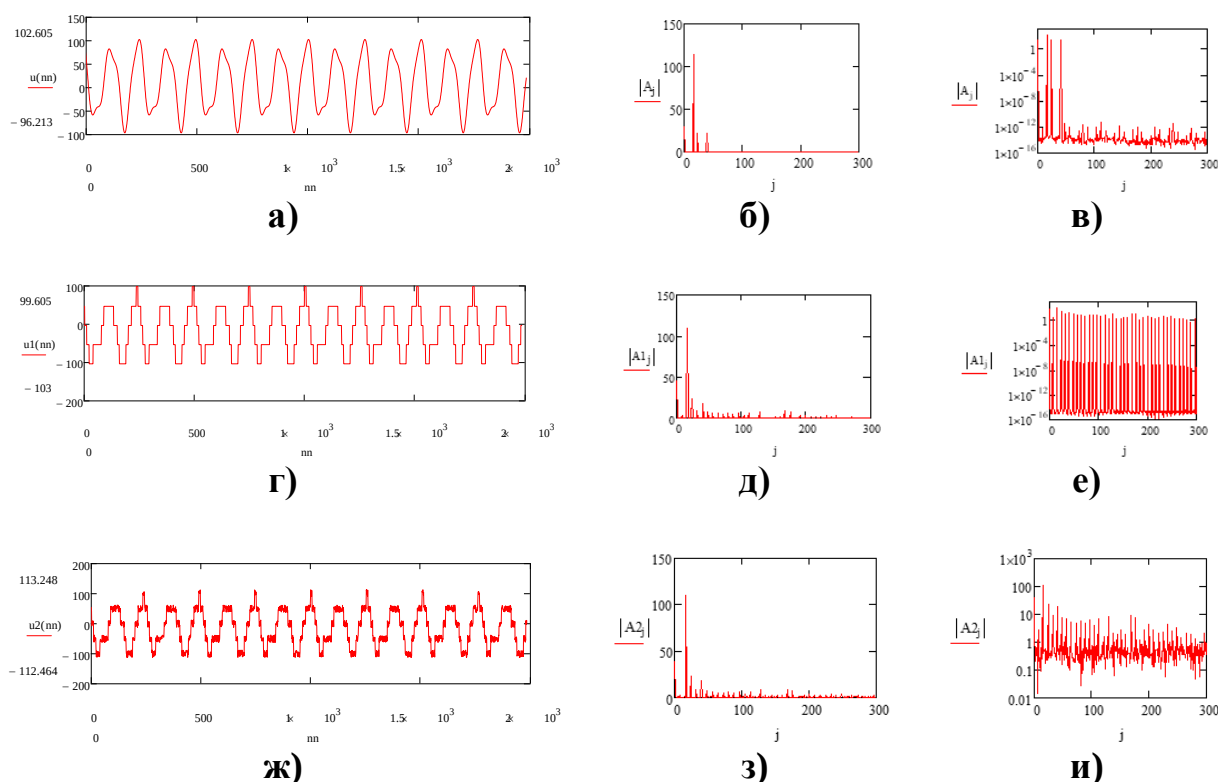


Рисунок 9 – Сигналы напряжения и их амплитудные спектры в линейном и логарифмическом масштабе при разных сочетаниях параметров малоразрядного квантования и дизеринга

Имитационное моделирование на сигнале напряжения ($|U| = 80$ В, $f_0 = 50$ Гц) при двух интергармониках, $N = 80$ отсчётов на период (МЭК 61850) дало результаты, приведённые в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение точности оценки амплитуды основной гармоники при 3 вариантах цифровой обработки сигналов

Алгоритм	Оценка амплитуды	Ошибка
Стандартное ДПФ, $u(n)$	70,97 В	11,3%
Малоразрядное квантование (4 уровня), $u_1(n)$	81,23 В	1,54%
Малоразрядное квантование + дизеринг, $u_2(n)$	80,34 В	0,425%

При совместном применении малоразрядного квантования (4 уровня) и дизеринга погрешность оценки амплитуды основной частоты по сравнению со стандартным ДПФ снизилась более чем в 26 раз (с 11,3% до 0,425%). Число уровней квантования задаётся один раз и не меняется в процессе работы. При отклонениях частоты до $f = 45$ Гц метод с 4 уровнями квантования обеспечивает ошибку 0,11% против 18% у стандартного ДПФ. При отклонении от промышленной частоты $|\Delta f| \geq 5$ Гц и увеличении числа уровней квантования метод теряет преимущество, что однозначно определяет оптимальное число уровней (4, т.е. 2 разряда).

Исследовано практическое применение дизеринга для задачи ОМП. При одностороннем ОМП ВЛ 110 кВ ($L = 50$ км) без специальной ЦОС при интергармонике частотой 125 Гц расчет расстояния до места повреждения дает ошибку $\Delta L_K = 0,737$ км (1,4% длины). После применения дизеринга флуктуационная ошибка сведена к нулю. Предложенный метод ЦОС целесообразно реализовать программно, совместно с протоколом МЭК 61850 и соответствующей ему частотой дискретизации устройств РЗА.

В шестой главе разработаны методы ОМП на ВЛ, устойчивые к искажениям токов и напряжений, обеспечивающие однозначное решение квадратного уравнения и учитывающие реальный характер переходного сопротивления в условиях УПН с ВЛ.

Практика показывает, что широко применяемый реактансметрический метод в условиях ненулевого переходного сопротивления даёт результаты, расходящиеся с истинным местом повреждения свыше 60 км. Приведены 2 случая обработки осциллограмм КЗ на реальных ВЛ 110 кВ, когда реактансметр показал 159,19 и 57,753 км, а волновой метод – 90,09 и 93,895 км соответственно (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты определения места повреждения на реальных воздушных линиях 110 кВ

Данные	Реактансметр	Компенсационный метод	Итерационный метод полного сопротивления	Волновой метод
КЗ 1	159,19 км	91,506 км	91,506 км	90,09 км
КЗ 2	57,753 км	94,582 км	94,582 км	93,895 км

Одним из результатов главы является доказанный расчётно-экспериментальным путём факт, что переходное сопротивление при однофазном КЗ на ВЛ, оборудованной ГТ (рисунок 10), имеет активно-индуктивный характер $\underline{Z}_n = R_n + jX_n$, когда ток КЗ протекает через ГТ. Устойчивость к реактивной составляющей переходного сопротивления рассматривается именно в контексте ОМП ВЛ, поскольку для защиты учёт комплексного характера этого сопротивления реализуется характеристикой реле сопротивления ДЗ. В задаче ОМП реактивная составляющая переходного сопротивления является источником случайной погрешности.

На модели ВЛ 110 кВ (АС-150/24, 100 км, ГТ АЖС-70/39) расчётные значения составили $\underline{Z}_n = (11,8 \div 12,6) + j(1,5 \div 1,6)$ Ом при пробитом искровом промежутке (ИП); $\underline{Z}_n = 9,2 + j1,6$ Ом при глухом заземлении ГТ. Погрешность стандартного ОМП при неучёте реактивной составляющей $\underline{Z}_n$ 4-10% от длины ВЛ. Результат подтверждён на данных реальной ВЛ 110 кВ (длина 67,38 км, 7 зафиксированных КЗ): при всех однофазных КЗ переходное сопротивление имело активно-индуктивный характер (таблица 6).

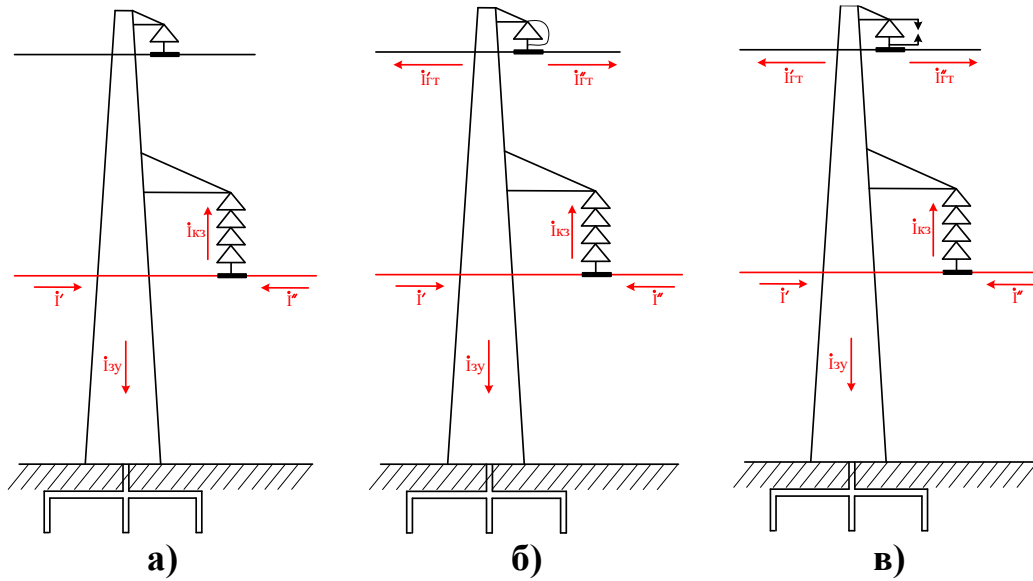


Рисунок 10 – Составляющие тока короткого замыкания на опоре воздушной линии при различных вариантах заземления грозозащитного троса: грозотрос на опоре изолирован (а), грозотрос на опоре заземлён наглухо (б), грозотрос на опоре заземлён через искровой промежуток, пробитый при коротком замыкании (в)

Таблица 6 – Параметры переходного сопротивления в точке короткого замыкания и расчётное расстояние до него на имитационной модели линии 110 кВ при различных вариантах заземления грозотроса

Вариант заземления ГТ	$L_{\text{факт}}, \text{ км}$	$\underline{Z}_{\text{П}}, \text{ Ом}$	$L_{\text{расч}}, \text{ км}$
Вариант 1 – ГТ изолирован по всей длине, ИП не пробит	20 / 50 / 80	15 + j0 (во всех точках)	20 / 50 / 80
Вариант 2 – ГТ на конечных опорах заземлён наглухо, на промежуточных заземлён через ИП, пробитый в месте КЗ	20 / 50 / 80	11,804 + j1,502 / 12,561 + j1,519 / 11,814 + j1,514	18,96 / 47,33 / 75,52
Вариант 3 – ГТ на конечных и анкерных опорах заземлён наглухо	20 / 50 / 80	9,174 + j1,616 / 9,18 + j1,67 / 9,176 + j1,621	18,66 / 47,18 / 75,12

Разработан способ ОМП для одноцепных ВЛ, основанный на решении системы квадратных уравнений:

$$\begin{cases} n^2 + Bn + C = 0 \\ n^2 + B_1n + C_1 = 0, \end{cases} \quad (19)$$

где коэффициенты уравнений определяются через ПАР и параметры ВЛ и ЭЭС:

$$B = \frac{K_{1V}K_{3H} - K_{1H}K_{3V}}{K_{3V}}; \quad C = \frac{K_{2H}K_{3V} - K_{2V}K_{3H}}{K_{3V}}; \quad (20)$$

$$B_1 = \frac{K_{4V}K_{6H} - K_{4H}K_{6V}}{K_{6V}}; \quad C_1 = \frac{K_{5H}K_{6V} - K_{5V}K_{6H}}{K_{6V}}; \quad (21)$$

$$\dot{K}_1 = K_{1H} + jK_{1V}; \quad \dot{K}_2 = K_{2H} + jK_{2V}; \quad \dot{K}_3 = K_{3H} + jK_{3V}; \quad (22)$$

$$\dot{K}_4 = K_{4H} + jK_{4V}; \dot{K}_5 = K_{5H} + jK_{5V}; \dot{K}_6 = K_{6H} + jK_{6V}; \quad (23)$$

$$\dot{K}_1 = \frac{\dot{U}_A}{i_A Z_L} + 1 + \frac{Z_B}{Z_L}; \dot{K}_2 = \frac{\dot{U}_A}{i_A Z_L} \left(\frac{Z_B}{Z_L} + 1 \right); \dot{K}_3 = \frac{i_{FA}}{i_A Z_L} \left(\frac{Z_A + Z_B}{Z_L} + 1 \right); \quad (24)$$

$$\dot{K}_4 = \frac{\dot{U}_A}{i_A Z_{0L}} + 1 + \frac{Z_{0B}}{Z_{0L}}; \dot{K}_5 = \frac{\dot{U}_A}{i_A Z_{0L}} \left(\frac{Z_{0B}}{Z_{0L}} + 1 \right); \dot{K}_6 = \frac{i_0}{i_A Z_{0L}} \left(\frac{Z_{0A} + Z_{0B}}{Z_{0L}} + 1 \right). \quad (25)$$

Для двухцепных ВЛ аналогичная (19) система квадратных уравнений учитывает взаимное сопротивление между цепями и токи цепей. При решении (19) оба корня могут попадать в пределы ВЛ, при этом место КЗ будет определено неоднозначно. Для получения однозначного решения выполнено преобразование системы к уравнению канонического вида, которое имеет 2 корня: $n = 0$ и $n = \frac{C_1 \cdot B - C \cdot B_1}{C_1 - C}$. Первый корень формально соответствует повреждению в точке измерения, т.е. на шинах ПС, которые охватываются зоной действия ПДЗ шин. КЗ на них выявляется независимо от алгоритма ОМП ВЛ. Способы защищены патентами РФ и реализуются программно без модернизации аппаратной части терминалов. Расчётами показано, что предложенные методы устраняют систематическую погрешность, достигающую 10% и более от длины ВЛ.

Также разработан способ одностороннего ОМП на одноцепной ВЛ с учётом комплексного переходного сопротивления (рисунок 11). Задача ОМП формулируется как система двух квадратных уравнений – по параметрам ПП и нулевой последовательности. Совместное решение с исключением R_f и X_f сводится к квадратному уравнению вида

$$a \cdot m^2 + b \cdot m + c = 0, \quad (26)$$

коэффициенты которого, как и в (19), зависят от измеренных токов и напряжений и параметров ВЛ. Из двух корней выбирается удовлетворяющий условию $0 < m < 1$; расстояние $l = m \cdot L$. Метод не требует предположения о характере переходного сопротивления – R_f и X_f определяются в процессе расчёта.

Устойчивость предложенного на рисунке 11 способа ОМП в вероятностном смысле проверена численным экспериментом на модели ВЛ 110 кВ (50 км, 5000 испытаний методом Монте-Карло) по критерию $P(e \leq 15\%L)$ в условиях шумовых искажений ПАР. У способа-прототипа (метод Такаги, допущение об активном характере Z_f) средняя ошибка (14,3 км) практически не зависит от уровня шума измерения и является методической. Устойчивость прототипа не превышает 13-14% на всём исследованном диапазоне шума. У предложенного способа ОМП устойчивость составляет 100% при отсутствии шума и при шуме 0,5%, снижаясь до 67% при шуме 2,0%. Таким образом, систематическая составляющая погрешности ОМП переводится в управляемую случайную, зависящую от качества измерительного тракта.

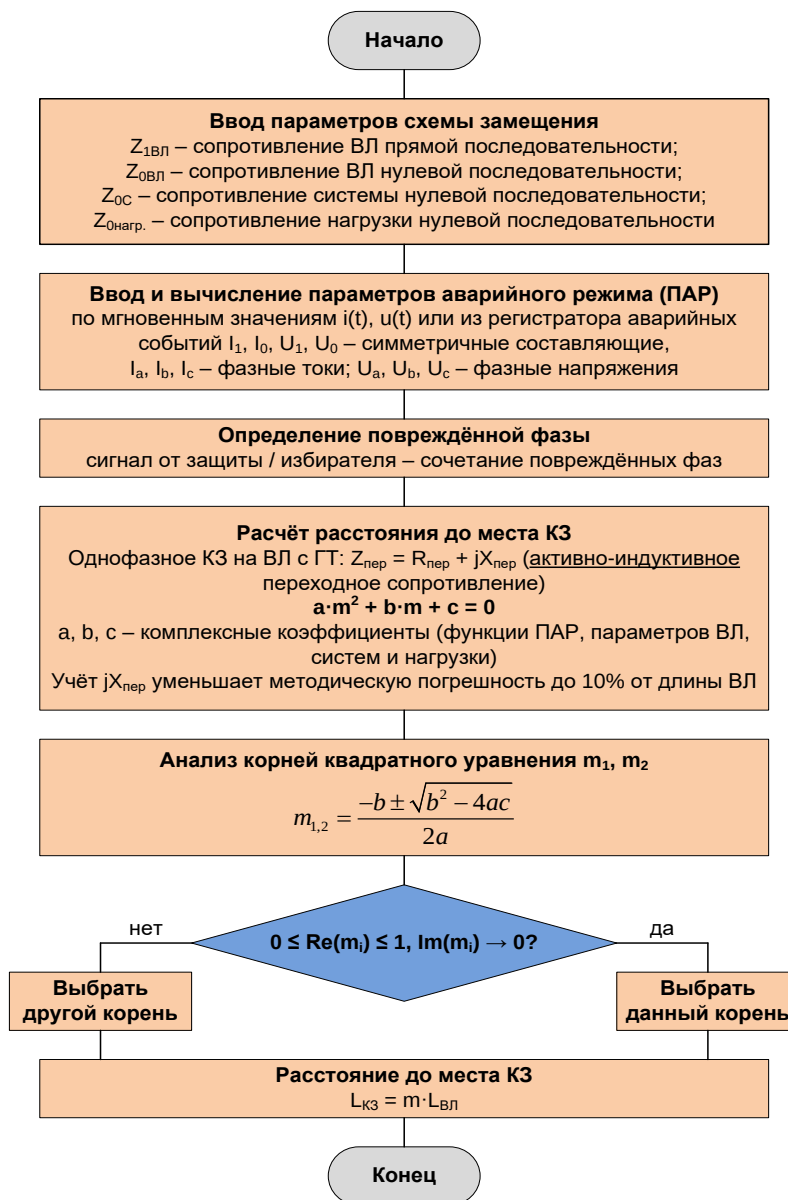


Рисунок 11 – Алгоритм одностороннего определения места повреждения на воздушной линии с грозотросом с учётом $\underline{Z}_f = R_f + jX_f$

В седьмой главе предложены программно-аппаратные решения по обеспечению устойчивости защиты и автоматики в УПН и выполнена натурная верификация разработанных алгоритмов.

Для аппаратной реализации системы диагностики искажений разработан прототип на базе контроллера cRIO-9014 с модулями измерения токов и напряжений (рисунок 12). Программная реализация выполнена в LabVIEW с непрерывной обработкой методом двух измерений и с алгоритмом пропуска выборок с малым изменением сигнала на основе фильтра Савицкого-Голея. Испытания с комплексом РЕТОМ-51 при генерации суммы ВГ и на присоединениях лабораторных нагрузок в сети 0,4 кВ показали, что прибор корректно определял параметры СЗ и рассчитывал коэффициенты влияния для всех типов нагрузок из выборки.

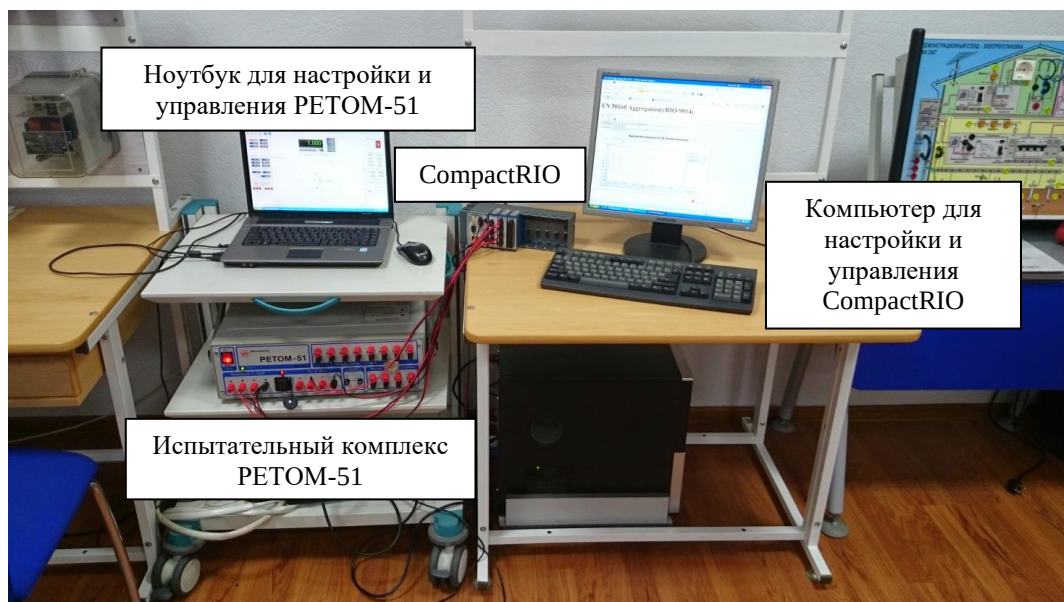
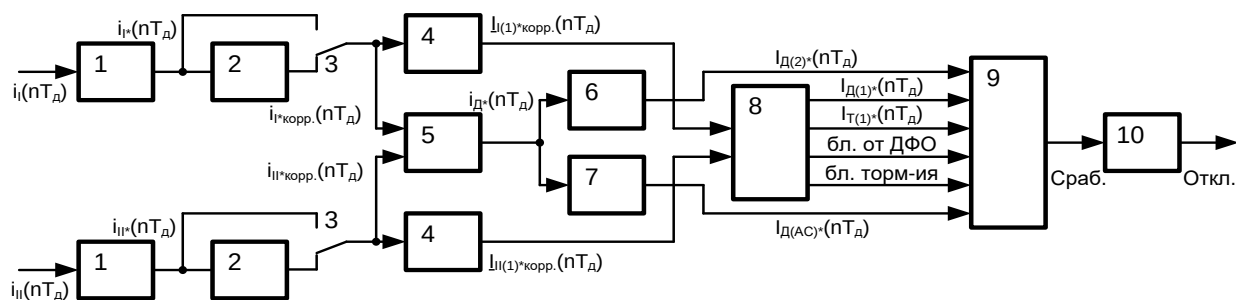


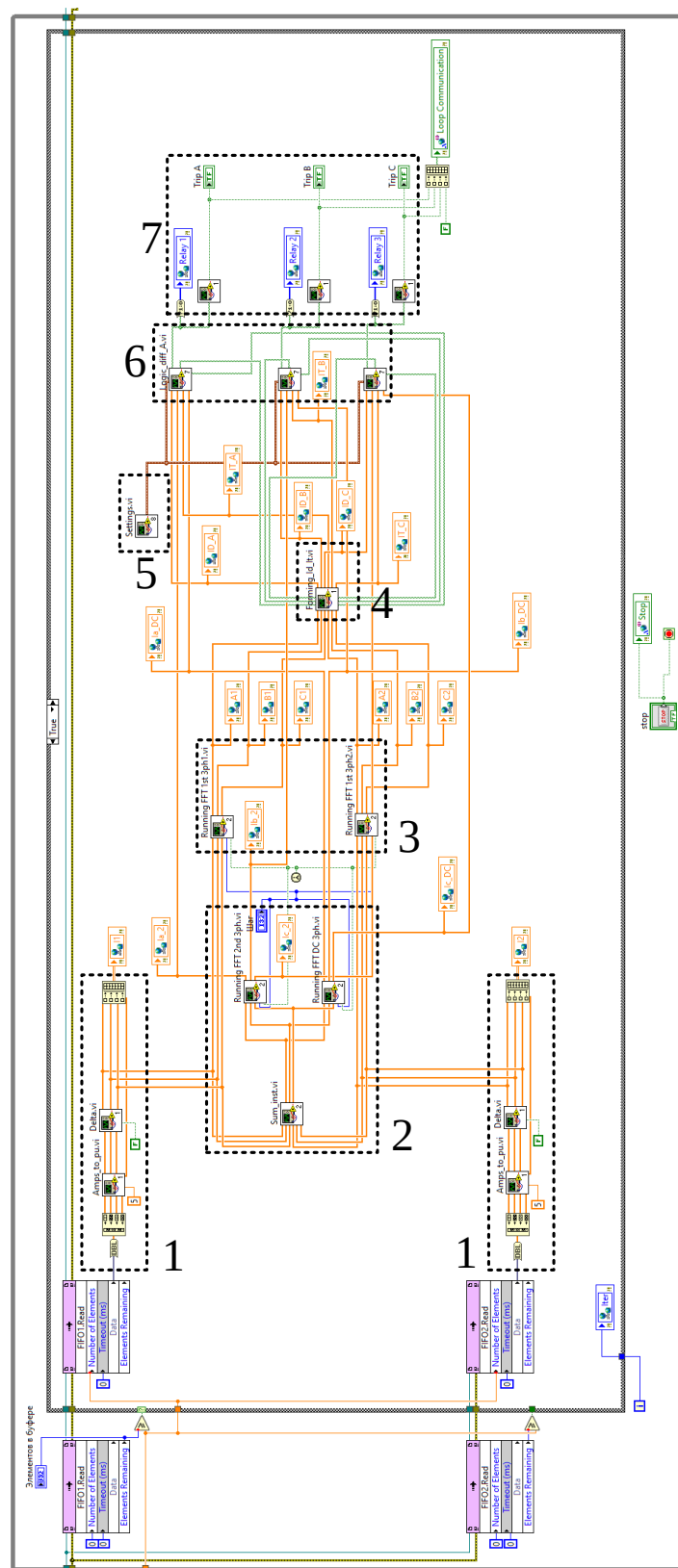
Рисунок 12 – Подключение измерительной системы на базе CompactRIO к испытательному комплексу РЕТОМ-51

В части защиты и автоматики имитационное моделирование охватывало 8 типов ПДЗ шин, СТ и генераторов 5 производителей в 800 режимах внешних КЗ с глубоким насыщением ТТ. После введения ДФО и блокировки по АС получено 0 из 800 неправильных срабатываний для всех типов ПДЗ (таблица 3). Для аппаратной реализации и натурной верификации разработан прототип ПДЗ на базе контроллера NI cRIO-9035 (свободно программируемая логика, детерминированное выполнение алгоритмов), 2 модулей токового ввода NI 9227 (6 каналов – 2 плеча по 3 фазы) и модуля релейного выхода NI 9481. Программная реализация выполнена в среде LabVIEW (12 функциональных виртуальных приборов по модульному принципу), рисунки 13 и 14.



1 – блок перевода мгновенных значений токов в о.е.; 2 – блок «цифрового треугольника»; 3 – ключ ввода-вывода «цифрового треугольника»; 4 – блок преобразования Фурье для выделения вектора тока основной частоты; 5 – блок суммирования токов сторон для формирования дифференциального тока; 6 – блок преобразования Фурье для выделения действующего значения 2-й гармоники дифференциального тока; 7 – блок преобразования Фурье для выделения апериодической составляющей дифференциального тока; 8 – блок формирования дифференциального и тормозного тока, дифференциально-фазного органа и блокировки торможения; 9 – блок логики торможения; 10 – блок выходных реле

Рисунок 13 – Блочная диаграмма прототипа дифференциальной защиты в LabVIEW



1 – блоки выравнивания токов и перевода в о.е.; 2 – блок выделения аperiodической и второй гармонической составляющей; 3 – блоки формирования векторов фазных токов плеч; 4 – блок формирования дифференциального и тормозного токов; 5 – блок уставок; 6 – блоки логики дифференциальной защиты и дифференциально-фазного органа; 7 – блоки выходных сигналов срабатывания дифференциальной защиты

Рисунок 14 – Фрагмент схемы разработанного виртуального прибора в среде LabView

Испытания прототипа улучшенной ПДЗ выполнены в 3 этапа. На первом осуществлялась подача токов установившегося режима, внешнего и внутреннего КЗ от PETOM-51/61; прототип корректно функционировал во всех режимах (рисунок 15). На втором этапе выполнялись испытания в режимах глубокого насыщения ТТ: осциллограммы критических режимов из MATLAB Simulink экспортировались в COMTRADE, загружались в PETOM-51 или PETOM-61 и воспроизводились на аналоговых входах прототипа (рисунок 16). На третьем этапе подавались осциллограммы реальных аварий.

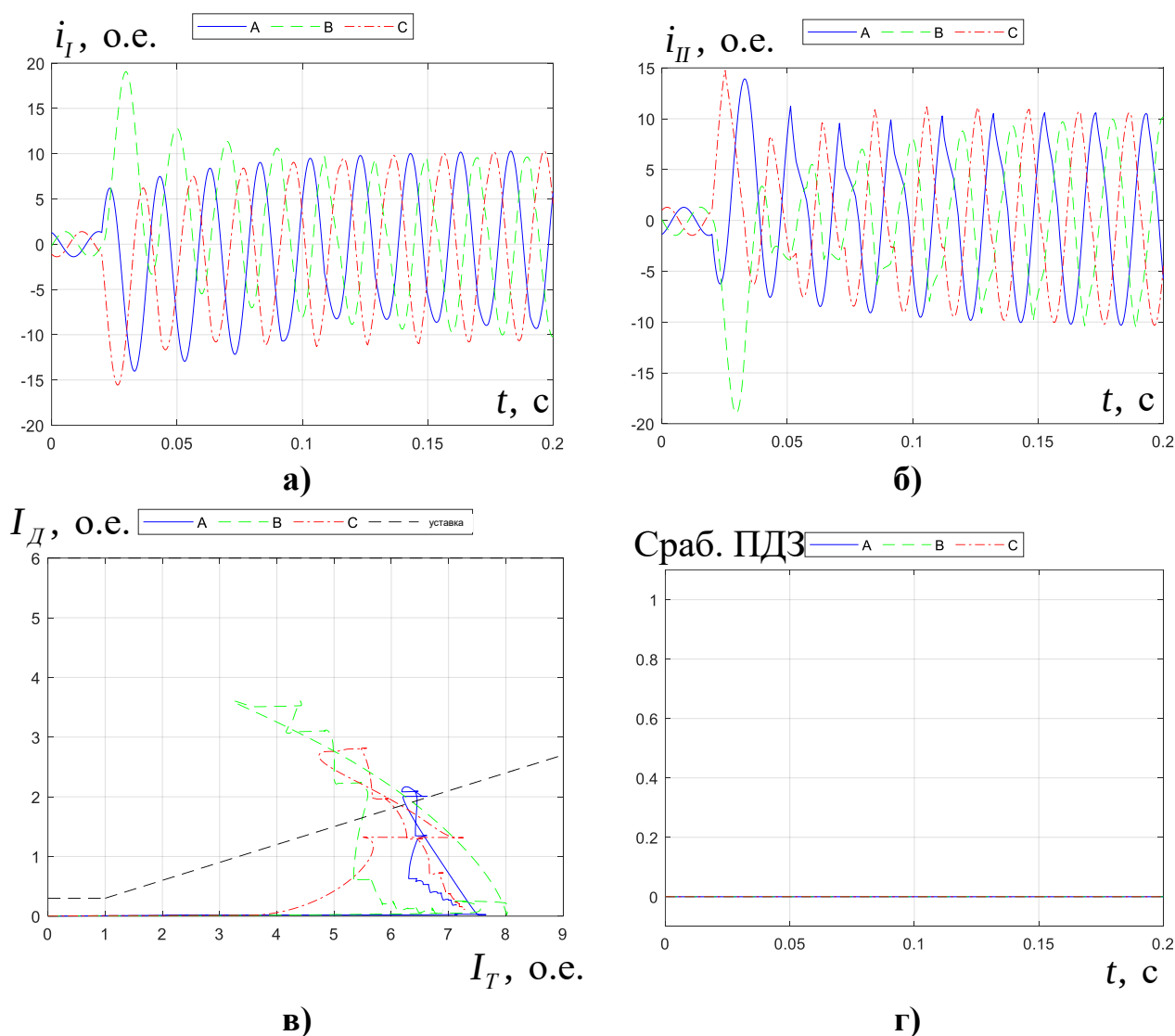
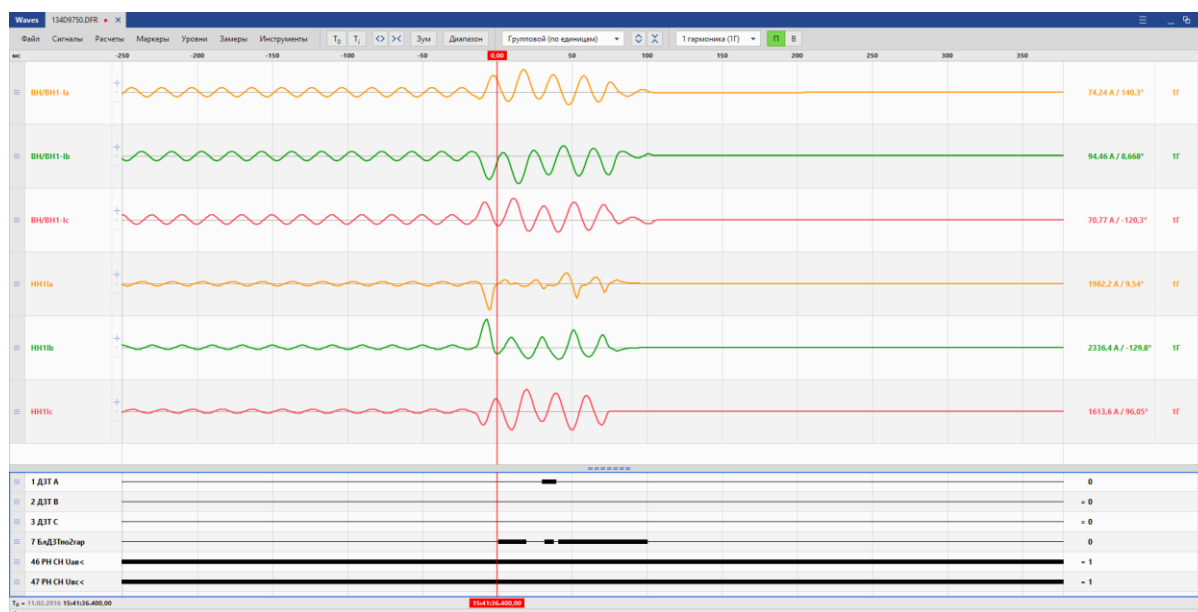


Рисунок 15 – Результаты натурных испытаний: (а) ток стороны 1 при внешнем коротком замыкании с насыщением трансформатора тока; (б) аналогичный ток стороны 2; (в) траектория тока небаланса на характеристике торможения дифференциальной защиты; (г) логические сигналы срабатывания защиты

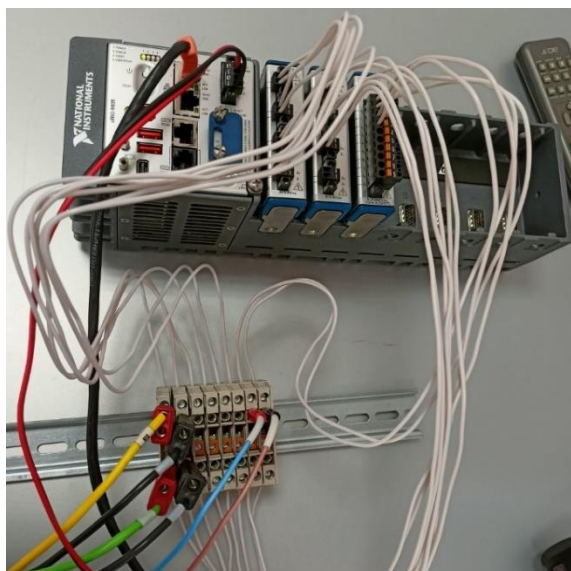
По испытаниям прототипа терминала в 25 наиболее тяжёлых режимах насыщения ТТ получены следующие результаты: 0 некорректных срабатываний при внешних КЗ, в 10 опытах имитации внутренних КЗ с максимальными замедлениями время действия не превысило 0,09 с от начала КЗ. Результаты

совпадают с данными имитационного моделирования и подтверждают применимость предложенных усовершенствований ко всем исследованным видам защищаемого оборудования (таблица 3) и терминалам всех производителей.

Техническое решение реализуемо без массовой замены ТТ на классы 5PR/TPY/TPZ, а предполагает только изменение алгоритма существующих терминалов. Таким образом, исследования главы 7 позволили перевести методы, изложенные в главах 2-6, на уровень аппаратной реализации и экспериментальной верификации.



а)



б)



в)

Рисунок 16 – Осциллограммы токов сторон, подаваемые от PETOM-51 при имитации реального переходного режима с насыщением трансформатора тока (а), фотография общего вида разработанного прототипа (б) и процесса его испытаний (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных диссертационных исследований получены и сформулированы следующие основные выводы и результаты:

1. Подтверждён систематический характер искажений токов и напряжений в УПН на основе натурных измерений на более чем 20 объектах: K_{2U} превышает норму в 5,5 раз (в ремонтных схемах – до 7,5 раз на стороне 110 кВ и до 13,5 раз на стороне 27,5 кВ); K_U достигает 9,4% при норме 2% на шинах 220 кВ ГЭС, питающей алюминиевый завод, и до 67% в сети, питающейся от тяговой ПС. Нарушения носят устойчивый воспроизводимый характер, качественно отличающий УПН от сетей общего назначения.

2. Доказана некорректность понятия «долевого вклада» вследствие неаддитивности напряжения искажения. Разработан метод оценки влияния потребителей по автономному напряжению $U_{авт,k}$ и коэффициенту влияния $K_{вл,k}$ с погрешностью не более 7% на 12 типах нагрузок. Разработан корреляционный метод экспресс-анализа источников искажений с порогом выявления $|R_{UI}| < 0,6$, корректность подтверждена на данных транзита Тайшет–Тулун. Предложены организационно-технические мероприятия по снижению искажений на основе применения штрафных надбавок: рассмотренный пример показал суммарный штраф с двух искажающих потребителей 1 187 205 руб./год при сроке окупаемости ФКУ порядка 8 лет.

3. Введена система вероятностных критериев устойчивости защиты в условиях искажений сигналов тока и напряжения – матрица условных вероятностей, ROC-характеристика и критерий Неймана-Пирсона. Показано применение критериев устойчивости на примере усовершенствованного алгоритма ПДЗ (процентное торможение, блокировка по 2-й гармонике, ДФО и блокировка по АС), что обеспечило правильное несрабатывание в 100% из 5184 сценариев внешнего КЗ против 36% у базового алгоритма торможения с блокировкой по 2-й гармонике.

4. Введено понятие устойчивости ОМП как вероятности непревышения нормированного значения ошибки (15% длины для ВЛ до 50 км, 10% для 50-100 км, 7% для 100-300 км, 5% для 300 км и более). Верифицирована устойчивость группового байесовского алгоритма ОМП, снижающего среднеквадратическую ошибку с 1,52 км у лучшего частного метода до 0,88 км на примере модели ВЛ 220 кВ Луч-Нагорная. Выигрыш по зоне обхода составил 10-15%.

5. Разработаны алгоритмы обеспечения устойчивой работы защит в условиях искажения сигналов напряжения и тока. На примере ПДЗ СТ показано, что один только ДФО снижает долю неселективных срабатываний при внешних КЗ с 18,52% до 1,85% (в 10 раз), добавление блокировки по АС устраняет их полностью, а при БТН применение ДФО и блокировки по АС снижает число ложных срабатываний с 36 случаев до 4 (в 9 раз). Для ПДЗ генератора показано, что направленное торможение с блокировкой B исключает ложные срабатывания при насыщении ТТ в режимах внешних КЗ во всех 300 режимах. Разработан способ восстановления формы тока ТТ по трём отсчётам (погрешность менее 1%) и модифицированная ТЗОП с рабочей величиной $\alpha =$

i_2/i_1 и органом приращения тока ОП, корректно различающая все 9 видов несимметричных КЗ и несимметричную тяговую нагрузку.

6. Разработан метод ЦОС на основе дизеринга с малоразрядным квантованием (4 уровня), снижающий погрешность оценки амплитуды основной гармоники в условиях интергармоник с 11,3% до 0,425% – более чем в 26 раз – без анализа состава помех и без необходимости изменения аппаратной части терминала защиты. В задаче ОМП ВЛ флуктуационная ошибка $\Delta L = 0,737$ км (1,4% длины ВЛ) при применении дизеринга сводится к нулю. Метод совместим с протоколом МЭК 61850 и реализуется программно.

7. Установлен активно-индуктивный характер переходного сопротивления при однофазных КЗ на ВЛ с ГТ ($Z_f = (11,8 \div 12,6) + j(1,5 \div 1,6)$ Ом на модели ВЛ 110 кВ с проводом АС-150/24), приводящий к погрешности стандартного ОМП 4-10%. Разработаны и защищены патентами РФ новые способы ОМП ЛЭП, позволяющие получить однозначные решения квадратных уравнений и устраняющие влияние реактивной составляющей переходного сопротивления на точность ОМП.

8. Разработаны и испытаны в ходе натурных экспериментов прототип устройства выявления источников искажений токов и напряжений на основе модуля NI cRIO-9014 и прототип ПДЗ на базе модуля NI cRIO-9035, реализующий ДФО и блокировку по АС с помощью среды LabVIEW. Моделирование логики 8 типов серийно выпускаемых ПДЗ (MiCOM, ЭКРА, Механотроника, Бреслер, АВВ) в 800 режимах с глубоким насыщением ТТ выявило от 194 до 740 некорректных срабатываний. Предложенный алгоритм исключил излишние срабатывания во всех 800 режимах при максимальном замедлении 0,06-0,1 с в режимах внутренних КЗ. Натурные испытания с использованием РЕТОМ-51 и РЕТОМ-61 подтвердили 0 некорректных срабатываний в 25 наиболее тяжёлых режимах, время действия при внутренних КЗ составило не более 0,09 с. Решение реализуется без замены ТТ путём изменения алгоритма существующих терминалов защиты.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные статьи в журналах из перечня ВАК:

1. **Федосов, Д. С.** Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи с заземленным грозозащитным тросом путём решения квадратных уравнений / А. Л. Куликов, Д. С. Федосов, П. П. Чернеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2026. – Т. 28., № 3. – С. 26-36. – DOI 10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36.

2. **Федосов, Д. С.** Прототип цифровой дифференциальной защиты с улучшенной отстройкой от режимов с глубоким насыщением трансформаторов тока / А. Л. Куликов, Д. С. Федосов, Е. О. Анненков // Электротехника. – 2026. – № 5. – С. 64-71.

3. **Федосов, Д. С.** Обеспечение устойчивости определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи при несинусоидальности

токов и напряжений / А. Л. Куликов, Д. С. Федосов // Электрические станции. – 2026. – № 3(1136). – С. 44-51. – DOI 10.71841/ES.elst.2026.1136.03.06.

4. **Федосов, Д. С.** Устойчивость функционирования релейной защиты в системах электроснабжения промышленных потребителей / А. Л. Куликов, Д. С. Федосов // Электричество. – 2026. – № 3. – С. 41-53. – DOI 10.24160/0013-5380-2026-3-41-53.

5. **Федосов, Д. С.** Разработка методики экономического стимулирования потребителей с нелинейными и несимметричными нагрузками к снижению искажений напряжения / Д. С. Федосов, В. В. Романова, Е. В. Зубова // Интеллектуальная электротехника. – 2026. – № 1(33). – С. 22-47.

6. **Федосов, Д. С.** Сравнительный анализ эффективности алгоритмов торможения в дифференциальной защите в условиях глубокого насыщения трансформаторов тока / А. В. Лукьянов, Д. С. Федосов // Электрические станции. – 2025. – № 11(1132). – С. 46-53. – DOI: 10.71841/EP.elst.2025.1132.11.07.

7. **Федосов, Д. С.** Модифицированная токовая защита обратной последовательности для работы в условиях несимметрии нагрузки / Д. С. Федосов // Релейная защита и автоматизация. – 2025. – № 3(60). – С. 4-11.

8. **Федосов, Д. С.** Оценка неопределенности электрических нагрузок, обусловленных зарядом электромобилей / Н. А. Шамарова, И. Н. Шушпанов, Д. С. Федосов, К. В. Суслов, А. Г. Батухтин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 147-161. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-147-161.

9. **Федосов, Д. С.** Анализ аварийных режимов линий электропередачи в фазных координатах / Д. С. Федосов, С. Г. Тигунцев // Электричество. – 2025. – № 2. – С. 42-50. – DOI: 10.24160/0013-5380-2025-2-42-50.

10. **Федосов, Д. С.** Исследование несимметричных и несинусоидальных режимов в схеме электроснабжения железнодорожной тяги с учетом случайного характера изменения нагрузок / А. Н. Висящев, С. Г. Тигунцев, Д. С. Федосов, Е. В. Зубова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2025. – № 1(88). – С. 40-45.

11. **Федосов, Д. С.** Расчетное исследование несимметричных и несинусоидальных режимов на подстанциях тягового транзита 110 кВ Тайшет – Тулун / А. Н. Висящев, С. Г. Тигунцев, Д. С. Федосов, Е. В. Зубова, Ю. Н. Терских, А. А. Висящев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 5(86). – С. 72-78.

12. **Федосов, Д. С.** Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку / Е. В. Зубова, Д. С. Федосов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 83-95. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.

13. **Федосов, Д. С.** Измерение и анализ показателей качества электроэнергии на подстанциях тягового транзита 110 кВ Тайшет – Тулун / А. Н. Висящев, С. Г. Тигунцев, Д. С. Федосов, Ю. Н. Терских, А. А. Висящев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 3(84). – С. 14-20.

14. **Федосов, Д. С.** Анализ влияния переходного сопротивления электрической дуги на работу дистанционной защиты с использованием динамической модели / В. А. Новобрицкий, Д. С. Федосов // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 2(51). – С. 12-18.

15. **Федосов, Д. С.** Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения / А. Н. Висящев, Э. Р. Пленков, Д. С. Федосов // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 2(22). – С. 78-89. – DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_78.

16. **Федосов, Д. С.** Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений / Е. О. Анненков, Е. В. Зубова, А. С. Селезнев, Д. С. Федосов // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 401-414. – DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-401-414.

17. **Федосов, Д. С.** Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока / В. А. Новобрицкий, Д. С. Федосов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 71-85. – DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85.

18. **Федосов, Д. С.** Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах / Т. С. Мухаметгалеева, Д. С. Федосов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 4(159). – С. 450-462. – DOI: 10.21285/1814-3520-2021-4-450-462.

19. **Федосов, Д. С.** Оценка влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети / А. Н. Висящев, Д. С. Федосов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 3(48). – С. 46-50.

20. **Федосов, Д. С.** Симметрирование режимов в системах электроснабжения железнодорожной тяги / А. Н. Висящев, Б. Н. Каратаев, С. Г. Тигунцев, Д. С. Федосов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 1(46). – С. 60-63.

21. **Федосов, Д. С.** Исследование резонансных явлений на высших гармониках в схеме внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки / Д. С. Федосов, И. А. Тарасов, Д. В. Воронцов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 4(111). – С. 145-154.

Основные статьи в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

1. **Fedosov, D. S.** Prototype of Digital Differential Protection with Improved Immunity to Deep Current Transformer Saturation / A. L. Kulikov, D. S. Fedosov, E. O. Annenkov // Russian Electrical Engineering. – 2026. – Vol. 97, No. 5. – Pp. 408-414. – DOI: 10.3103/S106837122670046X.

2. **Fedosov, D. S.** Dithering-based Current and Voltage Parameter Estimation for Industrial Power Systems / A. L. Kulikov, D. S. Fedosov, V. Yu. Vukolov // Energy Systems Research. – 2026. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 137-144. – DOI: 10.25729/esr.2026.02.0016.

3. **Fedosov, D.** Modified Negative-Sequence Overcurrent Protection for Operation Under Load Asymmetry Conditions / D. Fedosov, I. Iliev, H. Beloev, K. Suslov, A. Suslov, I. Shushpanov, I. Beloev // *Electricity*. – 2026. – Vol. 7, No. 3. – 71. – DOI 10.3390/electricity7030071.

4. **Fedosov, D. S.** Fast phasor estimation for digital bus differential protection under saturation conditions of current transformers / I. N. Shushpanov, D. S. Fedosov, A. S. Vovseenko, K. V. Suslov, J. Shi // *Energy Reports*. – 2026. – Vol. 15. – 109259. – DOI: 10.1016/j.egyr.2026.109259.

5. **Fedosov, D.** Methodology for Selecting Parameters of Electric Energy Storage Systems in Microgrids with Integration of Electric Vehicle Charging Stations / I. Shushpanov, H. Beloev, N. Shamarova, D. Fedosov, K. Peng, I. Iliev, I. Beloev, K. Suslov // *Energies*. – 2026. – Vol. 19, No. 10. – 2307. – DOI: 10.3390/en19102307.

Патенты РФ на изобретения и полезные модели:

1. Пат. 2864459 РФ, МПК G01R 21/00. Способ оценки влияния потребителя на искажение напряжения в точке общего присоединения / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, А. А. Севостьянов. – № 2025122249 ; заявл. 12.08.2025 ; опубл. 22.06.2026, Бюл. № 18.

2. Пат. 2864349 РФ, МПК H02H 3/08. Способ токовой защиты электроустановки от коротких замыканий / А. Л. Куликов, А. А. Колесников, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков. – № 2025135086 ; заявл. 10.12.2025 ; опубл. 19.06.2026, Бюл. № 17.

3. Пат. 2861653 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на двухцепной воздушной линии электропередачи / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков. – № 2025129810 ; заявл. 29.10.2025 ; опубл. 06.05.2026, Бюл. № 13.

4. Пат. 2861652 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на воздушной линии электропередачи, оборудованной грозозащитным тросом / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков, П. П. Чернеев. – № 2025128974 ; заявл. 22.10.2025 ; опубл. 06.05.2026, Бюл. № 13.

5. Пат. 2861610 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения на воздушной линии электропередачи / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков. – № 2025129715 ; заявл. 29.10.2025 ; опубл. 06.05.2026, Бюл. № 13.

6. Пат. 2858295 РФ, МПК H02H 3/28. Способ дифференциальной защиты электроустановки / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков. – № 2025119551 ; заявл. 16.07.2025 ; опубл. 17.03.2026, Бюл. № 8.

7. Пат. 2853444 РФ, МПК G01R 19/25. Способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, **Д. С. Федосов**, А. А. Севостьянов. – № 2025114308 ; заявл. 27.05.2025 ; опубл. 23.12.2025, Бюл. № 36.

8. Пат. 2853189 РФ, МПК G01R 19/30. Способ восстановления тока, искаженного вследствие насыщения трансформатора тока / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, А. А. Лоскутов. – № 2025114315 ; заявл. 27.05.2025 ; опубл. 22.12.2025, Бюл. № 36.

9. Пат. 2852334 РФ, МПК H02H 3/08. Способ обеспечения отключающей способности силовых выключателей / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, Е. В. Крюков, И. Н. Шушпанов. – № 2025116241 ; заявл. 11.06.2025 ; опубл. 08.12.2025, Бюл. № 34.

10. Пат. 2851035 РФ, МПК G01R 19/25. Способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, **Д. С. Федосов**, А. А. Севостьянов. – № 2025122234 ; заявл. 12.08.2025 ; опубл. 17.11.2025, Бюл. № 32.

11. Пат. 2850736 РФ, МПК G01R 23/00. Способ оценки параметров синусоидального сигнала / А. Л. Куликов, **Д. С. Федосов**, А. А. Севостьянов. – № 2025110628 ; заявл. 24.04.2025 ; опубл. 13.11.2025, Бюл. № 32.

12. Пат. на полезную модель № 220793 РФ, МПК H02H 7/26, G01R 31/08. Устройство спектрально-дуговой защиты / В. А. Новобрицкий, **Д. С. Федосов**. – № 2022126870 ; заявл. 14.10.2022 ; опубл. 03.10.2023, Бюл. № 38.

13. Пат. 2627195 РФ, МПК G01R 21/00. Способ оценки влияния потребителя на искажение напряжения в точке общего присоединения / А. Н. Висящев, **Д. С. Федосов**. – № 2016142222 ; заявл. 27.10.2016 ; опубл. 03.08.2017, Бюл. № 22.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Свид. 2025693692 РФ. Программа для проверки правильности фазировки токовых цепей цифровой дифференциальной защиты трансформатора / И. Н. Шушпанов, **Д. С. Федосов**, А. Л. Куликов. – № 2025692557 ; заявл. 24.11.2025 ; зарегистр. 01.12.2025.

2. Свид. 2025615504 РФ. Программа определения резонансных гармоник токов и напряжений для воздушных ЛЭП 35–220 кВ, питающих нелинейную нагрузку / **Д. С. Федосов**, Е. В. Зубова. – № 2025613753 ; заявл. 22.02.2025 ; зарегистр. 05.03.2025.

3. Свид. 2025617136 РФ. Программа управления прототипом дифференциально-фазной защиты ЛЭП с применением атмосферной оптической линии связи / **Д. С. Федосов**, Е. О. Анненков, В. А. Новобрицкий. – № 2025614994 ; заявл. 13.03.2025 ; зарегистр. 24.03.2025.

4. Свид. 2025617138 РФ. Программа для расчёта и визуализации напряжённости магнитного поля, создаваемого воздушными ЛЭП высокого напряжения / **Д. С. Федосов**, В. А. Новобрицкий, В. Ю. Давыдов. – № 2025615016 ; заявл. 13.03.2025 ; зарегистр. 24.03.2025.

5. Свид. 2025660828 РФ. Программа для исследования работы дифференциальной защиты трансформатора при различных сочетаниях влияющих факторов / В. Ю. Давыдов, **Д. С. Федосов**. – № 2025619474 ; заявл. 17.04.2025 ; зарегистр. 29.04.2025.

6. Свид. 2025660990 РФ. Программа расчёта параметров переходного режима короткого замыкания для исследования работы дифференциальной защиты трансформатора / В. Ю. Давыдов, **Д. С. Федосов**. – № 2025619385 ; заявл. 17.04.2025 ; зарегистр. 28.04.2025.

7. Свид. 2014614322 РФ. Программный модуль для определения параметров потребителя и оценки его влияния на качество электрической энергии / А. Н. Висящев, Д. С. Федосов. – № 2014611907 ; заявл. 05.03.2014 ; зарегистр. 22.04.2014.

Учебные пособия:

1. **Федосов, Д. С.** Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие / Д. С. Федосов. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2026. – 300 с. – ISBN 978-5-8038-2060-4.

2. **Федосов, Д. С.** Цифровые технологии защиты и коммуникаций в электроэнергетике : учебное пособие / К. В. Суслов, М. М. Султанов, И. Н. Шушпанов, Д. С. Федосов. – Волжский : Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2026. – 94 с. – ISBN 978-5-94721-185-6.

3. **Федосов, Д. С.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах : учебное пособие / Д. С. Федосов. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2021. – 162 с.

4. **Федосов, Д. С.** Релейная защита электрических станций и подстанций : учебное пособие по направлениям подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / Д. С. Федосов. – Иркутск : ИРНИТУ, 2019. – 111 с.

5. **Федосов, Д. С.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах : учебное пособие по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения / Д. С. Федосов. – Иркутск : ИРНИТУ, 2019. – 145 с.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Подписано в печать 08.09.2026 г. Формат 60 × 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 2,75.

Тираж 120 экз. Зак. 77. Поз. плана 2н.