

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора Куликова Александра Леонидовича
на диссертацию **Осинцева Анатолия Анатольевича**
**«Интеллектуальное децентрализованное управление режимами и
релейная защита оборудования электрических сетей
с распределённой (малой) генерацией»**, представленную на
на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности **2.4.3. «Электроэнергетика»**

Актуальность темы диссертации

Текущий этап развития электроэнергетики характеризуется устойчивой тенденцией к переходу от модели централизованного производства электроэнергии на крупных электростанциях к созданию распределённых систем энергоснабжения с использованием источников малой мощности. В России накоплен значительный опыт эксплуатации объектов малой генерации, однако вопросы их интеграции в существующие распределительные сети остаются предметом научных дискуссий и требуют поиска новых технических решений. Практика показывает, что включение генерирующих установок малой мощности в состав распределительных сетей приводит к изменению характера протекания электромагнитных и электромеханических процессов. Возникающие при этом режимы отличаются от традиционных (для систем с односторонним питанием), что создает предпосылки для снижения эффективности работы релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Следует также отметить, что создание разветвленной инфраструктуры сбора и передачи данных для целей централизованного управления в распределительных сетях сопряжено со значительными капитальными затратами, которые зачастую сопоставимы со стоимостью самих объектов генерации. В условиях множественности собственников генерирующего оборудования и различия их экономических интересов реализация единой централизованной системы управления становится организационно и технически затруднительной. Это обуславливает необходимость поиска альтернативных подходов, основанных на распределённом принятии решений и максимальном использовании локальной информации.

В представленной диссертационной работе Осинцев А.А. отмечает вышеуказанные проблемы и предлагает их решение на базе концепции децентрализованного мультиагентного управления. В исследовании предпринята попытка создания целостной системы, охватывающей как режимное управление в нормальных условиях, так и противоаварийное управление с последующим восстановлением нормального режима. Такой комплексный подход представляется обоснованным и своевременным. И поэтому считаю, что диссертация Осинцева А.А. является актуальной и практически значимой.

Научная новизна положений и значимость теоретических результатов

Автором проведён анализ современного состояния и тенденций развития распределительных электрических сетей в условиях массового внедрения объектов малой распределённой генерации, что позволило сформулировать требования к новым системам управления. Основными требованиями являются: децентрализованный характер принятия решений на основе локально измеряемых параметров, отсутствие необходимости в постоянном информационном обмене между устройствами, способность к самовосстановлению после аварийных возмущений, адаптивность к изменениям конфигурации сети и состава генерирующего оборудования, а также возможность интеграции интеллектуальных алгоритмов для решения задач идентификации режимов и принятия решений.

В диссертации получены результаты, имеющие научную новизну; наиболее значимыми являются следующие:

1. Разработаны теоретические основы и принципы децентрализованного мультиагентного управления электрическими сетями с распределённой малой генерацией, включающие, в том числе, предложенные автором принцип разделения времени принятия решений агентами и новые информационные признаки локально контролируемых параметров для решения системных задач режимного управления.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность ограничения выдаваемой в сеть мощности по признаку снижения частоты собственных колебаний генераторов, что позволяет контролировать запасы статической устойчивости без сбора информации с удалённых участков сети.

3. Разработана модель экспертного роевого искусственного интеллекта для задач противоаварийного разделения активных электрических сетей и их последующего восстановления.

4. Разработаны структура и алгоритмы поведения интеллектуальных устройств (агентов), обеспечивающих децентрализованное комплексное управление режимами.

5. На разработанном цифро-физическом испытательном стенде с использованием прототипов интеллектуальных агентов экспериментально доказана возможность децентрализованного комплексного управления режимами электрических сетей с распределённой малой генерацией, включая регулирование частоты и напряжения в нормальном и послеаварийном режимах, противоаварийное разделение сети на сбалансированные энергорайоны и последующее восстановление целостности сети и нормального режима.

6. Доказана возможность и показаны преимущества применения искусственной нейронной сети в алгоритмах восстановления вторичного тока трансформаторов тока и дифференциальной защиты генераторов.

На основе полученных теоретических результатов работы сформирован

законченный комплекс научно-обоснованных способов, алгоритмов и моделей децентрализованного мультиагентного управления (ДМАУ) режимами и релейной защиты оборудования электрических сетей с распределенной малой генерацией. Комплекс охватывает все ключевые аспекты функционирования активных распределительных сетей - от регулирования частоты и напряжения в нормальном режиме до противоаварийного разделения при коротких замыканиях и послеаварийного восстановления целостности сети, что создает методологическую основу для проектирования децентрализованных систем управления электрическими сетями нового типа, не требующих централизованных диспетчерских центров и развитой телекоммуникационной инфраструктуры.

Теоретическое обоснование применения искусственных нейронных сетей для решения задач релейной защиты расширяет границы применимости интеллектуальных технологий в электроэнергетике.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что полученные в диссертационной работе результаты доведены до стадии, позволяющей использовать их при проектировании, создании и эксплуатации электрических сетей с распределенной малой генерацией. Соискателем не просто предложены идеи, а разработаны полнофункциональные прототипы интеллектуальных устройств (агентов ДМАУ) с высоким уровнем готовности технологии (опытные образцы, испытанные в условиях, приближенных к реальным). К практически значимым результатам также следует отнести готовый к опытно-промышленной эксплуатации прототип агента сетевого выключателя с полным набором алгоритмов защит и автоматики (приложение В диссертации), методику выбора параметров тактов и квантов времени у данного агента для сетей любой конфигурации, а также инженерную методику оценки времени срабатывания токовых отсечек при насыщении ТТ, позволяющую избежать необоснованной замены оборудования.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных исследований и результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, верификацией теоретических положений на программно-аппаратном комплексе RTDS и электродинамической модели кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Имеются положительные результаты комплексных испытаний прототипов агентов ДМАУ, в ходе которых многократно воспроизводились нормальные и утяжелённые установившиеся режимы, режимы удаленной синхронизации, автоматической тактовой сборки сети и КЗ с управляемым разделением сети и последующим восстановлением. Положения и результаты диссертационной работы обсуждались на различных международных и всероссийских конференциях.

Оценка содержания диссертации и её завершенности

Диссертация Осинцева А.А. изложена логически последовательно с обоснованием всех теоретических положений проведёнными экспериментами на физических и математических моделях. Диссертационная работа включает 433 страницы машинописного текста и содержит введение, 5 глав, заключение, список сокращений, словарь терминов, список литературы из 280 наименований, 6 приложений, 192 рисунка и 24 таблицы.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор тенденций развития распределенной генерации. Критически проанализированы существующие подходы к управлению режимами (централизованная, децентрализованная, распределенная мультиагентная архитектуры) и релейной защите (адаптивные защиты, защиты на дифференциальном принципе). Обоснован вывод о том, что подавляющее большинство предлагаемых решений требуют развитой информационно-коммуникационной инфраструктуры, что создает неприемлемые риски кибератак и неоправданно удорожает системы управления относительно стоимости самих объектов малой генерации. Сформулирована научная проблема, на решение которой направлена диссертация.

Вторая глава посвящена теоретическим основам децентрализованного режимного управления. Предложены и формализованы два варианта децентрализованного регулирования частоты: по фиксированному приоритету станций и с привязкой к тактам времени. Разработан способ автоматической самонастройки коэффициентов ПИ-регуляторов частоты и обменной мощности, основанный на минимизации целевой функции качества переходного процесса. Результаты подтверждены испытаниями на RTDS. Исследована возможность фиксации предела статической устойчивости генератора по снижению частоты собственных колебаний. Для задач децентрализованного регулирования напряжения сформулированы правила поведения агентов при пересечении зон ответственности. Показана целесообразность применения генетических алгоритмов для выбора отключаемых нагрузок при восстановлении резервов мощности.

Третья глава содержит теоретические и технологические основы противоаварийного управления и релейной защиты в сетях с распределённой малой генерацией. Ключевым результатом является обоснование смены концепции: отказ от безусловного сохранения целостности сети при КЗ и переход к концепции управляемого сбалансированного разделения сети с последующим автоматическим восстановлением.

Четвертая глава посвящена практической реализации и экспериментальному исследованию технологии ДМАУ. Предложена архитектура роевого искусственного интеллекта экспертного типа,

обеспечивающая децентрализованное восстановление целостности электрической сети и возврат к нормальному режиму после её аварийного разделения. Разработано семейство прототипов интеллектуальных агентов на базе отечественных контроллеров. Создан уникальный цифро-физический испытательный стенд на базе электродинамической модели НГТУ и SCADA-системы MasterSCADA. Выполнена программа подготовительных, локальных (отдельных функций), комплексных (для оценки системных эффектов) испытаний, подтвердившая корректность децентрализованного самоназначения ведущей по частоте электростанции, эффективность мультиагентного регулирования напряжения в условиях конфликта интересов, работоспособность удаленной синхронизации на выключателях, не контролируемых станцией, реализуемость полного роевого цикла «аварийное разделение – сборка сети – восстановление нормального режима» без использования каналов связи.

Пятая глава направлена на совершенствование локальной противоаварийной автоматики и релейной защиты оборудования, обеспечивающих эффективность технологии ДМАУ. Предложен алгоритм быстродействующей ступени автоматики ограничения повышения частоты по скорости изменения частоты с блокировкой от дистанционного органа. Выполнен сравнительный анализ четырех методов измерения частоты применительно к задачам режимного и противоаварийного управления ЛИЭС. Исследована проблема насыщения трансформаторов тока в сетях 6-35 кВ; предложено эмпирическое выражение для оценки времени срабатывания токовой отсечки при насыщении ТТ. Обоснована и экспериментально подтверждена (на математических моделях) возможность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для восстановления искаженного вторичного тока ТТ. Разработаны два оригинальных алгоритма дифференциальной генератора: на основе структурного метода распознавания образов и на основе ИНС, обеспечивающие высокое быстродействие и устойчивость функционирования.

В заключении сформулированы выводы, которые соответствуют целям и задачам, поставленным в работе.

В приложениях приведены сведения о разработанной SCADA-системе проведения экспериментом, монтажные схемы и алгоритмы агента сетевого выключателя на базе RAPTOR-X86, результаты поэтапных испытаний технологии ДМАУ, а также патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения, подтверждающие новизну, апробацию и практическое использование результатов диссертационного исследования.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация Осинцева А.А. соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. «Электроэнергетика» по следующим направлениям исследований:

П.8. Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия

устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях» (главы 3, 5).

П.11. Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид (главы 2, 4).

П.16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике (главы 2, 3, 5).

П.20. Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии (главы 4, 5).

Качество оформления диссертации

Оформление диссертационной работы соответствует всем требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям. Текст работы написан с использованием общепринятой научной и технической терминологии, логически выстроен. Содержание автореферата полностью коррелирует с содержанием диссертации.

Соответствие критериям, которым должна отвечать диссертация

Диссертационная работа Осинцева Анатолия Анатольевича соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., №842 (далее - Положение), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук:

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработана совокупность теоретических положений в области управления активными распределительными электрическими сетями. Решена научно-техническая проблема создания интеллектуальной децентрализованной системы режимного и противоаварийного управления, имеющая важное хозяйственное значение для развития распределённой энергетики и повышения надёжности электроснабжения потребителей (п.9 Положения).

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, все разделы логически взаимосвязаны и подчинены достижению поставленной цели. Новые научные результаты, выносимые на защиту, сформулированы конкретно и обоснованно, их достоверность подтверждена

экспериментально (п.10 Положения).

Материалы диссертации опубликованы в 13 статьях в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 2.4.3 (технические науки), 2 журнальных статьях в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus (1 квартиль), получено 2 патента на изобретения и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (п.11 - 13 Положения).

В диссертации корректно и в полном объеме приведены ссылки на авторов и источники заимствований (п.14 Положения).

На обсуждение предлагается вынести следующие основные замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Какие особенности имеются в отношении применения результатов диссертационного исследования в крупных системах электроснабжения, уже находящихся продолжительное время в эксплуатации? Поскольку интеллектуальное децентрализованное управление режимами и релейная защита оборудования электрических сетей с распределённой генерацией требует применение электрических аппаратов с большим коммутационным ресурсом, а также специализированных устройств защиты и автоматики, нужна ли полная реконструкция таких систем электроснабжения?

В таких системах электроснабжения могут уже существовать каналы связи, которые можно использовать для реализации защиты и автоматики. Имеется целесообразность их использования для сочетания неселективной и селективной релейной защиты? Какие положительные эффекты при этом можно получить?

2. В главе 2 (стр. 114-115 диссертации) приводится алгоритм (правила) корректировки баланса реактивной мощности для ввода напряжения в контролируемых узлах сети в допустимую область. В частности, «если фиксируется невозможность регулирования напряжения в удаленном узле (в виду близости к нему источника реактивной мощности с большим регулировочным диапазоном, определяется через коэффициент взаимной корреляции Пирсона r), то класс состояния напряжения в этом узле игнорируется». Если рассчитанный коэффициент корреляции близок к 1 (например, $r > 0,7$), то фиксируется прямая зависимость изменения напряжения на удалённом конце линии от напряжения в месте подключения ЛИЭС, в противном случае такая зависимость отсутствует.

Однако, в составе ЛИЭС могут присутствовать промышленные потребители с нелинейной нагрузкой, которые существенно влияют на отклонение показателей качества электроэнергии от нормативных значений и соответственно на расчет коэффициента взаимной корреляции Пирсона. Предусматривались ли какие-либо меры компенсации такого влияния?

3. В третьей главе предлагается способ РЗ, в котором исключается необходимость «прямого» селективного отключения поврежденных ЛЭП путем

неселективного отключения группы элементов в районе сети с признаками аварийного режима и последующим быстрым восстановлением схемы района за счет интеллектуального автоматического повторного включения. При этом элементы с устойчивыми повреждениями остаются селективно отключенными.

Какие ограничения имеет предлагаемый способ релейной защиты? Возможно ли его применение в системах электроснабжения промышленных предприятий, имеющих непрерывные производства?

4. В главе 5 (стр. 263, 264 диссертации) при рассмотрении способа измерения частоты, основанного на квадратурной демодуляции, приведена некорректная математическая запись. При этом используются величины $\text{Im}(\varphi(t))$, $\text{Re}(\varphi(t))$, где $\varphi(t)$ – функция изменения фазы синусоидального сигнала во времени, которая не является комплексной.

5. На стр.292-295 диссертации приводятся методы повышения функциональной устойчивости дифференциальной защиты генератора при соединении обмоток статора в «треугольник». Однако численные показатели устойчивости не используются, поэтому выводы, к сожалению, носят качественный характер, а численные показатели выигрыша предложенных технических решений отсутствуют.

6. В исследованиях по использованию искусственных нейронных сетей для восстановления вторичного тока трансформаторов тока (стр. 299-305 диссертации) отсутствуют предложения по технической реализации устройства, реализующего такое восстановление.

Каким образом видится автору применение указанного устройства на практике, а также настройка его в условиях эксплуатации?

7. Замечания редакционного характера: использование длинных предложений, трудных для восприятия; применение иностранного обозначения десятичных дробных чисел; описки, опечатки и другие.

Заключение по диссертационной работе

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Осинцева А.А., которая представляет в целом законченную научно-квалификационную работу, отражающую результаты исследований автора по разработке новой технологии децентрализованного мультиагентного управления электрическими сетями с распределённой малой генерацией.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.4.3. «Электроэнергетика», а её основные научные результаты прошли апробацию на международных и российских конференциях. Количество публикаций соответствует требованиям ВАК на соискание учёной степени доктора технических наук. Автореферат в должной степени соответствует содержанию диссертации.

На основании изложенного считаю, что представленную диссертационную работу по уровню научной новизны, объёму выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных

результатов можно квалифицировать как решение научно-технической проблемы создания интеллектуальной децентрализованной системы режимного и противоаварийного управления, имеющей важное хозяйственное значение для развития распределённой энергетики и повышения надёжности электроснабжения потребителей.

Диссертационная работа А.А. Осинцева полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в действующей редакции).

Автор диссертации Осинцев Анатолий Анатольевич заслуживает присуждение ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.3 - «Электроэнергетика».

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроэнергетика,
электроснабжение и силовая электроника»
ФГБОУ ВО «Нижегородский
государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»,
профессор

Александр Леонидович Куликов

«16» марта 2026 г.

Контактные данные:

Электронная почта: inventor61@mail.ru.

Телефон: 7(831) 432-91-85.

Сведения об организации:

Наименование: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»

Адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Электронная почта: nntu@nntu.ru

Телефон: +7(831) 436-63-07

Факс: +7(831) 436-94-75

Подпись заверя

*Членский секретарь
Ученого совета*

*С озвонком ознакомлен
30.03.2026 г. В.А. Осинцев*

*И.Н. Мерзляков
Отзыв оформлен 30.03.2026
(Овсянников А.Г.)*