

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
им. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИСЭМ СО РАН)



664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, 130
Тел. (395-2) 42-47-00
Факс (395-2) 42-67-96
E-mail: info@isem.jrk.ru
от 16.03.2020 № 253/40-23
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора ИСЭМ СО РАН
Д.Т.Н.

«12»

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Осинцева Анатолия Анатольевича «Интеллектуальное децентрализованное управление режимами и релейная защита оборудования электрических сетей с распределённой (малой) генерацией», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика

Актуальность темы диссертации

Развитие мировой электроэнергетики вступило в фазу структурной трансформации, связанной с процессами технологической модернизации и изменением принципов организации энергоснабжения. Формирование энергосистем нового поколения сопровождается эволюцией распределительных сетей, которые приобретают свойства активных самоорганизующихся комплексов. Эта эволюция особенно значима в условиях широкого внедрения объектов распределенной энергетики, формирующих локальные энергосистемы различного масштаба (активные энергетические комплексы, локальные интеллектуальные энергосистемы – ЛИЭС, Микрогрид), что создает новые требования к системам управления.

Современный этап цифровой трансформации распределительных сетей 6-35 кВ характеризуется усложнением режимов их работы, обусловленным стохастичностью генерации и потребления, многообразием применяемых технических решений, а также необходимостью согласования интересов различных участников энергорынка (сетевых компаний, владельцев генерации, активных потребителей). Это противоречие проявляется, в частности, в задаче регулирования напряжения: сетевая организация заинтересована в определенном уровне

напряжения для оптимизации потерь, тогда как потребители могут иметь противоположные предпочтения для снижения собственных затрат. В таких условиях традиционные централизованные подходы к управлению режимами электрической сети демонстрируют ограниченную эффективность, поскольку не обеспечивают гибкого учета разнонаправленных интересов.

Дополнительным фактором, усугубляющим проблему управления режимами электрических сетей, насыщенных малой генерацией с низкой инерционностью, является специфика динамических процессов в них, которая создает трудности для применения устройств противоаварийной автоматики, разработанных для сетей «крупной» энергетики.

В ответ на эти вызовы в глобальной энергетике формируется запрос на переход к принципиально новому классу систем управления - автономным системам, способным к адаптации и принятию решений в условиях неопределенности. Наиболее перспективной архитектурой для построения таких систем управления в распределительных сетях с малой генерацией является система децентрализованного мультиагентного автоматического управления (ДМАУ), основанная на принципах роевого интеллекта. Данная архитектура предполагает, что управление реализуется не из единого центра, а через локальное взаимодействие множества интеллектуальных агентов, управляющих оборудованием сети. Каждый агент, обладая ограниченной локальной информацией и следуя общим правилам, вносит вклад в формирование глобально устойчивого и оптимального режима, разрешая возникающие конфликты интересов через механизмы кооперации и косвенной координации.

Таким образом, тема диссертационной работы Осинцева А.А. и полученные в ней результаты исследований, направленные на разработку теоретических основ, архитектурных решений и алгоритмов распределенного управления режимами активных распределительных электрических сетей, т.е. на преодоление существующих ограничений в управлении данных сетей, обладают значительной научной и практической ценностью для электроэнергетической отрасли.

Общая характеристика работы

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, словаря терминов, списка литературы, включающего в себя

280 библиографических наименований, и шести приложений. Общий объем работы – 433 страницы, включая 24 таблицы и 192 рисунка.

Во **введении** диссертационной работы обоснована актуальность темы исследования, отражены цель и научные задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и прикладная значимость работы, методы исследования, перечислены научные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлены апробация основных положений работы и личный вклад автора.

В **первой** главе проведён анализ тенденций развития электроэнергетики, связанных с цифровизацией и децентрализацией на основе малой генерации. Рассмотрены структурно-режимные изменения в сетях, проблемы обеспечения надёжности, особенности цифровизации и кибербезопасности. Отмечены ограничения традиционных систем управления и релейной защиты, а также необходимость их перехода к интеллектуальным децентрализованным самоорганизующимся системам.

Во **второй** главе изложены теоретические основы децентрализованного мультиагентного режимного управления активными электрическими сетями. Представлены принципы и архитектура управления, методы децентрализованного регулирования частоты с самопереназначением ведущей электростанции, а также алгоритмы автоматической самонастройки регуляторов частоты и обменной мощности на основе анализа переходных процессов. Теоретически обоснована возможность ограничения выдаваемой мощности генераторов по признаку снижения частоты собственных колебаний для сохранения статической устойчивости. Кроме того, рассмотрены вопросы децентрализованного поддержания баланса реактивной мощности (регулирования напряжения) в нормальных режимах на основе локальных и косвенных измерений.

В **третьей** главе предложен подход к противоаварийному управлению и релейной защите в активных распределительных электрических сетях. Вместо концепции сохранения целостности сети при любых возмущениях предлагается стратегия упреждающего сбалансированного разделения сети на части с их последующим автоматическим восстановлением. Описан согласованный алгоритм действий агентов экспресс отключения и сетевых выключателей при коротких замыканиях, обеспечивающий неселективное отключение аварийного района с последующим автоматическим повторным включением и интеллектуальной сборкой неповреждённой части сети для восстановления селективности, а также

процесс сканирующей синхронизации для восстановления параллельной работы активных частей сети.

В четвертой главе предложена структура и алгоритмические модели поведения интеллектуальных агентов, основанные на принципах роевого интеллекта и позволяющие реализовывать децентрализованное комплексное управление режимами сети. Описан процесс разработки и испытаний прототипов устройств ДМАУ, включающий создание цифро-физического испытательного стенда, прототипирование интеллектуальных агентов и их экспериментальное исследование как по отдельности, так и совместно друг с другом. Проведённые комплексные испытания подтвердили работоспособность и эффективность технологии ДМАУ в условиях, моделирующих реальную активную распределительную электрическую сеть.

Пятая глава посвящена исследованию и совершенствованию алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики для обеспечения эффективности работы локальных интеллектуальных энергосистем. Разработаны специализированные алгоритмы для автоматики ограничения повышения частоты. Проведён анализ и модернизация быстродействующих токовых защит, направленных на повышение их функциональной надёжности в радиальных сетях 6-35 кВ, и дифференциальных защит генераторов. Предложены интеллектуальные решения, в том числе с применением искусственных нейронных сетей, для повышения селективности и устойчивости защит в условиях сложных переходных режимов, характерных для сетей с распределённой малой генерацией.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна диссертационной работы

В ходе проведённого комплекса исследований получены и предложены следующие новые результаты.

1. Разработаны теоретические основы для решения системных задач комплексного управления режимами электрических сетей с распределённой малой генерацией на принципах децентрализации.

2. Обосновано применение принципа разделения времени принятия решений между агентами в рамках децентрализованного управления, что позволяет координировать их действия без прямого обмена данными.

3. Доказано, что для решения системных задач при децентрализованном управлении активными сетями достаточно информации, получаемой от локального контроля параметров установившихся и переходных режимов.

4. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность в условиях достижения предела по статической устойчивости определения допустимой выдаваемой генератором мощности в сеть по косвенному признаку – снижению частоты его собственных электромеханических колебаний.

5. Разработана модель экспертного роевого искусственного интеллекта применительно к задачам противоаварийной фрагментации (разделения) активных электрических сетей и их последующего автоматического восстановления.

6. Созданы структура и алгоритмические модели поведения интеллектуальных агентов, которые в совокупности реализуют комплексное децентрализованное управление режимами электрических сетей с распределенной генерацией.

7. Экспериментально доказана принципиальная возможность и эффективность комплексного децентрализованного управления режимами электрических сетей с распределенной генерацией.

8. Доказана возможность и показаны преимущества использования искусственных нейронных сетей в алгоритмах восстановления искаженного вторичного тока трансформаторов тока, а также в работе продольной дифференциальной защиты генераторов, что повышает её устойчивость функционирования и быстродействие.

Значимость результатов и выводов для науки и практики

В своей диссертационной работе Осинцевым А.А. сформулирована и экспериментально подтверждена новая концепция интеллектуального децентрализованного управления активными распределительными электрическими сетями с малой генерацией.

Разработаны теоретические основы и алгоритмические модели мультиагентного управления режимами электрических сетей с распределённой малой генерацией, позволяющего децентрализованно решать системные задачи, при этом обеспечивая функционирование сети не только в нормальном режиме, но и её автоматическое восстановление после аварийных разделений. Внедрение предложенных решений способствует повышению надёжности, живучести и адаптивности энергосистем, а также снижению затрат на их создание и эксплуатацию и создаёт основу для последующей интеграции малой генерации в территориально-интегрированную локальную энергосистему.

Предложенные прототипы интеллектуальных агентов (автоматического регулирования частоты и мощности, регулирования напряжения в контролируе-

мом районе сети, сетевых выключателей, управления синхронизацией, отделения от сети) технологии ДМАУ демонстрируют возможность эффективного решения задач регулирования частоты, напряжения, удалённой синхронизации и защиты без обмена данными между устройствами, установленными на различных объектах электроэнергетики. Это устраняет необходимость в применении дорогостоящих и уязвимых информационных каналов связи, делая технологию доступной для массового внедрения в существующие и вновь строящиеся сети.

Автором разработан алгоритм автоматической самонастройки ПИ-регуляторов частоты и обменной мощности, основанный на минимизации целевой функции, объединяющей величину перерегулирования и длительность затухающего переходного процесса, обеспечивая адаптацию регуляторов к изменениям в сети, таким как подключение или отключение нагрузки, без необходимости вмешательства человека.

Разработан алгоритм быстросействующей ступени автоматики ограничения повышения частоты по скорости её изменения (применительно к объектам малой генерации) с блокирующим органом на основе реле сопротивления. Это решение позволяет эффективно предотвращать опасный рост частоты, характерный для сетей с низкой инерционностью.

Для повышения устойчивости дифференциальной защиты генераторов малой мощности предложены алгоритмы, основанные на методах структурного распознавания образов и искусственной нейронной сети, обеспечивающие устойчивую идентификацию аварийных режимов даже при существенных искажениях сигналов измерительных трансформаторов тока.

Результаты диссертации способствуют цифровой трансформации распределительных сетей, переходу к активным и самовосстанавливающимся энергосистемам. Разработанные технологии уже внедрены в проектах АО «ТЭСС», АО «ИАЭС» и ООО «Модульные Системы Торнадо», что подтверждает их практическую ценность. Кроме того, результаты используются в образовательном процессе НГТУ, способствуя подготовке специалистов в области интеллектуальных энергосистем.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы, полученные в диссертации, и уже имеющие приложения, подтверждённые патентами на изобретение, актами о внедрении в производственную деятельность энергокомпаний, опытно-конструкторские разработки, проектную работу и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, могут быть масштабированы и эффективно использованы в

практике проектирования, эксплуатации и оперативного децентрализованного управления режимами локальных интеллектуальных энергосистем с распределённой (малой) электрогенерацией и их объединений, а также при разработке автоматики и мультиагентных систем интеллектуального управления указанными энергосистемами и энергообъединениями.

Достоверность результатов исследования

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации Осинцева А.А. подтверждается корректным применением математического аппарата и комплексной верификацией: теоретические выкладки согласуются с результатами вычислительных экспериментов (на базе RTDS) и физического моделирования, реализованного на цифро-физическом стенде, воспроизводящем динамику реальной активной распределительной электрической сети. Научная состоятельность работы также подтверждена её обсуждением на профильных конференциях и получением экспертной оценки от специалистов отрасли.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика:

пункту 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»;

пункту 11 – «Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид»;

пункту 16 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;

пункту 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».

Оценка содержания автореферата и диссертации

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертационной работы. В диссертации подробно раскрыты положения, выносимые на защиту, предложенные решения новы и достаточно полно аргументированы. Структура диссертации обладает внутренним единством, текст написан технически грамотным языком и качественно оформлен.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней

Представленная к защите диссертационная работа Осинцева Анатолия Анатольевича отвечает требованиям п.п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в актуальной редакции), а именно:

п.9. Диссертация Осинцева А.А. является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит новые научно обоснованные технические и технологические решения (алгоритмы, прототипы устройств, методологию), внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Решение проблемы управления и защиты сетей с распределённой генерацией имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение, способствуя цифровой трансформации, повышению надёжности энергоснабжения и развитию распределённой энергетики в России.

п.10. Диссертация написана самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора, что детально описано в разделе «Личный вклад» в диссертации и автореферате, где чётко разграничены самостоятельные разработки Осинцева А.А. и совместная работа с научным консультантом и коллегами. Работа имеет прикладной характер, и в ней приводятся конкретные сведения о практическом использовании. Предложенные соискателем решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями в ходе подробного анализа литературных источников в главе 1 диссертации, что демонстрирует понимание Осинцевым А.А. достоинств и недостатков существующих решений и преимуществ предлагаемого им подхода.

п.11-13. Основные результаты диссертации опубликованы в достаточном количестве в рецензируемых научных изданиях и приравненных к ним статьях (для соискателей ученой степени доктора технических наук согласно п.13 требуется не менее 10 публикаций). Общее количество публикаций – 18, из них 13 статей опубликовано в российских рецензируемых научных журналах, входящих

в перечень ВАК РФ по специальности 2.4.3, журнальных статей в научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus – 2. Получены 2 патента РФ на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, которые в соответствии с п.12(1) приравниваются к рецензируемым изданиям. Таким образом, количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, полностью удовлетворяет установленному требованию, а полученные патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ усиливают этот результат.

п.14. Диссертация соответствует требованию указания ссылок на авторов и источники заимствованных материалов. Собственные результаты, полученные соискателем лично и в соавторстве, выделены и отмечены.

Замечания по диссертации

1. Формулировки пунктов научной новизны, представленные в автореферате и диссертации, в целом отражают круг решаемых задач, однако носят недостаточно конкретный характер в части раскрытия качественных преимуществ полученных результатов. В ряде положений отсутствует явное указание, в чём именно состоят отличия предлагаемых подходов, моделей и алгоритмов от известных решений и ближайших аналогов. Вследствие этого не до конца ясно, что именно является новым: постановка задачи, принятые допущения и ограничения, структура алгоритма, состав контролируемых параметров и логика принятия решений, либо достигаемые эффекты и условия их обеспечения.

2. В диссертации отсутствует целостный обзор по двум опорным для работы направлениям, а именно, по алгоритмам роевого интеллекта и по экспертным системам, а также не отражен анализ предшествующего опыта применения алгоритмов роевого интеллекта и экспертных систем в задачах управления режимами электроэнергетических систем. В частности, не рассмотрены известные примеры отечественных разработок в области экспертных систем и комплексов поддержки принятия решений, применявшихся в энергетике, например: система МИМИР-3, экспертные советчики диспетчера для ликвидации перегрузок (НПЦ "Приоритет") и оперативного управления региональной ЭЭС (Коми НЦ УрО РАН). В связи с этим не показано, как предлагаемый подход соотносится с такими решениями по постановке задач, требуемой исходной информации, роли каналов связи и диспетчерского уровня, а также по ожидаемым эффектам.

3. Вызывает определенные вопросы терминологическая обоснованность использования понятия «роевой интеллект экспертного типа». Исходя из

представленного в диссертационной работе описания следует, что речь идёт преимущественно о децентрализованной мультиагентной системе с набором правил (экспертных процедур) и разделением времени принятия решений. При этом не раскрыто, какие именно механизмы обеспечивают возникновение роевых эффектов – формирование глобального коллективного поведения, самоорганизацию, адаптацию за счёт локальных взаимодействий и т.п., а также по каким критериям предлагаемый подход следует относить именно к «роевому интеллекту», а не к классу мультиагентного управления на основе заданных правил. Кроме того, в работе фактически не представлено сопоставление предложенной модели с известными алгоритмами роевого интеллекта по ключевым признакам (что вытекает из предыдущего замечания), таким как способ координации агентов, характер обмена информацией, целевые критерии коллективного поведения и свойства устойчивости. Такое сопоставление позволило бы более обоснованно использовать заявленную терминологию и точнее позиционировать вклад автора в этой области.

4. Несмотря на заявляемый «экспертный тип» ДМАУ, в работе не представлено целостное и достаточно формализованное описание структуры базы знаний и базы правил агентов и подхода к их построению. В диссертации приведены отдельные примеры правил вида «если ... то ...» для регулирования напряжения при выходе режима за длительно допустимые пределы (стр. 114-115), а также указания на «заранее подготовленное экспертом формализованное описание классов состояния» (стр. 311) и «словарь признаков режимов» (стр. 313). Однако не представлена целостная структура базы знаний и базы правил агентов, недостаточно чётко раскрыт подход к их формированию и сопровождению в жизненном цикле, не ясно определены источники знаний и процедура их верификации и актуализации по мере изменения схемы сети, уставок, состава источников реактивной мощности и режимных ограничений. Это затрудняет оценку воспроизводимости решений, непротиворечивости правил и практической применимости подхода в реальных условиях эксплуатации, особенно территориально интегрированных локальных энергосистемах, где принципиально важно понимать, каким образом обеспечиваются полнота правил, их согласованность между всеми агентами, устойчивость управления при пересечении границ классов состояний, отказах измерений и переключениях сети.

5. В работе в качестве базового объекта рассматриваются распределительные сети и локальные энергосистемы с распределёнными электростанциями

малой мощности на основе синхронной генерации. Вместе с тем для современных микросетей и изолированных энергорайонов на уровне 6–35 кВ (в том числе потенциально для ЛИЭС) всё более типичен смешанный состав источников, включающий ВИЭ, системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) и источники на базе силовой электроники, в том числе системообразующие инверторы. В связи с этим требуется пояснить, как предложенная технология ДМАУ будет работать в условиях, когда амплитудно-частотные характеристики и динамика источников определяются не только инерцией синхронных машин, но и настройками контуров управления инверторов (виртуальная инерция, статизм по частоте и напряжению, ограничение по току, режимы ограничения мощности), и как в таком случае может быть обеспечено согласование первичного и вторичного регулирования частоты и распределения резервов между синхронными агрегатами, СНЭЭ и инверторными источниками без возникновения конкурирующих воздействий, перерегулирования и ухудшения устойчивости при возмущениях и послеаварийных переключениях.

Указанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации и не снижают её научную и практическую ценность.

Общее заключение

Представленная диссертационная работа Осинцева Анатолия Анатольевича на тему «Интеллектуальное децентрализованное управление режимами и релейная защита оборудования электрических сетей с распределённой (малой) генерацией» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей комплексное решение проблемы управления и защиты электрических сетей с распределённой малой генерацией, обладающей внутренним единством, содержащей новые научно обоснованные технические и технологические решения (алгоритмы, прототипы устройств, методологию), внедрение которых имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение, способствуя цифровой трансформации, повышению надёжности энергоснабжения и развитию распределённой энергетики в России.

Диссертация представляет собой целостное самостоятельное исследование, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, заслуживающие публичной защиты. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На основании вышеизложенного можно констатировать, что рассмотренная диссертация соответствует требованиям п.п.9-14 «Положения о при-

суждения ученых степеней», утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а её автор Осинцев Анатолий Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Отзыв на диссертацию Осинцева Анатолия Анатольевича «Интеллектуальное децентрализованное управление режимами и релейная защита оборудования электрических сетей с распределённой (малой) генерацией» обсужден и одобрен на заседании отдела электроэнергетических систем №40 ИСЭМ СО РАН, протокол №1 от 05.03.2026 г.

д-р техн. наук (05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы), ст.н.с., ведущий научный сотрудник лаборатории управления функционированием электроэнергетических систем №43 отдела электроэнергетических систем №40 ИСЭМ СО РАН

Колосок Ирина Николаевна

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130,

тел.: +7(3952) 500-646,

адрес электронной почты: info@isem.irk.ru,

сайт: https://isem.irk.ru.

Отзыв получен

30.03.2026

И.И. (Овчинников А.Г.)

*С отзывом ознакомлен
30.03.2026г. И.И.*