



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-25
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Денис Сергеевич Гуц

«16» 02 2026 г.

№ _____
на № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» на диссертацию Томина Никиты Викторовича «Методологические основы синтеза автономных систем управления режимами активных распределительных сетей с применением машинного обучения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.3. – «Электроэнергетика»

Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационной работы определяется тем, что в условиях энергетической трансформации, вызванной цифровизацией отрасли, естественным трендом развития является построение интеллектуальной энергетической системы, которая была бы способна адекватно управлять режимами распределительных сетей в условиях возрастания стохастичности генерации и потребления, появления локальных микросетей и интеграции распределённых энерго-ресурсов (РЭР). В этих условиях возможностей сложившихся систем автоматизированного и автоматического управления недостаточно и общемировая тенденция заключается в эволюционном движении к созданию автономных систем управления.

Диссертационная работа Томина Н.В. направлена на решение актуальной научной проблемы создания методологических основ построения интеллектуальной автономной системы управления (ИАСУ) цифровыми РЭС, объединяющей преимущества автоматизированных (АСУ) и автоматических (САУ) систем управления и, безусловно, является актуальной.

Научная новизна

Результаты диссертационной работы соискателя имеют следующую новизну:

1. Предложенная адаптация иерархической модели интеллекта (Hierarchical Intelligence Model, HIM) для синтеза автономных систем управления в электроэнергетике на базе методологии обучения с подкреплением (RL), позволяющей создавать интеллектуальных агентов способных самостоятельно производить эффективные действия в заданной среде и устраняющей ключевое ограничение традиционных систем управления – неспособность к многоуровневому принятию решений в условиях неопределенности, что актуально для сложных электрических сетей, включающих РЭР.

2. Разработанные методологические основы построения и внедрения иерархической ИАСУ для реализации поэтапной цифровой трансформации РЭС в энергетические сообщества с полноценной реализацией всех форм активности потребителей.

3. Предложенная комплексная методология построения цифрового двойника энергетических систем на базе оригинальной пятиуровневой архитектуры, принципиально отличающаяся тем, что обеспечивает одновременное комбинированное обучение RL-агента на данных как физической сети, так и её виртуальной полумарковской модели с реальными временными параметрами; реализует многоуровневую достоверизацию и адаптивную фильтрацию данных с заменой аномалий статистически обоснованными оценками, а также использует прогнозную метамодель на основе стекинга для повышения точности и устойчивости прогнозирования.

4. Разработанная методология синтеза нового класса самообучающихся САУ на основе объединения теории «уравнений мозга» и методов RL для реализации адаптивного управления устройствами и объектами активной распределительной сети.

5. Предложенный принципиально новый подход к построению автономных диспетчерских систем типа «Автономный диспетчер», рассматриваемого как интеллектуальное ядро ИАСУ, ориентированных на управление активными сетями 35–0,4кВ, объединяя принципы когнитивной автоматизации, цифровых двойников и самообучающихся механизмов RL для сквозного интеллектуального управления: от локального регулирования микросетей и полевых устройств до стратегической оптимизации режимов цифровых РЭС на уровне ЦУС.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

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

- **пункту 10** - разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения;

- **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.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Методология интеллектуальных систем „Автономного диспетчера“ и разработанный программный комплекс „МЕГА“ позволяет реализовать автономное оптимальное управление микроэнергетическими системами с РЭР учетом множества усложняющих факторов.

2. Методика автономного управления энергоустановками и нагрузками зданий позволяет снизить их энергопотребление (на 15-55%).

3. Гибридная метамодель на основе стекинга позволяет существенно повысить точность прогнозирования параметров режима электрических сетей, что принципиально улучшает предсказательные функции предложенной модели цифрового двойника энергетических систем.

4. Метод синтеза самообучающейся САУ микроэнергетической системы позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты, что было подтверждено апробацией на физической модели гибридного микрогрида и зафиксировано актом об использовании результатов диссертации.

5. Подход к построению цифрового двойника позволяет существенно повысить эффективность проектов по цифровизации энергорайонов посредством реализации сквозного цикла „энергомониторинг-анализ-управление“ от первичных датчиков до стратегий автономного управления.

Структура и объем диссертации

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» СО РАН. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Основной текст диссертации составляет 588 страниц с 236 рисунками и 23 таблицами. Список литературы содержит 538 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность исследований, приведён подробный обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору исследований и анализу проблематики перехода современных электроэнергетических систем (ЭЭС) к автономному управлению при их интеллектуализации и цифровизации. Основными научными результатами этой главы являются формулировка научной проблемы как проблемы создания методологических основ построения интеллектуальной автономной системы управления (ИАСУ) цифровыми РЭС, объединяющей преимущества автоматизированных (АСУ) и автоматических (САУ) систем управления, и уточнение постановки задачи исследования.

Во **второй главе** выполнен анализ современных методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, а также адаптации „иерархической модели интеллекта“ (НМ) для разработки автономных систем управления в современных электрических сетях. В частности показано, что мультиагентные системы (МАС) обладают актуальными характеристиками для задач оперативного и противоаварийного управления режимами активных электрических сетей, включая способность к самоорганизации, адаптации к изменяющимся условиям и распределенной обработке информации. Это определяет перспективность агентно-ориентированного подхода для создания автономных систем управления нового поколения. Для разработки автономных систем предложена адаптация „иерархической модели интеллекта“ (НМ), которая объединяет различные уровни интеллектуального поведения. Отмечена достижимость полноценного АИИ в рамках НМ на основе методов обучения с подкреплением (RL), которые являются наиболее подходящими для создания полноценных автономных систем.

Третья глава посвящена детальному исследованию возможностей RL для разработки систем управления режимами электрических сетей на основе АИИ. Приведена общая математическая постановка методов RL, которые рассматриваются как важная ветвь машинного обучения для создания автономных самообучающихся агентов, способных взаимодействовать с динамической средой, представленной как марковский процесс принятия решений. Обоснована эффективность мультиагентного обучения с подкреплением для создания автономных систем. На основе серии экспериментов выполнена оценка потенциала выделенных методов RL в задачах оптимизации режимов работы изолированной микросети, интеллектуальной автоматизации систем регулирования напряжения в распределительной сети и совместной оптимизации режимов систем передачи и распределения энергии, включающих ВИЭ и РЭР.

Содержанием **четвертой главы** является разработка оригинального подхода к созданию цифровых двойников (ЦД) энергетических объектов на базе обучения с подкреплением. В главе всесторонне исследуется методология создания и практического применения такого подхода как ключевого элемента ИАСУ активными распределительными сетями.

Разработана комплексная методология построения цифрового двойника энергетических систем, основанная на пятиуровневой архитектуре с интеграцией обучения с подкреплением. Ключевым элементом стала детализированная модель сервисов, где особое внимание уделено механизму достоверизации данных с адаптивной фильтрацией измерений и заменой аномалий статистически обоснованными оценками.

Сформулированы требования к цифровизации распределительных сетей 35-0.4 кВ, обеспечивающие поэтапное внедрение ЦД в зависимости от степени оснащённости инфраструктуры.

Экспериментально продемонстрирована эффективность применения предложенной модели ЦД для предиктивной диагностики отказов и управления техническим состоянием на примере идентификации аномалий в цифровом РЭС.

В пятой главе предложена новая методология построения и функционирования самообучающихся САУ нижнего и среднего уровня в рамках модуля координации контроллеров РП и ТП предложенной ИАСУ. Особый акцент сделан на анализе дуализма управления, при котором локальные САУ энергетических объектов цифровой РЭС (реклоузеров, энергоузелов, микросетей, электрозаправочных станций (ЭЗС), инверторов и т.п.) обладают способностью как к полностью автономному принятию решений, так и к координированному взаимодействию через центральный оптимизатор на уровне ЦУС.

Предложена концепция синтеза нового класса самообучающихся САУ, применимых в активных распределительных сетях, развивающая теорию адаптивных систем через интеграцию методов RL с классическими принципами построения "разумных" систем управления В.А. Якубовича.

Предложена модель многомерной самообучающейся САУ для управления скоростью вращения ротора ВЭУ на основе безмодельного метода TRPO.

Исследованиями показано, что предложенная мультиагентная самообучающаяся САУ эффективно регулирует напряжение при случайных колебаниях нагрузки для электрической сети с высоким уровнем РЭР, подключенных через системообразующие инверторы.

Рассмотрена методология координации самообучающихся САУ и автономного принятия решений в цифровых активных электрических сетях. Показано, что в рамках рассматриваемой концепции ИАСУ на нижнем уровне (0,4-10

кВ) реализованы полностью автономные самообучающиеся САУ как для отдельных энергетических объектов, так и для целых микросетей.

Шестая глава посвящена системному изложению концепции автономного управления цифровыми распределительными сетями, объединяющему теоретические разработки предыдущих глав в целостную методологию построения и внедрения ИАСУ. Эта глава отражает переход от научно-исследовательских задач к практической реализации в условиях реальных электросетевых объектов в условиях цифровизации РЭС. В главе представлена комплексная концепция построения автономных диспетчерских систем для цифровых РЭС 35-0,4 кВ.

Выполнен анализ ЭСО как ключевого элемента цифровой трансформации городских и изолированных энергорайонов. Предложена модифицированная методология поэтапной трансформации цифровых РЭС, завершающим этапом которой является создание ЭСО с реализацией локальных рынков и развертыванием интеллектуальной автономной системы управления на уровне ЦУС. Важнейшим элементом исследования и финальным этапом развёртывания верхнего уровня ИАСУ, является разработанная интеллектуальная система «Автономный диспетчер», представляющая собой качественный скачок в управлении активными распределительными сетями 35–0,4 кВ, объединяя когнитивную автоматизацию, цифровые двойники и мультиагентные алгоритмы для сквозного интеллектуального управления.

Предложена и протестирована инновационная архитектура модуля функций ЭСО в составе АСТУ «Автономный диспетчер», обеспечивающая оптимальное управление городскими и изолированными микросетями, объединёнными в ЭСО, с реализацией локального „справедливого“ рынка электроэнергии посредством технологии блокчейна. Разработана модель оптимального управления цифровым РЭС в городской среде на базе АСТУ «Автономный диспетчер» с реализацией сервиса «интеграции зданий в сеть», сочетающего стратегическое управление через цифровые двойники на уровне ЦУС, интеллектуальную координацию энергоэффективных зданий с помощью MARL-алгоритмов и автоматизированное управление полевыми устройствами зданий и сети. В рамках развития предложенной методологии поэтапного внедрения ИАСУ, основанной на принципах человеко-центрического ИИ, сформулированы принципы её адаптивной автономности.

В заключении приведены основные выводы по результатам исследований.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Выводы по главе 1 сформулированы как простое перечисление изложенных в главе материалов.

2. Содержание подраздела 2.1.1 воспринимается как продолжение обоснования актуальности темы.
3. Рисунок 2.7 (стр. 96) называется в диссертации «Осциллограммы скорости вращения ротора генератора при вариации скорости ветра», однако ось ординат представляет собой шкалу угла поворота лопастей ветрогенератора.
4. Фраза «схема нейро-нечеткого управления с прямым крутящим моментом для привода асинхронного двигателя» (стр. 96) не имеет смысла; по-видимому, автор имеет в виду прямое управление крутящим моментом.
5. На стр. 124 ссылка на рис. 2.22, б, которого нет в тексте диссертации.
6. Выражения (2.8)-(2.10) содержат « ki, ai — вектор ключа и вес важности i -го входного сигнала», как определяется вес важности?
7. На стр.142 указано: «...при правильном стимуле модель RL может начать изучать поведение самостоятельно, без (человека) наблюдения». Как этот процесс реализуется технически?
8. При рассмотрении процессов и моделей обучения, автор не даёт оценок длительности этого процесса. Это особенно важно, так как упоминаемые градиентные методы не отличаются высоким быстродействием.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность представленных в диссертации результатов.

Общее заключение

Диссертация Томина Никиты Викторовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной проблемы создания методологических основ построения интеллектуальной автономной системы управления (ИАСУ) цифровыми РЭС, объединяющей преимущества автоматизированных (АСУ) и автоматических (САУ) систем управления, имеющей важное значение для развития 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.

Содержание диссертации отражает основные идеи работы и полученные в ней результаты, а также раскрывает ее научную и практическую значимость. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. По результатам исследований опубликовано в 49 печатных изданиях, 9 из которых – в журналах (К1,К2), рекомендованных ВАК по специальности 2.4.3, 4

статьи в изданиях (K1,K2), рекомендованных ВАК по другим специальностям, 15 — в периодических научных журналах (Q1,Q2), индексируемых Web of Science и Scopus, 14 – в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Диссертация Томина Н.В. «Методологические основы синтеза автономных систем управления режимами активных распределительных сетей с применением машинного обучения» отвечает требованиям, установленным в п.п. 9 - 14 Положения о присуждения учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями от 11.09.2021 г.), предъявляемым к докторским диссертациям.

Автор диссертации, Томин Н.В., заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика».

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры электроэнергетики Сибирского федерального университета, протокол № 7 от 04.02.2026 г.

Отзыв подготовлен заведующим кафедрой электроэнергетики, доктором технических наук, профессором Пантелеевым Василием Ивановичем.

Заведующий кафедрой
электроэнергетики, д-р техн. наук
(05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы), профессор

2 Пантелеев Василий Иванович

Я, Пантелеев Василий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Томина Никиты Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Пантелеев Василий Иванович

