

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук, профессора Савиной Натальи Викторовны на диссертационную работу Томина Никиты Викторовича на тему **«Методологические основы синтеза автономных систем управления режимами активных распределительных сетей с применением машинного обучения»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика

1. Актуальность темы

Глобальные тренды развития современных электроэнергетических систем (ЭЭС) связаны с их цифровой трансформацией, декарбонизацией и децентрализацией. В распределительных сетях это проявляется в лавинообразном росте количества объектов распределенной генерации, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), систем накопления энергии, зарядной инфраструктуры для электромобилей и активных потребителей. Трансформация пассивных сетей в активные распределительные электрические сети создает принципиально новые вызовы для систем управления. Стохастический характер генерации и потребления, двунаправленные потоки мощности и высокая динамика процессов приводят к тому, что традиционные централизованные диспетчерские подходы и жесткие алгоритмы автоматики достигают предела своей эффективности.

Существующий разрыв между усложняющейся физической инфраструктурой и устаревающими методами управления создает риски снижения надежности и эффективности энергоснабжения. Кроме того, проблема интеграции оперативно-диспетчерского и автоматического управления в единую когнитивную систему, способную к самообучению и адаптации, является одним из ключевых вызовов для создания интеллектуальных энергетических систем нового поколения. Переход от традиционной парадигмы «автоматизация» и «автоматика» к качественно новому уровню «автономного управления» на основе принципов когнитивной автоматизации представляет собой актуальное направление научных исследований, находящееся на переднем крае мировой науки. В этой связи, переход к концепции «когнитивной автоматизации» и создание интеллектуальных автономных систем управления, способных к автономному принятию решений в условиях неопределенности, соответствует стратегии развития энергетики РФ.

Работа Томина Н.В. актуальна и в контексте развития микрогридов, локальных энергетических систем, где требования к автономности, надёжности и эффективности управления на порядок выше, чем в традиционных централизованных системах. Это особенно важно для России с её обширными территориями децентрализованного электроснабжения, где автономные микроэнергетические

системы могут стать эффективным решением проблемы надёжного и экономичного энергоснабжения изолированных потребителей.

Таким образом, диссертационная работа Томина Н.В., направленная на разработку методологических основ построения автономных систем управления, объединяющих технологии цифровых двойников, мультиагентного управления и искусственного интеллекта (в частности, методов обучения с подкреплением), является актуальной и соответствует современным мировым тенденциям развития электроэнергетики и стратегическим направлениям ее цифровизации в РФ. Данное исследование решает крупную научную проблему создания систем управления нового поколения, необходимых для устойчивого функционирования цифровых районов электрических сетей и микроэнергетических систем.

2. Научная новизна положений и решаемых задач

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании целостной методологии построения автономных систем управления, интегрированных в физическую природу режимов электрической сети.

В диссертации получены следующие основные новые научные результаты:

– разработана методология построения иерархических интеллектуальных автономных систем управления активными распределительными сетями, обеспечивающая интеграцию автоматических, автоматизированных и когнитивных функций управления режимами на уровнях отдельных устройств, микросетей, энергорайонов и центров управления сетями;

– предложен оригинальный способ построения цифрового двойника ЭЭС на основе пятиуровневой архитектуры, обеспечивающий комбинированное обучение управляющих интеллектуальных агентов с использованием физической и виртуальной моделей сети, методов обучения с подкреплением (англ. Reinforcement learning, RL) и многоуровневой достоверизации данных.

– развита методология синтеза нового класса самообучающихся систем автоматического управления (САУ) объектами активных распределительных сетей и микроэнергетических систем, позволяющая реализовать адаптивное управление источниками распределённой генерации, системами накопления электроэнергии и элементами силовой электроники без априорных сведений о параметрах объекта;

– предложен новый подход к построению автономных диспетчерских систем нового поколения, обеспечивающих делегирование значительной части оперативных и противоаварийных функций интеллектуальному контуру управления при сохранении стратегического контроля со стороны диспетчера.

В совокупности полученные результаты формируют новую научную ос-

нову для развития автономных и интеллектуальных систем управления распределительными сетями, включая микроэнергетические системы и локальные энергорайоны, и существенно расширяют существующие представления о возможностях режимной и противоаварийной автоматики в условиях высокой доли распределённой генерации и цифровизации электроэнергетики.

3. Теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов

Теоретическая ценность работы заключается в существенном расширении методологического базиса современной электроэнергетики в части управления активными распределительными сетями. Автор доказал, что для эффективного управления стохастическими энергообъектами недостаточно классических детерминированных подходов, и предложил научно обоснованную концепцию когнитивной автоматизации. Теоретическую ценность представляет предложенный автором синтез классической теории адаптивного управления и современных алгоритмов машинного обучения. Это позволяет преодолеть фундаментальное противоречие между требованием математической строгости управления режимами и отсутствием точных моделей для множества распределённых активных элементов, создан теоретический фундамент для перехода к полностью автономным энергосистемам. Предложена концепция иерархического интеллектуального управления, объединяющая современные достижения в области обучения с подкреплением, теории сложных систем и когнитивной автоматизации.

Практическая значимость работы состоит в создании готового к внедрению комплекса алгоритмических и программных решений, востребованность которых подтверждена широкой географией их использования на реальных объектах электроэнергетики. В частности, как показано в работе, разработанные система «Автономный диспетчер» и комплекс «МЕГА» прошли успешную апробацию в изолированных микрогридах Бурятии, Якутии и Приморского края, а также в микрорайонах г. Якутска, обеспечив снижение нормированной стоимости электроэнергии и улучшение показателей надёжности. Эффективность предложенных метамоделей прогнозирования доказана их внедрением в ОАО «Азер-энерджи» для реальной ветростанции с повышением точности предсказания выработки мощности в 4–6 раз. Кроме того, результаты исследования использованы при разработке Энергетической стратегии Иркутской области на период до 2036 года и верифицированы на физических моделях ИСЭМ СО РАН, подтвердив возможность увеличения предельной мощности интеграции ВИЭ в сеть в среднем на 30% при снижении токовых перегрузок, что зафиксировано соответствующими актами внедрения.

4. Обоснованность и достоверность научных выводов, положений и рекомендаций

Обоснованность научных положений обеспечивается корректным использованием фундаментальных законов электротехники, теории автоматического управления, методов оптимизации и машинного обучения. Автор использует современный математический аппарат: марковские процессы принятия решений, методы машинного обучения, динамическая оптимизация, адаптивное управление, элементы теории игр.

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований, в том числе на физических моделях (полигон ИСЭМ СО РАН), сопоставлением результатов моделирования с данными реальных районов электрических сетей. Основные результаты работы прошли широкую апробацию на авторитетных международных конференциях (IEEE PowerTech, IEEE ISGT Europe, IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems, и др.) и отечественных научных семинарах (секция «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НИ «НТС ЕЭС» и Научный совет РАН, «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», и др.), опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых журналах (Q1/Q2 по Scopus/WoS), что свидетельствует о признании мировым научным сообществом.

Представленные в диссертационной работе основные научные положения, выводы по главам, заключительные выводы и рекомендации являются в целом обоснованными.

5. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертационная работа Томина Н.В. отвечает критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024). В ней соблюдены следующие принципы соответствия:

5.1. Указанная соискателем цель работы – разработка автономных систем управления режимами активных распределительных сетей и объектов малой энергетики в структуре современных электроэнергетических систем с применением методов машинного обучения – достигнута в диссертации. Диссертационная работа является законченной научно-квалифицированной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития электроэнергетики (п. 9).

5.2. Диссертация написана соискателем самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе ее автора в науку. Результаты диссертационного

исследования получены при поддержке многочисленных грантов РФФИ, РНФ, РФФИ, ФЦП и проектов государственного задания. Разработанные соискателем новые научно обоснованные технические решения и разработки аргументированы и сопоставлены с результатами исследований других авторов (п. 10).

5.3. Основные результаты диссертационной работы содержатся в 49 печатных научных работах, в том числе: 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК по специальности 2.4.3; 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по другим специальностям; 15 публикаций в периодических научных журналах Q1, Q2, индексируемых Web of Science и Scopus; 14 статей в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ (п.п. 11-13).

5.4. В диссертационной работе Томина Н.В. сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов научной деятельности (п. 14).

5.5. Тема и содержание диссертационной работы Томина Н.В. соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика по следующим пунктам:

– п. 10 – «Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения»;

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

– 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».

6. Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа Томина Н.В. состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 538 наименований и приложений. Основной текст диссертации составляет 588 страниц с 236 рисунками и 23 таблицами.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цели и задачи, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, информация об апробации полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Проблематика перехода к автономному управлению режимами электрических сетей при их интеллектуализации и цифровизации»** проведён глубокий анализ проблематики перехода современных ЭЭС к автономному управлению. Детально рассмотрены факторы, определяющие трансформацию распределительных сетей: массовое внедрение распределённых энергетических ресурсов, ВИЭ, активных потребителей. Критически проанализированы существующие подходы к управлению активными электрическими сетями, показаны их ограничения. Обоснована новая концепция когнитивной автоматки для активных распределительных сетей. Сформулирована основная научная задача — развитие методологических основ построения ИАСУ с обеспечением сквозного интеллектуального управления на всех уровнях.

Во второй главе **«Искусственный интеллект и машинное обучение для разработки автономных систем управления ЭЭС»** выполнена адаптация иерархической модели интеллекта (НИМ) для разработки автономных систем управления в электроэнергетике. Проведён анализ применения технологий ИИ в энергетической отрасли, показавший резкий рост публикаций и перспективность мультиагентных систем для задач управления активными сетями. Обоснован выбор методов обучения с подкреплением как наиболее подходящих для создания автономных самообучающихся агентов, способных самостоятельно принимать эффективные решения в заданной среде. Показано, что использование НИМ обеспечивает экспоненциальное сокращение вычислительной сложности, естественное согласование мультимасштабных процессов, что открывает путь к созданию полноценных автономных систем управления. Рассмотрена проблема делегирования решений, где требуется поэтапное делегирование полномочий с обязательным сохранением человеческого контроля над критически важными решениями.

В третьей главе **«Исследование методов обучения с подкреплением для синтеза систем управления на базе автономного ИИ»** детально исследованы возможности различных методов RL для управления режимами электрических сетей. Дается общая математическая постановка методов RL, которые рассматриваются как важная ветвь машинного обучения для создания автономных самообучающихся агентов. Проведена систематизация методов по классификационным признакам с обоснованием области их применимости. Выделены и описаны конкретные методы RL с наибольшим потенциалом для электроэнергетики. Потенциал этих методов оценён на основе серии вычислительных экспериментов в задачах оптимизации режимов изолированных микросетей, интеллектуальной автоматизации регулирования напряжения в распределительных сетях и совместной оптимизации систем передачи и распределения энергии с ВИЭ и распределёнными энергоресурсами, что подтвердило их перспективность для синтеза автономных систем управления.

В четвёртой главе **«Методология построения цифровых двойников энергетических систем на основе обучения с подкреплением»** разработана комплексная методология построения цифрового двойника энергетической системы на базе оригинальной пятиуровневой архитектуры с интеграцией методов RL. Детально описан механизм комбинированного обучения агента RL на данных физической сети и виртуальной модели. Рассмотрены практика применения цифровых двойников в электроэнергетике, основные подходы к их построению, требования к информационной обеспеченности. Сформулированы требования к цифровизации распределительных сетей 35-0,4 кВ для поэтапного внедрения цифровых двойников в зависимости от степени оснащённости инфраструктуры. В главе экспериментально подтверждена эффективность предложенной технологии цифрового двойника для задачи активного управления распределительной сетью на примере тестовых и реальных схем городских энергорайонов.

В пятой главе **«Разработка самообучающихся систем автоматического управления активными цифровыми электрическими сетями: методология координации и автономного принятия решений»** предложена методология синтеза нового класса самообучающихся САУ на основе интеграции теории «уравнений мозга» Якубовича с методами RL. Разработаны и апробированы конкретные реализации таких САУ для управления ветроэнергетическими установками, системообразующими инверторами, зарядными станциями электромобилей и энергоустановками зданий. Предложенные реализации этих САУ наглядно демонстрируют их способность самостоятельно адаптироваться к изменяющимся условиям работы без априорных знаний об объекте, что подтверждено экспериментами, в том числе на реальных моделях энергооборудования – физической гибридной микросети ИСЭМ СО РАН. Проведённые в главе исследования подтвердили достигаемые на базе самообучающихся САУ технико-экономические эффекты: повышение предельной мощности интеграции ВИЭ, снижение токовых перегрузок в сети, высокую робастность к кибератакам, контекстные стратегии управления энергооборудованием и т.д.

Шестая глава **«Автономные диспетчерские системы для цифровых районов электрических сетей»** представляет комплексную концепцию построения систем автономного диспетчерского управления на базе всех разработанных методологических решений. В ней проведён анализ энергетических сообществ как ключевого элемента цифровой трансформации городских и изолированных энергорайонов. Предложена модифицированная методология поэтапной трансформации цифровых РЭС. Ключевым элементом исследования и финальным этапом развёртывания верхнего уровня ИАСУ выступает интеллектуальная система «Автономный диспетчер». Её трехблочная архитектура (когнитивный

блок, блок принятия решений и блок управления) обеспечивает автономное выполнение задач: от локального регулирования микросетей до стратегической оптимизации режимов на уровне центра управления сетями. Рассмотрены практические аспекты реализации системы управления «Автономный диспетчер» для различных типов цифровых энергорайонов, показана универсальность и масштабируемость разработанной методологии. Сформулированы специфические требования для российских распределительных сетей для успешной реализации предложенной автором ИАСУ, формирующие комплексный подход к цифровой трансформации, учитывающий нормативные, технологические и климатические особенности страны.

В **заключении** обобщены результаты, полученные в диссертационной работе, которые показывают, что поставленные задачи диссертационного исследования выполнены в полном объеме, а их решение позволяет реализовать поэтапный подход с дифференцированными требованиями для городских и изолированных цифровых энергорайонов, что в совокупности обеспечивает плавный переход к автономному управлению при соблюдении нормативов РФ.

7. ВОПРОСЫ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации Томина Н.В. возникли следующие вопросы и замечания:

1. При формировании интеллекта и использовании автономных систем управления, в т.ч. самообучаемых, значимым этапом является подготовка данных для обучения и реализации различных задач, решаемых в работе: прогнозирования, оптимизации, принятия решения, анализа надежности и т.д. В диссертации не показаны какие параметры схемно-режимной ситуации необходимы для машинного обучения с подкреплением, рассматриваются они как многомерный процесс или независимо друг от друга. Также не показано, каким образом встраивается в процесс обучения топологическая структура сети, как учитываются особенности структуры сетей.
2. Каков объем данных, интервал времени между соседними данными нужны при обучении, при решении указанных задач? При этом целесообразно показать необходимый объем данных в сравнении предлагаемого подхода на основе методов RL с другими методами и подходами, аналогично по точности прогнозирования, эффективности принимаемых решений.
3. Для действующих распределительных сетей характерна проблема низкой наблюдаемости. Предложенное в работе обучение с подкреплением основано на взаимодействии с динамической средой, в то время как в эксплуатации традиционно используются результаты контрольных замеров. Ин-

теллектуальные счетчики для решения своей основной задачи – учета электроэнергии – собирают и обрабатывают данные раз в месяц. Как в работе разрешено это противоречие? Проводился ли анализ совместимости выпускаемых в РФ интеллектуальных счетчиков с созданием требуемой динамической среды для обучения? С какой степенью наблюдаемости сети предложенный блок МОА, основанный на алгоритме изоляционного леса, может обеспечить достоверную информацию и какими методами? Аномалии электропотребления определяются в сравнении с заданным или сформированным шаблоном? Как обеспечена достоверность шаблона при низком качестве информации?

4. В работе не показано, в чем состоит основное преимущество предлагаемой технологии цифровых двойников (ЦД) сетей 10/0,4 кВ по сравнению с другими технологиями, и в чем заключается принципиальное отличие ЦД, предложенного автором для сетей 35-110 кВ и сетей 6-10, 0,4 кВ от других ЦД. Необходим ли обмен данными между ЦД сетей разных классов напряжения, в том числе и магистральных, и как он будет осуществляться?
5. Какие требования предъявляются к интеллектуальным счетчикам для применения в предложенной модели ЦД для предиктивной диагностики отказов в задаче идентификации аномалий электропотребления в цифровом РЭС? Нужна ли адаптация выпускаемых в РФ счетчиков под задачи ЦД? ЦД выявляет только аномалии и место их возникновения или еще их идентифицирует?
6. Как учитывается в ЦД РЭС подключение новых элементов сети: ЛЭП, ПС, КУ; новых потребителей? При подключении новых потребителей возможна ситуация, когда ЦД воспримет их как аномалию в электропотреблении. Что предложено в модели для ее исключения?
7. В работе предложена новая методология построения и функционирования самообучающихся САУ нижнего и среднего уровня, но не показано в рамках модуля координации контроллеров РП и ТП разработанной ИАСУ, рассматриваются ли линейные разъединители, широко применяемые в распределительных сетях 6-10 кВ, и каким образом осуществляется управлением ими в условиях технической неосуществимости автоматического воздействия на них? Аналогично по мачтовым и столбовым ПС, применяемым в сельских сетях и имеющим отличия в управлении. Учитываются ли конструктивные и топологические особенности сетей при машинном обучении для принятия решения и реализации выработанного управляющего воздействия автономной системы управления (самообучающиеся САУ). Чем обеспечивается регулирование напряжения в сети 0,4 кВ?

8. В работе не раскрыт переходный период от классических сетей к активным в части сбора и обработки данных (отсутствуют системы телемеханики в сетях 6-10 кВ), применения не управляемых исполнительных механизмов: не управляемых коммутационных аппаратов, компенсирующих устройств, выключателей нагрузки, линейных разъединителей, технически не приспособленных для автоматического дистанционного управления, применения трансформаторов 6-10/0,4 кВ с ПБВ, трансформаторов без АРПН (только РПН), что характерно для СТ 35/6-10 кВ, массово применяемых в эксплуатации.
9. В работе приведено много примеров, иллюстрирующих различные аспекты методологии автономных систем управления, что является ее достоинством. Целесообразно показать интегрирующие эффекты и ожидаемые сроки окупаемости.
10. На рис 4.10 указаны элементы G1 и G2, тогда как в тексте приведены T1 и T2 (стр. 239).
11. В таблице 18 (стр. 446) не указаны единицы измерения.

Приведенные замечания и вопросы не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы, поскольку существенно не влияют на основные выводы, а также полученные научные и практические результаты.

8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Томина Н.В. является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, обладающей актуальностью, научной новизной, теоретической и практической значимостью полученных результатов. В ней решена важная научная проблема, заключающаяся в разработке методологических принципов совершенствования средств классической автоматизации активных распределительных сетей, объектов малой энергетики, содержащих распределённые и возобновляемые источники энергии, посредством разработки нового класса автономных систем управления на основе интеллектуальных алгоритмов принятия решений.

Полученные соискателем результаты базируются на корректном использовании основных положений теории математического моделирования, устойчивости ЭЭС, корректности поставленных задач, анализе и сопоставлении полученных результатов с данными, опубликованными другими отечественными и зарубежными авторами, что позволяет сделать вывод о соответствии диссертационной работы паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Содержание диссертационной работы подробно отражает последователь-

ность решения поставленных задач. Текст диссертационной работы изложен грамотным языком, корректным в научном и техническом отношении. Материалы диссертационного исследования представлены в объеме, достаточном для понимания, доступны и репрезентативны. Сделанные в работе выводы и сформулированные рекомендации аргументированы.

Диссертационная работа Томина Н.В. на тему «Методологические основы синтеза автономных систем управления режимами активных распределительных сетей с применением машинного обучения», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является актуальной, обладает научной новизной и практической значимостью полученных результатов, соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика. Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, направленной на разработку систем управления нового поколения, необходимых для устойчивого функционирования цифровых районов электрических сетей и микроэнергетических систем, что имеет существенное значение для развития электроэнергетики страны. По своему теоретическому уровню и практическому значению она соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а именно критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), а ее автор Томин Н.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,

доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой энергетики Энергетического факультета

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Амурский государственный университет»

Савина Наталья Викторовна

«19» февраля 2026 г.

Тел. (моб): +7 924-677-44-30

E-mail: nataly-savina@mail.ru

ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»

Адрес: 675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д.21

Телефоны: +8 (800) 234-5-104

E-mail: rector@amursu.ru, сайт: <https://amursu.ru/>

