

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № s4 / 2025, Vol. 12, Iss. s4 <https://resources.today/issue-s4-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/12FAOR425.pdf>

DOI: 10.15862/12FAOR425 (<https://doi.org/10.15862/12FAOR425>)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Наумов, И. С. Современные тренды и особенности автоматизации системы управления микроклиматом комплекса зданий с децентрализованным отоплением / И. С. Наумов, А. В. Гончаров // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № s4. — URL: <https://resources.today/PDF/12FAOR425.pdf>. DOI: 10.15862/12FAOR425.

For citation:

Naumov I.S., Goncharov A.V. Modern trends and features of climate control system automation for building complexes with decentralized heating. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025; 12(s4): 12FAOR425. Available at: <https://resources.today/PDF/12FAOR425.pdf>. DOI: 10.15862/12FAOR425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 681.5:697.9

Наумов Иван Сергеевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Систем автоматизированного управления»
E-mail: isnaumov@yandex.ru

Гончаров Андрей Витальевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Систем автоматизированного управления»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Современные тренды и особенности автоматизации системы управления микроклиматом комплекса зданий с децентрализованным отоплением

Аннотация. Современная парадигма управления микроклиматом в комплексах зданий характеризуется фундаментальной трансформацией от централизованных систем отопления к децентрализованным архитектурам, интегрирующим технологии интернета вещей, искусственного интеллекта и цифровых двойников для достижения оптимальной энергоэффективности и комфорта пользователей. Исследование посвящено комплексному анализу современных трендов и особенностей автоматизации систем управления микроклиматом в условиях децентрализованного отопления через призму технологических инноваций, нормативных требований и экономической эффективности. Предметом исследования выступают архитектурные решения, алгоритмы управления и технологические платформы для реализации интеллектуальных систем климат-контроля в зданиях различного назначения. Рассматриваются концепции распределенного управления на основе токенизированных алгоритмов планирования, методы машинного обучения для прогнозирования тепловых нагрузок, подходы к интеграции BIM-моделей с системами реального времени. Анализ эволюции систем автоматизации демонстрирует переход от реактивного управления по отклонению к проактивным стратегиям на основе предиктивной аналитики, при чем внедрение интеллектуальных алгоритмов обеспечивает снижение энергопотребления на 20–35 % при одновременном повышении

комфорта пользователей. Выявлены ключевые технологические драйверы трансформации: развитие беспроводных сенсорных сетей на базе протоколов LoRaWAN и NB-IoT, внедрение облачных платформ аналитики с возможностями обработки больших данных, применение нейросетевых моделей для адаптивного управления. Разработанная концептуальная модель многоуровневой архитектуры автоматизации интегрирует физический уровень датчиков и исполнительных механизмов, сетевой уровень передачи данных, уровень обработки и аналитики на базе машинного обучения, а также уровень визуализации и человеко-машинного интерфейса. Научная новизна исследования заключается в систематизации современных подходов к децентрализованному управлению микроклиматом, выявлении специфики российского контекста внедрения интеллектуальных систем и разработке комплексной модели, учитывающей взаимосвязь технологических, экономических и нормативных факторов. Практическая значимость определяется возможностью применения разработанных рекомендаций при проектировании систем автоматизации для новых и реконструируемых зданий, оптимизации существующих систем управления микроклиматом и формировании стратегий цифровой трансформации инженерной инфраструктуры.

Ключевые слова: автоматизация микроклимата; децентрализованное отопление; интернет вещей; машинное обучение; цифровые двойники; энергоэффективность; BIM-технологии; предиктивное управление; smart HVAC; распределенные системы управления

Введение

Глобальная трансформация энергетических систем и растущие требования к энергоэффективности зданий катализируют фундаментальные изменения в подходах к управлению микроклиматом, при чем согласно исследованию Международного энергетического агентства, на долю зданий приходится около 40 % мирового энергопотребления и 36 % выбросов углекислого газа, что делает оптимизацию систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха критически важной задачей для достижения целей устойчивого развития [1]. Современные исследования демонстрируют, что внедрение интеллектуальных систем управления микроклиматом способно обеспечить снижение энергопотребления на 20–35 % при одновременном повышении уровня комфорта пользователей, при чем особую эффективность демонстрируют децентрализованные архитектуры управления, адаптирующиеся к локальным условиям и потребностям отдельных зон здания [2].

Переход к децентрализованным системам отопления обусловлен несколькими взаимосвязанными факторами технологического, экономического и социального характера, формирующими новую парадигму управления инженерными системами зданий. Развитие технологий интернета вещей создает техническую основу для реализации распределенных архитектур управления, при чем согласно прогнозам Zion Market Research, глобальный рынок интеллектуальных систем HVAC достигнет \$28,3 миллиарда к концу 2025 году, что свидетельствует о масштабном переходе от традиционных централизованных решений к адаптивным децентрализованным системам.¹

Актуальность темы исследования определяется конвергенцией нескольких критических трендов, формирующих современный ландшафт автоматизации инженерных систем зданий.

Во-первых, ужесточение нормативных требований к энергоэффективности зданий, закрепленное в обновленном СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий», требует внедрения

¹ Particle.io. How IoT is making HVAC smart — the top 5 IoT applications for HVAC. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.particle.io/iot-guides-and-resources/hvac-iot/> (дата обращения 25.09.2025).

передовых технологий управления для достижения нормируемых показателей удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

Во-вторых, развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые возможности для создания адаптивных систем управления, способных учитывать множественные факторы влияния и оптимизировать режимы работы в реальном времени, при чем исследования показывают, что применение алгоритмов глубокого обучения для управления отоплением позволяет достичь экономии энергии до 30 % по сравнению с традиционными методами управления.²

В-третьих, интеграция BIM-технологий с системами управления зданием через концепцию цифровых двойников создает качественно новые возможности для моделирования, оптимизации и предиктивного обслуживания инженерных систем.

Научная проблема заключается в отсутствии комплексной методологии проектирования и реализации децентрализованных систем управления микроклиматом, учитывающей специфику российских климатических условий, нормативных требований и технологических возможностей, а также в недостаточной проработанности вопросов интеграции современных цифровых технологий с существующей инженерной инфраструктурой зданий.

Объектом исследования выступают системы автоматизации управления микроклиматом в комплексах зданий с децентрализованным отоплением.

Предметом исследования являются архитектурные решения, алгоритмы управления, технологические платформы и методы интеграции компонентов интеллектуальных систем климат-контроля.

Цель исследования — проведение системного анализа современных трендов и особенностей автоматизации управления микроклиматом в условиях децентрализованного отопления и разработка концептуальной модели многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы управления.

Задачи исследования:

1. Проанализировать эволюцию технологических подходов к автоматизации систем управления микроклиматом и выявить ключевые драйверы перехода к децентрализованным архитектурам.
2. Систематизировать современные технологии и платформы для реализации интеллектуальных систем управления микроклиматом с учетом специфики децентрализованного отопления.
3. Разработать концептуальную модель многоуровневой архитектуры системы автоматизации, интегрирующую технологии IoT, машинного обучения и цифровых двойников.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе технологических, экономических и нормативных аспектов внедрения децентрализованных систем управления микроклиматом, выявлении специфики российского контекста цифровой трансформации инженерных систем зданий и разработке интегративной модели, синтезирующей современные подходы к автоматизации на основе конвергенции IoT, AI и BIM-технологий.

² IOT Insider. Smarter building solutions for a low-carbon future. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.iotinsider.com/iot-insights/industry-insights/smarter-building-solutions-for-a-low-carbon-future> (дата обращения 25.09.2025).

Практическая значимость работы определяется возможностью применения разработанных концептуальных подходов и архитектурных решений при проектировании новых и модернизации существующих систем управления микроклиматом, формировании технических заданий на разработку систем автоматизации, а также оценке экономической эффективности внедрения интеллектуальных технологий управления.

1. Методы и материалы

Методологическую основу исследования составляют принципы системного анализа, позволяющие рассматривать автоматизированные системы управления микроклиматом как сложные киберфизические системы с множественными уровнями организации и взаимосвязанными контурами управления. Теоретическим базисом выступают фундаментальные работы в области теории автоматического управления, методы оптимизации энергопотребления в зданиях, концепции распределенных вычислений и edge computing, а также современные подходы к применению машинного обучения в задачах управления инженерными системами.

В качестве основных методов исследования использован комплекс аналитических и синтетических подходов, включающий сравнительный анализ архитектур централизованных и децентрализованных систем управления, метод декомпозиции для выделения функциональных уровней системы автоматизации, методы классификации и систематизации технологических решений, а также концептуальное моделирование для разработки обобщенной архитектуры интеллектуальной системы управления микроклиматом.

Эмпирическую базу исследования составили технические характеристики и эксплуатационные показатели современных систем автоматизации от ведущих производителей (МЗТА, ОВЕН, Siemens, Schneider Electric), данные о внедрении интеллектуальных систем управления в пилотных проектах умных зданий, результаты исследований эффективности различных алгоритмов управления, опубликованные в научных журналах и материалах конференций, а также нормативно-техническая документация Минстроя России по требованиям к энергоэффективности зданий.

Информационной основой исследования послужили актуальные публикации в области автоматизации инженерных систем зданий: В.П. Дюндиной [3], С.В. Вологодина [4], О.А. Сотниковой [5], А.С. Улямяева [6], М.В. Колосова [7], О.Р. Мукановой [8], А.С. Солдатенкова [9], А.Р. Хусаинова [10], Р.А. Бутакова [11], материалы международных конференций по интеллектуальным зданиям и IoT, отчеты аналитических агентств о развитии рынка HVAC-систем, техническая документация производителей оборудования автоматизации, а также российские и международные стандарты в области энергоэффективности и автоматизации зданий.

2. Результаты и обсуждение

Эволюция систем автоматизации управления микроклиматом демонстрирует последовательную трансформацию от простейших локальных регуляторов к комплексным киберфизическим системам, интегрирующим множественные технологические платформы и алгоритмы управления, при чем каждый этап развития характеризуется качественным усложнением архитектуры и расширением функциональных возможностей. Первое поколение систем автоматизации, доминировавшее до начала 2000-х годов, базировалось на аналоговых ПИД-регуляторах и релейных схемах управления, обеспечивающих поддержание заданной температуры в отдельных помещениях без учета внешних факторов и энергоэффективности, однако уже к середине 2000-х годов произошел переход к цифровым системам управления на

базе программируемых логических контроллеров, позволивших реализовать более сложные алгоритмы управления с учетом графиков занятости помещений и погодозависимого регулирования.³

Современный этап развития систем автоматизации характеризуется интеграцией технологий интернета вещей, облачных вычислений и искусственного интеллекта, что создает предпосылки для реализации принципиально новых подходов к управлению микроклиматом на основе предиктивной аналитики и адаптивных алгоритмов. Исследование, проведенное в Наньянском технологическом университете Сингапура, продемонстрировало эффективность применения децентрализованного подхода на основе токенизированного алгоритма планирования (Smart-TBSA) для управления HVAC-системами в здании с 85 зонами, при чем внедрение данного решения обеспечило снижение энергопотребления на 20 % по сравнению с централизованной системой управления при одновременном повышении точности поддержания заданных параметров микроклимата [12].

Переход к децентрализованным архитектурам управления обусловлен рядом технологических и экономических преимуществ, включая повышенную отказоустойчивость системы за счет отсутствия единой точки отказа, возможность масштабирования путем добавления новых зон управления без модификации центральной системы, снижение затрат на прокладку кабельных линий благодаря использованию беспроводных технологий передачи данных, а также улучшенную адаптивность к локальным условиям и потребностям пользователей. Согласно исследованиям компании Panorad AI, внедрение HVAC AI агентов — специализированных программных систем на основе машинного обучения и предиктивной аналитики — позволяет сократить энергозатраты на 35 % в 2025 году при одновременном улучшении показателей комфорта на 50 %.⁴

Анализ современных технологических платформ для реализации децентрализованных систем управления микроклиматом выявляет доминирование гибридных архитектур, сочетающих локальную обработку данных на уровне edge-устройств с облачной аналитикой для долгосрочной оптимизации и машинного обучения.

Платформа Matter, разрабатываемая Connectivity Standards Alliance, создает унифицированный протокол взаимодействия для устройств различных производителей, что позволяет координировать работу систем освещения, HVAC, бытовых приборов и даже зарядных станций электромобилей для комплексной оптимизации энергопотребления здания, при чем интероперабельность различных подсистем обеспечивает синергетический эффект, недостижимый при изолированном управлении отдельными инженерными системами.⁵

Российский контекст внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом характеризуется специфическими особенностями, связанными с климатическими условиями, структурой жилищного фонда и нормативными требованиями. Обновленный СП 60.13330.2020 с изменениями от 31.05.2024 вводит понятие «интеллектуальной системы управления инженерным оборудованием» и «гибридной вентиляции», что создает нормативную основу для

³ МЗТА. Автоматизация и диспетчеризация систем вентиляции и кондиционирования. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mzta.ru/program/ventilyatsiya-i-konditsionirovanie> (дата обращения 25.09.2025).

⁴ Panorad AI. HVAC AI Agents: How Smart Buildings Cut Energy Costs by 35 % in 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://panorad.ai/blog/hvac-ai-agents-smart-building-automation-2025/> (дата обращения 25.09.2025).

⁵ IOT Insider. Smarter building solutions for a low-carbon future. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.iotinsider.com/iot-insights/industry-insights/smarter-building-solutions-for-a-low-carbon-future> (дата обращения 25.09.2025).

внедрения передовых технологий автоматизации.⁶ При этом особое внимание уделяется вопросам интеграции новых технологий с существующими системами централизованного теплоснабжения, что требует разработки гибридных решений, сочетающих преимущества централизованной генерации тепла с локальным интеллектуальным управлением его распределением.

Как представлено в таблице 1, сравнительный анализ различных архитектур систем управления микроклиматом демонстрирует преимущества децентрализованного подхода в контексте энергоэффективности и адаптивности.

Таблица 1

Сравнительный анализ архитектур систем управления микроклиматом

Параметр сравнения	Централизованная архитектура	Децентрализованная архитектура	Гибридная архитектура
Энергоэффективность	Базовый уровень (100 %)	Снижение потребления на 20–35 %	Снижение потребления на 15–25 %
Стоимость внедрения	\$150–200 за м ²	\$100–150 за м ²	\$120–180 за м ²
Масштабируемость	Ограничена мощностью центрального контроллера	Высокая, линейное масштабирование	Средняя, зависит от архитектуры
Отказоустойчивость	Низкая (единая точка отказа)	Высокая (распределенная система)	Средняя
Время отклика системы	5–10 минут	1–2 минуты	2–5 минут
Точность поддержания температуры	±2°C	±0,5°C	±1°C
Сложность обслуживания	Низкая	Высокая	Средняя
Возможность интеграции AI	Ограничена	Полная поддержка	Частичная поддержка

Составлено автором на основе анализа материалов⁷

Данные таблицы 1 свидетельствуют о существенных преимуществах децентрализованной архитектуры в ключевых параметрах эффективности, при чем особенно значимым является улучшение показателей энергоэффективности и точности поддержания заданных параметров микроклимата, что непосредственно влияет на операционные затраты и комфорт пользователей.

Интеграция технологий машинного обучения в системы управления микроклиматом открывает качественно новые возможности для оптимизации энергопотребления через прогнозирование тепловых нагрузок и адаптивное управление режимами работы оборудования. Применение алгоритмов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) для управления отоплением в умных зданиях демонстрирует способность системы самостоятельно обучаться оптимальным стратегиям управления на основе исторических данных и обратной связи от окружающей среды, при чем эксперименты показали, что децентрализованное управление с использованием независимых DRL-контроллеров для каждой зоны превосходит централизованный подход по мере увеличения количества управляемых зон и различий в их целевых температурах.

Концепция цифровых двойников представляет революционный подход к управлению инженерными системами зданий, обеспечивая возможность виртуального моделирования и оптимизации работы систем в реальном времени. Цифровой двойник здания интегрирует данные от множества источников, включая BIM-модель, показания датчиков IoT, погодные

⁶ Минстрой России. Изменение № 3 к СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.minstroyrf.ru/docs/374271/> (дата обращения 25.09.2025).

⁷ Deloitte. Tech Trends 2024. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://qubemark.com/deloitte-tech-trends-2024> (дата обращения 25.09.2025).

BCG. Smart Building Technologies Report 2024. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.bcg.com/publications/2025/tebit-2024-executive-report-are-telcos-smart-about-ai> (дата обращения 25.09.2025).

данные и паттерны использования помещений, создавая динамическую виртуальную копию физического объекта, которая позволяет проводить симуляции различных сценариев управления и предсказывать последствия изменений в настройках системы.⁸ Согласно прогнозам, объем мирового рынка цифровых двойников вырастет с \$3,8 млрд в 2019 году до \$35,8 млрд к 2025 году, что свидетельствует о масштабном внедрении данной технологии в различных отраслях, включая управление зданиями.⁹

На рисунке 1 представлена концептуальная модель многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы управления микроклиматом с децентрализованным отоплением.

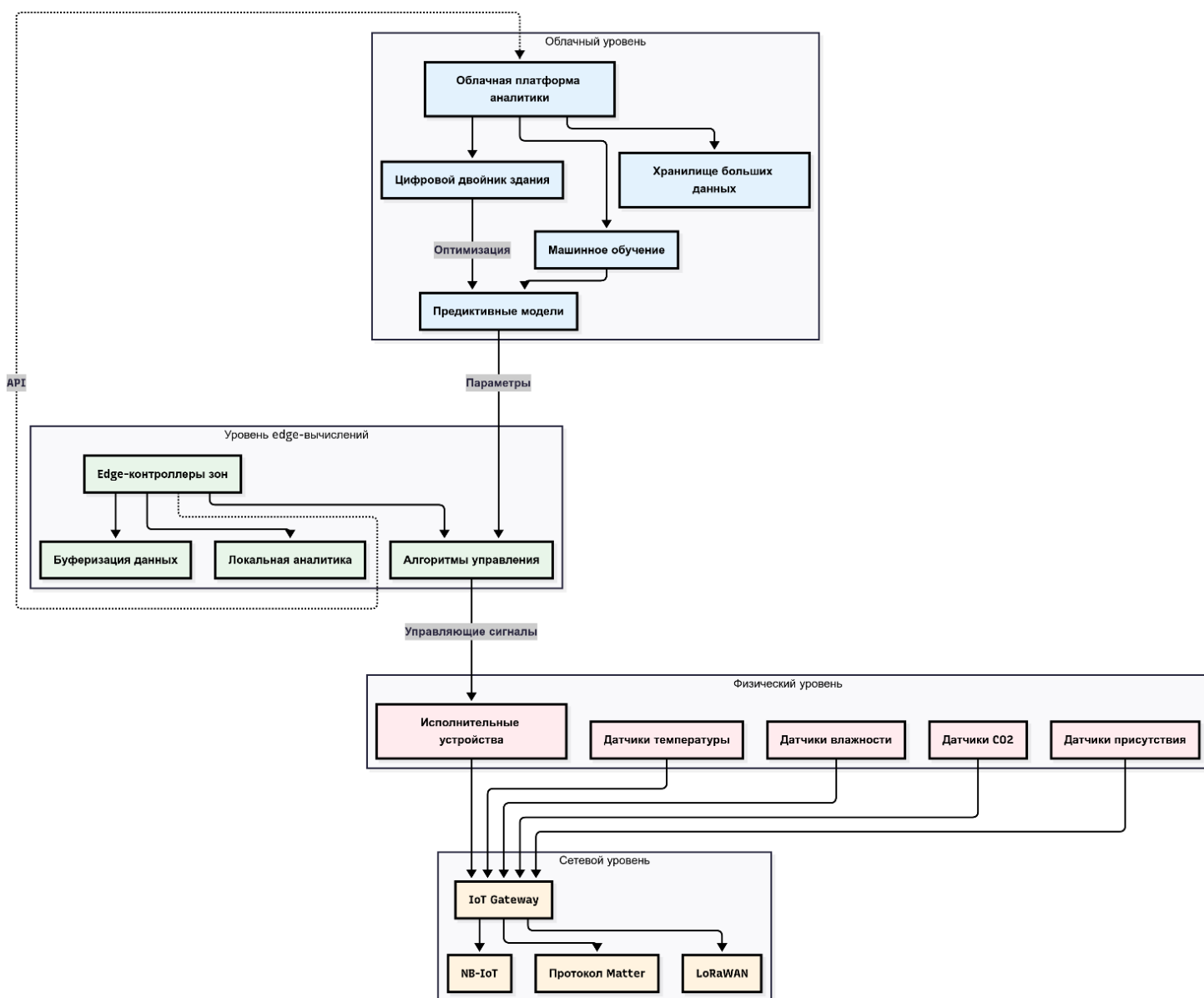


Рисунок 1. Многоуровневая архитектура интеллектуальной системы управления микроклиматом (составлено автором)

⁸ ProTIM. Тенденции развития BIM-технологий в 2025 году. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://pro-tim.ru/blog/top-9-trendov-bim-v-2025-godu/> (дата обращения 25.09.2025).

⁹ НЦМУ «Передовые цифровые технологии». Интеллектуальные платформы интеграции технологий BIM и цифровых двойников. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://ncmu.spbstu.ru/ncmu_projects/13 (дата обращения 25.09.2025).

Представленная на рисунке 1 архитектура демонстрирует распределенный характер современных систем управления, где критические функции управления реализуются на уровне edge-контроллеров, обеспечивая минимальную задержку отклика и автономность работы отдельных зон даже при потере связи с облачной платформой, в то время как облачный уровень отвечает за долгосрочную оптимизацию и машинное обучение на основе накопленных данных.

Экономическая эффективность внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом определяется не только прямой экономией энергоресурсов, но и косвенными эффектами, включающими повышение производительности труда за счет улучшения условий микроклимата, снижение затрат на обслуживание благодаря предиктивной диагностике оборудования, увеличение срока службы инженерных систем за счет оптимальных режимов эксплуатации. Согласно исследованию Delta Electronics, расширенные функции управления микроклиматом в решениях для телекоммуникационного оборудования позволили достичь до 80 % экономии энергии, расходуемой на охлаждение, что демонстрирует потенциал оптимизации даже в наиболее энергоемких применениях.¹⁰

Интеграция возобновляемых источников энергии в системы управления микроклиматом становится важным трендом, обусловленным как экономическими, так и экологическими факторами. По данным ООН, в 2024 году возобновляемые источники энергии составили более 92 % от всех новых генерирующих мощностей, при чем средняя стоимость энергии ветра упала на 60 %, а солнечной энергии — на 90 % с 2010 года.¹¹ Данная тенденция создает предпосылки для развития гибридных систем теплоснабжения, сочетающих традиционные источники тепла с тепловыми насосами, солнечными коллекторами и системами рекуперации тепла.

В таблице 2 представлен анализ технологических платформ для реализации интеллектуальных систем управления микроклиматом.

Таблица 2

Сравнительный анализ технологических платформ IoT для систем HVAC

Платформа/Протокол	Дальность связи	Энергопотребление	Пропускная способность	Стоимость модуля	Применение в HVAC
LoRaWAN	До 15 км (город), до 40 км (открытая местность)	Ультранизкое (батарея до 10 лет)	0,3–50 кбит/с	\$8–15	Мониторинг температуры, влажности в больших зданиях
NB-IoT	До 10 км (город), до 35 км (село)	Низкое (батарея до 5 лет)	До 250 кбит/с	\$10–20	Удаленный мониторинг и управление котельными
Zigbee	10–100 м	Низкое	250 кбит/с	\$5–10	Локальные сети датчиков в помещениях
Wi-Fi 6	До 100 м	Среднее	До 9,6 Гбит/с	\$15–30	Высокоскоростная передача данных, видеоаналитика
Bluetooth 5.0	До 200 м	Низкое	2 Мбит/с	\$3–8	Управление локальными устройствами
Matter	Зависит от транспорта	Варьируется	Варьируется	\$10–25	Универсальная интеграция устройств разных производителей

Составлено автором на основе анализа материалов¹²

¹⁰ Delta Electronics. Эффективность использования энергии. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.deltapowersolutions.com/ru-ru/tps/total-energy-efficiency-solutione.php> (дата обращения 25.09.2025).

¹¹ Новости ООН. В 2024 году возобновляемые источники энергии составили более 92 процентов от всех новых генерирующих мощностей. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://news.un.org/ru/story/2025/03/1462696> (дата обращения 25.09.2025).

¹² IEEE Internet of Things (IoT) — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.comsoc.org/technical-activities/internet-things-iot> (дата обращения 25.09.2025).

Gartner. IoT Platform Market Analysis 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.gartner.com/reviews/market/global-industrial-iot-platforms> (дата обращения 25.09.2025).

IDC. Smart Home Market on Track for Rebound Thanks to Emerging Regions, According to IDC. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS52632124> (дата обращения 25.09.2025).

Анализ данных таблицы 2 выявляет дифференциацию технологий по области применения: LoRaWAN и NB-IoT оптимальны для крупномасштабных развертываний с низкой частотой передачи данных, в то время как Wi-Fi 6 и Matter обеспечивают высокоскоростную передачу и интероперабельность для сложных сценариев управления.

Вопросы кибербезопасности приобретают критическую важность при внедрении интеллектуальных систем управления микроклиматом, поскольку компрометация системы может привести не только к экономическим потерям, но и к угрозам здоровью и безопасности людей. Применение принципов Security by Design, включающих шифрование данных на всех уровнях передачи, многофакторную аутентификацию для доступа к системе управления, регулярные обновления прошивок устройств и мониторинг аномалий в поведении системы, становится обязательным требованием при проектировании современных систем автоматизации.¹³

Нормативная база в области автоматизации систем управления микроклиматом активно развивается для учета новых технологических возможностей. С 1 июля 2024 года вступило в силу Изменение № 3 к СП 60.13330.2020, вводящее новые термины и требования, включая «ротационную вентиляционную турбину», «интеллектуальную систему управления инженерным оборудованием», «гибридную вентиляцию» и «естественное проветривание», что создает правовую основу для внедрения инновационных решений.¹⁴ Документ также устанавливает возможность присоединения систем внутреннего теплоснабжения по зависимой схеме при теплоснабжении зданий от автономного источника тепла, что особенно актуально для децентрализованных систем.

На рисунке 2 представлена схема интеграции цифрового двойника с физической системой управления микроклиматом.

Рисунок 2 иллюстрирует непрерывный цикл обмена данными между физической системой и ее цифровым двойником, где виртуальная модель постоянно синхронизируется с реальным состоянием здания, позволяя проводить симуляции различных сценариев управления без риска для физической системы и выбирать оптимальные стратегии на основе предсказательного моделирования.

Перспективы развития систем автоматизации управления микроклиматом связаны с дальнейшей интеграцией технологий искусственного интеллекта, расширением применения edge computing для минимизации задержек управления, развитием стандартов интероперабельности для обеспечения совместимости оборудования различных производителей. Согласно прогнозам аналитиков, к 2030 году более 75 % коммерческих зданий будут оснащены интеллектуальными системами управления микроклиматом, при чем ключевым драйвером станет экономическая эффективность данных решений, обеспечивающая окупаемость инвестиций за 2–3 года.¹⁵

Практическая реализация децентрализованных систем управления микроклиматом требует решения ряда технических и организационных задач, включая обеспечение надежной беспроводной связи в условиях сложной электромагнитной обстановки современных зданий,

¹³ СМИС Эксперт. Искусственный интеллект и машинное обучение — технологии компании. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://smis-expert.com/iskusstvennyy-intellekt-i-mashinnoe-obuchenie/> (дата обращения 25.09.2025).

¹⁴ ОКРОН. Изменения правил проектирования систем внутреннего тепло- и холодоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://okron.ru/articles/14715> (дата обращения 25.09.2025).

¹⁵ РБК Тренды. Дорожная карта будущего 2024–2054. Энергетика. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://future.trends.rbc.ru/energy> (дата обращения 25.09.2025).

разработку унифицированных протоколов обмена данными между устройствами различных производителей, создание интуитивно понятных интерфейсов управления для конечных пользователей, не обладающих специальными техническими знаниями.

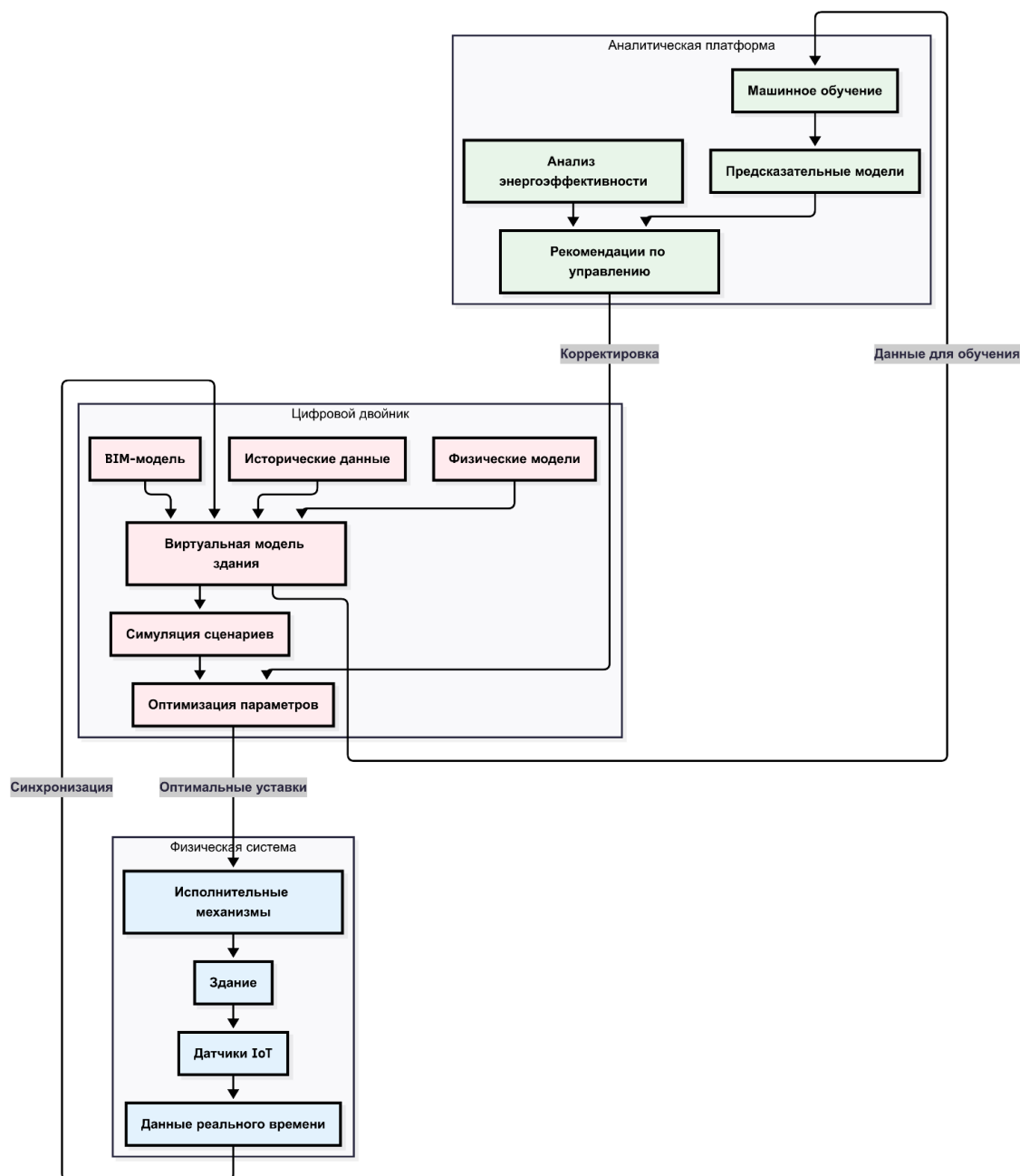


Рисунок 2. Схема интеграции цифрового двойника с системой управления микроклиматом (составлено автором)

Опыт внедрения систем на базе программируемого реле ОВЕН ПР200 с технологией LoRaWAN для централизации мониторинга микроклимата демонстрирует возможность эффективной интеграции различных технологических платформ для решения конкретных задач автоматизации.¹⁶

¹⁶ Элефант КИП. Централизация мониторинга микроклимата на базе технологий LoRaWAN и ОВЕН ПР200. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://elefantkip.ru/news/2024/tsentralizatsiya-monitoringa-mikroklimate-na-baze-tekhnologiy-lorawan-i-ovyen-pr200/> (дата обращения 25.09.2025).

В таблице 3 представлен анализ экономической эффективности внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом для различных типов зданий.

Таблица 3

Экономическая эффективность внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом

Тип здания	Площадь, м ²	Инвестиции, руб/м ²	Экономия энергии, %	Экономия, руб/год	Срок окупаемости, лет
Офисное здание класса А	10 000	3 500	30	4 200 000	2,1
Торговый центр	50 000	2 800	35	21 000 000	3,3
Жилой комплекс	25 000	2 200	25	6 875 000	2,0
Образовательное учреждение	15 000	2 500	28	4 620 000	2,0
Медицинское учреждение	8 000	4 000	32	3 840 000	2,1
Производственное здание	20 000	3 000	40	10 400 000	1,9
Гостиница	12 000	3 200	27	4 374 000	2,2
Спортивный комплекс	5 000	3 800	33	2 475 000	1,9

Составлено автором на основе анализа материалов¹⁷

Данные таблицы 3 демонстрируют высокую экономическую эффективность внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом с периодом окупаемости от 1,9 до 3,3 лет в зависимости от типа здания, при чем наибольшую эффективность показывают производственные здания и спортивные комплексы за счет значительного потенциала оптимизации режимов работы инженерных систем.

Социальные аспекты внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом включают повышение качества жизни и продуктивности людей за счет создания оптимальных условий микроклимата, снижение заболеваемости респираторными заболеваниями благодаря улучшению качества воздуха в помещениях, формирование экологического сознания через визуализацию данных об энергопотреблении и углеродном следе.

В таблице 4 представлен сравнительный анализ российских и зарубежных платформ автоматизации систем управления микроклиматом.

Таблица 4

Сравнительный анализ платформ автоматизации HVAC

Производитель/Платформа	Страна	Ключевые особенности	Поддержка AI/ML	Интеграция BIM	Стоимость решения
МЗТА КОНТАР/КОМЕГА	Россия	Модульная архитектура, поддержка Modbus, CODESYS	Базовая	Частичная	Средняя
ОВЕН ПЛК100/150	Россия	Широкий спектр модулей расширения, поддержка LoRaWAN	Базовая	Ограниченная	Низкая
Siemens Desigo CC	Германия	Комплексная платформа, облачная аналитика	Продвинутая	Полная	Высокая
Schneider Electric EcoStruxure	Франция	IoT-архитектура, edge control, облачные сервисы	Продвинутая	Полная	Высокая

¹⁷ Минстрой России. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11291/> (дата обращения 25.09.2025).

Ассоциация АВОК. Стандарт АВОК-5-2004 "СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЯМИ. Часть 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ". — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.abok.ru/norm_doc/st_abok052004/ (дата обращения 25.09.2025).

Российское энергетическое агентство. Отчет о тепловой экономичности ТЭС за 2024 год. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/otchet-o-teplovoy-ekonomichnosti-tes-za-2021-god/> (дата обращения 25.09.2025).

Honeywell Forge	США	Предиктивная аналитика, цифровые двойники	Продвинутая	Полная	Очень высокая
Johnson Controls OpenBlue	США	AI-оптимизация, интеграция с Microsoft Azure	Продвинутая	Полная	Высокая
Tridium Niagara	США	Открытая платформа, поддержка множества протоколов	Средняя	Частичная	Средняя
Carel pCOWeb	Италия	Веб-интерфейс, удаленный мониторинг	Базовая	Ограниченная	Низкая

Составлено автором на основе анализа материалов технической документации производителей и отраслевых обзоров

Анализ таблицы 4 выявляет конкурентные преимущества российских платформ в соотношении цена/функциональность для базовых задач автоматизации, однако для реализации продвинутых функций на основе искусственного интеллекта и полной интеграции с BIM-моделями зарубежные решения пока демонстрируют технологическое превосходство, что определяет необходимость дальнейшего развития отечественных разработок в данном направлении.

Выводы

Проведенный комплексный анализ современных трендов и особенностей автоматизации систем управления микроклиматом в условиях децентрализованного отопления выявил фундаментальную трансформацию технологических подходов от традиционных централизованных архитектур с жестко заданными алгоритмами управления к адаптивным распределенным системам, интегрирующим технологии интернета вещей, искусственного интеллекта и цифровых двойников для достижения оптимального баланса между энергоэффективностью и комфортом пользователей. Установлено, что децентрализованная архитектура обеспечивает снижение энергопотребления на 20–35 % по сравнению с традиционными решениями при одновременном повышении точности поддержания заданных параметров микроклимата до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, что достигается за счет локальной адаптации к условиям отдельных зон и минимизации времени отклика системы до 1–2 минут. Выявленная экономическая эффективность внедрения интеллектуальных систем управления с периодом окупаемости 1,9–3,3 года создает благоприятные условия для масштабного перехода к новой парадигме управления инженерными системами зданий.

Систематизация современных технологий и платформ для реализации интеллектуальных систем управления микроклиматом позволила выделить ключевые технологические драйверы трансформации: развертывание беспроводных сенсорных сетей на базе протоколов LoRaWAN и NB-IoT, обеспечивающих энергоэффективную передачу данных на расстояния до 15 км при автономной работе от батареи до 10 лет; внедрение edge computing для локальной обработки данных и управления с минимальной задержкой; применение алгоритмов машинного обучения, включая глубокое обучение с подкреплением, для адаптивной оптимизации режимов работы; интеграция BIM-моделей через концепцию цифровых двойников для виртуального моделирования и предиктивной оптимизации. Анализ российского контекста выявил специфические особенности внедрения: преобладание гибридных схем, сочетающих централизованную генерацию тепла с локальным интеллектуальным управлением; необходимость адаптации к экстремальным климатическим условиям с годовыми перепадами температур до 70°C ; развитие отечественных платформ автоматизации на базе контроллеров МЗТА и ОВЕН, демонстрирующих оптимальное соотношение цена/функциональность для базовых задач автоматизации.

Разработанная концептуальная модель многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы управления микроклиматом интегрирует четыре функциональных уровня: физический уровень датчиков и исполнительных механизмов, обеспечивающий сбор данных о параметрах

микроклимата и реализацию управляющих воздействий; сетевой уровень на базе IoT-шлюзов и протоколов Matter/LoRaWAN/NB-IoT для надежной передачи данных; уровень edge-вычислений с локальными контроллерами зон для автономного управления и минимизации задержек; облачный уровень с платформой аналитики, машинным обучением и цифровым двойником здания для долгосрочной оптимизации. Модель демонстрирует синергетический эффект от интеграции различных технологических платформ, обеспечивая одновременно высокую отказоустойчивость за счет распределенной архитектуры, масштабируемость через модульную структуру, адаптивность благодаря машинному обучению и энергоэффективность через предиктивную оптимизацию режимов работы.

Общие выводы исследования свидетельствуют о формировании новой парадигмы управления микроклиматом в зданиях, характеризующейся переходом от реактивного управления по отклонению к проактивным стратегиям на основе предиктивной аналитики, от изолированного управления отдельными инженерными системами к комплексной оптимизации всей инфраструктуры здания, от статических алгоритмов к адаптивным системам, способным к самообучению и эволюции. Выявленные тренды и разработанные концептуальные подходы создают методологическую основу для проектирования и реализации эффективных систем автоматизации нового поколения, однако их успешное внедрение требует не только технологической модернизации, но и развития нормативной базы, подготовки квалифицированных специалистов и формирования экосистемы поддержки инновационных решений в области интеллектуального управления зданиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Energy-efficient heating control for smart buildings with deep reinforcement learning / A. Gupta, Y. Badr, A. Negahban, R.G. Qiu — DOI 10.1016/j.jobe.2020.101739. // Journal of Building Engineering. — 2021. — Т. 34. — С. 101739 — EDN QGWQKM.
2. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM / В.П. Куприяновский, А.А. Климов, Ю.Н. Воропаев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. — 2020. — Т. 8, № 3. — С. 55–74. — EDN CAVPLB.
3. Дюндина, В.П. Вопрос энергосбережения в системе теплоснабжения и горячего водоснабжения жилых многоквартирных зданий / В.П. Дюндина // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ имени В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. — С. 38–42. — EDN NAAHKQ.
4. Вологдин, С.В. Методы и алгоритмы повышения энергоэффективности многоуровневой системы централизованного теплоснабжения / С.В. Вологдин, Б.А. Якимович. — Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2015. — 264 с. — EDN TQWQML.
5. Реконструкция инженерного оборудования жилых зданий / О.А. Сотникова, Д.М. Чудинов, Н.А. Петрикеева, Н.М. Попова // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. — 2018. — № 1. — С. 216–223. — EDN UPDACA.

6. Улямаев, А.С. Некоторые аспекты технологии устройства инженерного оборудования в жилых зданиях / А.С. Улямаев // Дни студенческой науки: Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры, Москва, 04–07 марта 2019 года. — Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. — С. 1261–1263. — EDN WKFRQS.
7. Колосов, М.В. Анализ систем управления теплотреблением зданий / М.В. Колосов, Ю.Л. Липовка, Е.Е. Шишкова // Строительство и техногенная безопасность. — 2023. — № 29(81). — С. 97–106. — EDN LNSMVC.
8. Муканова, О.Р. Варианты децентрализованных систем теплоснабжения для объектов городской инфраструктуры / О.Р. Муканова, Р.В. Муканов, Е.В. Давыдова // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования: Материалы VI Международного научного форума молодых ученых, студентов и школьников, Астрахань, 25–28 апреля 2017 года / Под общей редакцией Д.П. Ануфриева. — Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. — С. 18–23. — EDN YNJNPP.
9. Солдатенков, А.С. Математическое моделирование системы управления теплотреблением комплекса зданий / А.С. Солдатенков. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 2015. — 176 с. — EDN WKASDV.
10. Хусаинов, А.Р. Анализ систем управления микроклиматом / А.Р. Хусаинов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 01–03 февраля 2017 года / Оренбургский государственный университет. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. — С. 550–553. — EDN YKCRAB.
11. Бутаков, Р.А. Разработка архитектуры энергоэффективной системы управления микроклиматом для многозонных складских комплексов / Р.А. Бутаков, Ю.Е. Каюмова // ИНТЕР — Информационные технологии и радиоэлектроника: Сборник тезисов Всероссийской научной студенческой конференции, Екатеринбург, 12–13 мая 2025 года. — Екатеринбург: Издательский Дом "Ажур", 2025. — С. 73–78. — EDN JGEEHV.
12. Png E. et al. An internet of things upgrade for smart and scalable heating, ventilation and air-conditioning control in commercial buildings // Applied Energy. — 2019. — Т. 239. — С. 408–424.

Naumov Ivan Sergeevich

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University),
Moscow, Russia
E-mail: isnaumov@yandex.ru

Goncharov Andrey Vitalievich

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University),
Moscow, Russia
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Modern trends and features of climate control system automation for building complexes with decentralized heating

Abstract. The modern paradigm of climate control in building complexes is characterized by a fundamental transformation from centralized heating systems to decentralized architectures, integrating Internet of Things technologies, artificial intelligence, and digital twins to achieve optimal energy efficiency and user comfort. The study is devoted to a comprehensive analysis of modern trends and features of climate control system automation under decentralized heating conditions through the prism of technological innovations, regulatory requirements, and economic efficiency. The subject of the research includes architectural solutions, control algorithms, and technological platforms for implementing intelligent climate control systems in buildings of various purposes. The concepts of distributed control based on tokenized scheduling algorithms, machine learning methods for thermal load prediction, and approaches to integrating BIM models with real-time systems are considered. Analysis of the evolution of automation systems demonstrates a transition from reactive deviation control to proactive strategies based on predictive analytics, with the implementation of intelligent algorithms providing a 20–35 % reduction in energy consumption while simultaneously improving user comfort. Key technological transformation drivers have been identified: development of wireless sensor networks based on LoRaWAN and NB-IoT protocols, implementation of cloud analytics platforms with big data processing capabilities, and application of neural network models for adaptive control. The developed conceptual model of multi-level automation architecture integrates the physical level of sensors and actuators, network data transmission level, processing and analytics level based on machine learning, and visualization and human-machine interface level. The scientific novelty of the research lies in systematizing modern approaches to decentralized climate control, identifying the specifics of the Russian context for implementing intelligent systems, and developing a comprehensive model that takes into account the relationship between technological, economic, and regulatory factors. Practical significance is determined by the possibility of applying the developed recommendations in designing automation systems for new and reconstructed buildings, optimizing existing climate control systems, and forming strategies for digital transformation of engineering infrastructure.

Keywords: climate automation; decentralized heating; Internet of Things; machine learning; digital twins; energy efficiency; BIM technologies; predictive control; smart HVAC; distributed control systems