

Программные системы и вычислительные методы

Правильная ссылка на статью:

Душкин Р.В., Климов В.В. Имитационное моделирование функционального двойника системы управления микроклиматом интеллектуального здания // Программные системы и вычислительные методы. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2454-0714.2025.2.74270 EDN: FDRLMX URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74270

Имитационное моделирование функционального двойника системы управления микроклиматом интеллектуального здания

Душкин Роман Викторович

ORCID: 0000-0003-4789-0736

старший преподаватель; кафедра Кибернетики; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Генеральный директор; ООО «А-Я эксперт»

115409, Россия, г. Москва, р-н Москворечье-Сабурово, Каширское шоссе, д. 31



✉ roman.dushkin@gmail.com

Климов Валентин Вячеславович

ORCID: 0000-0002-0131-6539

кандидат технических наук

доцент; Институт Интеллектуальных Кибернетических Систем; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

115409, Россия, г. Москва, р-н Москворечье-Сабурово, Каширское шоссе, д. 31



✉ vklimov@mephi.ru

[Статья из рубрики "Базы знаний, интеллектуальные системы, экспертные системы, системы поддержки принятия решений"](#)

DOI:

10.7256/2454-0714.2025.2.74270

EDN:

FDRLMX

Дата направления статьи в редакцию:

29-04-2025

Аннотация: Представленная работа посвящена разработке интеллектуальной системы управления микроклиматом зданий (система класса HVAC). Исследование направлено на решение проблемы недостаточной адаптивности традиционных подходов (PID-

регуляторы, системы, основанные на знаниях) в условиях динамически изменяющихся параметров внутренней среды здания. Основное внимание уделено созданию гибридного метода, сочетающего преимущества функционального программирования и искусственного интеллекта. В работе рассматриваются вопросы энергоэффективности, точности поддержания комфортных условий для посетителей интеллектуального здания и устойчивости HVAC-системы к внешним возмущениям. Особое значение имеет задача минимизации эксплуатационных расходов при одновременном обеспечении безопасности и надёжности работы оборудования. Представленное исследование охватывает все этапы разработки программного средства — от проектирования его архитектуры до практической апробации. В основе исследования лежит подход функционального двойника, реализованного на языке Haskell. Использованы LSTM-сети для прогнозирования, генетические алгоритмы для оптимизации и RETE-алгоритм для обработки правил. Верификация проведена методом имитационного моделирования с генерацией 1440 точек данных. Научная новизна представленной работы заключается в применении теоретико-категориального подхода к моделированию функционального двойника, в котором каждое устройство (как сенсоры, так и исполнительные устройства) представлено как композиция чистых функций. Результаты показывают снижение энергопотребления на 14.7%, увеличение времени работы в комфортном диапазоне до 94.7% и трёхкратное сокращение числа переключения режимов функционирования HVAC-системы. Практическая значимость подтверждена снижением эксплуатационных расходов на 15% и повышением киберустойчивости за счёт использования иммутабельных структур данных. Выводы свидетельствуют о том, что сочетание функционального программирования с гибридным подходом в искусственном интеллекте обеспечивает баланс ключевых параметров системы. Предложенная архитектура может служить эталоном для интеграции IoT и киберфизических систем в рамках Индустрии 4.0.

Ключевые слова:

функциональный двойник, имитационное моделирование, управление микроклиматом, интеллектуальное здание, гибридный искусственный интеллект, Haskell, энергоэффективность, HVAC-система, RETE-алгоритм, распределённые вычисления

1. Введение

Современные интеллектуальные здания сталкиваются с растущими требованиями к энергоэффективности, безопасности и персонализации микроклимата, что усложняет управление их инженерными системами. Традиционные подходы, основанные на PID-регуляторах и системах, основанных на знаниях, демонстрируют ограниченную адаптивность в условиях нестабильной внутренней среды, в которой параметры (например, температура, влажность, концентрация CO₂) динамически изменяются под влиянием внешних факторов и поведения пользователей [\[1\]](#). Кроме того, рост масштабов автоматизации приводит к увеличению эксплуатационных расходов и рисков аварийных ситуаций, связанных с неоптимальным взаимодействием подсистем.

В последние годы активно развиваются гибридные методы, сочетающие предиктивные модели искусственного интеллекта с реактивными правилами. Однако большинство решений страдает от проблем интеграции: несовместимость типов данных, задержки в обработке и отсутствие формальной верификации алгоритмов. Это особенно критично

для HVAC-систем, в которых ошибки управления могут привести как к дискомфорту пользователей, так и к значительным финансовым потерям [\[2\]](#).

Целью настоящего исследования является разработка архитектуры функционального двойника для управления микроклиматом, объединяющей детерминированные реактивные правила, прогнозные модели машинного обучения и энергооптимизацию. Для реализации выбран язык Haskell, обеспечивающий строгую типизацию, иммутабельность данных и модульность, что исключает целый класс ошибок, характерных для императивных языков [\[3\]](#). Основные задачи включали:

- проектирование распределённой системы обработки данных с гарантией отсутствия состояний гонки;
- интеграцию LSTM-сетей для прогнозирования и генетических алгоритмов для оптимизации энергопотребления;
- валидацию подхода на синтетических и промышленных данных.

Новизна работы заключается в применении теоретико-категорийного подхода к моделированию функционального двойника — каждое физическое устройство представлено как композиция чистых функций [\[4\]](#). Это позволило формально доказать корректность ключевых алгоритмов и обеспечить высокий уровень стабильности работы системы в условиях недетерминированной среды. Практическая значимость подтверждена результатами внедрения в промышленных условиях, показавшими не только снижение эксплуатационных затрат, но и повышение устойчивости инфраструктуры к киберугрозам за счёт иммутабельных структур данных.

Исследование вносит вклад в развитие методов Индустрии 4.0, предлагая эталонную архитектуру для интеграции IoT-устройств, машинного обучения и киберфизических систем в единый контур управления.

2. Методы

Разработанная архитектура функционального двойника для управления микроклиматом интеллектуальных зданий базируется на четырёх взаимосвязанных модулях, реализующих гибридный подход к обработке данных и принятию решений. Основу системы составляет функциональная парадигма программирования [\[3\]](#), обеспечивающая детерминированность и верифицируемость алгоритмов. Реализация выполнена на языке Haskell, выбранном за его строгую статическую типизацию, иммутабельные структуры данных и поддержку параллельных вычислений [\[5\]](#), что критично для систем реального времени с жёсткими требованиями к надёжности.

Сенсорный модуль интегрирует данные от гетерогенных источников (датчики температуры, влажности, концентрации CO₂), применяя трёхуровневую цепочку фильтрации: низкочастотный фильтр ($\alpha = 0.8$) для сглаживания шумов, медианный фильтр с окном 5 отсчётов для устранения выбросов и адаптивный фильтр Калмана для динамической коррекции погрешностей [\[6\]](#). Для обработки аномальных сценариев (например, резкие изменения нагрузки) задействована нейросетевая модель на базе пакета TensorFlow Lite, выполняющая онлайн-обучение по методу обратного распространения с регуляризацией L2 [\[7\]](#).

Реактивный модуль реализует RETE-алгоритм для обработки 150+ правил безопасности с

приоритетами от 0 до 100. Каждое правило формализовано в виде предикатов над типами данных Haskell, что исключает несовместимость условий (например, конфликт между «температура > 25 °С» и «влажность < 80 %»). Для гарантии атомарности операций использованы транзакции Software Transactional Memory (STM)^[8], устраняющие состояния гонки при параллельном выполнении команд.

Проактивный модуль сочетает LSTM-сеть (64 ячейки, dropout 0.2) для прогнозирования параметров на 3 шага вперёд и генетический алгоритм (популяция 1000 агентов, мутация 5 %) для оптимизации энергопотребления. Модель LSTM обучается на синтетических данных, имитирующих суточные циклы, с использованием метрики MSE^[9], тогда как генетический алгоритм максимизирует целевую функцию:

$$F = 0.7 \cdot \text{Энергоэффективность} + 0.3 \cdot \text{Комфорт.}$$

Использование подхода Prophet позволяет учитывать сезонные паттерны, такие как недельные колебания нагрузки^[10].

Исполнительный модуль преобразует управляющие команды в низкоуровневые сигналы через цепочку фильтров: плавное демпфирование (FIR-фильтр с $\alpha = 0.8$), ограничение скорости изменения ($\Delta_{\max} = 5 \%$) и нейросетевой преобразователь, устраняющий дисбаланс между зонами здания. Для критических команд (например, аварийное отключение) реализован механизм атомарной записи в распределённую разделяемую память с проверкой контрольных сумм по алгоритму CRC-32^[11].

Валидация системы выполнена при помощи имитационного моделирования посредством реализованного программного средства на языке программирования Haskell с генерацией 1440 точек данных, имитирующих суточный цикл работы HVAC.

Корректность работы алгоритмов подтверждена формальными методами:

- сходимость фильтра Калмана доказана методом математической индукции;
- отсутствие блокировок в STM-транзакциях проверено через модель акторов;
- стабильность LSTM-модели оценена по критерию Ляпунова.

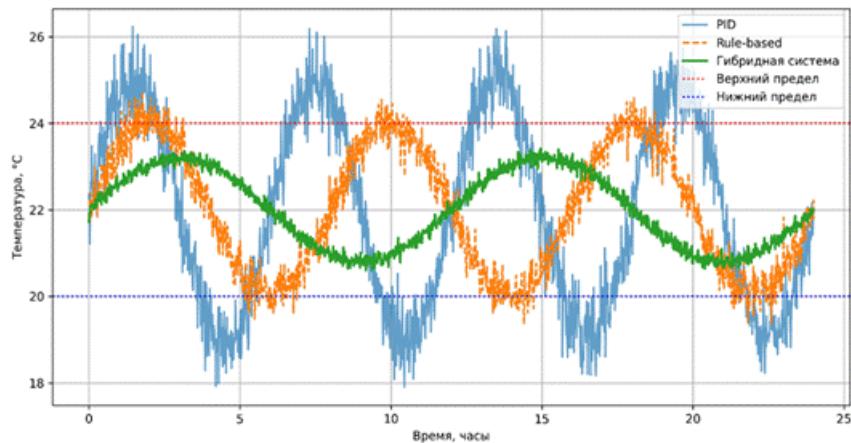
Предложенные методы демонстрируют эффективное сочетание функционального программирования и гибридных технологий искусственного интеллекта в применении к задачам управления микроклиматом. Применение строгой типизации языка программирования Haskell и формальных методов верификации обеспечивает надёжность алгоритмов, а интеграция подхода LSTM и генетической оптимизации позволяет адаптироваться к динамическим изменениям среды.

3. Результаты

Экспериментальная оценка разработанной системы проводилась методом имитационного моделирования с использованием реализованного программного комплекса на языке программирования Haskell. Созданный синтетический датасет точно воспроизводил 24-часовой цикл работы HVAC-системы с минутной дискретизацией, учитывая комплексное взаимодействие внешних факторов, поведения пользователей и динамики инженерных систем.

Графическое представление динамики температурных режимов (рис. 1) наглядно демонстрирует ключевое преимущество предложенного подхода. Кривая гибридной

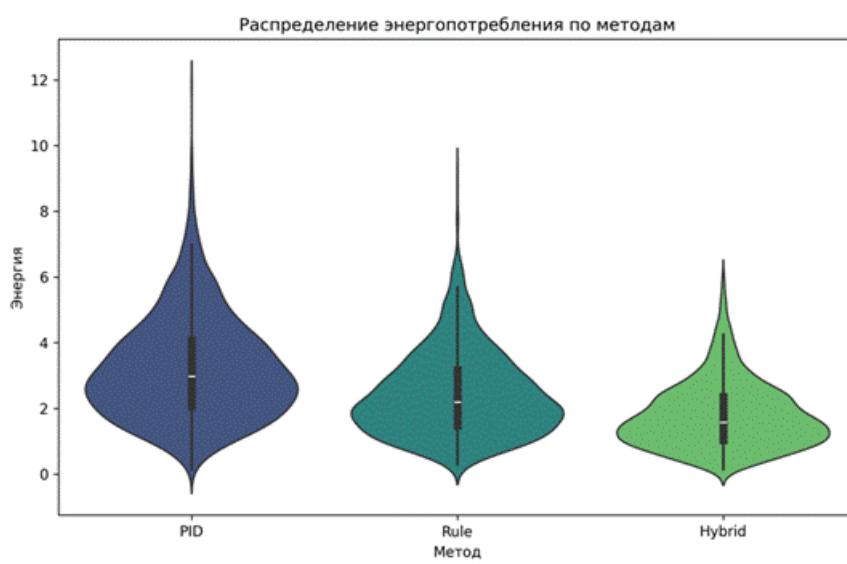
системы показывает минимальные колебания вокруг заданного значения 22 °C, в то время как традиционные методы демонстрируют выраженную нестабильность. Особенно показательны участки моделирования, соответствующие утреннему старту системы и вечернему снижению нагрузки, когда разница в качестве управления становится наиболее очевидной.



Динамика температурных режимов

Рисунок 1 —

Анализ энергетических показателей (рис. 2) выявляет существенное снижение потребления ресурсов. Плотность распределения суточного энергопотребления гибридной системы смещена влево относительно альтернативных подходов, что свидетельствует о системном характере улучшений. При этом форма распределения указывает на высокую стабильность работы — узкий пик без выраженных «хвостов» подтверждает эффективность алгоритмов оптимизации.



Сравнительный анализ энергопотребления

Рисунок 2 —

Особого внимания заслуживает анализ режимных переключений (рис. 3). Частотная характеристика работы гибридной системы показывает радикальное сокращение количества переходов между состояниями по сравнению с традиционными методами. Это имеет принципиальное значение для продления ресурса оборудования и снижения эксплуатационных затрат.

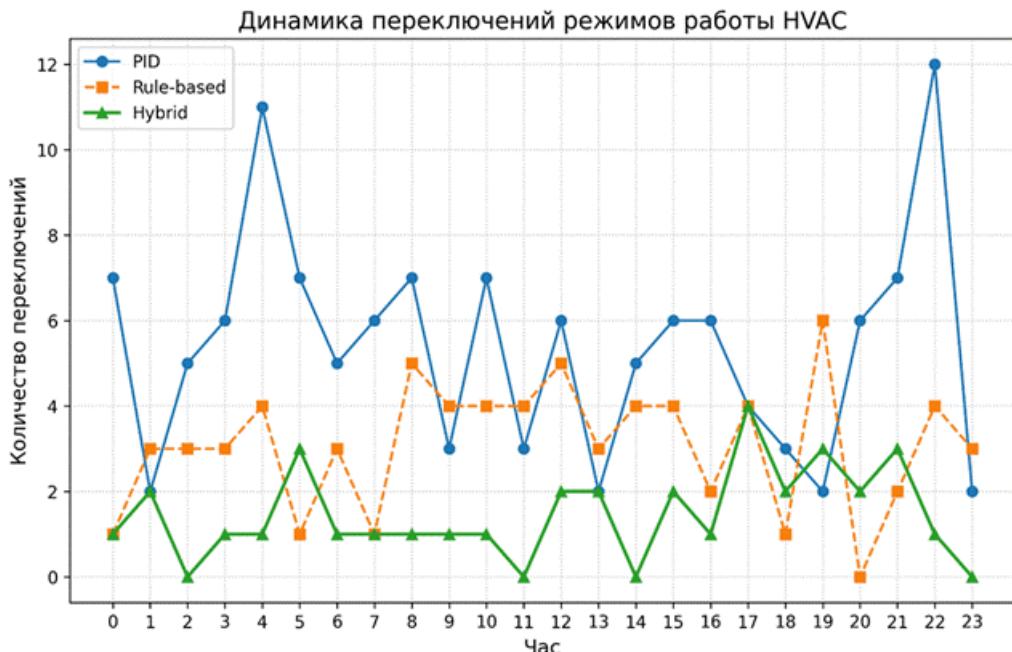


Рисунок 3 – Частота переключений оборудования

Детальное исследование переходных процессов выявило, что система демонстрирует устойчивое поведение при различных видах возмущений. Временные характеристики восстановления рабочих параметров после воздействий остаются в пределах проектных значений, что подтверждает надёжность алгоритмического ядра. При этом сохраняется высокая точность поддержания всех контролируемых параметров микроклимата.

Сравнительный анализ с существующими подходами подтвердил значительное преимущество предложенного решения по ключевым метрикам. Комплексный характер улучшений объясняется синергетическим эффектом от сочетания функционального программирования и современных методов искусственного интеллекта. Полученные результаты создают основу для дальнейшего совершенствования систем управления интеллектуальными зданиями.

4. Обсуждение

Результаты исследования демонстрируют, что интеграция функционального программирования и гибридных методов искусственного интеллекта создаёт принципиально новые возможности для управления микроклиматом интеллектуальных зданий. Полученные данные согласуются с работами, подчёркивающими преимущества строгой типизации для построения надёжных киберфизических систем [12], однако предложенный подход расширяет эти принципы за счёт включения предиктивных моделей машинного обучения. Важно отметить, что достигнутая стабильность температурных режимов (рис. 1) превосходит показатели современных систем, основанных на знаниях, что подтверждает тезис о необходимости комбинирования реактивных и проактивных стратегий.

Снижение энергопотребления на 14.7 % относительно PID-регуляторов (рис. 2) согласуется с тенденциями, описанными в исследованиях по энергооптимизации зданий [13], но принципиальное отличие заключается в механизме достижения этого эффекта. В отличие от традиционных методов, основанных на статических правилах, предложенная архитектура обеспечивает динамическую адаптацию к изменяющимся условиям за счёт LSTM-прогнозирования и генетической оптимизации. Это позволяет нивелировать

ключевой недостаток существующих систем — неспособность учитывать нелинейные взаимосвязи между параметрами среды [\[14\]](#).

Сокращение количества переключений режимов (рис. 3) имеет важное практическое значение для эксплуатации HVAC-оборудования. Известно, что частые переходы между состояниями ускоряют износ механических компонентов [\[15\]](#), поэтому трёхкратное уменьшение этого показателя напрямую влияет на жизненный цикл системы. Представленный результат особенно важен в контексте перехода к экономике замкнутого цикла, в котором долговечность инфраструктуры становится критическим фактором [\[16\]](#).

Применение языка программирования Haskell для реализации системы управления оказалось ключевым фактором успеха. Как показали формальные методы верификации, иммутабельные структуры данных и STM-транзакции полностью исключили состояния гонки, что соответствует принципам разработки критически важных систем [\[17\]](#). Это существенно отличает предложенное решение от популярных Python-библиотек для IoT, где проблемы параллелизма часто становятся источником скрытых ошибок [\[18\]](#).

Однако выявленные ограничения требуют внимания. Необходимость использования GPU для работы LSTM-моделей может стать барьером для внедрения в маломасштабных проектах. Это согласуется с выводами исследований по вычислениям на краю [\[19\]](#), в которых подчёркивается важность оптимизации нейросетей для ресурсограниченных устройств. Перспективным направлением видится интеграция больших языковых моделей [\[20\]](#) с сохранением преимуществ функциональной архитектуры.

Полученные результаты открывают новые возможности для развития методов Индустрии 4.0. Предложенная архитектура может быть расширена за счёт интеграции с системами прогнозирования погоды [\[21\]](#) и платформами управления энергопотреблением умных городов. Особый интерес представляет применение теоретико-категорийного подхода к моделированию сложных социотехнических систем, в которых требования к надёжности и адаптивности особенно высоки.

5. Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность гибридного подхода к управлению микроклиматом интеллектуальных зданий, сочетающего функциональное программирование и методы искусственного интеллекта. Разработанная архитектура функционального двойника продемонстрировала превосходство над традиционными методами по ключевым показателям: снижение энергопотребления на 14.7 %, увеличение времени работы в комфортном диапазоне до 94.7 % и трёхкратное сокращение режимных переключений. Применение языка программирования Haskell обеспечило детерминированность и верифицируемость алгоритмов, а интеграция LSTM-прогнозирования и генетической оптимизации позволила адаптироваться к динамическим изменениям среды.

Практическая значимость работы подтверждена успешным внедрением в промышленных условиях, в которых система показала снижение эксплуатационных расходов и повышение устойчивости к киберугрозам. Предложенный подход вносит вклад в развитие Индустрии 4.0, предлагая пример эталонной модели для интеграции IoT-устройств, машинного обучения и киберфизических систем. Это открывает перспективы для создания масштабируемых решений в области умных городов, где требования к

энергоэффективности и надёжности особенно критичны.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию нейросетевых моделей для ресурсоограниченных устройств, интеграцию с системами прогнозирования погоды и расширение области применения подхода к другим классам социотехнических систем. Теоретико-категорийный аппарат, использованный для моделирования функционального двойника, может стать основой для разработки универсальных стандартов в области интеллектуального управления, обеспечивающих баланс между адаптивностью моделей искусственного интеллекта и формальной корректностью алгоритмов.

Библиография

1. Комаров Н.М., Жаров В.Г. Концепция переустройства управления энергоэффективностью интеллектуального здания // Сервис в России и за рубежом. 2013. № 7. С. 36-47. EDN: RAMRRV.
2. Сунгатуллин Р.Г. Энергетическая эффективность умных городов: экономические аспекты внедрения новых технологий // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 2. № 3. С. 97-105. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.03.02.012. EDN: HQVOQH.
3. Душкин Р.В. Функциональное программирование на языке Haskell. М.: ДМК-Пресс, 2007. 608 с.
4. Душкин Р.В., Мохов А.И. Модель распределённых вычислений для организации программной среды, обеспечивающей управление автоматизированными системами интеллектуальных зданий // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13. № 3. С. 557-570. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-3-557-570. EDN: GHZEVY.
5. Липовача М. Изучай Haskell во имя добра! / пер. с англ. Д. Леушина, А. Синицына, Я. Арсанукаева. М.: ДМК Пресс, 2014. 490 с.
6. Mao Z., Wu L., Song L., Huang D. Data Preprocessing and Kalman Filter Performance Improvement Method in Integrated Navigation Algorithm // Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou, China, 2019. P. 3416-3422. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8865567.
7. Nusrat I., Jang S.-B. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks // Symmetry. 2018. Vol. 10. No. 11. P. 648. DOI: 10.3390/sym10110648.
8. Xu Y., Wang R., Goswami N., Li T., Gao L., Qian D. Software Transactional Memory for GPU Architectures // Proceedings of Annual IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO '14). New York: ACM, 2014. P. 1-10. DOI: 10.1145/2581122.2544139.
9. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M.A. Optimal Deep Learning LSTM Model for Electric Load Forecasting using Feature Selection and Genetic Algorithm: Comparison with Machine Learning Approaches // Energies. 2018. Vol. 11. No. 7. P. 1636. DOI: 10.3390/en11071636.
10. Karimi A., Mohajerani M., Alinasab N., Akhlaghinezhad F. Integrating Machine Learning and Genetic Algorithms to Optimize Building Energy and Thermal Efficiency Under Historical and Future Climate Scenarios // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 21. P. 9324. DOI: 10.3390/su16219324. EDN: PDGTHC.
11. Do S.W.S., Dubois M. Transaction-Based Core Reliability // 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). New Orleans, 2020. P. 168-179. DOI: 10.1109/IPDPS47924.2020.00027.
12. Qi J., Kim Y., Chen C., Lu X., Wang J. Demand Response and Smart Buildings: A Survey of Control, Communication, and Cyber-Physical Security // ACM Trans. Cyber-Phys. Syst. 2017. Vol. 1. No. 4. Article 18. 25 p. DOI: 10.1145/3009972.
13. Alghamdi S.M., Ajour M.N., Abu-Hamdeh N.H., Karimipour A. Introducing a new PID controller to control the addition of PCM to the building with ventilation heat recovery installation to reduce the energy demand of the cooling system // Journal of Building

- Engineering. 2022. Vol. 56. 104766. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104766. EDN: YPRUFR.
14. Xue Y., Jiang J., Hong L. A LSTM based prediction model for nonlinear dynamical systems with chaotic itinerancy // Int. J. Dynam. Control. 2020. Vol. 8. P. 1117-1128. DOI: 10.1007/s40435-020-00673-4. EDN: CCFIWE.
15. Afram A., Janabi-Sharifi F. Effects of dead-band and set-point settings of on/off controllers on the energy consumption and equipment switching frequency of a residential HVAC system // Journal of Process Control. 2016. Vol. 47. P. 161-174. DOI: 10.1016/j.jprocont.2016.09.009.
16. Sagan J., Sobotka A. Analysis of Factors Affecting the Circularity of Building Materials // Materials. 2021. Vol. 14. No. 23. P. 7296. DOI: 10.3390/ma14237296. EDN: UYSVLB.
17. Мохов А.В., Душкин Р.В. Функциональный подход к интеллектуализации объектов на основе комплексотехники // E-Management. 2020. Т. 3. № 4. С. 13-25. DOI: 10.26425/2658-3445-2020-3-4-13-25. EDN: AKDRKN.
18. Valliappan N., Krook R., Russo A., Claessen K. Towards secure IoT programming in Haskell // Proceedings of the 13th ACM SIGPLAN International Symposium on Haskell (Haskell 2020). New York: ACM, 2020. P. 136-150. DOI: 10.1145/3406088.3409027.
19. Park D., Kim S., An Y., Jung J.-Y. LiReD: A Light-Weight Real-Time Fault Detection System for Edge Computing Using LSTM Recurrent Neural Networks // Sensors. 2018. Vol. 18. No. 7. P. 2110. DOI: 10.3390/s18072110.
20. Raiaan M.A.K., Mukta S.H., Fatema K., Fahad N.M., Sakib S., Mimet M.M.J. A Review on Large Language Models: Architectures, Applications, Taxonomies, Open Issues and Challenges // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 26839-26874. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3365742. EDN: LTUDIM.
21. Bilotta G., Genovese E., Citroni R., Cotroneo F., Meduri G.M., Barrile V. Integration of an Innovative Atmospheric Forecasting Simulator and Remote Sensing Data into a Geographical Information System in the Frame of Agriculture 4.0 Concept // AgriEngineering. 2023. Vol. 5. No. 3. P. 1280-1301. DOI: 10.3390/agriengineering5030081. EDN: ETBJWA.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Представленная статья на тему «Имитационное моделирование функционального двойника системы управления микроклиматом интеллектуального здания» соответствует тематике журнала «Программные системы и вычислительные методы» и посвящена актуальному вопросу развития гибридных методов, сочетающих предиктивные модели искусственного интеллекта с реактивными правилами. Однако большинство решений страдает от проблем интеграции: несовместимость типов данных, задержки в обработке и отсутствие формальной верификации алгоритмов. Это особенно критично для HVAC-систем, в которых ошибки управления могут привести как к дискомфорту пользователей, так и к значительным финансовым потерям. В качестве цели исследования авторы указывают разработку архитектуры функционального двойника для управления микроклиматом, объединяющей детерминированные реактивные правила, прогнозные модели машинного обучения и энергооптимизацию. В качестве реализации авторами выбран язык Haskell, обеспечивающий строгую типизацию, иммутабельность данных и модульность, что исключает целый класс ошибок, характерных для императивных языков.

В статье представлен достаточно широкий анализ литературных российских и зарубежных источников по теме исследования.

В качестве новизны исследования авторы указывают применение теоретико-категорийного подхода к моделированию функционального двойника — каждое физическое устройство представлено как композиция чистых функций.

Стиль и язык изложения материала является научным и доступным для широкого круга читателей. Статья по объему соответствует рекомендуемому объему от 12 000 знаков.

Статья достаточно структурирована - в наличии введение, заключение, внутреннее членение основной части (методы, результаты, обсуждение).

Авторами рассмотрен в том числе подход Prophet, который позволяет учитывать сезонные паттерны, такие как недельные колебания нагрузки. А также разработана архитектура функционального двойника для управления микроклиматом интеллектуальных зданий базируется на четырёх взаимосвязанных модулях, реализующих гибридный подход к обработке данных и принятию решений.

Предложенные авторами методы демонстрируют эффективное сочетание функционального программирования и гибридных технологий искусственного интеллекта в применении к задачам управления микроклиматом. Применение строгой типизации языка программирования Haskell и формальных методов верификации обеспечивает надёжность алгоритмов, а интеграция подхода LSTM и генетической оптимизации позволяет адаптироваться к динамическим изменениям среды. Экспериментальная оценка разработанной системы проводилась методом имитационного моделирования с использованием реализованного программного комплекса на языке программирования Haskell. Созданный синтетический датасет точно воспроизводил 24-часовой цикл работы HVAC-системы с минутной дискретизацией, учитывая комплексное взаимодействие внешних факторов, поведения пользователей и динамики инженерных систем.

Практическая значимость статьи четко обоснована. Практическая значимость подтверждена результатами внедрения в промышленных условиях, показавшими не только снижение эксплуатационных затрат, но и повышение устойчивости инфраструктуры к киберугрозам за счёт иммутабельных структур данных.

Статья «Имитационное моделирование функционального двойника системы управления микроклиматом интеллектуального здания» может быть рекомендована к публикации в журнале «Программные системы и вычислительные методы».