

УДК: 628.87, 004.772
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3
EDN: CQRTXM



Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении

И.О. Степанов¹, Д.В. Крайнов²

¹ГУП Республики Татарстан "Головная территориальная проектно-изыскательская научно-производственная фирма «Татинвестгражданпроект»",

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Технология информационного моделирования активно применяется на стадии проектирования и строительства, генерируя большой объем информации об объекте. На этапе эксплуатации эта информация почти не используется, хотя эксплуатационным службам она необходима для принятия эффективных решений, это и стало причиной особого внимания к данной теме. *Целью* исследования является разработка цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении научно-образовательного центра «Системы», расположенного на территории кампуса Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие *задачи*: проанализировать возможность применения технологии цифрового двойника на стадии эксплуатации здания для выбранного объекта, разработать средство измерения и метод передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель учебной аудитории.

Результаты. На примере учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы» разработан метод мониторинга параметров микроклимата в помещении с передачей данных в цифровую информационную модель здания в режиме реального времени. Новизна результатов заключается в усовершенствовании процесса эксплуатации зданий с целью обеспечения комфортного микроклимата в помещении. Для строительной отрасли появляется возможность оптимизировать затраты в условиях обеспечения комфортного микроклимата с использованием цифровой информационной модели здания.

Ключевые слова: Цифровой двойник, эксплуатация здания, технология информационного моделирования, ТИМ, интернет вещей, MQTT протокол

Для цитирования: Степанов И.О., Крайнов Д.В. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 26-36, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3, EDN: CQRTXM

Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring

I.O. Stepanov¹, D.V. Kraynov²

¹SUE of the Republic of Tatarstan "Head Territorial Design and Survey Research and Production Firm "Tatinvestgrazdanproekt",

²Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Information modeling technology is actively used at the design and construction stage, generating a large amount of information about the facility. At the operational stage, this information is almost not used, although operational services need it to

make effective decisions, which is the reason for special attention to this topic. The purpose of the research is to develop a digital twin for monitoring the microclimate in the premises of the scientific and educational center “Systems”, located on the campus of Kazan State University of Architecture and Engineering. To achieve this goal, the following tasks are formulated: to analyze the possibility of using digital twin technology at the stage of operation of a building for a selected facility, to develop a measuring tool and a method for transmitting data on temperature and humidity of internal air to the information model of the classroom. *Results.* Using the example of a classroom at the scientific and educational center “Systems”, a method for monitoring indoor microclimate parameters with data transfer to a digital information model of the building in real time has been developed. The novelty of the results lies in the improvement of the process of operating buildings in order to ensure a comfortable indoor microclimate. For the construction industry, there is an opportunity to optimize costs while ensuring a comfortable microclimate using a digital building information model.

Keywords: Digital twin, building operation, information modeling technology, BIM, Internet of things, MQTT protocol

For citation: Stepanov I.O., Kraynov D.V. Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 26-36, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3, EDN: CQRTXM

1. Введение

Проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция (ремонт) и стадия сноса здания являются основными этапами жизненного цикла объекта капитального строительства (ОКС). В настоящее время на каждом этапе наблюдается различная степень внедрения информационных технологий (рис. 1) [1].

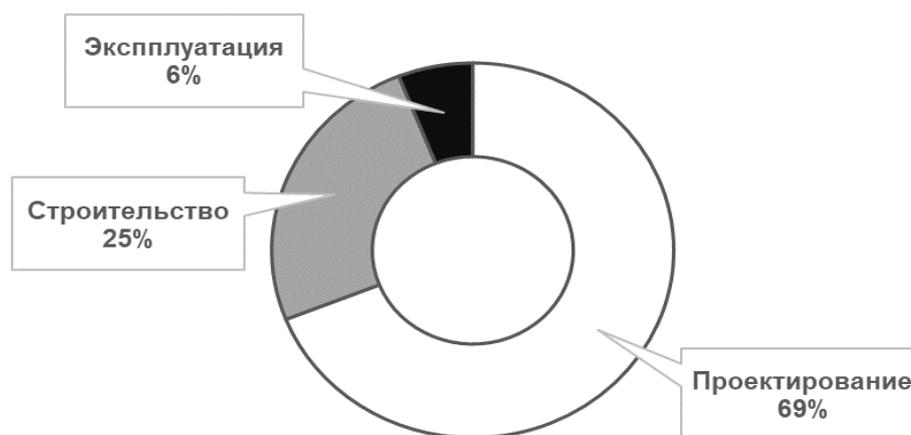


Рис.1. Применение цифровых технологий на этапах жизненного цикла здания
(иллюстрация авторов)

Fig.1 Application of digital technologies at the stages of the building life cycle
(illustration by the authors)

На стадии проектирования для получения проектно-сметной документации активно используются системы автоматизированного проектирования (САПР) и технология информационного моделирования (ТИМ) [2]. На этапе строительства информационные технологии применяется в меньшей степени и в основном для решения определённых задач отдела капитального строительства [3-5]. А на этапе эксплуатации информационные технологии практически не используются [6], именно это факт стал причиной особого внимания к этой теме.

На стадии эксплуатации необходимо эффективно управлять зданием, своевременно обслуживать техническое оборудование, контролировать износ конструкций, отслеживать динамические характеристики здания и быстро реагировать на чрезвычайные ситуации. Для решения этих задач возможно использование цифровой

информационной модели (ЦИМ). Однако только ЦИМ будет недостаточно по причине того, что она предоставляет лишь статические данные созданного физического объекта, что ограничивает возможности ее применения на стадии эксплуатации.

Вследствие стремительного развития технологий передачи информации в режиме реального времени с датчиков, расположенных на физическом объекте, активно стала развиваться технология цифрового двойника, в которой ЦИМ является одним из основных элементов.

На сегодняшний день исследования технологии цифровых двойников находятся на начальной стадии и имеют тесную связь с технологиями информационного моделирования и умного дома (умного города) [7-9].

Одной из задач на стадии эксплуатации является обеспечения комфорта в помещении с разумным использованием энергетических ресурсов. Для решения этой задачи авторы применили цифровой двойник для дистанционного обучения беспроводных сенсорных сетей с целью повышения энергоэффективности системы мониторинга микроклимата [10,11]. Подход по проверке и калибровке цифрового двойника на примере лучистого отопления описан в [12], что позволило снизить эксплуатационные затраты, при том же уровне комфорта. В исследовании [13] автор применяет цифровой двойник для проверки обеспечения комфортного микроклимата в годовом цикле эксплуатации. В работах [14,15] цифровой двойник использовали для управления системами отопления и вентиляции университетского здания, что привело к снижению финансовых затрат при сохранении комфортного микроклимата в помещении.

Для поддержания комфортного микроклимата в помещении необходимо контролировать состояние оборудования для предотвращения выхода его из строя [16]. Для решения задачи прогнозирования технического обслуживания оборудования авторы применяют технологию цифрового двойника в вентиляционных системах и для обслуживания промышленного оборудования [17-19].

Для решения этой задачи эффективного управления зданием в исследовании [20] была предложена платформа комплексного сбора исторических данных, а также получения данных в режиме реального времени, на основе которых алгоритмы искусственного интеллекта поддерживают техническое обслуживание здания, позволяя достичь оптимизации энергоэффективности. Цифровой двойник используется для создания интеллектуальной системы оптимизации и автоматизации управления электроэнергией в жилых районах города [21]. Результаты мониторинга в реальном времени на основе цифровых двойников могут преодолеть разрыв между проектными энергетическими характеристиками и фактическими характеристиками здания [22].

На основе проведенного анализа работ и исследований в области применения цифровых двойников, а также развитием проекта «Умный город», направленного на формирование эффективной системы управления городским хозяйством можно сделать вывод, что выбранная тема является актуальной. Целью данной работы является разработка цифрового двойника для мониторинга микроклимата в учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы».

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка «умного датчика» температуры и влажности;
- разработка метода передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель учебной аудитории центра «Системы».

2. Материалы и методы

В данной работе цифровой двойник понимается как набор параметризованных цифровых моделей, интегрированных в общий алгоритм управления объектом, с использованием внешних данных, полученных с датчиков и оборудования здания в режиме реального времени. В данной статье разработан метод мониторинга микроклимата в учебной аудитории научно-образовательного центра Системы с передачей полученных данных в информационную модель. Цифровой двойник состоит из трех базовых уровней (рис. 2).

Первый уровень осуществляет сбор информации при помощи умных датчиков, расположенных в здании.

Второй уровень хранит информационную модель здания и динамическую базу данных, в которую при помощи протоколов связи поступает информация с датчиков. Стандартные протоколы передачи данных обеспечивают двунаправленный поток обмена информацией между физическим и цифровым объектом.

Третий уровень объединяет цифровую информационную модель и базу данных при помощи Web-интерфейса. Здесь же осуществляется анализ, прогнозирование и управления зданием.

В рамках представленной работы на первом уровне для сбора информации о параметрах воздуха был разработан измеритель температуры и влажности, который состоит из измерительного датчика DHT22 и платы ESP8266 со встроенным Wi-Fi модулем, при помощи которого происходит подключение к интернету и передача данных (рис. 3).



Рис.2. Концепция цифрового двойника здания на примере центра SYSTEMS
(иллюстрация авторов)

Fig.2 The concept of a digital twin of a building using the example of the “SYSTEMS” center
(illustration by the authors)



Рис.3. Прототип измерителя температуры и влажности (иллюстрация авторов)

Fig.3 Prototype of a temperature and humidity meter (illustration by the authors)

Подключение датчика DHT22 к плате ESP8266 (рис. 4) осуществляется к контакту питания VCC на 3,3В, к контакту GND (к минусу) и к контакту D5 для вывода данных с датчика.

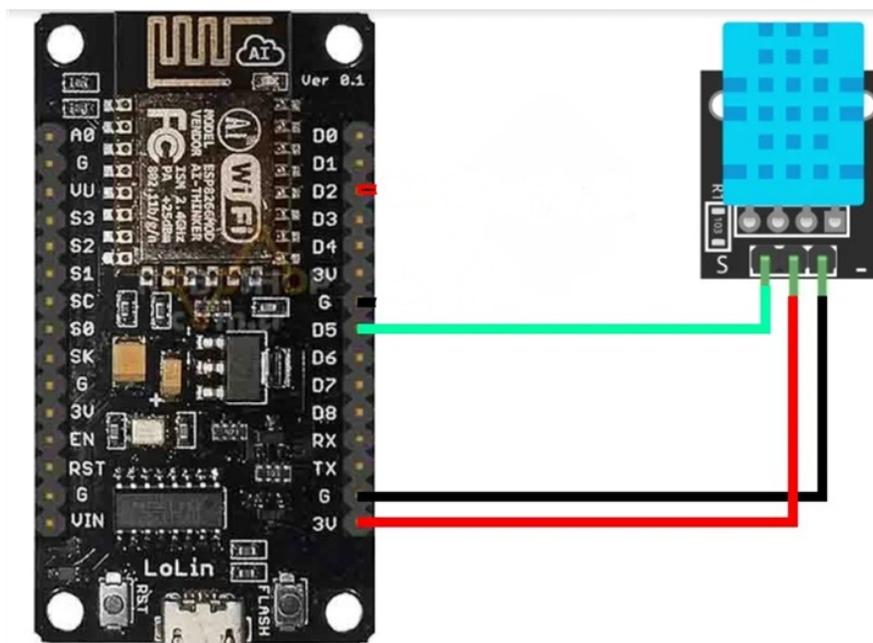


Рис.4. Схема подключения датчика к плате (иллюстрация авторов)
Fig.4 Connection diagram of the sensor to the board (illustration by the authors)

Для защиты измерителя от механических воздействий на 3D принтере был напечатан пластиковый корпус толщиной 1,2 мм (рис. 5).



Рис.5. Измеритель температуры и влажности в корпусе (иллюстрация авторов)
Fig.5 Temperature and humidity meter in the building (illustration by the authors)

На втором уровне использовалась информационная модель учебной аудитории центра «Системы», которая отражает геометрические характеристики объекта (рис. 6) и развернута база данных SQL на облачном сервере.

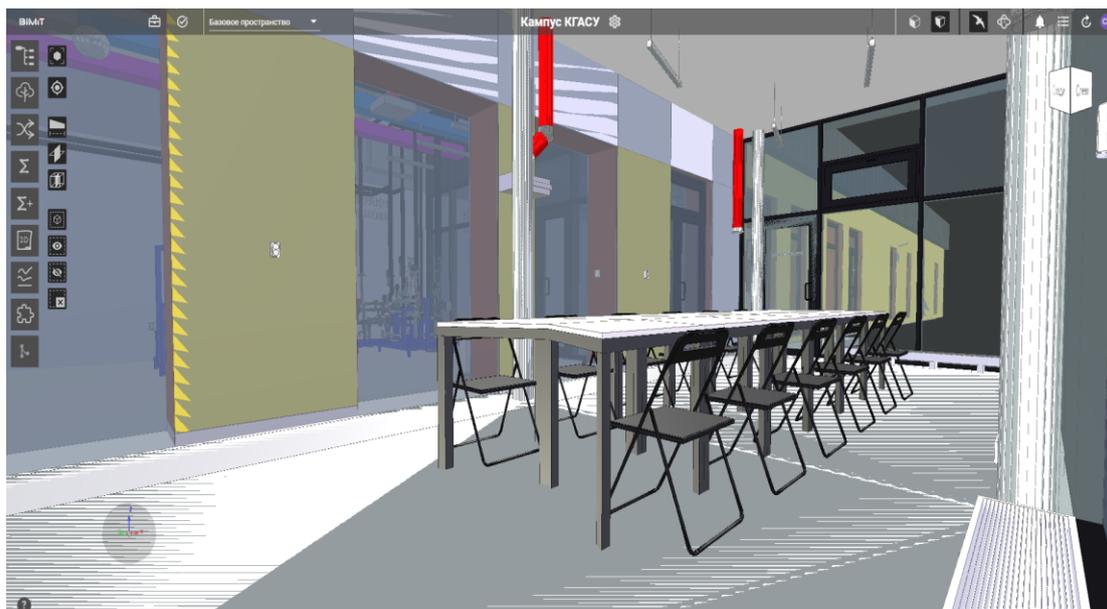


Рис.6. Информационная модель учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы» (иллюстрация авторов)

Fig.6 Information model of the classroom of the scientific and educational center “Systems” (illustration by the authors)

Для передачи измерений в базу данных использовалась технология Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). MQTT - это легкий сетевой протокол обмена сообщениями, разработанный для передачи данных с минимальными затратами ресурсов и широкой полосой пропускания. MQTT широко используется в системах интернета вещей (IoT) для обмена данными между устройствами и серверами. Обмен данными между устройствами происходит только через брокера по принципу издатель-подписчик (рис. 7). Брокер - это центральный узел MQTT, который получает, обрабатывает, хранит и обеспечивает надежный обмен информацией между устройствами, благодаря контролю уровня качества передачи сообщений (Quality of Service). Принцип контроля заключается в делении сообщения на две части, первая несет в себе передаваемую информации, а вторая степень ее значимости.

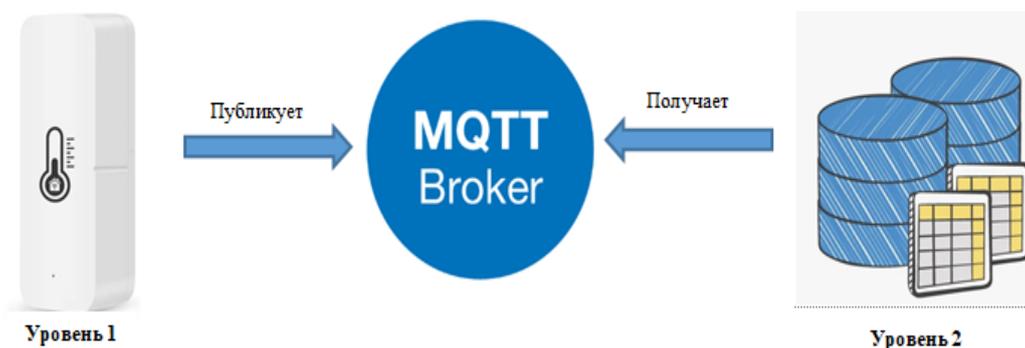


Рис.7. Схема передачи данных по MQTT протоколу (иллюстрация авторов)

Fig.7 Scheme of data transmission via the MQTT protocol (illustration by the authors)

Третий уровень реализован в среде общих данных BIMIT, которая позволяет объединить канал передачи данных и цифровую информационную модель здания [23].

3. Результаты и обсуждения

При помощи Web-сервиса осуществлена интеграция архитектурной модели научно-образовательного центра «Системы» и каналов передачи температуры и влажности, полученных измерителем. Это позволило передавать данные в цифровой двойник учебной аудитории с необходимой периодичностью. В результате цифровой двойник

учебной аудитории НОЦ «Системы» при помощи MQTT протокола получает информацию о параметрах микроклимата в помещении, записывает ее в свои свойства и отображает текущие значения в режиме реального времени (рис. 8).

Важно отметить, что измеренные значения температуры и относительной влажности не только отображаются в Web-сервисе, но и сохраняются в динамической базе данных. Это дает возможность провести детальный анализ изменения параметров внутреннего воздуха в аудитории за любой период, а также позволит отслеживать динамику изменений, выявлять тенденции и прогнозировать возможные проблемы. Таким образом, система обеспечивает эффективный контроль состояния микроклимата в аудитории.

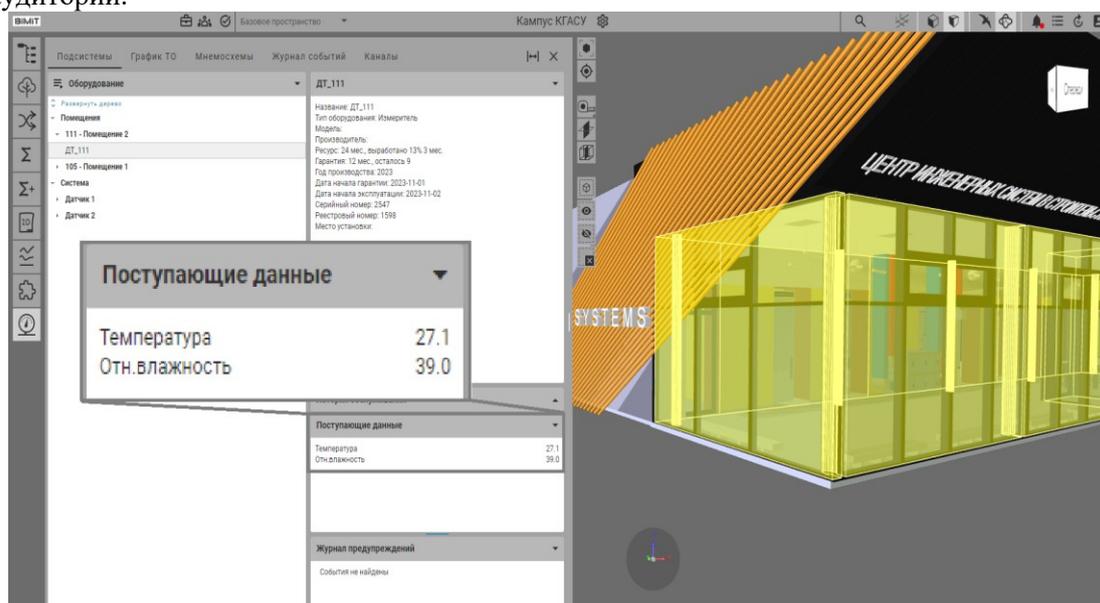


Рис.8. Отображение параметров микроклимата с привязкой к информационной модели в среде общих данных BIMiT (иллюстрация авторов)

Fig.8 Displaying microclimate parameters linked to an information model in the BIMiT common data environment (illustration by the authors)

На основе полученной информации, хранящейся в базе данных, были визуализированы изменения температуры (рис. 9) и влажности (рис. 10) внутреннего воздуха в учебной аудитории 8 февраля 2024 года. На графике видно, что температура колеблется в диапазоне 27-29 градусов, а по нормативам достаточно обеспечивать температуру от 18-20 градусов, это говорит о перерасходе энергетических ресурсов и необоснованных эксплуатационных затратах в отопительный период. Также стоит отметить скачок температуры и влажности в период 17:30 до 21:00. В это время у студентов проходят занятия, и от студентов начали поступать дополнительные тепlopоступления, тем самым происходит дополнительный перегрев помещения. Данные факты показывают необходимость внедрения адаптивного отопления, что позволит снизить затраты без потери комфорта для студентов.

Также в течение года могут возникать периоды дискомфорта, связанные с колебанием наружной температуры, что ведет к ухудшению самочувствия у людей в помещении. В исследовании [24] автор при помощи компьютерного моделирования выявил, что в переходный период микроклимат в помещении ухудшается и помещение перегревается, поэтому необходимо отслеживать параметры внутреннего воздуха в течении всего года.

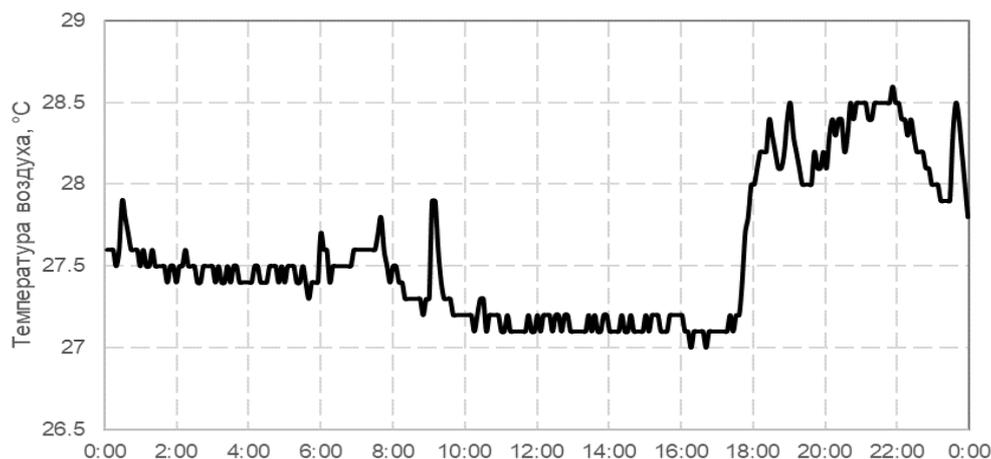


Рис.9. График изменения температуры в учебной аудитории за 08.02.2024
(иллюстрация авторов)

Fig.9 Graph of changes in temperature in the classroom for 08.02.2024 (illustration by the authors)

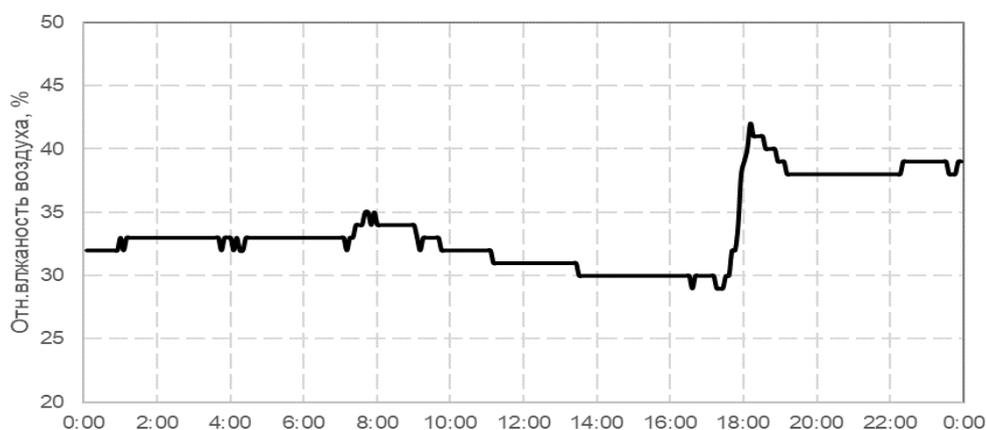


Рис.10. График изменения влажности в учебной аудитории за 08.02.2024
(иллюстрация авторов)

Fig.10 Graph of changes in humidity in the classroom for 08.02.2024 (illustration by the authors)

4. Заключение

В работе был разработан метод передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель на примере учебной аудитории центра НОЦ «Системы». Для этого был разработан датчик температуры и влажности, передающий информацию по протоколу MQTT, тем самым демонстрируя технологию цифрового двойника. Данный пример цифрового двойника позволяет отслеживать характеристика внутреннего воздуха в помещении. На основе информации полученной с датчика можно провести анализ работы системы отопления и вентиляции. Перспективой развития данной темы является разработка механизма дистанционного доступа и управления лабораторными стендами и инженерными системами при помощи технологии цифрового двойника. Применение данной технологии позволит подключить сенсоры и устройства для мониторинга состояния инженерных систем и окружающей среды в режиме реального времени для создания точной и функциональной цифровой модели зданий КГАСУ, которая поможет улучшить управление кампусом, оптимизировать затраты и повысить уровень комфорта и безопасности студентов и сотрудников.

Список литературы/References

1. Технологии информационного моделирования // наш.дом.рф: ежедн. интернет-изд.:2024. URL:<https://наш.дом.рф/технологии-информационного-моделирования> (дата обращения 13.05.2024) [Information modeling technologies // наш.дом.рф:

- daily Internet edition: 2024. URL: <https://наш.дом.рф/технологии-информационного-моделирования> (reference date: 13.05.2024)]
2. Вайсман С.М. Разработка организационно-технологических решений в строительстве с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2016. Т. 16, № 4. С. 21–28. DOI: 10.14529/build160404.EDN: XBDEYJ [Vaisman S.M. Development of organizational and technological solutions in construction using information modeling technologies (TIM) // Bulletin of South Ural State University. The series "Construction and Architecture". 2016. Vol. 16, No. 4. P. 21-28. DOI: 10.14529/build160404.EDN: XBDEYJ]
 3. Пашин Д. А., Колосов И. Л., Якушев Н. М. Проблемы внедрения технологии информационного моделирования (ТИМ) в строительстве // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2023. Т. 19, № 4. С. 24-31. DOI: 10.22213/2618-9763-2023-4-24-31.EDN: SEANFJ [Pashin D. A., Kolosov I. L., Yakushev N. M. Problems of implementation of information modeling technology (TIM) in construction // Socio-economic management: theory and practice. 2023. Vol. 19, No. 4. P. 24-31. DOI: 10.22213/2618-9763-2023-4-24-31.EDN: SEANFJ]
 4. Дронов Д. С., Киметова Н. Р., Ткаченко В. П. Проблемы внедрения BIM-технологий в России // Синергия наук. 2017. № 10. С. 529–529. EDN: YLPAZJ [Dronov D. S., Bikmetova N. R., Tkachenko V. P. Problems of implementing BIM technologies in Russia // Synergy of Sciences. 2017. No. 10. P. 529-529. EDN: YLPAZJ]
 5. Князева Н.В., Лёвина Д.А.. "Использование BIM-сценариев в работе служб эксплуатации"//Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, 2019, стр. 99-105. DOI:10.34031/article_5cd6df471c80bo.92422061 [Knyazeva N.V., Levina D.A.. "The use of BIM scenarios in the operation of maintenance services"//Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2019, P. 99-105. DOI:10.34031/article_5cd6df471c80bo.92422061]
 6. Содис лаб // sodis.ru: ежедн. интернет-изд. 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru> (дата обращения 13.05.2024) [Sodis Lab // sodis.ru: daily Internet edition 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru> (reference date: 13.05.2024)]
 7. Hendrik van der Valk ; Hendrik Haße; Frederik Moller ;Boris Otto: Archetypes of Digital Twins, 2021, 1. DOI:10.1007/s12599-021-00727-7
 8. Van Nederveen, G.A.; Tolman, F.P. Modelling multiple views on buildings // Automation in Construction. 1 (3): 215-24. - 1992. - DOI:10.1016/0926-5805(92)90014-B.
 9. Min Deng, Carol C. Menassa, Vineet R. Kamat From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. // Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 2021. 26, P. 58-83, DOI: 10.36680/j.itcon.2021.005
 10. Zaballos, A.; Briones, A.; Massa, A.; Centelles, P.; Caballero, V.A Smart Campus' Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring. // Sustainability, 2020, DOI:10.3390/su12219196
 11. Clausen, A.; Arendt, K.; Johansen, A.; Sangogboye, F.C.; Kjærgaard, M.B.; Veje, C.T.; Jørgensen, B.N.A 1.A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings, 2021. DOI:10.1186/s42162-021-00153-9
 12. Bortolini, Rafaela, Raul Rodrigues, Hamidreza Alavi, Luisa Felix Dalla Vecchia, and Núria Forcada. "Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review" Energies 15, 2022: DOI:10.3390/en15197002
 13. Салов И.В., Щербатов И.А., and Салова Ю.А.. "Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии"// International Journal of Open Information Technologies, vol. 10, no. 3, 2022, pp. 57-62. [Salov I.V., Shcherbatov I.A., Salova Yu.A. "Application of digital twins and cyberphysical systems at thermal and electric energy generation facilities"//

- International Journal of Open Information Technologies, vol. 10, No. 3, 2022, P. 57-62.]
14. Norouzi, Pooria, Sirine Maalej, and Rodrigo Mora. "Applicability of Deep Learning Algorithms for Predicting Indoor Temperatures: Towards the Development of Digital Twin HVAC Systems" // *Buildings* 13, no. 6: 1542.2023/ DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13061542>
 15. Zakharov, A., Romazanov, A., Shirokikh, A., & Zakharova, I. Intellectual Data Analysis System of Building Temperature Mode Monitoring. 2019 // International Russian Automation Conference. 2019 DOI:10.1109/rusautocon.2019.88676
 16. Vering, C., Mehrfeld, P.; Nürenberg, M. Coakley, D.; Lauster, M.; Müller, D. Unlocking Potentials of Building Energy Systems' Operational Efficiency: Application of Digital Twin Design for HVAC systems, Rome, Italy, 2–4. 2019. DOI:10.26868/25222708.2019.210257
 17. Жабицкий М. Г., Ожерельев С. А., and Тихомиров Г. В. "Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ" // International Journal of Open Information Technologies, vol. 9, no. 8, 2021, pp. 43-51. [Zhabitsky M. G., Ozherelev S. A., Tikhomirov G. V. "The concept of an integrated digital twin of a complex engineering object on the example of a research reactor of the National Research Nuclear University MPhI" // International Journal of Open Information Technologies, vol. 9, No. 8, 2021, P. 43-51]
 18. Blume, Christine & Blume, Stefan & Thiede, Sebastian & Herrmann, Christoph. Data-Driven Digital Twins for Technical Building Services Operation in Factories: A Cooling Tower Case Study // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2020 DOI: 10.3390/jmmp4040097.
 19. Hosamo, Haidar & Svennevig, Paul & Svidt, Kjeld & Han, Daguang & Nielsen, Henrik. A Digital Twin Predictive Maintenance Framework of Air Handling Units based on Automatic Fault Detection and Diagnostics. // *Energy and Buildings*. 2022 DOI:10.1016/j.enbuild.2022.111988.
 20. Ni, Zhongjun & Eriksson, Petra & Liu, Yu & Karlsson, Magnus & Gong, Shaofang. Improving energy efficiency while preserving historic buildings with digital twins and artificial intelligence. // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021 DOI:10.1088/1755-1315/863/1/012041.
 21. Agostinelli S., Cumo F., Guidi G., & Tomazzoli C. The Potential of Digital Twin Model Integrated With Artificial Intelligence Systems. // *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2020. DOI:10.1109/eeeic/icpseurope49358
 22. Francisco, Abby & Mohammadi, Neda & Taylor, John. Smart City Digital Twin-Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. // *Journal of Management in Engineering*. 2020. DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000741
 23. BIMIT/Цифровой двойник здания // <https://twin.bimit.ru/>: ежедн. интернет-изд: 2024. URL: <https://twin.bimit.ru/> (дата обращения 30.05.2024) [BIMIT/Digital twin of a building // <https://twin.bimit.ru/>: daily Internet edition: 2024. URL: <https://twin.bimit.ru/> (reference date: 30.05.2024)]
 24. Петров А.С. Оценка длительности комфорта в помещении методом компьютерного моделирования // *Жилищное строительство*. – 2023. – № 8. – С. 43-52. – DOI 10.31659/0044-4472-2023-8-43-52. – EDN ABEJFF. [Petrov A.S. Assessment of the duration of comfort in a room by computer modeling // *Housing construction*. – 2023. – No. 8. – P. 43-52. – DOI 10.31659/0044-4472-2023-8-43-52. – EDN ABEJFF.]

Информация об авторах

Степанов Иван Олегович, инженер, ГУП Республики Татарстан "Головная Территориальная Проектно-Изыскательская Научно-Производственная Фирма «Татинвестгражданпроект», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: stepoooo98@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0637-9053

Крайнов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: dmitriy.kraynov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3074-9090

Information about the authors

Ivan O. Stepanov, engineer, State Unitary Enterprise of The Republic of Tatarstan "Head Territorial Design and Survey Research and Production Firm "Tatinvestgrazhdanproekt", Kazan, Russian Federation

E-mail: stepoooo98@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0637-9053

Dmitriy V. Kraynov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: dmitriy.kraynov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3074-9090