

АНОТАЦІЯ

Хоменко Є.В. Розроблення локальної IoT-системи моніторингу й контролю стану приміщень на базі платформи Home Assistant. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 12.121 Інженерія програмного забезпечення. – Херсонський державний університет, Івано-Франківськ, 2026.

Загальна наукова проблема дослідження полягає у відсутності комплексного підходу до проєктування локальних автономних IoT-систем моніторингу та керування, які забезпечують повний контроль над даними, автономне виконання логіки автоматизацій, підвищений рівень безпеки та можливість подальшого розширення функціональності без залежності від зовнішніх хмарних сервісів.

Актуальність дослідження зумовлена стрімким поширенням IoT-рішень у сфері домашньої та офісної автоматизації, які здебільшого реалізуються у вигляді комерційних хмароорієнтованих екосистем. Такі рішення спрощують впровадження, однак водночас створюють обмеження щодо автономності, прозорості архітектури, безпеки та можливостей використання у дослідницьких і експериментальних сценаріях. У цьому контексті особливої ваги набуває розробка локальних серверних IoT-систем, орієнтованих на приватність, контрольованість та відтворюваність результатів.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування IoT-систем моніторингу та керування станом приміщень як складних кіберфізичних систем, що забезпечують збір, передавання, обробку та використання сенсорних даних для автоматизованого керування параметрами середовища.

Предметом дослідження є архітектурні підходи, методи та моделі організації взаємодії між компонентами локальної автономної IoT-системи, спрямовані на забезпечення автономності її функціонування, підвищення рівня інформаційної безпеки та ефективного збору і локальної обробки сенсорних даних.

Метою роботи є розроблення та наукове обґрунтування архітектури і програмно-апаратного комплексу локальної автономної IoT-системи моніторингу й контролю стану приміщень, орієнтованої на інтеграцію гетерогенних сенсорних і виконавчих пристроїв, підтримку різномірних комунікаційних протоколів, локальну обробку та зберігання сенсорних даних, а також забезпечення підвищеного рівня інформаційної безпеки і автономного функціонування системи незалежно від зовнішніх хмарних сервісів.

Додатково мета роботи передбачає формування програмної інфраструктури для подальшого застосування аналітичних та інтелектуальних методів обробки даних у межах локальної обчислювальної платформи IoT-системи.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі розв'язані такі основні завдання:

- виконати системний аналіз сучасних IoT-технологій, архітектурних підходів та програмних платформ з метою виявлення обмежень хмароорієнтованих рішень і обґрунтування доцільності застосування локальних автономних IoT-систем;
- дослідити та обґрунтувати вибір комунікаційних протоколів і стандартів IoT для локальних систем моніторингу з урахуванням вимог надійності, масштабованості, енергоефективності та сумісності пристроїв;

- розробити узагальнену багаторівневу архітектуру локальної IoT-системи, що забезпечує автономне функціонування, модульність, відмовостійкість, локальну обробку даних та підвищений рівень інформаційної безпеки;
- реалізувати програмно-апаратний прототип локальної IoT-системи з інтеграцією сенсорних і виконавчих пристроїв, сервісів збору та зберігання даних, а також механізмів автоматизації та керування;
- дослідити можливості локальної обробки та аналізу сенсорних даних у межах IoT-платформи на основі інтегрованого аналітичного контуру, що включає методи кластеризації, прогнозування та виявлення аномалій;
- оцінити функціональні, експлуатаційні та безпекові характеристики розробленої системи та експериментально підтвердити її ефективність порівняно з хмарними рішеннями за критеріями автономності, затримки обробки даних, рівня контролю над даними та масштабованості.

У першому розділі дисертації виконано огляд сучасного стану розвитку Internet of Things (IoT) та проаналізовано основні підходи до побудови систем моніторингу й автоматизації. Розглянуто еволюцію IoT-технологій, типові архітектурні моделі, стандарти та комунікаційні протоколи. Проаналізовано переваги та обмеження комерційних IoT-екосистем, а також можливості локальних серверних платформ. Окрему увагу приділено питанням безпеки, автономності та контролю над даними. За результатами аналізу встановлено, що існуючі хмароорієнтовані рішення недостатньо придатні для дослідницьких і приватних IoT-систем, що дозволило сформулювати дослідницьку прогалину, пов'язану з необхідністю локальних автономних IoT-рішень.

У другому розділі розроблено архітектуру локальної IoT-системи моніторингу та керування станом приміщень. Запропоновано багаторівневу структуру системи, яка охоплює рівень сенсорних і виконавчих пристроїв, комунікаційний рівень, рівень збору та зберігання даних, рівень керування автоматизаціями, а також підсистему безпеки. Обґрунтовано вибір протоколів взаємодії та принципів інтеграції компонентів з урахуванням вимог до автономної роботи, мінімальних затримок і локального виконання логіки керування.

У третьому розділі розглянуто питання аналізу даних, що формуються в процесі функціонування IoT-системи. Проаналізовано можливості використання аналітичних підходів для оцінювання стану приміщень, контролю параметрів мікроклімату, енергоспоживання та виявлення відхилень у роботі сенсорних вузлів. Показано доцільність локальної обробки даних у межах IoT-системи без залучення зовнішніх хмарних сервісів, що дозволяє підвищити автономність, зменшити затримки та забезпечити кращий контроль над даними.

У четвертому розділі реалізовано локальну IoT-систему моніторингу та керування на базі платформи Home Assistant. Виконано інтеграцію сенсорних і виконавчих пристроїв, налаштовано механізми збору даних і реалізовано сценарії автоматизації з локальним виконанням. Проведено експериментальне дослідження роботи системи в реальних умовах, оцінено її стабільність, автономність та зручність розширення. Отримані результати підтверджують ефективність використання локальної серверної платформи для побудови автономних IoT-систем моніторингу стану приміщень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у систематизації та обґрунтуванні архітектурних рішень для побудови локальних автономних IoT-систем моніторингу та контролю стану приміщень. У роботі сформовано цілісний підхід до організації взаємодії між сенсорними пристроями, комунікаційними протоколами та програмними компонентами

локальної IoT-платформи з урахуванням вимог автономності, безпеки та керованості. Запропоновані рішення дозволяють узгодити роботу різномірних пристроїв і сервісів у межах єдиної локальної архітектури без залучення зовнішніх хмарних сервісів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених архітектурних підходів і програмної реалізації під час створення локальних IoT-систем автоматизації, моніторингу та керування інженерними параметрами приміщень. Отримані результати можуть бути застосовані для побудови приватних IoT-інсталяцій з підвищеним рівнем автономності, інформаційної безпеки та контролю над даними, а також використані як основа для подальших досліджень і експериментальних розробок у сфері локальних кіберфізичних систем.

Ключові слова: Інтернет речей (IoT); архітектура IoT-систем; периферійні обчислення (edge computing); бездротові сенсорні мережі; моніторинг; автоматизація; архітектура розподілених систем; проектування програмних систем; моніторинг навколишнього середовища; інформаційна безпека; інформаційні системи; інтероперабельність систем; людино-комп'ютерна взаємодія; Home Assistant.

Список публікацій здобувача:

- *Список публікацій здобувача, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*
 1. Khomenko, Y., & Babichev, S. (2025). Modular IoT Architecture for Monitoring and Control of Office Environments Based on Home Assistant. IoT, 6(4), 69. <https://doi.org/10.3390/iot6040069> (Scopus, WoS, quartile Q1)
 2. Babichev, S., Yarema, O., Khomenko, Y., Senchyshen, D., & Durnyak, B. (2025). Sensor-Oriented Framework for Underwater Acoustic Signal Classification Using EMD-Wavelet Filtering and Bayesian-Optimized Random Forest. Sensors, 25(17), 5336. <https://doi.org/10.3390/s25175336> (Scopus, WoS, quartile Q1)
 3. Khomenko, Y., Babichev, S. (2025). Contemporary Methods, Models, and Software for Implementation and Optimization of IoT (Internet of Things) Systems: A Review. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 2. ISDMCI 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 244. Springer, Cham, pp. 134–158. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88483-2_7 (Scopus, book chapter, quartile Q4)
- *Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові результати дисертації:*
 4. Хоменко Є.В., Бабічев С.А. (2025). Автономна IoT-система моніторингу мікроклімату аудиторій на основі відкритої DIY-архітектури. Том 8 № 1 (2025): Прикладні питання математичного моделювання, 2025, 245-254. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24> (Категорія Б)
 5. Хоменко Є. (2024). Сучасні методи, моделі та програмні засоби реалізації та оптимізації систем IoT (INTERNET OF THINGS), Збірник наукових праць "Information Technologies in Education" (ITE), (55), 72–84. <https://doi.org/10.14308/ite000782> (Категорія Б)
- *Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

6. Khomenko Ye., Babichev S. (2024). Advantages and disadvantages of modern Internet of Things systems. Матеріали XX Міжнародної наукової інтернет-конференції „Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence”, 20-23 червня 2024 року. С. 41-44. м. Усті на Лабі, Чехія
7. Khomenko Y. (2025). Comparison of commercial and local IoT systems for environmental monitoring in educational institutions. Abstracts of XIX International Scientific and Practical Conference. Krakow, Poland. Pp. 228-234.
8. Senchyshen D., Khomenko Y. (2025). Integration of IoT sensors into the KSU24 digital learning environment: infrastructure and pedagogical implications. Abstracts of XX International Scientific and Practical Conference. Plovdiv, Bulgaria. Pp. 222-226.
9. Khomenko Y. (2025). Modern voice assistants of intellectual systems and their use in Internet of Things (IoT) systems. Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference. Krakow, Poland. Pp. 208-214.
10. Хоменко Є., Лемещук О. (2023). Технічні аспекти та норми для систем керування «розумний будинок» в умовах війни, Матеріали IV International Scientific and Theoretical Conference „Features of the development of modern science in the pandemic’s era”, May 19, 2023. P. 73–75. Berlin, Germany.

Anotation

Yevhenii V. Khomenko. Development of a local IoT system for monitoring and control of indoor environments based on the Home Assistant platform. Qualification scientific work, manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 12.121 Software Engineering. – Kherson State University, Ivano-Frankivsk, 2026.

The general scientific problem addressed in this dissertation lies in the lack of a comprehensive approach to the design of local autonomous IoT monitoring and control systems that ensure full control over data, autonomous execution of automation logic, an enhanced level of information security, and the possibility of further functional expansion without dependence on external cloud services.

The relevance of the research is determined by the rapid spread of IoT solutions in the field of home and office automation, which are predominantly implemented as commercial cloud-oriented ecosystems. Although such solutions simplify deployment, they simultaneously impose limitations on system autonomy, architectural transparency, information security, and applicability in research and experimental scenarios. In this context, the development of local server-based IoT systems focused on privacy, controllability, and reproducibility of results becomes particularly important.

The object of the study is the functioning processes of IoT systems for monitoring and controlling indoor environments as complex cyber-physical systems that ensure the collection, transmission, processing, and utilization of sensor data for automated management of environmental parameters.

The subject of the study is the architectural approaches, methods, and models for organizing interaction between the components of a local autonomous IoT system, aimed at ensuring its operational autonomy, increasing the level of information security, and achieving efficient collection and local processing of sensor data.

The goal of the work is the development and scientific substantiation of the architecture and a software-hardware complex for a local autonomous IoT system for monitoring and controlling indoor environments, oriented toward the integration of heterogeneous sensor and actuator devices, support for diverse communication protocols, local processing and storage of sensor data, as well as providing an increased level of information security and autonomous system functioning independent of external cloud services.

Additionally, the goal of the work involves the formation of a software infrastructure for the further application of analytical and intelligent data processing methods within the local computing platform of the IoT system.

To achieve the stated objective of the dissertation, the following main tasks have been addressed:

- to perform a systematic analysis of modern IoT technologies, architectural approaches, and software platforms in order to identify the limitations of cloud-oriented solutions and substantiate the feasibility of using local autonomous IoT systems;
- to investigate and justify the selection of IoT communication protocols and standards for local monitoring systems, taking into account the requirements of reliability, scalability, energy efficiency, and device interoperability;

- to develop a generalized multi-layer architecture of a local IoT system that ensures autonomous operation, modularity, fault tolerance, local data processing, and an enhanced level of information security;
- to implement a hardware-software prototype of a local IoT system with the integration of sensor and actuator devices, data collection and storage services, as well as automation and control mechanisms;
- to investigate the capabilities of local processing and analysis of sensor data within the IoT platform based on an integrated analytical framework that includes clustering, prediction, and anomaly detection methods;
- to evaluate the functional, operational, and security characteristics of the developed system and to experimentally validate its effectiveness in comparison with cloud-based solutions according to the criteria of autonomy, data processing latency, data control, and scalability.

In the first chapter of the dissertation, the current state of development of Internet of Things (IoT) technologies is reviewed, and the main approaches to the construction of monitoring and automation systems are analyzed. The evolution of IoT technologies, typical architectural models, standards, and communication protocols is considered. The advantages and limitations of commercial IoT ecosystems, as well as the capabilities of local server-based platforms, are analyzed. Particular attention is paid to issues of information security, autonomy, and data control. Based on the results of the analysis, it is established that existing cloud-oriented solutions are insufficiently suitable for research-oriented and private IoT systems, which makes it possible to identify a research gap related to the need for local autonomous IoT solutions.

In the second chapter, the architecture of a local IoT system for indoor monitoring and control is developed. A multi-layer system structure is proposed, covering the sensor and actuator layer, the communication layer, the data collection and storage layer, the automation control layer, and the security subsystem. The selection of interaction protocols and principles of component integration is substantiated, taking into account the requirements for autonomous operation, minimal latency, and local execution of control logic.

In the third chapter, the issues related to the analysis of data generated during the operation of the IoT system are considered. The possibilities of applying analytical approaches to assess indoor conditions, monitor microclimate parameters, energy consumption, and detect anomalies in the operation of sensor nodes are analyzed. The feasibility of local data processing within the IoT system without the involvement of external cloud services is demonstrated, which allows for increased system autonomy, reduced processing delays, and improved control over data storage and usage.

In the fourth chapter, a local IoT monitoring and control system based on the Home Assistant platform is implemented. Sensor and actuator devices are integrated, data collection mechanisms are configured, and automation scenarios with local execution are implemented. An experimental study of the system operation under real-world conditions is conducted, and its stability, autonomy, and extensibility are evaluated. The obtained results confirm the effectiveness of using a local server-based platform for building autonomous IoT systems for indoor condition monitoring.

The scientific novelty of the obtained results consists in the systematization and substantiation of architectural solutions for the development of local autonomous IoT systems for indoor

monitoring and control. A comprehensive approach to organizing the interaction between sensor devices, communication protocols, and software components of a local IoT platform is formulated, taking into account the requirements for autonomy, information security, and controllability. The proposed solutions enable the integration of heterogeneous devices and services within a unified local architecture without involving external cloud services.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed architectural approaches and software implementation in the creation of local IoT systems for automation, monitoring, and control of indoor engineering parameters. The obtained results can be used to build private IoT installations with an increased level of autonomy, information security, and data control, as well as serve as a basis for further research and experimental developments in the field of local cyber-physical systems.

Key words: Internet of Things, IoT architecture, edge computing, wireless sensor networks, monitoring, automation, distributed system architecture, software system design, environmental monitoring, information security, information system, system interoperability, human-computer interaction, Home Assistant.

List of applicant's publications:

- *List of the applicant's publications in which the main scientific results of the dissertation are published:*
 1. Khomenko, Y., & Babichev, S. (2025). Modular IoT architecture for monitoring and control of office environments based on Home Assistant. *IoT*, 6(4), 69. <https://doi.org/10.3390/iot6040069> (Scopus, WoS, Q1)
 2. Babichev, S., Yarema, O., Khomenko, Y., Senchyshen, D., & Durnyak, B. (2025). Sensor-oriented framework for underwater acoustic signal classification using EMD–wavelet filtering and Bayesian-optimized random forest. *Sensors*, 25(17), 5336. <https://doi.org/10.3390/s25175336> (Scopus, WoS, Q1)
 3. Khomenko, Y., & Babichev, S. (2025). Contemporary methods, models, and software for implementation and optimization of IoT (Internet of Things) systems: A review. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (Eds.), *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making*, Volume 2. ISDMCI 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 244. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88483-2_7 (Scopus, book chapter, Q4)
- *List of the applicant's publications additionally presenting the scientific results of the dissertation:*
 4. Khomenko, Y. V., & Babichev, S. A. (2025). Autonomous IoT system for classroom microclimate monitoring based on an open DIY architecture. *Applied Issues of Mathematical Modelling*, 8(1). 245-254. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-24> (Ukrainian professional journal, Category B)
 5. Khomenko, Y. (2025). Contemporary methods, models, and software tools for the implementation and optimization of IoT (Internet of Things) systems. *Information Technologies in Education*, 55, 72–84. <https://doi.org/10.14308/ite000782> (Ukrainian professional journal, Category B)
- *List of the applicant's publications confirming the approbation of the dissertation results:*

6. Khomenko, Y., & Babichev, S. (2024). Advantages and disadvantages of modern Internet of Things systems. In: *Proceedings of the 20th International Scientific Internet Conference "Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence"*, June 20–23, 2024, Ústí nad Labem, Czech Republic, pp. 41–44.
7. Khomenko, Y. (2025). Comparison of commercial and local IoT systems for environmental monitoring in educational institutions. In: *Abstracts of the XIX International Scientific and Practical Conference*, Krakow, Poland, pp. 228–234.
8. Senchyshen, D., & Khomenko, Y. (2025). Integration of IoT sensors into the KSU24 digital learning environment: Infrastructure and pedagogical implications. In: *Abstracts of the XX International Scientific and Practical Conference*, Plovdiv, Bulgaria, pp. 222–226.
9. Khomenko, Y. (2025). Modern voice assistants of intelligent systems and their use in Internet of Things (IoT) systems. In: *Abstracts of the XXII International Scientific and Practical Conference*, Krakow, Poland, pp. 208–214.
10. Khomenko, Y., & Lemeshchuk, O. (2023). Technical aspects and standards for smart home control systems under wartime conditions. In: *Proceedings of the IV International Scientific and Theoretical Conference "Features of the Development of Modern Science in the Pandemic's Era"*, May 19, 2023, Berlin, Germany, pp. 73–75.