

МІНІСТЕРСТВО КУЛЬТУРИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ КУЛЬТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БОРИСОВ ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.738.5.042:[02:005.591.6]:681.51](043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ


ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
У БІБЛІОТЕЧНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО

029 Інформаційна, бібліотечна та архівна справа

Галузь знань — Культура і мистецтво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з інформаційної, бібліотечної та архівної справи.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 О. О. Борисов

Науковий керівник: Кобелєв Олексій Миколайович, доктор наук із соціальних комунікацій, професор

Харків — 2026

АНОТАЦІЯ

Борисов О. О. Інтеграція технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво. — Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 029 Інформаційна, бібліотечна та архівна справа. — Міністерство культури України, Харківська державна академія культури, Харків, 2026.

Дисертація присвячена обґрунтуванню комплексної стратегії інтеграції концепції Інтернету речей (IoT) у бібліотечно-інформаційне виробництво в умовах стрімкої цифрової трансформації галузі. У роботі, вперше на дисертаційному рівні, доведено своєчасність та нагальність впровадження IoT як потужної основи соціотехнічної парадигми розвитку інтелектуальної бібліотеки, яка закладається нині на перетині технічних, технологічних, організаційних, управлінських, інформаційних, аналітичних, сервісних, соціокомунікативних, культурологічних та людиноцентричних аспектів функціонування бібліотечно-інформаційної сфери діяльності.

Досягненню мети та виконанню завдань дослідження сприяло застосування комплексу наукових підходів: системного, соціально-комунікативного, культурологічного, інституційного; та методів: аналізу, синтезу, порівняння, бібліометричного аналізу, емпіричного дослідження (анкетного онлайн-опитування фахівців-практиків бібліотечної сфери України).

На основі бібліометричного аналізу доведено, що у світовій науковій літературі (джерела, проіндексовані в Scopus протягом 2010 - 2022 рр.) інтерес до концепції Інтернету речей постійно зростає. Однак проблематика застосування IoT в бібліотечній сфері діяльності розроблена недостатньо (лише 200 тематичних наукових публікацій із 124063). Зокрема, констатовано брак українських наукових розвідок. Підкреслено, що у світовому науковому полі переважає технічний дискурс, тоді як для бібліотечно-інформаційного виробництва першочерговими є

не технічні принципи локального впровадження та роботи технологій Інтернету речей, а те, які зміни вони спричиняють у доступі до знань, як трансформують досвід користувачів, який вплив здійснюють на організацію виробничих процесів та працю бібліотечного фахівця, в який спосіб корегують етичні норми роботи з інформацією та даними, якого нового змісту надають соціокомунікативній діяльності бібліотек.

Визначено, що логіка дослідження передбачає вивчення Інтернету речей як середовища, у якому фізичні об'єкти бібліотеки можуть бути включені в цифрову взаємодію. Водночас підкреслено, що дослідницька стратегія зміщує акцент з трактування суто інженерного характеру феномену Інтернету речей на гуманітарний та соціотехнічний ракурси реалізації бібліотечних IoT-інновацій. Зокрема, у роботі розглянуто напрями, можливості, особливості та ризики формування адаптивного інтелектуального бібліотечного середовища; окреслено принципову зміну філософії взаємодії користувача з бібліотекою, її безбар'єрним простором, відкритими фондами, інклюзивною сервісною інфраструктурою; акцентовано на розгортанні багаторівневої моделі персоналізованого супроводу, ефективність якої вимірюється не технічними параметрами та функціональними показниками, а рівнем сервісу та якістю отриманого різноманітними користувачькими аудиторіями досвіду.

Обґрунтовано, що концепція впровадження Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво поєднує фізичний простір та об'єкти, документні фонди та цифрові ресурси, користувачів, бібліотечних фахівців, користувачьку поведінку, технологічні виробничі процеси, автоматизацію, моніторинг, аналітику й прогнозування. Доведено, що основними напрями впровадження IoT в бібліотеках стають: інтеграція фізичного та цифрового простору, управління фондами, забезпечення їх збереженості та захисту, оптимізація рутинних операцій, автоматизація та інтелектуалізація виробничих процесів, персоналізація сервісу, підвищення ресурсоефективності без втрати комфорту зі сторони бібліотечних кадрів та користувачів, розвиток проактивного

аналітичного управління інфраструктурою, розгортання єдиної людиноцентричної цифрової соціотехнічної екосистеми. Акцентовано, що впровадження IoT-технології набуває сенсу лише тоді, коли вона працює на людину: користувача, бібліотекаря, громаду, дослідника, студента, людину з інвалідністю тощо.

Проаналізовано практичний досвід українських і зарубіжних бібліотек. Встановлено, що найбільш поширеним напрямом IoT-інновацій є радіочастотна ідентифікація, яка використовується для обліку фондів, інвентаризації, самообслуговування, контролю видачі й повернення документів, захисту та пошуку одиниць зберігання. Окрім цього, з'ясовано у бібліотеках використовуються сенсорні системи моніторингу інфраструктури, інтерактивна навігація фізичного простору, автоматизоване повернення й сортування документів, «розумні» робочі місця, рішення для енергозбереження, кліматконтролю, безпеки й організації комфортних колаборативних, інклюзивних та імерсивних форматів зонування середовища.

На основі порівняння зарубіжного й українського досвіду виявлено, що у світовій практиці бібліотечно-інформаційне виробництво дедалі частіше тяжіє до моделі Smart Library, тобто «розумної бібліотеки», в якій IoT-технології інтегровано охоплюють сервісну, управлінську та аналітичну систему. Радикальні інновації в бібліотечно-інформаційному виробництві фіксуються там, де досягається синергія між Інтернетом речей, штучним інтелектом, імерсивними технологіями та ін. Встановлено, що в Україні натомість переважають локальні рішення: ізольовані системи контролю доступу, відеоспостереження, радіочастотної ідентифікації, окремі реалізовані елементи «розумного» простору.

За результатами опитування бібліотекарів відзначено початковий етап інтеграції технологій Інтернету речей в українських бібліотеках. Зафіксовано чітке усвідомлення професійною спільнотою переваг впровадження IoT у процеси бібліотечно-інформаційного виробництва. Разом з тим виявлені критичні оцінки перспектив впровадження IoT в бібліотеках України у зв'язку з обмеженістю фінансових та організаційних ресурсів, браком технічних спеціалістів та знань

бібліотечних фахівців щодо особливостей концепції Інтернету речей. Підкреслено нагальність розробки комплексної стратегії впровадження IoT у бібліотечно-інформаційне виробництво, необхідність обґрунтування реалістичних моделей поступового впровадження, які починаються з доступних рішень і розширюються відповідно до потреб конкретної установи.

Розроблено концептуальну модель інтеграції технологій Інтернету речей. Важливим положенням цієї моделі є те, що впровадження IoT має починатися не з придбання окремого обладнання, а з оцінювання поточного стану бібліотеки: її напрямів діяльності, ресурсної бази, кадрового потенціалу, особливостей реалізації управлінських процедур, потреб кадрів та очікувань користувачів, а головне - готовності до цифрових перетворень. Підкреслено, модель має циклічний характер: цифрова трансформація не завершується після встановлення IoT-пристрою або поліпшення окремої сервісної складової. Модель передбачає систематичне оцінювання результатів IoT-впроваджень, корекцію обраних рішень, моніторинг ефективності для працівників та вимірювання практичної цінності для різних аудиторій користувачів, а також поступове вдосконалення бібліотечних виробничих процесів. Означена концепція запропонованої моделі дозволяє уникати хаотичної локальної цифровізації без урахування доцільності, корисності, вартості, ризиків та особливостей впливу на користувачів IoT-впроваджень.

Розроблено індикатори IR-Gap (Interest Rate Gap) та DCI (Digital Risk Score). IR-Gap запропоновано як індикатор розриву між декларованими цілями IoT-інновацій бібліотеки та реальною спроможністю впроваджень з огляду на ресурсні, кадрові, інфраструктурні й управлінські можливості. DCI обґрунтовано як індекс цифрової спроможності, який дозволяє оцінити готовність бібліотеки до цифрових змін. Ці індикатори допомагають оцінити сильні та слабкі сторони установи, визначати точки росту, дозволяють аргументувати послідовність подальших дій.

У роботі запропоновано HCLC (Human-Centric Library Constructor) – людиноцентричний бібліотечний конструктор. Це практична рамка, яка дозволяє

бібліотеці вибудовувати власну траєкторію IoT-трансформації: від базових рішень до складніших моделей інтелектуального управління. HCLC враховує різний ресурсний потенціал бібліотек та передбачає вибір необхідного сценарію впровадження IoT у виробничі процеси. Разом HCLC окреслена стратегічна матриця R1–R3, яка означає три рівні рішень: стартові, проміжні та розширені. Логіка її реалізації дозволяє бібліотеці не чекати ідеальних умов, а починати з найменших кроків IoT-впроваджень, поступово накопичувати досвід та компетентності, підвищувати рівень задоволеності та довіри користувачів. Запропоновано «Журнал вигід» і «типові технічні карти», які допомагають перекласти складну технологічну ідею мовою управлінського та бібліотечного планування.

Досліджено ризики впровадження IoT, які стосуються не тільки технічних збоїв, а й можливого порушення конфіденційності користувачів, надмірного збору даних, нестачі відповідних технічних компетентностей у бібліотечних фахівців, нерівного доступу до цифрових сервісів і можливої втрати довіри до бібліотеки з боку окремих аудиторій користувачів. Підкреслено, що етичний, правовий і гуманітарний виміри інтеграції IoT у роботі винесено на один рівень із технічним.

Ключові слова: бібліотека, університетські бібліотеки, цифровізація, цифровізація бібліотечних процесів, Інтернет речей, інфраструктурні IoT-системи, технології штучного інтелекту, роль бібліотек у формуванні інклюзивного середовища, цифрові інструменти, вебдоступність, намір використання, комунікаційна взаємодія, цифровий простір, імерсивні технології, бібліотечно-інформаційне виробництво.

ABSTRACT

Borysov O. O. Integration of the Internet of Things Technologies into Library and Information Production. - Qualification scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in Specialty 029 Information, Library and Archival Studies. – Ministry of Culture of Ukraine, Kharkiv State Academy of Culture, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the substantiation of a comprehensive strategy for integrating the concept of the Internet of Things (IoT) into library and information production in the conditions of the rapid digital transformation of the field. For the first time at the dissertation level, the study proves the timeliness and relevance of implementing IoT as a powerful basis for the socio-technical paradigm of intelligent library development, which is currently being formed at the intersection of technical, technological, organizational, managerial, informational, analytical, service-related, socio-communicative, cultural, and human-centered aspects of the functioning of the library and information sphere.

Achievement of the aim and objectives of the research was facilitated by the use of a set of scientific approaches: systemic, socio-communicative, cultural, and institutional; as well as methods such as analysis, synthesis, comparison, bibliometric analysis, and empirical research, namely an online questionnaire survey of practicing specialists in the library field of Ukraine.

Based on a bibliometric analysis, it has been proven that interest in the Internet of Things concept has been steadily growing in global scientific literature, namely in sources indexed in Scopus between 2010 and 2022. Nevertheless, the issue of IoT application in the library sector remains insufficiently developed (only 200 topical scientific publications out of 124,063). In particular, a lack of Ukrainian scientific studies has been noted. It is emphasized that technical discourse prevails in the global scientific field, whereas for library and information production, the primary concern is not the technical principles of local implementation and operation of IoT technologies, but rather the changes they cause in access to knowledge, the way they transform the user experience, their impact on the organization of production processes and the work of library professionals, the way they modify ethical standards for working with

information and data, and the new meaning they give to the socio-communicative activities of libraries.

It has been determined that the research logic involves studying the Internet of Things as an environment in which physical objects of the library can be included in digital interaction. Meanwhile, it is emphasized that the research strategy shifts the focus from interpreting the IoT as a purely engineering phenomenon to the humanitarian and socio-technical perspectives of implementing library IoT innovations. In particular, the study examines the directions, opportunities, characteristics, and risks of forming an adaptive intelligent library environment; outlines a fundamental change in the philosophy of user interaction with the library, its barrier-free space, open collections, and inclusive service infrastructure; highlights the development of a multi-level model of personalized support, the effectiveness of which is measured not by technical parameters or functional indicators, but by the level of service and the quality of experience gained by diverse user audiences.

It is substantiated that the concept of implementing the Internet of Things in library and information production combines physical space and objects, document collections and digital resources, users, library professionals, user behaviour, technological production processes, automation, monitoring, analytics, and forecasting.

It has been proven that the main areas of IoT implementation in libraries include the integration of physical and digital space, collection management, ensuring their preservation and protection, optimization of routine operations, automation and intellectualization of production processes, personalization of services, increase of resource efficiency without reducing comfort for library staff and users, development of proactive analytical infrastructure management, and deployment of a unified human-centred digital socio-technical ecosystem.

It is emphasized that the implementation of IoT technology becomes meaningful only when it works for people: users, librarians, communities, researchers, students, people with disabilities, and others.

Practical experience of Ukrainian and foreign libraries has been analyzed. It has been established that the most widespread area of IoT innovation is radio-frequency identification, which is used for collection accounting, inventory, self-service, control of document lending and return, protection, and searching for storage items. In addition, it has been found that libraries use sensor systems for infrastructure monitoring, interactive navigation of physical space, automated return and sorting of documents, smart workplaces, solutions for energy saving, climate control, security, and the organization of comfortable collaborative, inclusive, and immersive forms of environmental zoning.

Based on the comparison of foreign and Ukrainian experience, it has been revealed that in global practice, library and information production is increasingly moving towards the Smart Library model, that is, the “smart library”, in which IoT technologies comprehensively cover the service, management, and analytical systems. Radical innovations in library and information production are observed where synergy is achieved between the Internet of Things, artificial intelligence, immersive technologies, and others. It has been established that in Ukraine, by contrast, local solutions predominate: isolated access control systems, video surveillance, radio-frequency identification, and separate implemented elements of smart space.

According to the results of the survey of librarians, the initial stage of integrating Internet of Things technologies in Ukrainian libraries has been noted. Clear awareness by the professional community of the advantages of implementing IoT in the processes of library and information production has been identified. At the same time, critical assessments of the prospects for IoT implementation in Ukrainian libraries have been identified due to limited financial and organizational resources, a lack of technical specialists, and insufficient knowledge among library professionals regarding the specifics of the Internet of Things concept. The urgency of developing a comprehensive strategy for implementing IoT in library and information production is emphasized, as well as the need to substantiate realistic models of gradual implementation that start with accessible solutions and expand according to the needs of a particular institution.

A conceptual model for the integration of Internet of Things technologies has been developed. An important principle of this model is that IoT implementation should begin not with the purchase of certain equipment, but with an assessment of the current state of the library: its areas of activity, resource base, personnel potential, specific features of management procedures, staff needs and user expectations, and, most importantly, its readiness for digital transformation. It is emphasized that the model has a cyclical character: digital transformation does not end after installing an IoT device or improving a separate service component. The model provides for the systematic evaluation of the results of IoT implementation, correction of the selected solutions, monitoring of the effectiveness for employees, measurement of practical value for different user audiences, and gradual improvement of library production processes.

The IR-Gap (Interest Rate Gap) and DCI (Digital Risk Score) indicators have been developed. IR-Gap is proposed as an indicator of the gap between the declared goals of library's IoT innovations and actual capacity for their implementation, taking into account resource, staff, infrastructure, and management capabilities. DCI is substantiated as a digital capacity index that makes it possible to assess the library's readiness for digital change. These indicators help to evaluate the strengths and weaknesses of an institution, identify growth points, and justify the sequence of further actions.

The study proposes HCLC (Human-Centric Library Constructor), a human-centred library constructor. It is a practical framework that allows a library to build its own trajectory of IoT transformation: from basic solutions to more complex models of intelligent management. HCLC takes into account the different resource potential of libraries and provides for the selection of the necessary scenario for implementing IoT in production processes. Together with HCLC, a strategic R1-R3 matrix, which represents three levels of solutions: initial, intermediate, and advanced, is outlined. The logic of its implementation allows a library not to wait for ideal conditions, but to start with the smallest steps of IoT implementation, gradually accumulate experience and competencies, and increase the level of user satisfaction and trust. A "Benefits Journal"

and “Standard Technical Maps”, which help to translate a complex technological idea into the language of management and library planning are proposed.

The risks of IoT implementation, which concern not only technical failures, but also possible violations of user privacy, excessive data collection, a lack of relevant technical competencies among library professionals, unequal access to digital services, and possible loss of trust in the library among certain user audiences have been studied. It is emphasized that the ethical, legal, and humanitarian dimensions of IoT integration are placed in the study at the same level as the technical dimension.

Keywords: library, university libraries, digitalization, digitalization of library processes, Internet of Things, infrastructure IoT systems, artificial intelligence technologies, the role of libraries in forming an inclusive environment, digital tools, web accessibility, usage intention, communication interaction, digital space, immersive technologies, library and information production.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

1. Борисов О. О. Компаративний аналіз підходів до інтеграції інтернету речей у сучасній бібліотечно-інформаційній діяльності // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 63. С. 131-139. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.063.09>.

2. Borysov O. Implementation of the Internet of Things in the Global Library Environment: Bibliometric Analysis // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 64. С. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.064.08>.

3. Borysov O. Scientific Publications' Bibliometric Analysis of Application-Level TCP/IP Models' Communication Protocols for The Internet of Things // Вісник Харківської державної академії культури. 2024. № 66. С. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.02>.

Опубліковані праці апробаційного характеру

4. Борисов О. О. Застосування технологій та засобів Інтернету речей у сучасних бібліотеках // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 17-18 листоп. 2022 р. Харків, 2022. С. 158-159.

5. Борисов О. О. Досвід впровадження технологій Інтернету речей у бібліотеках світу: огляд інновацій // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 20-21 квітня 2023 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2023. С. 167-170.

6. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотеках: аналітичний огляд міжнародної наукової кооперації та перспектив // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку: матер. міжнар. наук. конф., 22-23 листоп. 2023 р. У 2 ч. Ч. 1. Харків: ХДАК, 2023. С. 186-188.

7. Борисов О. О. Internet of things network protocols at TCP/IP model 1 ayers: trends and implementation perspectives in libraries // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 18-19 квіт. 2024 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2024. С. 141-144.

8. Borysov O. Optimizing IoT Integration in Libraries: Comparative Evaluation of Wired and Wireless Network Solutions // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., 21-22 листоп. 2024 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2024. С. 193-195.

9. Борисов О. О. Цифрова трансформація бібліотек: роль штучного інтелекту та Інтернету речей у створенні інноваційних інформаційних сервісів // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених, 17-18 квіт. 2025 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2025. С. 210-212.

10. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві України: результати емпіричного опитування та соціально-комунікаційні перспективи впровадження // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні

стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., 20–21 листоп. 2025 р. У 2 ч. Ч. 1.
Харків : ХДАК, 2025. С. 225-227.

11. Borysov O. Datafication as an instrument of strategic management in libraries under the integration of internet of things technologies // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених, 16-17 квіт. 2026 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2026. С. 239-241.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Концепція Інтернету речей в науковому дискурсі: бібліометричний аналіз публікацій за тематикою	11
1.2. Методологічна основа дослідження	31
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІоТ В БІБЛІОТЕЧНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО	43
2.1. Практичний досвід впровадження технологій Інтернету речей в бібліотеках України та зарубіжних країн	43
2.2. Аналіз мережевих моделей і протоколів обміну даними для ІоТ-середовища бібліотеки	52
Висновки до розділу	117
РОЗДІЛ 3. СТРАТЕГІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ІоТ В БІБЛІОТЕЧНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО	120
3.1. Концептуальна модель інтеграції технологій Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво	120
3.2. Економічні аспекти та ризики впровадження ІоТ-рішень	140
3.3. Стратегічне проектування ІоТ-трансформації бібліотек	151
Висновки до розділу	181
ВИСНОВКИ	185
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	197
ДОДАТКИ	220

ВСТУП

Технологічний прогрес, глибока цифрова трансформація українського соціуму, стрімка цифровізація різноманітних галузей, зміна патернів інформаційної поведінки користувачів призвели до модернізації бібліотечно-інформаційної сфери. Поступова реалізація концепції “Library 4.0” чітко окреслила важливу роль бібліотек — бути інтелектуальними центрами цифрової культури суспільства, а разом з тим позначила проблемні аспекти створення адаптивних інформаційних просторів для широкого кола користувачів.

Важливою умовою успішної інтеграції бібліотек в цифрову інфраструктуру суспільства стало впровадження технологій Інтернету речей (IoT), які на техніко-технологічному рівні вже локально трансформують бібліотечно-інформаційне виробництво, посилюючи можливості автоматизації рутинних бібліотечних процесів, оптимізації та забезпечення збереженості фондів, їх обліку, ресурсозаощадження, управління фізичним простором та його узгодження з цифровими продуктами й послугами, персоналізації сервісів та ін. Водночас проблематика впровадження технологій Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво актуалізується в контексті соціотехнічних трансформацій, які відбуваються в наслідок інтеграції фізичних об’єктів в цифровий простір, розвитку інноваційних цифрових сервісів, а разом з тим появи нових комунікаційних практик, форм соціокультурної та соціокомунікаційної взаємодії. Протиріччя полягає в тому, що у сучасному науковому полі домінує технічний дискурс, бракує людиноцентричних підходів, які поєднують гуманітарні цілі бібліотек із практично здійсненими кроками впровадження IoT. У цьому контексті дисертація фокусується на узгодженні техніко-технологічних інновацій із соціокомунікаційною місією бібліотеки, акцентуючи вигоди для користувачів, бібліотечних фахівців та всієї бібліотечно-інформаційної сфери.

Зв’язок роботи з науковими програмами, темами та планами. Дисертаційне дослідження узгоджується з пріоритетами Стратегії розвитку

бібліотечної справи в Україні до 2025 року “Якісні зміни бібліотек для забезпечення сталого розвитку України” та “Стратегії цифрового розвитку інновацій України до 2030 року”.

Дисертаційне дослідження проведено в межах комплексної науково-дослідної теми Харківської державної академії культури “Документально-комунікаційні структури суспільства: інноваційні стратегії розвитку” (Державний реєстраційний номер 0109U000512).

Мета дослідження – розроблення концептуальних засад впровадження технологій IoT у бібліотечно-інформаційне виробництво України.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

- систематизувати наукові дослідження на основі бібліометричного огляду публікацій (Scopus, 2010–2022 рр.) для виявлення тенденцій і лакун;
- обґрунтувати методологію наукового дослідження;
- дослідити практичні кейси впровадження технологій Інтернету речей в українських та зарубіжних бібліотеках;
- з’ясувати поточний стан готовності бібліотек України до впровадження IoT-технологій;
- розробити концептуальну модель інтеграції технологій Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво;
- визначити економічні аспекти та ризики впровадження IoT-рішень;
- запропонувати механізми стратегічного проектування IoT-трансформації бібліотек.

Об’єктом дослідження є технології Інтернету речей в бібліотечно-інформаційному виробництві в умовах цифрової трансформації.

Предметом дослідження є стратегії інтеграції технологій Інтернету речей у процеси бібліотечно-інформаційного виробництва.

Методологічну рамку дослідження становлять системний, соціокомунікативний, культурологічний та інституційний підходи, поєднання яких дозволяє розглядати бібліотеку як цілісну соціотехнічну екосистему. Методично

застосовано бібліометричний і контент-аналіз, анкетне опитування з подальшою описовою статистикою, перевіркою надійності шкал (значення α Кронбаха в межах, прийнятних для збереження пунктів анкети) і придатності до факторизації (КМО на рівні «посередній, але прийнятний»), а також непараметричні кореляції та кластеризацію. Для управлінських рішень використано економічні оцінки життєздатності проєктів, представлені у рукописі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертації *вперше*:

- обґрунтовано доцільність формування стратегії інтеграції технологій Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво на основі міждисциплінарного підходу, який узгоджує техніко-технологічні засади IoT з соціокомунікаційними цілями розвитку бібліотек, зокрема в напрямках оптимізації та інтелектуалізації бібліотечних процесів, підвищення ефективності комунікаційної взаємодії з користувачами та модернізації сервісної інфраструктури, розгортання інтегрованої інтелектуальної соціотехнічної системи;

- визначено напрями впровадження IoT в бібліотечно-інформаційне виробництво: управління, збереження та безпека фондів бібліотек; навігація простору; персоналізація обслуговування користувачів; оптимізація рутинних процесів бібліотечно-інформаційного виробництва через створення “розумних” робочих місць; підвищення ресурсоефективності та розвиток проактивного управління бібліотекою;

- розроблено Digital Capacity Index – інтегральний показник кількісного вимірювання спроможності бібліотек до впровадження цифрових технологій, що охоплює декілька ключових компонентів: інфраструктуру, кадрові та фінансові ресурси, систему управління та дає змогу визначити «цифрову зрілість» бібліотеки, виявити розриви (так званий IR-Gap) між декларованими цілями і реальними можливостями їх реалізації;

- здійснено типологізацію бібліотек за рівнем цифрової зрілості, яка виявила групи закладів зі схожими характеристиками та дозволила адресно сформулювати

рекомендації для кожної групи; застосовано методи сценарного прогнозування та оцінки витрат/вигод (Cost-Benefit Analysis) для різних варіантів модернізації бібліотек для прогнозування потенційного економічного і соціального ефекту від інвестицій у IoT-рішення та врахувати ризики й обмеження впровадження новацій

- розроблена практична дорожня карта впровадження синергії технологій Інтернету речей і штучного інтелекту в діяльність бібліотек, яка створює не лише технологічні передумови, але й відкриває широкий спектр нових гуманітарних і соціокультурних можливостей для сучасних бібліотек;

- запропоновано конструктор HCLC (Human-Centric Library Constructor), який дозволяє послідовно здійснювати цифрову трансформацію бібліотечно-інформаційного виробництва від базового рівня моніторингу та автоматизації окремих процесів до вищого рівня інтелектуалізації та персоналізації комунікації з користувачами;

удосконалено:

- моделі та принципів створення універсального «конструктора» технічних завдань, складеного як методологічний каркас, що дозволяє поєднати технічні можливості IoT із змістовними, етичними, комунікативними аспектами бібліотечно-інформаційного виробництва;

- практичні інструменти («Журнал вигід», «типові технічні карти»), які забезпечують прозоре обґрунтування і масштабованість впроваджень IoT;

- *набули подальшого розвитку:*

- наукові уявлення про концепцію Інтернету речей як каталізатора системної трансформації бібліотек, інструмента формування людиноцентричного комфортного, адаптивного, інклюзивного цифрового середовища.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що висновки та рекомендації становлять теоретико-методичне та організаційне підґрунтя впровадження технологій Інтернету речей в бібліотеках через використання розроблених індикаторів для діагностики готовності бібліотек і пріоритезації кроків, а також застосуванням HCLC-конструктора, «Журналу вигід» і типових карт для

управління впровадженнями на різних ресурсних рівнях. Це забезпечує поступове зниження розриву між намірами та можливостями бібліотеки, підтримуючи сталі сервісні зміни.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, висновки та наукові положення, які містяться в дисертації, одержані здобувачем особисто.

Апробація результатів дослідження. Основні наукові положення висновки та результати дисертаційного дослідження оприлюднено на міжнародних конференціях: “Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку” (Харків, 2022, 2023, 2024, 2025), “Культура та інформаційне суспільство XXI століття” (Харків, 2023, 2024, 2025, 2026).

Публікації. Основні положення та результати за темою дисертації викладено в 11 наукових публікаціях: 3 статті в наукових фахових виданнях України, 8 — тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (159) та 15 додатків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Концепція Інтернету речей в науковому дискурсі: бібліометричний аналіз публікацій за тематикою

З появою глобальної мережі Інтернет змінилися принципи комунікації, доступу до інформації та її обробки. Цей прогрес не обмежився лише комп'ютерами та мобільними пристроями. З розвитком технологій з'явилася можливість об'єднання гетерогенних пристроїв і систем у єдину мережу, що дало поштовх до створення концепції "Інтернет речей" (англ. Internet of Things, IoT).

Вперше «термін «Інтернет речей» запропонував у 1999 р. засновник дослідницького центру AutoID Center в Массачусетському технологічному інституті Кевін Ештон. Він висловив припущення, що згодом у кожної з речей реального фізичного світу в IoT буде цифровий двійник, її віртуальне представлення» [2]. Технологічний поступ відкоригував його ідею «ідентифікації та перенесення об'єктів у цифрове середовище» до концепції створення IoT як цифрової екосистеми.

Нині «Інтернет речей – концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані сенсори, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу й обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку. Окрім датчиків, мережа може мати виконавчі пристрої, вбудовані у фізичні об'єкти й пов'язані між собою через дротові чи бездротові мережі. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливість зчитування та приведення в дію виконавчих пристроїв чи алгоритмів, функцію програмування та ідентифікації, а також дозволяють виключити необхідність участі людини за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів» [1].

В останні роки Інтернет речей став одним із ключових факторів трансформації суспільства. Технології IoT все більше інтегруються в різноманітні сфери діяльності, підвищуючи продуктивність, зменшуючи витрати та полегшуючи управління процесами. Враховуючи, що технології IoT об'єднують фізичні об'єкти та системи в єдиний інтелектуальний комплекс, тим самим забезпечують нові можливості збору, обробки та аналізу інформації, їх потенціал став актуальним і для бібліотечно-інформаційного виробництва.

Над ідеєю впровадження новітніх технологій у бібліотечно-інформаційну сферу діяльності працюють такі українські вчені, як Д. Антоненко [130, 143], В. Бондаренко [132], Ю. Горбань [8], Т. Гранчак [6], О. Куліш [7], О. Кобелев [3], О. Мар'їна [4, 129], С. Назаровець, Є. Кулик [5], С. Гарагуля [127], О. Каракоз [130], Г. Липак, Н. Кунанець, Д. Жолна, О. Дуда, Р. Білоусова [133, 134, 142], О. Івашкевич [135]. Науковці підкреслюючи, що бібліотеки, які завжди слугували центрами збереження, впорядкування та розповсюдження знань, у сучасному світі, коли технології розвиваються з неймовірною швидкістю, успішно адаптуються до нових викликів, зокрема до IoT.

Відзначаючи стрімкий прогрес інформаційних систем та зростаючі очікування користувачів, фахівці досліджують перспективи та виклики впровадження та використання IoT у бібліотечному контексті, пов'язані з:

- ефективним управлінням, оптимізацією процесів збереження та інвентаризації фондів, автоматизацією обліку документів [4, 5, 134], використанням технології радіочастотної ідентифікації (RFID) [135];
- інтелектуальним управлінням інфраструктурою будівель, реалізацією концепції «розумний дім» в бібліотеках [4];
- підвищенням ефективності обслуговування через нові методи навчання, репрезентації інформації, реалізації освітньої та просвітницької діяльності, персоналізованих рекомендацій, забезпечення доступності та сумісності пристроїв та ресурсів [129, С. 73], впровадження бібліотечних послуг на основі мобільних технологій [132, 133];

- розгортанням концепції SMART-бібліотек, зокрема створенням інтелектуальних інтерактивних, адаптивних та інклюзивних середовищ для підвищення ефективності роботи, залученості та зручності користувачів [7, [130](#), [143](#)];

- інтеграцією джерел наукової інформації та цифровим кураторством [[127](#)].

Українська бібліотечна асоціація розглядає впровадження технологій Інтернету речей як складову моделі якісної інформаційної підтримки освіти та досліджень у бібліотеці, яка “дає змогу вийти на новий рівень надання послуг – у режимі реального часу розпізнавати потреби користувачів і пропонувати відповідні продукти для задоволення їхніх потреб” [[131](#)].

Потрібно відзначити, що тема впровадження технологій Інтернету речей в наукових розвідках українських вчених та методичних розробках професійних об'єднань представлена доволі обмежено та фрагментарно. Незважаючи на популярність в науковому дискурсі України протягом останніх 10 років питань цифрової трансформації бібліотек, проблематика інтеграції технологій IoT у виробничі процеси бібліотечно-інформаційної сфери діяльності не отримала послідовного та системного висвітлення. У науковому полі відсутні комплексні дослідження, що підкреслює актуальність, своєчасність та нагальність представленої дисертаційної розвідки.

Недостатній рівень теоретичного осмислення та практичного опрацювання питань впровадження технологій Інтернету речей в Україні вимагає звернення до наукових публікацій закордонних науковців та практиків.

Міжнародна спільнота вже понад 15 років активно досліджує можливості IoT для автоматизації бібліотечних процесів, удосконалення управління ресурсами, підвищення якості обслуговування користувачів, забезпечення збереженості фондів та інтеграції з іншими системами, зокрема з питань захисту інформації. Фахівці констатують, що IoT стає потенційно корисною технологією як для бібліотек, так для користувачів, адже сприяє підвищенню ефективності доступності та зручності надання послуг.

Стрімкий розвиток Інтернету речей, їх впровадження в усі галузі людської діяльності, взаємопроникнення різнорідних технологій, посилення внутрішніх зв'язків між ними вимагає проведення дослідження виникнення та поглиблення цих явищ з використанням бібліометричного аналізу з метою формулювання прогностичних перспектив розвитку досліджуваного напрямку.

Використання методів бібліометричного аналізу стає все більш актуальним у сучасному науковому контексті, і його значення суттєво зростає, коли мова йде про дослідження проблематики найновітніших розробок, таких як технології Інтернету речей в цілому, а також їх застосування в бібліотечно-інформаційному виробництві. Бібліометрія дозволяє аналізувати великі обсяги наукової літератури, сприяючи ідентифікації ключових дослідників, тенденцій, методів та концепцій розвитку наукової думки з означеного питання. Через кількісний аналіз публікацій та цитувань можна визначити актуальні напрямки дослідження, прогалини та подальші перспективи наукової розробки. Крім того, кількісний підхід бібліометрії забезпечує більш об'єктивний погляд на стан і розвиток галузі, мінімізуючи вплив особистих упереджень. Аналіз публікацій також дозволяє виявити перетин між різними науковими дисциплінами, сприяючи колаборації та інтеграції знань. Усі ці фактори роблять бібліометричний аналіз необхідним інструментом глибшого осмислення та розуміння досліджуваних проблем.

Для проведення бібліометричного аналізу була обрана наукометрична база даних Scopus, як одна з авторитетних та впливових серед науковців. Можливості цієї платформи дозволяють експортувати до 20000 бібліографічних записів документів для їх подальшої обробки, структурування, виявлення взаємозв'язків та оцінки динаміки.

Пошук наукових публікацій за тематикою дослідження проводився в декілька ітерацій з метою отримання статистичних даних як загальної кількості публікацій напрямку IoT, так і з виокремленням напрямку соціальних наук, а також безпосередньо у бібліотечному виробництві. Для визначення періоду компаративного бібліометричного аналізу було сформовано запит з найбільшою

галузевою спрямованістю, який мав наступні обмеження: ключові вирази «Internet of Thing» і «library»; типи документів – стаття, книга, частина книги або тези конференцій; роки публікації – з року першої публікації до 31 грудня 2022 р. включно. Результати пошуку за запитом «(KEY ("Internet of Things") AND KEY (library)) AND (DOCTYPE (ar) OR DOCTYPE (bk) OR DOCTYPE (ch) OR DOCTYPE (cp)) AND PUBYEAR < 2023» дозволили визначити, що перший науковий документ, пов'язаний з використанням технологій Інтернету речей у бібліотечному виробництві, був опублікований 20 жовтня 2010 р. і являє собою тези конференції за темою «Library system digitization study of the public university» [24]. Отже, порівняльний бібліометричний аналіз публікацій було проведено за період з 2010 по 2022 рр. включно.

В рамках даного дослідження бібліометричний аналіз був виконаний із застосуванням програмного засобу VOSviewer [25], який служить ефективним інструментом для візуалізації та аналітичного дослідження наукових мереж. Зокрема, використовуючи VOSviewer, було можливо відобразити зв'язки між авторами, аналізувати мережі цитувань та картографувати ключові слова у відповідних наукових публікаціях. Цей інструмент дозволив здійснити глибокий аналіз структури наукового поля, вивчити основні тренди та взаємодію між науковцями, організаціями та країнами, що призвело до комплексного розуміння динаміки та характеристик даної галузі дослідження.

З метою отримання загальної картини стосовно поточного стану розповсюдженості та проблематики публікацій було здійснено бібліометричний аналіз всього напряму досліджень за тематикою «Інтернет речей». Сформульований для цієї задачі пошуковий запит у базі даних Scopus [26] має наступний формат: «KEY ("Internet of Things") AND (DOCTYPE (ar) OR DOCTYPE (bk) OR DOCTYPE (ch) OR DOCTYPE (cp)) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023». Тобто, ключем пошуку є точний вираз "Internet of Things", а результати мають містити лише документи, що були опубліковані в період з 01 січня 2010 р. по 31 грудня 2022 р. та які є статтями в наукових виданнях, книгами, главами книг або

тезами наукових конференцій. За результатами пошуку у базі даних було знайдено 124063 документи, що задовольняють критеріям запиту.

Отримані дані щодо кількості документів було зведено у таблицю 1 [Додаток А], згідно з якою можна зробити висновки, що починаючи з 2010 р. спостерігається позитивна тенденція до збільшення кількості публікацій за тематикою. Найбільша динаміка зростання кількості наукових праць припадає на період з 2015 до 2018 рр., коли приріст складав понад 50% відносно попереднього періоду. У 2020 р. спостерігалось зниження рівня публікаційної активності через раптовий вибух вірусу COVID-19 та глобальне введення карантинних обмежень, що відчутно уповільнило дослідницькі роботи майже в усіх сферах. Проте на початку 2021 р. кількість публікацій зростає, що вказує на повернення інтересу до проблематики Інтернету речей. Візуалізацію динаміки росту кількості публікацій з досліджуваної проблеми відбиває Рис.1 [Додаток А].

Аналіз особливостей географічної структури потоку публікацій, пов'язаних з дослідженням феномену Інтернету речей, дозволяє визначити, що найпродуктивнішими є науковці Китаю. За оглянутий період ними було видано 28020 публікацій, що становить 22,6% усіх документів цієї тематики. На другій позиції рейтингу знаходиться Індія з показником 21736 наукових документів, або 17,5% від загальної кількості. Замикають трійку лідерів науковці Сполучених Штатів Америки, опублікувавши за цей час 14704 наукові праці, або 11,9% від загальної кількості публікацій напрямку. В десятку країн з найпродуктивнішими дослідженнями також входять Великобританія, Південна Корея, Італія, Німеччина, Франція, Канада та Японія (див. Таблицю 2 у [Додаток А]). Україна знаходиться на п'ятдесят другій позиції рейтингу з показником у 424 наукові праці, або 0,3% від загальної кількості публікацій. Візуальний аналіз цих даних можна провести завдяки графіку, відображеному на Рисунку 2 [Додаток А].

Таблиця 3 [Додаток А] ілюструє результати визначення п'яти журналів-лідерів за кількістю публікацій з теми «Інтернет речей». Так, значна частина статей розміщена в журналах США, на другому місці – німецькі видання. Але лише два

видання: «IEEE Access» та «IEEE Internet Of Things Journal» належать до Q1. Більшість цих журналів мають невисокий показник SCImago Journal Rank, що ілюструє впливовість наукового періодичного видання, окрім «IEEE Internet Of Things Journal», який має значення 3.747 та «IEEE Access» з показником 0.926. Німецьке видання «Advances in Intelligent Systems and Computing», згідно інформації з бази даних SCImago Journal & Country Rank [27] завершило свою діяльність у 2021 р., але, незважаючи на це, все ще знаходиться на п'ятій позиції рейтингу завдяки великій кількості опублікованих у журналі статей. Візуалізацію цих даних відбиває Рисунок 3 [Додаток А].

Звичайно, окрім кількості, варто враховувати фактор впливу того чи іншого видання. Для оцінки індексів впливу було обрано показники CiteScore від Scopus. «Розрахунок CiteScore базується на кількості посилань на документи (статті, огляди, конференції, розділи книг та дані) журналом протягом 4 років, поділених на кількість однакових типів документів, проіндексованих у Scopus та опублікованих у ті ж чотири роки. Наприклад, CiteScore-2022 р. зараховує цитати, отримані у 2019-2022 рр., до статей, оглядів, доповідей на конференціях, глав книг та документів з даними, опублікованих у 2019-2022 рр., і ділить це на кількість цих документів, опублікованих у 2019-2022 рр» [28].

З метою аналізу фактору впливу CiteScore було використано п'ять найрейтинговіших журналів, а дані, отримані за результатами пошуку, надано в Таблиці 4 [Додаток А]. Найвпливовішими є журнали першого квартилю від Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). Це видання «IEEE Internet of Things Journal» та «IEEE Access», які знаходяться на першій та другій позиціях рейтингу зі значеннями CiteScore 17,4 та 9,0 відповідно. Третю позицію рейтингу посідає німецьке видання «Lecture Notes in Computer Science», яке отримало CiteScore з фактором впливу 2,2. На четвертому місці зі значенням 1,1 знаходиться видання «ACM International Conference Proceeding Series», яке почало отримувати показники фактору впливу CiteScore лише з 2016 р. П'яту позицію рейтингу посідає вже неіндексований з 2021 р. науковий журнал «Advances in

Intelligent Systems and Computing» з фактором 0,9. Але, слід зазначити, що цей показник впливу журналу отриманий виданням востаннє у 2019 р., що зумовлено механізмом розрахунку CiteScore. Проаналізувавши отримані показники кожного видання впродовж досліджуваного періоду, можна зробити висновок, що перша трійка з оглянутих журналів має позитивну динаміку розвитку фактору впливу, що зумовлюють наукова та практична цінність досліджень, а також зростання зацікавленості до тематики Інтернету речей взагалі. Візуальний аналіз даних, отриманих за результатами ранжування фактору впливу лідируючих видань, можна провести завдяки графіку, відображеному на Рисунку 4 [Додаток А].

Аналіз особливостей видової структури потоку публікацій з досліджуваної проблематики дозволив виявити наступне співвідношення: найбільша кількість, а саме 76565 (61,7%) публікацій від загального обсягу – це тези наукових конференцій; 43364 (35%) – наукові статті; третє місце посідають глави в книгах з показником 3940 (3,2%); найменш розповсюдженим видом є книги, присвячені питанням «Інтернету речей», яких зафіксовано 194 назви, тобто 0,2% від загальної кількості опублікованих наукових праць. Дані, використані для аналізу, було отримано з бази даних Scopus та наведено у Таблиці 5 [Додаток А], а діаграму для візуальної оцінки результатів наведено на Рисунку 5 [Додаток А].

Варто зазначити, що дослідження, пов'язані з технологією «Інтернету речей», майже завжди, окрім комп'ютерних наук, перетинаються з іншими галузями людської діяльності. Це зумовлено, перш за все, самою концепцією IoT, а саме спрямованістю на взаємодію пристроїв з навколишнім середовищем та вплив на нього. Отже, варто виділити окремі напрями досліджень, провести проблемно-тематичний аналіз змісту наукових праць. Для цього з бази даних Scopus було отримано, впорядковано і сформульовано галузевий розподіл публікацій за досліджуваний період, що представлено у таблиці 6 [Додаток А]. Найбільша кількість досліджень з проблематики Інтернету речей проводяться в галузі комп'ютерних наук (37,6% документів) та інженерії (23,4% публікацій). Математика, системний аналіз, фізика та астрономія мають такі показники наукових праць 7,5%,

6,7% і 6,2% від загального обсягу відповідно. Інші напрямки наукової діяльності є слабо розвиненими з точки зору впровадження технології Інтернету речей, а отже потребують особливої уваги для отримання переваг від взаємодії з сучасними технологіями. Діаграму для візуальної оцінки галузевого розподілення наукових публікацій відображено на рисунку 6 [Додаток А].

Спираючись на результати аналізу, можна зробити висновок, що технічні науки наразі мають більший вплив на розвиток технології Інтернету речей. При цьому гуманітарні напрямки можуть отримати революційний розвиток, базуючись на вже досягнутих результатах представниками технічних галузей знань.

Аналіз цитувань наукових досліджень за тематикою «Інтернет речей» за обраний період також доводить стале зростання зацікавленості спільноти до популяризації впровадження сучасних технологій в різноманітні галузі. Найбільш стрімку динаміку збільшення кількості посилань можна спостерігати в період з 2015 до 2019 рр. включно. Графік, що відображає статистичні дані кількості цитувань за досліджуваною тематикою у часі представлено на рисунку 7 [Додаток А]. Варто зазначити, що тенденції збільшення кількості цитувань беззаперечно співпадають з загальним трендом зростання кількості наукових публікацій за той самий період.

В таблиці 7 [Додаток А] представлено 10 найцитованіших публікацій за тематикою «Інтернет речей». Найбільшу кількість посилань має стаття італійських науковців «The Internet of Things: a Survey» [29], яку було опубліковано авторитетним нідерландським виданням «Computer Networks» 28 жовтня 2010 р. У статті сформульовано парадигми розвитку технології Інтернету речей, оглянуто теоретичні засади та технічні засоби, на яких базується розробка систем цього профілю. Абсолютна більшість документів, що лідирують за цитуваннями також висвітлюють базові концепції, архітектуру та технологічні рішення, що мають застосовуватися в реалізації проектів і досліджень предметної галузі.

Аналіз бібліометричних даних, отриманих за тематичним запитом в базі даних Scopus, виявив, що науковці з 158 країн світу представили свої роботи впродовж періоду з 2010 по 2022 рр. Щоб краще зрозуміти цю картину, за допомогою

програмного забезпечення VOSviewer було створено карту взаємозв'язків між країнами за наступними параметрами: тип аналізу: співавторство; одиниця аналізу: країни; мінімальна кількість опублікованих країною документів: 25. Обмеження параметрів аналізу дозволило виявити 70 країн світу, що відповідають усім критеріям запити. Бібліометрична мережева мапа, представлена на рисунку 8 [Додаток А], дозволяє візуалізувати кількість публікацій за тематикою, розміром кулі з назвою країн, вченими яких було проведено дослідження, водночас товщиною ліній вказуючи на кількість робіт у співавторстві з дослідниками з інших країн. Завдяки використанню вказаного інструменту, виявлено, що найбільш продуктивною є взаємодія між такими країнами, як США, Китай, Великобританія, Індія та Австралія.

Розглядаючи «Total link strength», тобто загальну міцність ланки зв'язків, яка показує рівень співпраці між дослідниками з різних держав, ми можемо встановити рейтинг країн за цим параметром. Таблиця 8 [Додаток А] наглядно демонструє 10 країн-лідерів за числом публікацій з теми Інтернету речей. Для оцінки впливовості та якості наукових робіт в таблиці також вказано показник середньої кількості цитувань на одну публікацію.

Китай виокремлюється з 4722 роботами та показником 60,97 цитувань на одну публікацію. Однак, розглядаючи якість досліджень, можна побачити, що США, які займають друге місце за кількістю публікацій, мають більшу середню цитованість, 73,38 цитувань на документ, що свідчить про вищу якість наукових робіт. Показовими з погляду якості наукових робіт також можна вважати Австралію з 1108 науковими працями та середньою кількістю цитувань 76,8, а також Італію, яка займає 10 позицію рейтингу за кількістю робіт, але має високий показник цитованості – 73,64. При цьому індійські дослідники опублікували 2687 наукових праць, але якість публікацій не є високою, про що свідчить співвідношення кількості документів до показника їх цитованості, який дорівнює 49,49 цитувань на документ.

Для детального аналізу вживаності ключових слів також було використано програмне забезпечення VOSviewer, в рамках якого побудована карта взаємозв'язків

між цими словами, виходячи з принципу співзвучності, а за одиницю аналізу було обрано базові словосполучення ключових слів. Із первісних 67720 ідентифікованих ключових слів було відібрано 50, встановлено мінімальний поріг повторюваності в 500 разів та об'єднано їх семантичні дублікати.

На рисунку 9 [Додаток А] проілюстровано мережеву діаграму, яка візуально демонструє ієрархічну значущість ключових слів та їх взаємозв'язки. За допомогою алгоритмів VOSviewer 50 ключових слів було поділено на 5 кластерів, що відображають їх взаємозв'язок і тематичну близькість. Червоний кластер (складається з 17 ключів) домінує ключовими словами, пов'язаними із технологічною базою Інтернету речей та технічними рішеннями, зокрема «internet of things», «sensors», «wireless telecommunication», «gateways», «energy utilization» та інші. Зелений кластер (13 ключів) фокусується на хмарних та розподілених обчисленнях, зберіганні, обробці та управлінні інформацією з виразними ключовими словами «network architecture», «big data», «cloud computing», «digital storage», «information management» та іншими. Синій кластер (9 ключів) об'єднує слова, асоційовані з технологіями штучного інтелекту та машинного навчання, такими як «artificial intelligence», «deep learning», «decision making», «machine learning» та інші. Жовтий кластер (8 ключів) зосереджений на темах, які пов'язані з технологіями криптографії, захисту цифрових мереж та приватних даних. Характерні цьому кластеру ключові слова: «security», «privacy», «authentication», «cryptography» та інші. Фіолетовий кластер розглядає проблематику впровадження автоматизації прикладного рівня, включає в себе 2 ключові терміни: «automation» і «intelligent buildings». Цей деталізований розбір ключових слів допомагає краще розуміти структурні та семантичні аспекти досліджуваної теми. В таблиці 9 [Додаток А], яка інтерпретує проведений аналіз, наведено 20 найбільш вживаних ключових виразів, пов'язаних з тематикою Інтернету речей та величину їх взаємозв'язків.

Проведений бібліометричний аналіз дозволяє отримати загальну картину розвитку досліджень з проблематики Інтернету речей в усіх галузях науки. Однак,

найбільш корисним в рамках нашої дисертаційної роботи має стати поглиблене дослідження предмету «Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві».

Бібліометричний аналіз даних, отриманих з допомогою можливостей бази даних Scopus щодо тематики застосування технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційному виробництві, було здійснено за результатами сформульованого пошукового запиту «(KEY ("Internet of Things") AND KEY (library) AND NOT KEY (software) AND NOT ("Third-parity") AND NOT KEY ("Programming library") AND NOT KEY ("Assembly language") AND NOT KEY ("Combinatorial library") AND NOT KEY ("Analytics libraries") AND NOT KEY (algorithms) AND NOT KEY (fog) AND NOT KEY ("Client libraries") AND NOT KEY (satellites) AND NOT KEY ("Scientific literature")) AND (DOCTYPE (ar) OR DOCTYPE (bk) OR DOCTYPE (ch) OR DOCTYPE (cp)) AND PUBYEAR < 2023 AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023». Даний запит дозволяє обмежити результати пошуку за наступними параметрами: ключові слова – повне співпадіння фрази «Internet of Things», а також обов'язкова присутність ключового слова «library», додатково введено фільтрацію омонімічних значень методом виключення ключових виразів, не пов'язаних з контекстом дослідження; типи документів, що включаються в результати пошуку – статті, книги, глави книг або тези конференцій; період публікації – з появи першої публікації до 31 грудня 2022 р. включно.

За результатами запиту було знайдено 200 наукових праць. Першою публікацією за досліджуваним напрямком є тези конференції «Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium» під назвою «Library system digitization study of the public university» від 20 жовтня 2010 р. Документ присвячений «впровадженню RFID тегів до бібліотечної та інформаційної системи в бібліотеці Університету Олександра Дубчека в Тренчині (Словаччина)» [24].

Статистичні дані, отримані за запитом, було зведено у таблицю 10 [Додаток Б], яка відображає кількість публікацій за тематикою досліджуваного напрямку в хронологічному порядку. Для візуалізації результатів статистичного аналізу, які

свідчать про стаке збільшення кількості публікацій, було побудовано графік, представлений на рисунку 10 [Додаток Б]. В період з 2010 до 2014 рр. спостерігається повільне збільшення кількості наукових праць за тематикою Інтернету речей у бібліотечній справі. Але, вже в 2015 р. помітно явне зниження кількості публікацій. Впродовж 2016 р. також не досягнуто попередніх показників, однак, починаючи з 2017 р. відбувається стрімке зростання інтересу науковців до тематики, яке набуло пікового значення в 37 публікацій у 2020 р. Наступне уповільнення досліджень у 2021-2022 рр. можна аргументувати поширенням карантинних обмежень в зв'язку зі світовою епідемією вірусу COVID-19, яка спричинила обмеження доступу до багатьох громадських закладів.

У контексті кількісних показників дослідницьких результатів у сфері Інтернету речей в бібліотечній справі китайські науковці демонструють найбільшу продуктивність, опублікувавши 63 документи, що складає 31,5% загальної кількості робіт з цієї тематики. США посідають друге місце із 33 науковими роботами, що складає 16,5% від загального обсягу, тоді як індійські науковці займають третє місце з 25 публікаціями, або 12,5%. Серед найактивніших країн у цьому напрямку також можна виділити Німеччину (5,0%), Великобританію (4,5%), Південну Корею (4,0%), Японію (3,5%), Іран (3,0%) та Італію (2,5%), як це представлено у Таблиці 11 [Додаток Б]. Десяту позицію рейтингу розділяють декілька країн з однаково невеликою кількістю опублікованих наукових праць за досліджуваний період. Діаграма розподілення належності публікацій за тематикою по критерію належності до країн представлено на Рисунку 11 [Додаток Б].

Таблиця 12 [Додаток Б] ілюструє результати аналізу п'яти провідних журналів за кількістю публікацій на тему застосування технологій Інтернету речей у бібліотечній справі. Лідером є журнал з Великобританії «Library Hi Tech» з 11 науковими працями та найвищим серед учасників рейтингу показником SJR, який дорівнює 0.507. На другому місці рейтингу з 8 науковими публікаціями знаходиться «Lecture Notes In Computer Science Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics». Журнал входить у другий кuartиль,

проте його показник SJR становить лише 0.32. На третьому місці посідає німецьке видання четвертого квартилю «Advances In Intelligent Systems And Computing», оприлюднивши за період з 2017 до 2021 рр. 7 публікацій за досліджуваною тематикою. Варто зазначити, що «Applied Mechanics And Materials», згідно даним SCImago Journal & Country Rank [30], припинив своє існування у 2015 р., але завдяки 7 науковим працям утримує четверте місце в рейтингу. «Library Philosophy and Practice» є періодичним виданням, що виходить друком в США та посідає п'яту сходинку рейтингу з показником в 6 документів. Деталізований хронологічний графік рейтингу представлено на Рисунку 12 [Додаток Б].

Аналіз фактору впливу CiteScore виявляє, що очікувано найвпливовішими журналами є «Library Hi Tech» та «Lecture Notes in Computer Science», які належать до другого та третього квартилів відповідно. Найвищий рейтинг CiteScore на момент проведення аналізу має видання «Library Hi Tech» з показником 4.9, який було досягнуто поступовим набуттям його з 2017 р. Друге місце займає «Lecture Notes in Computer Science», який набув значення 2.2 повільною позитивною динамікою, починаючи з перших публікацій 2011 р. за досліджуваною тематикою. Третя позиція рейтингу CiteScore належить публікаціям видання «Advances In Intelligent Systems And Computing», яке в останній раз відповідало критеріям розрахунку CiteScore в 2019 р., на той час отримав значення 0.9. Журнали «Applied Mechanics And Material» та «Applied Mechanics And Material», які розташовані на нижніх місцях, взагалі не відповідають критеріям методики розрахунку CiteScore. Дані, використані для аналізу, наведено у таблиці 13 [Додаток Б], а графік для візуальної оцінки представлено на рисунку 13 [Додаток Б].

Розподілення документів за типами надано у таблиці 14 [Додаток Б]. Аналіз отриманих від бази даних Scopus інформації виявляє домінування тез конференцій сумарною кількістю 136 документів, або 68% від загальної кількості наукових праць. 31% опублікованих матеріалів складають 62 статті за тематикою, а лише 1% від загальної кількості належать 2 главам книг. Графічне відображення цих даних представлено діаграмою на рисунку 14 [Додаток Б].

Згідно з інформацією з бази Scopus була виконана систематизація та класифікація галузевого розподілу публікацій за встановлений часовий інтервал, результати чого представлено у таблиці 15 [Додаток Б]. Найактивніші дослідницькі заходи в цьому контексті спрямовані на область комп'ютерних наук з 154 науковими роботами, що становить 35,6%. Інженерна сфера відзначена 99 публікаціями, що становлять 22,9%. Такі дисципліни, як математика, соціальні науки, дослідження прийняття рішень, фізика та астрономія мають відсоткові частки 9,5%, 8,6%, 6,9% та 5,3% від загальної кількості публікацій відповідно. Інші напрями наукової активності у контексті Інтернету речей в бібліотечних процесах ще не демонструють значущих результатів. Візуалізація галузевого розподілу наукових розробок доступна на рисунку 15 [Додаток Б].

Аналіз цитувань наукових робіт на тему «Інтернет речей в бібліотечній діяльності» за встановлений часовий інтервал підтверджує зростання зацікавленості наукового середовища в застосуванні передових технологій у різноманітних областях. Відмічено значне збільшення кількості цитувань з 2018 р. Візуалізація трендів цитування за вказаною проблематикою представлена на рисунку 16 [Додаток Б].

Усього за запитом у базі даних Scopus було зафіксовано 1229 цитувань за період з 2010 р. до 2022 р. включно. Отримані дані дозволили виділити 10 найбільш цитованих наукових документів, що представлено у таблиці 16 [Додаток Б]. Слід зазначити, що хоча стаття «Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems» [31] досягла 336 цитувань і знаходиться на першій позиції рейтингу, фактично не є найбільш цитованою, тому що друге та третє місце посідає публікація «Dude, where's my card? RFID positioning that works with multipath and non-line of sight» [32; 33], але цей документ був оприлюднений двома різними виданнями та має сумарну кількість у 458 цитувань. Найбільш цитованими за тематикою Інтернету речей у бібліотечній сфері є роботи американських та індійських вчених.

В процесі визначення особливостей авторської та географічної структури потоку публікацій з проблем застосування технологій Інтернету речей в

бібліотечному виробництві, встановлено, що в період з 2010 до 2022 рр. вчені з 52 країн світу презентували свої наукові дослідження з цієї теми. Для глибшого інсайту та інтерпретації цих даних була застосована програма VOSviewer, що дозволила побудувати бібліометричну мережеву мапу взаємозв'язків між зазначеними країнами на основі параметрів: типу аналізу – співавторство, одиниці аналізу – країни, при цьому враховуючи мінімальний поріг опублікованих документів – три. Встановлені критерії відбору дозволили визначити 19 країн, які відповідали заданим параметрам. Візуально, на рисунку 17 [Додаток Б], бібліометрична мережева мапа ілюструє кількість публікацій кожної країни за допомогою відповідного розміру кулі з назвою держави, додатково акцентуючи на взаємодію між країнами товщинами з'єднувальних ліній. З використанням цього інструментарію було виявлено, що найбільша продуктивність взаємодії спостерігається між Китаєм, США та Великою Британією. Водночас важливо підкреслити, що хоча Китай домінує за загальною кількістю публікацій, наукові роботи дослідників зі Сполучених Штатів мають значно вищий показник середньої кількості цитувань на одну публікацію. Це свідчить про відмінну якість досліджень американських вчених та їхній внесок у формування базових технологічних концепцій досліджуваної проблематики.

Розглянувши загальну міцність ланки зв'язків, що відображає показник «Total link strength», ми отримуємо можливість деталізувати міжнародний рейтинг за інтенсивністю співпраці між науковцями різних країн. У таблиці 17 [Додаток Б] презентовано десять провідних країн за кількістю наукових публікацій в сфері впровадження та застосування Інтернету речей в бібліотечному виробництві.

Для аналізу сполучень ключових слів в публікаціях з досліджуваної проблематики була застосована програма VOSviewer. За її допомогою було складено мережеву діаграму взаємозв'язків між ними, базуючись на принципі співзвучності, де основною одиницею аналізу виступали всі базові ключові слова. Із загального числа 1945 зазначених ключових слів до аналізу було додано 56, враховуючи порогове значення їх повторюваності у 5 разів. Для підвищення

точності аналітичного вивчення семантичні дублікати були об'єднані, що дозволило сформулювати список з 39 унікальних ключових фраз.

Мережева діаграма, представлена на рисунку 18 [Додаток Б], наглядно відображає рангову значущість цих ключових слів та розкриває структуру їх взаємодії. Завдяки алгоритмам програми VOSviewer, ці 39 ключових слів були розділені на три кластери, характеризуючи їхні взаємозв'язки та тематичну схожість між собою. Червоний кластер, що містить 26 ключових словосполучень, переважно об'єднує терміни, які стосуються технологічної основи впровадження Інтернету речей у бібліотечному середовищі. Зокрема, це слова, що вказують на автоматизацію, управління інформаційними потоками, використання штучного інтелекту та специфічних сервісів. До ключових термінів цього кластера відносяться: «internet of things», «smart library», «library services», «digital libraries», «artificial intelligence», «library management» і «information management». Зелений кластер, що включає 8 ключових елементів, концентрує увагу на аспектах зберігання інформації, її конфіденційності та енергоефективності використання. Серед найбільш виразних термінів цього кластера можна виокремити: «digital storage», «data privacy», «cryptography» та «energy utilization». Синій кластер, який представлений 5 ключовими фразами, акцентує на технологіях візуалізації інформації, принципах машинного навчання та характеристиках вбудованих систем. Зокрема, цей кластер включає такі терміни, як «embedded systems», «deep learning» та «data visualization».

Аналіз ключових слів є важливим засобом глибокого розуміння семантики та структури досліджуваної проблематики. Він дозволяє виділити основні поняття та з'ясувати, як вони корелюють між собою. Вивчення ключових виразів може сприяти виявленню основних напрямків досліджень, їх актуальності, а також підсилити розуміння специфіки теми. В таблиці 18 [Додаток Б] наведено 20 найбільш вживаних ключових виразів, пов'язаних з тематикою Інтернету речей в бібліотечному виробництві та особливості їх взаємозв'язків. Ця таблиця не лише надає інформацію про кількісний показник згадування кожного виразу, але й

розкриває глибину та характер взаємозв'язків між ними. Такий підхід до аналізу забезпечує чітке розуміння ключових аспектів досліджуваної області, її актуальності та потенціалу для подальших наукових розробок.

На основі проведеного бібліометричного аналізу можна встановити низку закономірностей, які пояснюють структуру, тематику та динаміку наукових досліджень у сфері впровадження технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційному виробництві.

Передусім аналіз показав домінування технічного дискурсу: більшість публікацій зосереджені на апаратних і комунікаційних аспектах IoT – архітектура систем, протоколи передачі даних, безпека мереж, енергоефективність та візуалізація даних. Найчастіше вживаними ключовими словами є *internet of things*, *radio frequency identification (RFID)*, *wireless sensor networks*, *network security*, *automation*, *energy efficiency*, *cloud computing* і *big data*. Це свідчить про те, що дослідницька увага зарубіжних науковців нині тяжіє до проблем технічної реалізації та оптимізації інфраструктури, на якій базується «розумна» бібліотека.

Водночас у структурі публікацій чітко простежується зсув від вузькотехнічного до міждисциплінарного бачення. Дослідники поступово інтегрують IoT у ширший контекст цифрової гуманітаристики, інформаційного менеджменту й управління знаннями. Це відображається в зростанні частоти ключових слів *libraries*, *digital libraries*, *information management*, *library systems*, *smart library*, *university libraries*. Тобто науковці починають розглядати Інтернет речей не лише як технологічну платформу, а як каталізатор трансформації інформаційного простору бібліотек – інструмент, який впливає на організацію праці, комунікацію з користувачами та якість сервісу.

Порівняльний аналіз показує також три стійкі тематичні блоки, які формують основні напрями сучасних наукових досліджень:

1. Технологічний блок – роботи, присвячені апаратним сенсорам, RFID-ідентифікації, хмарним обчисленням, мережевій безпеці та оптимізації

передачі даних. Тут переважають інженерні й комп'ютерні дослідження, орієнтовані на вдосконалення протоколів і архітектури систем.

2. Аналітично-управлінський блок – публікації, де IoT розглядається як джерело великих масивів даних для бібліотечного менеджменту. В цих роботах обговорюється використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування поведінки користувачів, моделювання потоків відвідувань, автоматичного поповнення фондів, а також побудови персоналізованих рекомендаційних систем.

3. Гуманітарно-соціальний блок – зосереджується на етичних, правових та соціокультурних наслідках впровадження IoT. Найчастіше йдеться про проблеми конфіденційності, безпеки персональних даних, енергоспоживання, доступності цифрових сервісів для маломобільних груп користувачів і впливу автоматизації на професію бібліотекаря.

Суттєвою закономірністю є географічна концентрація досліджень: за даними мережевої візуалізації співавторства, найбільш активні центри публікаційної діяльності зосереджені у Китаї, США, Великій Британії, Індії та Іспанії. Китай є лідером за кількістю документів, однак публікації американських і британських авторів демонструють вищий рівень цитованості, що свідчить про їхній концептуальний вплив на становлення теоретичних засад IoT у бібліотеках. Європейські дослідження, натомість, вирізняються фокусом на етичних стандартах і політиці відкритих даних.

У межах бібліотечно-інформаційного напрямку найчастіше закордонними дослідниками вивчаються такі проблеми та тренди:

- впровадження RFID-технологій у бібліотечних фондах (управління обліком, протикрадіжні системи, самообслуговування);
- використання сенсорних мереж для моніторингу умов зберігання фондів;
- застосування IoT у поєднанні зі штучним інтелектом для формування рекомендаційних сервісів та аналітики користувацької поведінки;
- цифрова етика й інформаційна безпека в бібліотеках;

- оптимізація енергоспоживання та сталий розвиток бібліотечних будівель (energy efficiency, intelligent buildings).

Бібліометричні дані також засвідчують розширення міждисциплінарного поля: у публікаціях усе частіше поєднуються бібліотекознавство, інформатика, соціальні комунікації, економіка та урбаністика. З'являються дослідження, в яких “розумні” бібліотеки розглядаються як агенти розвитку концепції «розумних міст» – мікромоделі інтегрованих цифрових середовищ, у яких IoT взаємодіє з транспортною, енергетичною й освітньою інфраструктурою [140, 141].

Отже, в результаті аналізу наукової джерельної бази встановлено наступні закономірності:

- тематичне ядро досліджень становлять технічні аспекти IoT, однак тенденція останніх років свідчить про посилення гуманітарного виміру – дослідження етичних, соціальних та управлінських аспектів цифрової трансформації бібліотек;
- наукова активність концентрується у високорозвинених технологічних регіонах, але поступово розширюється за рахунок країн Центральної та Східної Європи, включно з Україною;
- у структурі ключових понять посилюється інтеграція IoT із технологіями штучного інтелекту, хмарними сервісами та аналітикою великих даних, що формує новий міждисциплінарний сегмент – *Smart Library Ecosystem*;
- відбувається перехід від ізольованих експериментів до системного підходу, у якому бібліотека розглядається як частина єдиного мережевого середовища даних.

Узагальнено, сучасні наукові публікації демонструють поступове перетворення IoT з інженерного феномену на соціокомунікаційну парадигму розвитку бібліотек майбутнього, в яких взаємодія між користувачем, простором і даними відбувається в режимі реального часу, а ефективність вимірюється не лише кількістю сенсорів, а й якістю отриманого досвіду.

1.2. Методологічна основа дослідження

Теоретичним підґрунтям представленого дисертаційного дослідження постали фундаментальні положення теорії бібліотечно-інформаційного виробництва, обґрунтовані в середині 2000-х років І. О. Давидовою [156]. В основі цієї авторської концепції лежить обґрунтування бібліотечно-інформаційного виробництва “як самостійної галузі інформаційної індустрії” [156, С. 14].

Науковиця розглядає бібліотечно-інформаційне виробництво як таке, що виходить за межі реалізації сукупності суто бібліотечних процесів. За її визначенням це специфічний вид інформаційного виробництва, спрямований на створення суспільно значущих інформаційних продуктів та послуг. І. О. Давидова підкреслює, що “ефективність бібліотечно-інформаційного виробництва тісно пов'язана з використанням комп'ютерної техніки, нових інформаційних технологій, систем і мереж, що спричиняє домінування технологічної складової у визначенні сутності бібліотечного виробництва. Водночас цей процес характеризується не лише якісно новим виробничим апаратом, заснованим на комп'ютеризованих знаряддях праці й інформаційних технологіях, але й новими соціальними відносинами” [156, С. 11]. Крім того, “стан бібліотечного виробництва зумовлюється складною сукупністю соціокультурних факторів, які визначають його особливості” [156, С. 17]. Спробуємо розглянути означені аспекти з позиції концепції Інтернету речей.

Важливим для нашого дослідження є визначення авторкою основних взаємопов'язаних підсистем бібліотечно-інформаційного виробництва: робочої сили, праці, засобів і предметів праці, результату - інформаційних продуктів та послуг [156, С. 16]. Це положення дозволяє нам розглянути концепцію Інтернету речей крізь призму теорії бібліотечно-інформаційного виробництва. Зокрема, окреслити: IoT-технології як нове покоління засобів праці; сенсорні мережі - як нову виробничу інфраструктуру; дані, які отримуються від IoT-пристроїв - як предмет праці; сервіси та аналітику, які продукуються на основі даних від IoT-пристроїв — як інноваційний продукт бібліотечно-інформаційного виробництва.

Давидова І. О. визначає бібліотечно-інформаційне виробництво в першу чергу як соціокультурну систему продукування інформаційних продуктів та послуг, яка функціонує на основі взаємодії та взаємозалежності інформаційних ресурсів, технологій, кадрів, потреб користувачів та організаційно-управлінських рішень. З цієї позиції в нашому дослідженні також потрібно відійти від технократичних аспектів дослідження Інтернету речей, натомість дослідити IoT як механізм трансформації засобів праці, технологій виробництва, характеру ресурсів, способів управління, форматів взаємодії з користувачькими аудиторіями, змістовної та функціональної складових інформаційних продуктів та послуг.

Фактично сьогодні ми можемо розглядати Інтернет речей як новий етап розвитку, закономірний результат еволюції бібліотечно-інформаційного виробництва, який набув актуальності в умовах глобальних цифрових трансформацій, зокрема цифровізації бібліотечно-інформаційної сфери діяльності. Проте, потрібно розкрити означену тезу більш докладно.

Перший етап - функціонування традиційної бібліотеки, характеризувався найпростішою моделлю бібліотечно-інформаційного виробництва, метою якої було збереження та забезпечення доступу користувачів до інформації.

Другий етап комп'ютеризації та автоматизації, залишив без змін предмет праці - інформацію, при цьому трансформував засоби праці та окремі процеси бібліотечно-інформаційного виробництва, зокрема через локальну автоматизацію комплектування, каталогізації, обліку, книговидачі, пошуку інформації. Виробнича система набула рис автоматизованої інформаційної системи.

Третій етап - розгортання бібліотечно-інформаційного виробництва як складової інформаційного виробництва суспільства. Виробнича система бібліотеки представлена взаємопов'язаними складовими: ресурсами, технологіями, працею, інформаційними продуктами та послугами для користувачів, які є результатами діяльності. Бібліотека на цьому етапі виступає не лише як соціокультурна та соціокомунікаційна установа, а й як виробник інформації, суб'єкт інформаційного ринку, складова інформаційної індустрії. "Роль бібліотеки як виробничої системи,

що за ринкових умов вирішує задачі індустріальної обробки інформаційних потоків, невинно зростає, виводячи на перший план проблеми підвищення ефективності бібліотечно-інформаційного виробництва” [156, С. 9]. На цьому етапі позначається перехід моделі бібліотечно-інформаційного виробництва до економіки знань.

Четвертий етап — цифровізація бібліотечно-інформаційного виробництва, пов’язаний з динамічним розгортанням мережевих ресурсів: “Найактивнішою сферою стає виробництво баз даних, інформаційно-аналітичних продуктів і послуг, створення Web-сторінок і порталів. Дигіталізація інформації, яка знаходить свій вияв у використанні цифрових методів виробництва, збереження і відтворення інформаційних продуктів і послуг, створює умови для конвертування інформації між комунікативними структурами і, в свою чергу, стимулює активний розвиток інформаційного ринку” [156, С. 9]. Бібліотечно-інформаційне виробництво на цьому етапі набуває рис “датацентричності” - бібліотеки інтегруються в глобальний інформаційний простір, ключовим ресурсом їх діяльності стають цифрові дані.

П’ятий етап - інтелектуалізація бібліотечно-інформаційного виробництва. З розвитком великих даних, технологій штучного інтелекту, прогресом машинного навчання, появою аналітичних платформ бібліотека здійснює поступовий перехід від інформаційного до інтелектуального виробництва. Основу виробництва складають когнітивні процеси, генерація нових знань на основі аналізу даних.

Шостий етап, етап розвитку бібліотечно-інформаційного виробництва на основі Інтернету речей характеризується принциповою зміною виробничого процесу. Якщо на попередніх етапах предметом праці, джерелом інформації були документи, мережеві інформаційні ресурси, то тепер виробнича IoT-модель спрямована на опрацювання внутрішніх даних, отриманих від фізичних об’єктів бібліотечного середовища. Новими виробничими ресурсами стають RFID-мітки, датчики та сенсори, інтелектуальні полиці, системи позиціонування, пристрої для моніторингу активності кадрів та користувачів тощо. У бібліотечно-інформаційному виробництві з’являється новий внутрішній інформаційний контур - бібліотека в режимі реального часу генерує операційні дані про власне функціонування,

наприклад, про місцезнаходження документів або пристроїв, використання робочих місць та завантаженість окремих зон, температуру, рівень освітлення, вологість тощо.

З позиції бібліотечно-інформаційного виробництва відбувається перехід від виробництва на основі документів та ресурсів до виробництва на основі документів, ресурсів та потоків даних, які використовуються як для оперативного управління, так і для генерації інформаційно-аналітичних продуктів, підвищення якості надання послуг. Наприклад, реаліями IoT виробництва стають оптимізація фізичного простору бібліотеки, навігація в ньому користувачів, персоналізація сервісу, зокрема інклюзивного обслуговування, моделювання робочих процесів, фондів, прогнозування попиту на ресурси. При цьому важливо, що змінюється реактивний характер бібліотечно-інформаційного виробництва, коли запит формує користувач, а бібліотека відповідає на нього, тобто залежить від сформованої потреби. IoT-виробництво стає проактивним, керується на основі операційних даних, які дозволяють автоматично, без запиту користувачів, виявляти потреби, накопичувати та аналізувати інформацію про функціонування бібліотеки, а за умов підключення потенціалу технологій штучного інтелекту та машинного навчання управляти ресурсами, прогнозувати попит, персоналізовано адаптувати сервіс під користувацькі аудиторії. Продуктом виробництва також стає і управлінське знання. Тому варто розглядати Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві не як технологічну інновацію, а як закономірний еволюційний етап розвитку.

Саме на етапі розвитку бібліотечно-інформаційного виробництва на основі Інтернету речей закладається основа для вибудови майбутньої концептуальної “Розумної бібліотеки” або Smart-бібліотеки. З позиції концепції бібліотечно-інформаційного виробництва Smart-бібліотека отримує дані про середовище, аналізує їх, оптимізує та прискорює прийняття рішень, автоматично реагує на зміни, вдосконалює виробничі процеси, діяльність кадрів, сервісну складову та ін. Smart-бібліотека стає не лише виробником інформації, даних, знань, а й інтелектуальним центром підтримки прийняття рішень. Smart-бібліотеку, що

функціонує на основі поєднання потенціалу IoT, штучного інтелекту, машинного навчання та аналітики можна визначити як соціотехнічну рефлексивну інформаційну систему, здатну до самостереження, самоаналізу, оцінки, прогнозування, тобто до адаптивного проактивного управління в режимі реального часу.

Потрібно зауважити, що обґрунтування концепції інтеграції Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво також потребувало звернення до наукових розвідок українських вчених. Зокрема, праця Лобузінної К. В. (2012) допомогла аргументувати, що результатом бібліотечної діяльності виступає не лише документний фонд чи каталог, а знанневий продукт і в такому разі бібліотечно-інформаційне виробництво має розглядатись як процес створення знанневих ресурсів [158].

Монографія Лобузінна І. (2016 р.) акцентувала перенесення фокуса уваги фахової спільноти із організації знань на конкретні процеси організації цифрових активів та ресурсів [159]. Це окреслило теоретичне підґрунтя для формування цифрової інфраструктури бібліотечно-інформаційного виробництва.

Важливою для аргументації нашої проблематики також стала модернізаційна модель довгострокового розвитку бібліотечно-інформаційної сфери України Воскобойнікової-Гузевої О. В. (2014) [157].

Важливим було звернення до концепції цифрової модернізації бібліотек Мар'їної О. Ю. (2018 р.), яка акцентувала на необхідності “зміщення акценту від «цифроцентричності» або «техноцентричності» до визначення соціально значущих ефектів цифрової модернізації бібліотечних установ” [129, С. 6].

Таким чином, авторські концепції українських науковців в нашому дослідженні сприяли осмисленню різних етапів та аспектів розвитку бібліотечно-інформаційного виробництва в умовах цифрових трансформацій.

Методологічну основу даного дисертаційного дослідження становить комплекс взаємопов'язаних підходів і методів, які відображають міждисциплінарний характер роботи та її соціокомунікаційну спрямованість. З урахуванням ролі бібліотеки як

соціального інституту, орієнтованого на комунікацію, збереження культурної спадщини та забезпечення доступності знань, обрано дослідницьку стратегію, яка поєднує технічні аспекти впровадження Інтернету речей (IoT) з гуманітарними, культурологічними та інституційними вимірами. Такий підхід дозволяє розглядати цифрові технології не ізольовано, а в контексті їхнього впливу на людину, бібліотечну спільноту, сферу бібліотечно-інформаційного виробництва та суспільство в цілому.

Системний підхід. Дослідження ґрунтується на системному баченні бібліотеки як складної соціотехнічної системи. Бібліотека розглядається у єдності її елементів – інформаційних ресурсів, користувачів, працівників, технологічної інфраструктури – та зовнішніх зв'язків із суспільством. Системний підхід забезпечив цілісний аналіз впровадження IoT-рішень: від технічних компонентів до організаційних структур і комунікаційних процесів. Завдяки цьому вдалося простежити, як інтеграція смарт-пристроїв впливає на всі рівні бібліотечної діяльності – управління, обслуговування, збереження фондів тощо – і виявити умови, за яких технологічні інновації гармонійно вбудовуються в повсякденну роботу закладу.

Соціокомунікативний підхід. В основі методології лежить розуміння бібліотеки як вузлового елемента соціальної комунікації. Впровадження IoT аналізується передусім крізь призму комунікативних процесів: передачі знань, інформаційного обміну між бібліотекою та її аудиторією, взаємодії користувачів із цифровими сервісами. Такий підхід акцентує увагу на тому, як IoT-технології розширюють можливості бібліотеки у виконанні її просвітницької та інформаційно-комунікативної місії. Методологія дослідження передбачає оцінювання того, якою мірою смарт-системи підвищують доступність інформаційних ресурсів, полегшують комунікацію між бібліотекарями і читачами, сприяють персоналізації послуг та залученню нових аудиторій. Бібліотека постає не лише як технічна платформа, а й як простір для соціальної взаємодії, де технології служать підсилювачем людських можливостей в отриманні та поширенні знань.

Культурологічний підхід. Дослідження враховує культурну місію бібліотек та ціннісний контекст впровадження новітніх технологій. Методологічна основа включає аналіз того, як інтеграція IoT співвідноситься з культурними функціями бібліотеки – збереженням спадщини, підтримкою читання, розвитком спільнот. IoT-рішення розглядаються як інструменти, що мають вписуватися у культурний простір бібліотеки, доповнюючи, а не витісняючи традиційні форми діяльності. При цьому дослідження спирається на принципи гуманітарних наук, зокрема використовує ідеї бібліотечної соціосеміотики та концепцію документа як культурного посередника [22]. Це дозволило інтерпретувати процес впровадження IoT не лише в термінах ефективності, але й з погляду символічного значення: наскільки нові технології узгоджуються з гуманітарними цінностями, етичними нормами та змістовними пріоритетами бібліотеки.

Інституційний підхід. Оскільки бібліотеки, особливо академічні, є важливою складовою освітньої інфраструктури, методологія дослідження приділяє підвищену увагу інституційним аспектам і рівню цифрової зрілості бібліотечних закладів. Застосовано підхід, що враховує рекомендації міжнародних організацій (зокрема поетапну модель цифрової трансформації для освітніх установ за методичними настановами UNESCO [23]) з метою оцінити готовність бібліотек до впровадження IoT. Це дозволило співвіднести розвиток українських бібліотек із глобальними критеріями та найкращими практиками, а також визначити, на якому етапі цифрового розвитку вони перебувають.

Інституційний аналіз включав оцінювання управлінських практик, наявних стратегічних документів, фінансових та кадрових можливостей бібліотек у контексті цифровізації. У межах дослідження було розроблено інтегральний показник – Digital Capacity Index – для кількісного вимірювання спроможності бібліотек до впровадження цифрових технологій. Цей індекс охоплює декілька ключових компонентів (інфраструктура, кадри, фінанси, управління) і дає змогу визначити «цифрову зрілість» інституції та виявити розриви між декларованими цілями і реальним станом (так званий *IR-Gap*, тобто розрив між намірами та можливостями

їх реалізації). Аналіз значень підіндексів (зокрема показника управлінської зрілості Governance) допоміг окреслити системні перешкоди на шляху впровадження IoT-рішень та сформувані обґрунтовані рекомендації щодо їх подолання.

Методи дослідження. Для реалізації мети і завдань використано комплекс методів, поєднуючих кількісний та якісний інструментарій. На теоретичному рівні застосовано методи аналізу, синтезу та порівняння – здійснено ґрунтовний огляд наукової літератури з питань IoT і бібліотечних інформаційних технологій, що дозволило визначити стан розробленості проблеми та основні концепції. Використано також бібліометричний аналіз: на основі наукометричних баз даних проаналізовано масив публікацій за тематикою дослідження, визначено провідні тенденції та коло ключових дослідників. Ці теоретичні та бібліометричні розвідки забезпечили глибоке розуміння предметної галузі та сформували базис для подальших емпіричних кроків.

На емпіричному рівні дослідження проведено анкетне онлайн-опитування фахівців-практиків бібліотечної сфери України з метою з'ясування поточного стану і готовності бібліотек до впровадження IoT-технологій [Додаток П]. В опитуванні взяли участь 74 респондентів з різноманітних бібліотек України, як загальнодержавного значення, обласних наукових, університетських, спеціалізованих так і публічних (міських і селищних).

Результати опитування унаочнили, що більшість учасників (52,7%) обізнані щодо сутності Інтернету речей, 32% мають поверхневе уявлення, а 14,9% не знайомі з технологією. Це свідчить про початкову стадію проникнення ідей впровадження IoT в українську бібліотечну професійну сферу діяльності.

Загальними виявленими тенденціями стали: низький рівень використання IoT в українських бібліотеках або відсутність подібних ідей та ініціатив (40 бібліотек -54,1% опитуваних). Серед впроваджених IoT-рішень поширення отримали: системи безпеки та відеоспостереження — 37,8%, 28 бібліотек; “розумне” освітлення — 14,9%, 11 бібліотек; системи контролю доступу — 17,6%, 13 бібліотек;

RFID-технології для обліку фондів — 9,5%, 7 бібліотек; розумні стелажі, лічильники відвідувань, технології штрихкодування, “розумна” розетка — 4 бібліотеки.

Результати опитування вказують на високий рівень зацікавленості фахівців в цифровій трансформації бібліотек: 40% опитаних відзначили готовність до впровадження технологій, ще 47% планують реалізацію таких проєктів протягом найближчих трьох років. Найбажанішими напрямками впровадження є: розумне управління бібліотекою, підвищення енергоефективності та безпеки фондів, запровадження інтерактивної навігації для покращення взаємодії з користувачами. Водночас кадрова готовність залишається низькою — лише третина установ мають фахівців, здатних забезпечити технічну інтеграцію, а 43% володіють частковими компетенціями [10].

Важливим аспектом опитування стало з’ясування основних факторів, які учасники вважають перешкодами впровадження IoT: високі фінансові витрати, недостатня кваліфікація кадрів та відсутність спеціалістів, складність технологічного обслуговування, недостатню державну підтримку. Важливими стали відповіді учасників на відкрите питання опитувальника щодо впровадження IoT, які мали обережний оптимістичний або більш критично-реалістичний характер.

Зібрані дані було перевірено на достовірність і піддано статистичній обробці. Зокрема, обчислено інтегральний індекс цифрової спроможності (Digital Capacity Index) для кожної бібліотеки, що дало кількісну оцінку рівня її цифрового розвитку. На основі цього показника здійснено типологізацію бібліотек за рівнем цифрової зрілості, яка виявила групи закладів зі схожими характеристиками та дозволила адресно сформулювати рекомендації для кожної групи. Крім того, застосовано методи сценарного прогнозування та оцінки витрат/вигод (Cost-Benefit Analysis) для різних варіантів модернізації бібліотек. Це допомогло спрогнозувати потенційний економічний і соціальний ефект від інвестицій у IoT-рішення та врахувати ризики й обмеження впровадження новацій.

Таким чином, запропонована методологічна основа забезпечує цілісне вивчення явища на перетині технологічного і соціогуманітарного поля. Комбінація

кількісних підходів з якісною інтерпретацією результатів дала змогу побачити впровадження IoT у бібліотеках одночасно як технічний процес і як соціокультурне явище. Отримані дані та висновки відображають не тільки рівень технологічної модернізованості бібліотек, але й те, як ці інновації впливають на комунікацію з користувачами, доступність знань та організаційну культуру. Такий гуманітарно орієнтований підхід відповідає сутності бібліотеки як соціального інституту: він дозволяє оцінювати цифрові нововведення крізь призму їх відповідності місії бібліотек – слугувати суспільству, накопичувати й передавати знання, забезпечувати діалог між людиною та інформаційним середовищем в умовах цифрової епохи.

Висновки до розділу

1. Концепція технології Інтернету речей, основу якої складає принцип інтеграції в єдину мережу фізичних гетерогенних об'єктів, постає ключовим фактором цифрової трансформації суспільства. Спираючись на результати бібліометричного аналізу потоку наукових публікацій з досліджуваної проблематики, можна з упевненістю стверджувати, що інтерес наукової спільноти до технології Інтернету речей постійно зростає, унаочнюючи її роль у підвищенні продуктивності, швидкодії та комфорту в різних галузях, зокрема й у бібліотечно-інформаційному виробництві. Проте, порівнюючи загальний обсяг наукових робіт, що стосуються Інтернету речей, і тих, що безпосередньо пов'язані з бібліотеками, можна констатувати, що останні складають лише невеликий відсоток. Із 124063 наукових публікацій за період з 01 січня 2010 р. по 31 грудня 2022 р. в базі даних Scopus на тему Інтернету речей знайдено лише 200 публікацій, які стосуються бібліотечної тематики.

2. Науковці і практики Китаю, США, Великої Британії, Індії та Іспанії, публікації яких демонструють високий рівень цитованості, досліджують окремі напрями впровадження технологій Інтернету речей у локальні процеси бібліотечно-інформаційного виробництва, презентують результати реалізації

пілотних бібліотечних проєктів, окреслюють перспективні горизонти наукового пошуку навколо ідеї “Smart”-бібліотеки. Порівняно вузький спектр наукових розвідок українських вчених присвячено аналізу процесів цифровізації бібліотек, в межах яких на теоретичному рівні висвітлюються окремі питання застосування IoT у бібліотеках.

3. Переважна більшість наукових публікацій пов’язана з техніко-технологічними аспектами впровадження IoT у роботу бібліотек. Водночас концепція Інтернету речей в бібліотечно-інформаційному виробництві виходить за межі технічної модернізації та виступає потужною основою для розвитку соціотехнічної парадигми бібліотек та посилення їх соціокомунікаційних функцій. Технологічно-функціональний потенціал IoT автоматизує виробничі процеси бібліотечно-інформаційного виробництва, змінює філософію сервісу бібліотек від традиційного надання стандартизованих послуг до розгортання моделі персоналізованого супроводу користувачів, сприяє формуванню адаптивної, інтелектуальної системи, яка поєднує фізичний простір та об’єкти, фонди, цифрові ресурси, користувачів, бібліотечних фахівців, користувацьку поведінку, технологічні виробничі процеси, автоматизацію, моніторинг, аналітику й прогнозування.

4. Враховуючи те, що предмет представленої наукової розвідки має чітко окреслений соціотехнічний характер та вимагає дослідження техніко-технологічних, інформаційно-комунікаційних, організаційно-функціональних, соціокультурних та людиноцентричних аспектів інтеграції Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво, методологічний апарат дослідження складають: системний підхід — для інтегрованого аналізу впровадження IoT-рішень: від технічних компонентів до організаційних структур і комунікаційних процесів; соціокомунікативний підхід — як інструмент дослідження трансформації комунікаційної взаємодії користувачів; культурологічний підхід — для окреслення ціннісних орієнтирів впровадження IoT в бібліотеках; інституційний підхід — для дослідження інституційних аспектів впровадження IoT в бібліотечно-інформаційне виробництво та визначення рівня цифрової зрілості бібліотек.

Методологію дослідження підтримано методами аналізу, синтезу та порівняння, бібліометричним аналізом, емпіричним дослідженням в форматі анкетного онлайн-опитування фахівців-практиків бібліотечної сфери України.

5. Результати опитування засвідчили початковий етап інтеграції технологій Інтернету речей в бібліотеках України та чітке усвідомлення професійною бібліотечною спільнотою користі від впровадження IoT у різноманітні процеси бібліотечно-інформаційного виробництва. Разом з тим виявлені скептичні прогнози у зв'язку з низькою обізнаністю бібліотечних кадрів щодо IoT та відсутністю достатнього фінансування й підтримки на різних рівнях, зокрема на державному. Це підкреслює нагальність розробки комплексної стратегії впровадження IoT у бібліотечно-інформаційне виробництво.

РОЗДІЛ 2.

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІoT В БІБЛІОТЕЧНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО

2.1. Практичний досвід впровадження технологій Інтернету речей в бібліотеках України та зарубіжних країн

Підсумовуючи теоретичні засади впровадження технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво доцільно перейти до аналізу вже реалізованих практик. Аналіз емпіричних кейсів дозволить виявити гуманітарну логіку технологічних інновацій та показати де і як автоматизовані «речі» беруть на себе рутину, звільняючи бібліотечні кадри для більш ефективної взаємодії з користувачами та формуючи більш персоніфіковану сервісну складову бібліотечно-інформаційного виробництва.

У світовому контексті склався умовний «канон» бібліотечного ІoT: ядро на основі RFID, мікролокаційні сервіси та інфраструктура збору/візуалізації даних і логістичні рішення (роботизовані сортери, конвеєри).

Системи радіочастотної ідентифікації (RFID) стали одним із базових інструментів «розумної» бібліотеки, оскільки забезпечують автоматизацію ключових сервісів – самостійної видачі/повернення документів, інвентаризації, протикрадіжного контролю, інвентаризації та оперативного сортування фондів. Один із найрепрезентативніших кейсів їх реалізації є досвід Національної бібліотечної ради Сінгапуру (NLB): упродовж 2000-х–2010-х рр. RFID інтегровано як частину ширшої сервісної інновації, що поєднує самообслуговування, переосмислення ролей персоналу та клієнтоорієнтовану організаційну культуру. Це дало змогу істотно скоротити операційні витрати і спрямувати зусилля працівників на консультування й освітню роботу з користувачами [9].

В аспекті збереження історичних та рідкісних фондів показовим є досвід Ватиканської апостольської бібліотеки: RFID розгорнуто в рамках так званого

«проєкту безпеки» (Pergamon) для інвентаризації й контролю доступу; зафіксовано як технологічну інтеграцію з OPAC/форматами опису, так і конкретні етапи впровадження, починаючи з 2002 р. (офіційні слайди CERL та річний звіт CENL). Для представленого дослідження це принципово: RFID тут не просто «швидкий сервіс», а інфраструктура збереження культурної спадщини, яка мінімізує людські помилки під час інвентаризацій та підвищує надійність регламентованого доступу до цінних колекцій [10].

Дотичним є досвід реалізації європейського проєкту MUSECORR в інститутах культурної спадщини, який охопив Данську королівську бібліотеку. У межах проєкту було випробувано AirCorr — систему безперервного контролю та аналітики корозійної активності повітря. Під час експерименту протягом 5 місяців в сховищах рукописів використовувались сенсори довготривалого моніторингу мікроклімату [128]. У цьому кейсі IoT було застосовано як оперативний інструмент оцінки факторів ризику та подальшого превентивного захисту документальної спадщини бібліотеки, на заміну періодичному пасивному відбору проб повітря.

Окремий кластер прикладів стосується мікролокаційних сервісів на основі BLE-маячків (beacons). У Публічній бібліотеці округу Ориндж (Орландо, США) систему BlueBeam запущено 1 листопада 2014 р. для «посилення досвіду відвідувачів» через контекстні сповіщення в просторі бібліотеки; кейс добре задокументований у професійному виданні RFID Journal і належить до ранніх, але показових «легких» IoT-впроваджень у бібліотеках [11]. Для гуманітарного погляду важливо, що йдеться не про «технічний трюк», а про ненав'язливу комунікацію з людиною в моменті її перебування у певній локації, що знижує інформаційний шум і допомагає швидко зорієнтуватися серед подій і сервісів.

Скандинавські публічні бібліотеки демонструють інший вимір «видимого» IoT – громадську візуалізацію операційних даних. У Пасцілянській бібліотеці (мережа HelMet, Гельсінкі) реалізовано статус-дисплей, який на публічних екранах показує агреговану інформацію (бронювання комп'ютерів, кількість відвідувачів, події, години роботи, погоду тощо) – пілот, результати якого використано для наступних

рішень у Центральній бібліотеці Ооді. Мета – зробити використання простору більш прозорим і зрозумілим для різних груп відвідувачів і співробітників [12]. Інший яскравий приклад, реалізований в Ооді – це автоматизовані системи повернення та сортування поєднані з «колаборативною» робототехнікою для внутрішньої логістики. Користувач кладе книгу на конвеєр – далі автоматизована лінія й мобільні роботи беруть на себе переміщення та підготовку примірників до повернення у фонд, що звільняє персонал для фронт-офісної взаємодії (техніко-прикладний опис доступний у відкритих матеріалах Futurice та виробничому кейсі Universal Robots) [13]. Фактично, це приклад гуманітарно орієнтованої модернізації «прихованих» внутрішніх процесів бібліотеки, який дозволяє зменшити черги й зробити користування простором більш зручним та приємним для відвідувачів.

У бібліотеці Сінхгадського інституту технологій та науки (Пуна, Індія) впроваджено систему інтелектуального управління з використанням RFID-міток. Два модулі системи орієнтовані: перший — на відстеження видачі та повернення книг; другий — на забезпечення правильного місця розташування книг у відділах та на полицях за допомогою голосових оповіщень користувачів. Крім фізичної реалізації (RFID-мітки, зчитувачі, датчики, кіоск самообслуговування, захисні ворота) для системи Shelf Smart реалізовано вебзастосунок, який відображає інформацію про книги, керує записами про видачу та повернення, нагадує про заборгованість на електронну пошту [137]. У процесі реалізації проекту були виявлені ризики помилкового зчитування RFID, констатована необхідність дотримання високих вимог до інфраструктури (датчики, мережа, обладнання), точного налаштування радіохвиль для уникнення помилок та ін.

Бібліотека Каліфорнійського університету в Сан-Дієго впровадила IoT-систему для оптимізації управління ресурсами та підвищення ефективності взаємодії з користувачами. У бібліотеці використовуються датчики та IoT-пристрої, які дозволяють в режимі реального часу збирати дані про наповненість різних зон, температуру повітря, рівень шуму. Використання IoT підвищує операційну

ефективність бібліотеки та рівень задоволеності обслуговування користувачів [138, С. 211].

Впровадження технологій Інтернету речей у бібліотеці Ньюмена у Вірджинському політехнічному інституті в межах проєкту «Smart Commons» зосереджено навколо збору даних про заповнюваність різних приміщень та зон, взаємодії відвідувачів у бібліотечному просторі, особливості переміщення меблів та ін. Моніторинг та аналіз даних від різних IoT компонентів, включаючи акселерометри, датчики руху, Bluetooth-маяки, лягають в основу прийняття рішень щодо проєктування бібліотечного простору для покращення навчальних середовищ, налагодження взаємодії користувачів, персоналізації їхнього досвіду [139]. Потенціал IoT в даному кейсі акцентував можливості виходу бібліотеки за межі класичних “пасивних просторів” та розгортання користувацько-орієнтованої моделі.

Досвід бібліотек університетів Пакистану продемонстрував ефективність впровадження пристроїв на основі IoT, таких як “розумні” кондиціонери, автоматична протипожежна сигналізація, “розумні” захисні двері, “розумні” машини для дезінфекції рук. Крім того, апробацію в університетських бібліотеках пройшли й послуги на основі IoT – самообслуговування користувачів при виписці та реєстрації книг через систему, автоматичне сповіщення про виписку, видачу документів, розпізнання картки читача та використання міток RFID з безпековою метою [136]. Аналіз досвіду впровадження IoT виявив одночасно і масштаб застосування і проблемні моменти, зокрема в аспекті бюджетування, відсутності політик та стратегій, нестачі технічного персоналу.

Для повноти міжнародної картини доцільно згадати й досвід університету Гонконгу (HKU): ще 2008–2011 рр. ці бібліотеки провели одну з найбільших у світі університетських RFID-інсталяцій (понад 1,8 млн ідентифікованих одиниць), поєднавши RFID із самообслуговуванням, швидкими інвентаризаціями та звітністю; у відкритому доступі – презентації, прес-релізи й хроніка «століття бібліотек HKU» з точними оцінками масштабів і показників ефективності [19; 20; 21]. Це важливо для нашого висновку: «канон» бібліотечного IoT формується не лише як набір

технологій (RFID-ядро, сенсори/маячки, аналітика та візуалізація), а як сервісна парадигма, де технологія «звільняє» людську увагу для змістовної взаємодії – від консультацій і просвіти до підтримки спільнот у кризових ситуаціях.

Поодинокі українські практики засвідчують рух до смарт-інфраструктури у двох напрямках: по-перше, впроваджені RFID-рішення в академічних бібліотеках і по-друге, «розумні» простори як відповідь на виклики безпеки та безперервності навчання. Так, Науково-технічна бібліотека НТУ «ХП» прямо декларує експлуатацію комплексної інформаційної системи з елементами контролю доступу, відеонагляду та автоматизацією бібліотечних процесів на основі RFID – це і про безпеку, і про оптимізацію щоденних процедур обслуговування фондів та користувачів [14]. Також, у відкритому електронному каталозі Бібліотеки Українського католицького університету (Коха) на рівні примірника явно відображено поле «RFID-мітка», що є верифікованим свідченням штатного використання RFID у бібліотечній логістиці (див. типовий запис) [15].

Окремої уваги потребує екосистема Науково-технічної бібліотеки КПІ ім. Ігоря Сікорського. На рівні стратегічних документів бібліотеки закладено вектор на інноваційну, безпечну і доступну інфраструктуру, де RFID розглядається як елемент модернізації сервісів і управління колекцією; сам документ доступний у відкритому доступі [16].

Водночас, новий феномен українського контексту – смарт-укриття CLUST Space у підвальних приміщеннях бібліотеки КПІ, яке в «мирному» режимі працює як коворкінг і читальна зала, а під час тривоги трансформується в укриття на 500 осіб; медіарепортажі докладно описують «розумні» функції простору (інженерні мережі, відеонагляд, мультифункціональність зон), підкреслюючи гуманітарний сенс IoT-рішень як забезпечення безперервності навчання та спільнотної взаємодії навіть у кризових умовах. [17]. Офіційні публікації бібліотеки також фіксують запуск і масштабування проекту CLUST Space, що є важливим свідченням інституційної спроможності таких інновацій [18].

Узагальнюючи, бібліотечні приклади IoT – як зарубіжні, так і українські – демонструють ту саму гуманітарну логіку: технологія працює там і так, де вона непомітно економить час та увагу людини, підвищує відчуття безпеки й доступності знання, а також забезпечує сталість сервісу (від повсякденної видачі до екстрених режимів простору) [12; 13; 17]. Запровадження технологій Інтернету речей в бібліотеках, особливо у співпраці з можливостями штучного інтелекту, відкриває перед бібліотеками перспективи глибокої трансформації їх діяльності. Наприклад, автоматизація процесів ідентифікації та відслідковування місцеположення книг в приміщеннях бібліотеки за допомогою Інтернету речей може значно спростити роботу бібліотекарів, зменшити частку рутинних технологічних операцій та відкрити нові можливості для покращення обслуговування користувачів. Інтеграція технологій Інтернету речей допомагає бібліотекам у дослідженні потреб користувачів, адаптації сервісів під конкретних користувачів та в розвитку персоналізованих рекомендацій. Це, у свою чергу, підвищує загальну ефективність бібліотечних служб та покращує користувацький досвід. Тому, важливо не лише продовжувати дослідження можливостей Інтернету речей у бібліотечній сфері, але й активно заохочувати науковців до глибокого вивчення цього питання, розглядаючи його як ключ до інноваційного розвитку бібліотечних послуг у майбутньому.

Аналіз кейсів впровадження IoT в бібліотеках дає підстави стверджувати, що переважна більшість проєктів базується на традиційній технології RFID та розвивається в напрямі застосування сенсорних систем для автоматизації окремих процесів та отримання аналітики даних. Проте радикальні інновації відбуваються в бібліотеках, які інтегрують IoT з технологіями штучного інтелекту, імерсивними технологіями та ін. Використання накопичених завдяки пристроям Інтернету речей даних стає ключовою складовою сучасних бібліотечних сервісів, оснащених штучним інтелектом. Інтеграція Інтернету речей дозволяє збирати деталізовану інформацію про поведінку та вподобання користувачів, забезпечуючи обробку великих обсягів даних. Ці дані можна використовувати для тренування алгоритмів штучного інтелекту, які в свою чергу сприяють удосконаленню персональних

рекомендацій, автоматизації робочих процесів і забезпеченню більш інтуїтивно орієнтованого користувацького досвіду. Віддалене керування, моніторинг користувацької активності, взаємодія з різними системами стають більш гнучкими та інтелектуальними. Така синергія між Інтернетом речей та штучним інтелектом відкриває нові горизонти для бібліотечно-інформаційного виробництва, роблячи його більш інтегрованим, інноваційним та зорієнтованим на задоволення різноманітних потреб користувачів, зокрема інформаційних, освітніх, дозвіллевих, соціокультурних, інклюзивних.

Аналіз практичного досвіду застосування Інтернету речей у бібліотечно-інформаційному виробництві дозволяє констатувати ряд переваг, серед яких:

- оптимізація внутрішніх робочих процесів призводить до збільшення продуктивності співробітників через інтелектуальну автоматизацію;
- автоматизація процесів обслуговування користувачів, значно підвищує швидкість, якість, комфортність та повноту реалізації бібліотечно-інформаційного сервісу;
- персоналізація сервісів для користувачів забезпечує більш релевантне та цілеспрямоване задоволення потреб;
- збільшення доступності ресурсів та просторів, застосування асистивних IoT пристроїв дозволяє бібліотекам втілити принципи безбар'єрності та інклюзивності для користувачів з інвалідністю або різними фізичними, когнітивними, сенсорними та психологічними порушеннями;
- ефективне відстеження та управління документними ресурсами бібліотеки, включаючи каталогізацію, інвентаризацію, оптимізацію комплектування поповнення, збереженості та безпеки фондів оптимізує операційну діяльність бібліотечно-інформаційного виробництва;
- моніторинг, аналітика та прогнозування даних щодо споживання ресурсів (енергозбереження, опалення, водопостачання, кондиціонування та ін.), планування експлуатаційного навантаження матеріально-технічної бази дають

можливість реалізувати інтелектуальне керування інфраструктурою бібліотеки, знижувати витрати без втрати комфорту зі сторони бібліотечних кадрів та користувачів;

- застосування сучасних технологій керування доступом та відеоспостереження сприяє підвищенню безпеки фондів та бібліотечних просторів;
- інтеграція інфраструктури бібліотеки з іншими системами забезпечує глибшу взаємодію з освітніми та науковими платформами;
- забезпечення віддаленого доступу до бібліотечних ресурсів сприяє підтримці дистанційного навчання та досліджень;
- застосування інноваційних IoT інструментів для спільного навчання та досліджень призводить до втілення нових форм освітніх взаємодій та колаборацій на основі створення інтерактивних середовищ;
- впровадження IoT-рішень у межах цифровізації бібліотечно-інформаційної сфери та розгортання “розумних” бібліотек сприяє їх інтеграції в цифрову інфраструктуру міст, потенційно наближає до концепції “розумних” просторів.

Аналіз наукових публікацій та практичних кейсів дозволяє виділити наступні напрями впровадження IoT в бібліотечно-інформаційне виробництво:

1. Управління фондами бібліотек шляхом застосування: RFID-технологій у процесах комплектування, автоматизації обліку та інвентаризації; сенсорів, датчиків та систем контролю логістики руху документів; систем автоматичного сортування та транспортування книг тощо.

2. Збереження та безпека фондів на основі впровадження сенсорів та систем моніторингу і контролю мікроклімату (температури, вологості, освітлення, запиленості повітря, корозійності конструкцій та ін.), раннього аварійного реагування та сповіщення (у разі задимлення, загоряння, протікання води, фіксації вібрацій або руйнувань будівлі); несанкціонованого доступу до окремих зон та сховищ; трекінгу переміщення та фіксації історії доступу до окремого об'єкту (наприклад, рідкісного видання).

3. Обслуговування користувачів на основі використання автоматизованих пристроїв та систем видачі й повернення документів (в тому числі self-service кіосків); навігаційних датчиків (Bluetooth-beacons), систем управління простором бібліотеки та персоналізованих рекомендацій щодо зонування, бронювання місць для індивідуальної та групової роботи, оптимізації користування коворкінг-зонами (наприклад, “розумних” полиць, “розумних” читальних залів), асистивних IoT-пристроїв (зокрема, “розумних” терміналів з адаптивним інтерфейсом, пристроїв голосового керування бібліотечними сервісами, тактильними навігаційними системами з датчиками) тощо.

4. Оптимізація рутинних процесів бібліотечно-інформаційного виробництва через створення “розумних” робочих місць — інтегрованих робочих зон, оснащених IoT-пристроями, сенсорами та цифровими сервісами для оптимізації взаємодії бібліотечних працівників з матеріально-технічною базою (“розумне” освітлення, клімат-контроль, регульовані меблі, контроль обладнання та ін.); з цифровими ресурсами (електронними каталогами, цифровими бібліотеками, базами даних); з інструментами колаборативної роботи (наприклад, спільними екранами, інтерактивними панелями, медіаприладами, бездротовим обміном контентом); з асистивними технологіями; з системами аналітики поведінкових даних про користувачів, даних про присутність та зайнятість місць, відстеження переміщення документів, меблів, техніки та ін.

5. Підвищення ресурсоефективності та розвиток проактивного управління бібліотекою шляхом застосування IoT-систем для моніторингу в режимі реального часу та автоматичного регулювання споживання ресурсів (електроенергії, води, витратних матеріалів тощо); а також для прогнозної аналітики з метою запобігання витрат, техніко-технологічних збоїв, аварійних ситуацій; вдосконалення сервісної системи персоналізованого та групового обслуговування користувачів; прогнозування попиту на послуги та ресурси бібліотеки; оптимізації закупівель та поповнення фондів.

2.2. Аналіз мережевих моделей і протоколів обміну даними для IoT-середовища бібліотеки

Теоретичний огляд концепції IoT та його потенціалу в контексті бібліотечно-інформаційного виробництва висвітлює важливість подальшого практичного аналізу мережевих моделей, комунікаційних протоколів та інтерфейсів, які мають забезпечити ефективну інтеграцію IoT-технологій у бібліотечно-інформаційне виробництво.

Комунікаційний протокол – це обумовлені наперед правила передачі інформації між двома пристроями комунікаційної системи. Протокол визначає правила, синтаксис, семантику, синхронізацію комунікації та можливі методи виявлення та виправлення помилок [34]. Інтерфейс — сукупність засобів, методів і правил взаємодії (керування, контролю, тощо) між елементами системи [35].

Вибір оптимальної моделі та відповідних правил обміну даними є критично важливим для успішного впровадження IoT у бібліотечні процеси. Оскільки IoT-системи у бібліотеках повинні ефективно працювати з великою кількістю пристроїв і забезпечувати безперебійне передавання даних, саме вдалий вибір мережевої моделі та протоколів визначає, наскільки інтеграція IoT буде ефективною. Виявлення та аналіз мережевих моделей і протоколів, що адаптовані до специфічних вимог бібліотечної сфери, зокрема щодо енергоефективності та масштабованості, проведені за допомогою методу бібліометричного аналізу, дозволяють сформулювати рекомендації щодо оптимального вибору та подальшого застосування цих технологій у бібліотечно-інформаційних процесах. Отже, є доцільним провести детальний аналіз існуючих моделей та комунікаційних протоколів, які можуть бути застосовані для інтеграції IoT у бібліотеках, з метою виявлення найбільш перспективних та ефективних рішень.

Метою створення різних мережевих моделей є узагальнення та стандартизація принципів функціонування мережевих пристроїв та протоколів у цих системах. Це дає можливість спростити процес розробки й впровадження мережевих технологій,

структурувати топологію системи та забезпечити надійну взаємодію між компонентами мережі [36].

Базовою моделлю мережевого обміну даними на цей час є модель OSI (Open Systems Interconnection), яку було розроблено Міжнародною організацією стандартизації (ISO) наприкінці 1970-х рр. Тоді ж ISO започаткувала програму розробки загальних стандартів та методів мережевого зв'язку, і в 1984 р. архітектура моделі OSI була офіційно прийнята як міжнародний стандарт. В моделі OSI взаємодія поділяється на сім рівнів: прикладний, представницький, сеансовий, транспортний, мережевий, каналний і фізичний. Кожен рівень відповідає за конкретний аспект взаємодії мережевих пристроїв. Модель OSI охоплює лише системні засоби взаємодії, які реалізуються операційною системою, системними утилітами та апаратними засобами. Взаємодія додатків кінцевих користувачів до цієї моделі не входить. Додатки реалізують свої протоколи взаємодії, звертаючись до системних засобів. Коли додаток надсилає запит до прикладного рівня, як у випадку із файловою службою, програмне забезпечення прикладного рівня формує повідомлення у стандартному форматі. Зазвичай повідомлення складається із заголовка та поля даних. Заголовок містить службову інформацію, яку необхідно передати прикладному рівню адресата, щоб визначити подальші дії. Проте, щоб доставити це повідомлення, необхідно вирішити багато задач, які виконують нижчі рівні.

Після формування повідомлення прикладний рівень передає його представницькому рівню. Протокол представницького рівня, використовуючи інформацію із заголовка прикладного рівня, додає власний заголовок із необхідними вказівками для протоколу представницького рівня адресата. Отримане повідомлення передається далі на сеансовий рівень, який також додає свій заголовок, і так далі. В деяких протоколах службова інформація може бути додана як у вигляді заголовка на початку, так і у вигляді суфіксу наприкінці повідомлення. Нарешті, повідомлення досягає фізичного рівня, який передає його лініями зв'язку адресату. До цього моменту повідомлення містить заголовки всіх рівнів. Коли воно досягає адресата,

фізичний рівень приймає його та передає на вищі рівні, де кожен рівень аналізує й обробляє відповідний заголовок, виконуючи свої функції, після чого передає повідомлення на рівень вище [37]. Цей процес схематично зображено на рисунку 19 [Додаток В].

Хоча модель OSI широко використовується для ілюстрації принципів мережевої взаємодії, на практиці значно частіше застосовується модель TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Ця модель, на відміну від OSI, має іншу структуру і використовується як основа для функціонування Інтернету. Вона була створена в 1970-х рр. у рамках проекту ARPANET, що здійснювався під егідою Пентагону США. У 1974 р. В. Серф і Б. Кан опублікували статтю «Протокол для міжмережевого з'єднання пакетних мереж», в якій описано принципи та структуру мережевої моделі TCP/IP. 1 січня 1983 р. ARPANet перейшов на TCP/IP, а сам ARPANet припинив своє існування у 1990 р. З часом Інтернет еволюціонував з коренів ARPANet, а TCP/IP продовжував розвиватися для задоволення змінних потреб Інтернету.

TCP/IP – це модель для здійснення адресації та контролю обміну даними між обчислювальними пристроями, об'єднаними в мережу. Не має значення, чи складають вони частину однієї і тієї ж мережі або підключені до окремих мереж. Не грає ролі і те, що один з них може бути персональним комп'ютером, а інший мікроконтролером чи сервером. TCP/IP – це незалежний від платформи стандарт, який дозволяє здійснювати комунікацію між різнорідними пристроями, операційними системами і мережами [38]. Це модель, яка керує локальними та глобальними мережами, і значною мірою завдяки універсальності та прозорості мережева модель TCP/IP набула статус найбільш розповсюдженого міжнародного стандарту адресації і наразі є основою сучасних мережевих комунікацій, включаючи Інтернет. Вона складається з чотирьох основних рівнів, кожен з яких має специфічні функції, що забезпечують надійну взаємодію між мережевими пристроями, які описано в таблиці 19.

Рівні та ключові функції моделі TCP/IP

Рівень	Ключові функції	Особливості
Фізичний	Відповідає за передачу даних через фізичні мережі, підтримуючи різні технології, такі як Ethernet, Wi-Fi, PPP (Point-to-Point Protocol) та інші	Забезпечує взаємодію з фізичними середовищами передачі, зберігаючи гнучкість у виборі технологій підключення
Мережевий	Основний протокол IP (Internet Protocol) відповідає за адресацію, сегментацію, маршрутизацію та доставку даних між різними мережами	IP не гарантує доставку даних, але забезпечує адресацію та ефективно керує маршрутизацією, що є критичним для роботи великих мереж, таких як Інтернет
Транспортний	Протоколи TCP (Transmission Control Protocol) і UDP (User Datagram Protocol) керують передачею даних, забезпечуючи відповідно надійність або швидкість	TCP забезпечує контроль над передачею, гарантує цілісність даних, тоді як UDP призначений для швидких, але менш надійних передач, таких як мультимедійні потоки
Прикладний	Забезпечує взаємодію кінцевих користувачів через протоколи, такі як HTTP (Hypertext Transfer Protocol), FTP (File Transfer Protocol), SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) та ін.	Орієнтований на роботу з користувацькими додатками, підтримуючи широкий спектр сервісів.

В авторській публікації [36] розглянуто доцільність використання моделі TCP/IP у дослідженнях завдяки її здатності відповідати необхідному рівню абстракції при розробці архітектури апаратних рішень для IoT. Стаття підкреслює, що кожен рівень цієї моделі може використовувати специфічні протоколи, що спрощує оптимізацію процесів розробки систем. Таблиця 20, наведена в статті, демонструє класифікацію найпоширеніших IoT-протоколів за рівнями TCP/IP, що допомагає визначити відповідні апаратні, програмні та комплексні засоби.

Таблиця 20

Відповідність протоколів IoT до рівнів моделі TCP/IP

Рівень моделі TCP/IP	Протоколи IoT
Прикладний	HTTPS, XMPP, CoAP, MQTT, AMQP
Транспортний	UDP, TCP
Мережевий	IPv4, IPv6, 6LoWPAN, RPL
Фізичний	IEEE 802.15.4, IEEE 802.11, IEEE 802.3, LPWAN, BLE, LTE, NFC, PLC, RFID, Z-Wave, ZigBee

Для аналізу впливовості протоколів на розвиток технологій IoT в бібліотечному середовищі та виявлення загальних трендів було проведено бібліометричний аналіз із застосуванням бази даних Scopus. Дослідження охопило період з 2018 по 2022 рр., протягом якого протоколи IoT були згруповані за рівнями моделі TCP/IP та відсортовані за кількістю наукових публікацій. Результати цього аналізу відображено в таблиці 21, що дозволяє ідентифікувати найперспективніші протоколи та їхню актуальність для розвитку бібліотечних IoT-технологій.

Таблиця 21

Кількість публікацій за тематикою протоколів IoT на рівнях моделі TCP/IP за період 2018-2022 рр. (за даними Scopus)

Протокол	Кількість публікацій за період з 2018 по 2022 роки включно					
	2018	2019	2020	2021	2022	Загалом за період
Фізичний рівень моделі TCP/IP						
RFID	512	567	566	611	625	2881
IEEE 802.11	266	318	335	356	372	1647
LPWAN	186	245	261	270	280	1242
ZigBee	217	230	242	223	261	1173
LTE	242	253	195	175	173	1038
BLE	188	165	156	208	192	909
IEEE 802.15.4	145	143	121	116	83	608
IEEE 802.3	84	84	68	75	64	375
NFC	54	49	50	49	53	255
PLC	22	29	17	21	27	116
Z-Wave	12	9	14	11	17	63
Мережевий рівень моделі TCP/IP						
RPL	123	138	191	179	183	814
IPv6	149	161	169	125	126	730
6LoWPAN	107	111	100	73	73	464
IPv4	18	31	24	17	16	106
Транспортний рівень моделі TCP/IP						
TCP	118	151	112	139	129	649
UDP	40	44	46	50	40	220
Прикладний рівень моделі TCP/IP						
MQTT	301	371	345	437	442	1896
CoAP	166	152	146	116	115	695
HTTPS	20	31	42	58	70	221
AMQP	18	20	22	27	20	107
XMPP	21	17	16	20	10	84

У результаті проведеного бібліометричного аналізу виділено кілька протоколів, які активно досліджуються в контексті IoT, зокрема у бібліотечному середовищі. На фізичному рівні найбільш значущими є протоколи RFID, IEEE 802.11 (Wi-Fi), LPWAN та ZigBee. В бібліотеках найбільшого поширення набули RFID та Wi-Fi, завдяки їхній здатності забезпечувати ефективну ідентифікацію та бездротовий зв'язок.

На мережевому рівні домінують протоколи IPv6 та RPL. RPL, побудований на основі IPv6, призначений для енергоефективних мереж з нестабільними каналами зв'язку. Популярність IPv6 зумовлена його здатністю адресувати величезну кількість пристроїв (до $3,4 \times 10^{38}$ адрес), що значно перевищує можливості IPv4, який має лише 2^{32} унікальних адрес. Враховуючи поточний дефіцит 32-бітних IP-адрес, використання IPv6 у IoT набуває дедалі більшого значення.

На транспортному рівні перевагу надають протоколу TCP, який забезпечує надійну доставку даних, що є критично важливим для багатьох застосувань IoT. Проте, UDP також широко використовується в сценаріях, де втрати даних не мають суттєвого значення, наприклад, для синхронізації часу, ширококомовних повідомлень і передачі потокових даних.

На прикладному рівні значну популярність здобули протоколи MQTT та CoAP. MQTT виділяється своїм низьким навантаженням на ресурси, можливістю шифрування та керування доставкою даних. Він забезпечує ефективний обмін даними між пристроями навіть за умов низької пропускну здатності мережі. CoAP, навпаки, використовує клієнт-серверну архітектуру, яка забезпечує безпосередній зв'язок між двома вузлами мережі. Проте, через використання UDP CoAP не гарантує надійної доставки, тому його зазвичай застосовують для обміну некритичною інформацією [36].

Аналіз моделі TCP/IP, яка є фундаментальною для сучасних мережевих комунікацій, виявляє її значущість у забезпеченні базових принципів взаємодії між мережевими пристроями. Однак для дослідження впровадження технологій IoT у

бібліотечно-інформаційне виробництво, необхідно звернути увагу на специфічні моделі стеку IoT, які краще відповідають особливим потребам таких систем.

Історія розвитку стеку IoT тісно пов'язана з появою нових вимог до масштабованості, енергоефективності та безпеки, що виникають при підключенні великої кількості гетерогенних пристроїв у мережі. Протягом останніх десятиліть IoT еволюціонував від концептуальної ідеї до масштабної технології, яка об'єднує фізичні об'єкти з цифровим світом, використовуючи нові комунікаційні протоколи, які були розроблені для роботи в умовах обмежених ресурсів і низького енергоспоживання. Зважаючи на специфіку бібліотечно-інформаційного виробництва, яке потребує надійних, безпечних і масштабованих рішень для автоматизації та управління ресурсами, моделі стеку IoT стають ключовим елементом для ефективної інтеграції IoT-технологій. Вибір відповідної архітектури, яка здатна забезпечити необхідну гнучкість і сумісність між різними пристроями та системами, є вирішальним для успішного впровадження IoT у бібліотечному середовищі.

Розвиток протоколів для IoT розпочався з появою бездротових технологій та вбудованих систем. Протягом 2000-х років були розроблені та впроваджені специфічні протоколи і технології для забезпечення зв'язку у великих мережах IoT. Сучасні протоколи й архітектури IoT еволюціонували з урахуванням потреб у мінімізації енергоспоживання, підтримці великої кількості пристроїв та забезпеченні безпеки [36]. Насьогодні існує кілька моделей стеку IoT з різними рівнями абстракції, але для можливості безпосереднього порівняння функцій та можливостей на всіх рівнях моделей обрано п'ятишарову абстракцію стеку IoT.

П'ятишаровий стек IoT представляє собою багаторівневу архітектуру, яка забезпечує ефективну взаємодію між різними компонентами IoT. Фізичний шар виконує базові функції передачі даних через різні фізичні середовища, включаючи як дротові, так і бездротові мережі. Він керує модуляцією сигналів, забезпечуючи надійний фізичний зв'язок між пристроями. Канальний шар забезпечує коректність передачі даних між сусідніми вузлами, контролюючи доступ до середовища

передачі та виправляючи помилки, що можуть виникнути під час передачі даних. На цьому рівні особливу роль відіграють механізми контролю доступу до середовища та керування логічними зв'язками, що відповідають за зменшення втрат даних та збільшення ефективності комунікації.

Мережевий шар відповідає за маршрутизацію даних між різними мережами, що особливо важливо в умовах IoT, де велика кількість пристроїв взаємодіє між собою в різних мережах. Він забезпечує передачу пакетів даних та їхню маршрутизацію на основі унікальних адрес для кожного вузла в мережі. Транспортний шар займається забезпеченням надійності передачі даних між відправником і отримувачем, включаючи розділення великих повідомлень на менші частини, їхню фрагментацію та збирання, а також шифрування для захисту даних під час передачі. Цей шар також забезпечує взаємодію між різними пристроями у форматі M2M (Machine-to-Machine), що дозволяє автоматизувати процеси без втручання людини.

Прикладний шар надає інтерфейси для взаємодії кінцевих користувачів та додатків із системою. Він відповідає за обробку даних, які генеруються додатками, та забезпечення інтерфейсу для розробників програмного забезпечення. Цей шар є найбільш орієнтованим на користувача та забезпечує доступ до функціональності IoT-системи, реалізуючи її інтерактивний потенціал. Таким чином, п'ятишаровий стек IoT забезпечує надійну та ефективну взаємодію між різними пристроями та системами в мережі IoT, дозволяючи їм взаємодіяти на рівні M2M та створювати нові можливості для автоматизації та оптимізації процесів [39]. Порівняльну таблицю структурної відповідності функцій на всіх рівнях моделі OSI, TCP/IP і шарах стеку IoT наведено на рисунку 20.

Обґрунтування вибору концепції стеку IoT як основи для дослідження базується на специфічних вимогах обладнання та протоколів, які часто використовуються в Інтернеті речей. Багато пристроїв IoT, зокрема датчики, RFID-мітки, пристрої з обмеженими енергетичними ресурсами, просто не мають можливості підтримувати стандарт TCP/IP через його вимоги до обчислювальної

потужності та енергоспоживання. Наприклад, пристрої на основі протоколу LoRaWAN або Zigbee використовують спеціальні енергозберігаючі комунікаційні протоколи, які забезпечують ефективну передачу даних на великі відстані, але не передбачають підтримки повноцінної мережевої адресації, яка властива TCP/IP.



Рис. 20. Процес мережевої взаємодії відповідно рівням моделі OSI, моделі TCP/IP та шарам стеку IoT

Більшість таких пристроїв орієнтовані на взаємодію в умовах обмеженого середовища передачі даних, де головним завданням є не стільки забезпечення прямого підключення до Інтернету, скільки ефективно збирання, обробка та передача даних на локальні шлюзи або хмарні платформи для подальшого аналізу. У цих умовах стек IoT виявляється більш гнучким і адаптованим, оскільки він враховує специфічні вимоги до енергозбереження, масштабу мережі та особливостей передачі даних.

Використання концепції стеку IoT дозволяє реалізувати гнучкіші моделі взаємодії між пристроями, які не залежать від традиційних мережевих технологій і можуть бути інтегровані в будь-яке середовище передачі даних. Наприклад, протоколи, такі як CoAP (Constrained Application Protocol) і MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), призначені для роботи в умовах обмежених ресурсів, підтримують передачу даних між пристроями без необхідності в повноцінній IP-адресації, що робить їх ідеальними для IoT-мереж з низьким енергоспоживанням.

Загалом, часткове використання TCP/IP в дослідженні дозволяє забезпечити сумісність з існуючими Інтернет-технологіями, водночас оптимізуючи комунікаційні процеси для специфічних потреб IoT-систем. Це підхід, що поєднує переваги традиційних мережевих моделей із можливостями, які відкриває сучасний стек IoT для підтримки масштабованих, безпечних та ефективних мереж IoT у бібліотечно-інформаційному виробництві.

Кожний з шарів стеку IoT використовує комунікаційні протоколи, які забезпечують оптимальну взаємодію між пристроями в умовах обмежених ресурсів, таких як низька пропускна здатність, обмежена енергетична потужність, або специфічні вимоги до безпеки. Ці протоколи призначені для підтримки гнучкості і масштабованості мережі, дозволяючи ефективно обробляти і передавати дані навіть в складних і гетерогенних середовищах. Вони також адаптовані для мінімізації затримок і забезпечення надійності зв'язку між великим числом пристроїв.

Застосування можливостей найбільш розповсюджених протоколів наведено у відповідності до кожного рівня стеку IoT на рисунку 21.

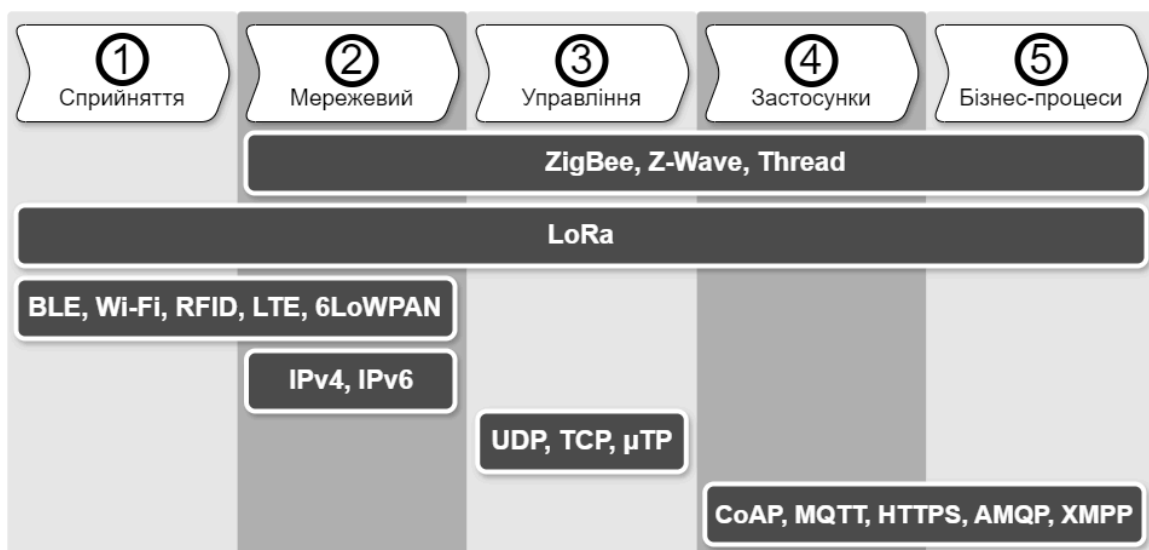


Рис. 21. Відповідність найбільш поширених комунікаційних протоколів до шарів п'ятишарового стеку IoT.

Комунікаційні протоколи, які використовуються на різних шарах стеку IoT, відповідають специфічним вимогам кожного з них і забезпечують оптимальну

взаємодію пристроїв в умовах обмежених ресурсів. Деякі протоколи можуть функціонувати на декількох шарах одночасно, демонструючи свою універсальність у різних контекстах. Наприклад, ZigBee, Z-Wave, Thread які використовуються одночасно на чотирьох шарах стеку: мережевому, управління, застосунків, а також бізнес-процесів. Ці особливості забезпечують ефективну комунікацію в малопотужних мережах. Також протокол LoRa, який задіяний окрім зазначених вище чотирьох шарах, задіяний на каналному рівні моделі OSI та фізичному рівні моделі TCP/IP, відповідаючи шару сприйняття стеку IoT. Така реалізація надає можливість використовувати на декілька порядків більший діапазон адресів IPv6 для пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Фізичний шар забезпечує основні функції передачі даних через різні середовища, використовуючи стандарти, такі як NFC (Near Field Communication) та BLE (Bluetooth Low Energy), оптимізовані для зниження енергоспоживання та підтримки малопотужних пристроїв. На шарі сприйняття використовується протокол 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks), який забезпечує ефективну комунікацію між малопотужними пристроями та підтримує маршрутизацію даних у складних середовищах. Мережевий шар відповідає за адресацію та маршрутизацію, де використовуються як IPv4, так і IPv6, що забезпечують надійну передачу даних між різними мережами. Шар управління може використовувати різні протоколи, зокрема TCP/UDP (Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol), μ TP (Micro Transport Protocol), та UDP-Lite, кожен з яких відповідає за надійність та ефективність передачі в різних умовах мережі.

На шарах застосунків і бізнес-процесів працюють протоколи, такі як CoAP (Constrained Application Protocol) та MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), що забезпечують взаємодію додатків та пристроїв у межах IoT-системи, особливо в умовах обмежених ресурсів. Ці протоколи призначені для забезпечення надійної та ефективної комунікації між пристроями, які можуть мати обмежені обчислювальні можливості та вимоги до низького енергоспоживання.

При виборі протоколів і технологій для впровадження IoT в бібліотечних системах доцільно враховувати вже наявну інфраструктуру, таку як Wi-Fi, Ethernet, RFID та NFC, оскільки вони забезпечують надійне підключення та обмін даними. Wi-Fi є ідеальним для передачі потокового мультимедійного контенту, такого як відео та аудіо, а також для текстової інформації, що потребує стабільного та швидкого з'єднання. Враховуючи широке використання Wi-Fi в бібліотечних приміщеннях, його інтеграція у IoT-системи є економічно вигідним рішенням, що дозволяє мінімізувати витрати на додаткове обладнання і забезпечити стабільний зв'язок для всіх користувачів. Крім того, Wi-Fi підтримує можливість інтеграції граничних пристроїв, таких як мікроконтролери, і шлюзів, що дозволяє об'єднувати гетерогенні середовища передачі даних. Це дає змогу створювати єдину інфраструктуру, яка об'єднує різноманітні пристрої та технології, забезпечуючи їх взаємодію в межах єдиної мережі. Ethernet, як дротова технологія, забезпечує стабільний і високошвидкісний зв'язок, що є важливим для забезпечення безперервного доступу до серверів обробки та накопичення даних, а також для мінімізації затримок при передачі великих обсягів інформації.

RFID технології вже активно використовуються в бібліотеках для автоматизації процесів інвентаризації та управління колекціями, що робить їх логічним вибором для подальшої інтеграції в IoT системи. Ці технології дозволяють швидко і точно ідентифікувати книги та інші ресурси, що полегшує їхній пошук і облік. Крім того, RFID не потребує використання акумуляторів для міток, що знижує вартість експлуатації.

NFC (Near Field Communication) заслуговує на увагу як технологія для впровадження в бібліотечних системах, особливо в контексті надання послуг самообслуговування користувачів. NFC може використовуватися для впровадження мобільних додатків, що дозволяють здійснювати безконтактні операції, такі як видача та повернення книг, оплата послуг, а також для доступу до приміщень. Це спрощує процеси для користувачів і підвищує рівень автоматизації без значних витрат на додаткове обладнання.

Bluetooth Low Energy (BLE) є доцільним вибором для впровадження в бібліотечних системах, особливо для пристроїв, які вимагають мінімального споживання енергії при збереженні ефективної комунікації. BLE дозволяє з'єднуватися з іншими пристроями на коротких відстанях, що робить його ідеальним для таких застосувань, як місцеве позиціонування або сповіщення користувачів про події чи ресурси.

Враховуючи постійне електропостачання в бібліотечних приміщеннях, пристрої можуть бути розроблені без необхідності використання вбудованих джерел живлення, що значно знижує вартість розробки та впровадження. Підхід інтеграції засобів IoT в наявну інфраструктуру бібліотечного закладу забезпечує баланс між інноваціями та економічною доцільністю, що є ключовим фактором успішного впровадження IoT в бібліотечне середовище.

Мережеві топології відіграють вирішальну роль в оптимізації роботи IoT-систем у бібліотеках, оскільки дозволяють ефективно організувати взаємодію між пристроями в залежності від конкретних потреб та умов експлуатації. Існує кілька основних типів топологій, кожен з яких має свої переваги, недоліки та найбільш підходящі сценарії використання. Рисунок 22 відображає структуру найбільш розповсюджених типів мережевих топологій, використовуваних в реалізаціях комплексних систем IoT.

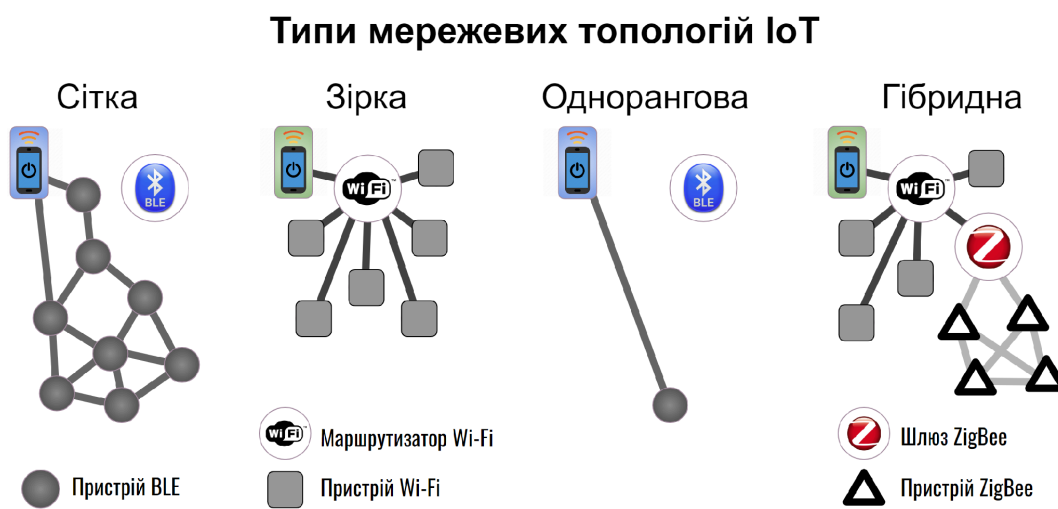


Рис. 22. Типи мережевих топологій Інтернету речей.

Топологія «Сітка» є однією з найпоширеніших для IoT завдяки своїй здатності забезпечувати високу надійність і масштабованість. У сітчастій топології всі вузли мережі можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо або через інші вузли, що забезпечує стійкість мережі до збоїв і можливість самовідновлення. Це робить її ідеальною для застосувань, де критично важлива надійність, наприклад, у розумних будівлях або системах безпеки. Серед найчастіше використовуваних технологій в обчислювальних мережах з сітчастою топологією є ZigBee, Z-Wave, і LoRa, які підтримують низьке енергоспоживання та ефективну роботу в умовах великих відстаней між вузлами.

Топологія «Зірка» використовується в системах із централізованим управлінням, де всі пристрої підключені до одного центрального вузла або шлюзу. Це дозволяє легко управляти мережею та забезпечує високу пропускну здатність, що важливо для передачі великих обсягів даних, наприклад, мультимедійного контенту в бібліотеках. Wi-Fi та Ethernet є типовими прикладами технологій, що використовуються в топологіях типу «Зірка», особливо в тих випадках, коли необхідний стабільний і високошвидкісний зв'язок.

Однорангова топологія забезпечує прямий зв'язок між двома пристроями і найчастіше використовується у випадках, коли необхідний простий і надійний канал зв'язку, наприклад, у системах моніторингу або контролю доступу. Bluetooth Low Energy є одним з найпопулярніших протоколів для реалізації топологій однорангового типу, особливо в умовах низького енергоспоживання та невеликих відстаней [40].

Гібридні топології поєднують елементи різних типів топологій для забезпечення більшої гнучкості та надійності мережі. Наприклад, можна використовувати сітчасту топологію для локальної взаємодії пристроїв, поєднуючи її з топологією «Зірка» для підключення до центрального шлюзу або сервера. Це забезпечує ефективне використання різних технологій, таких як Wi-Fi для широкомасштабного підключення та ZigBee або BLE для локальної комунікації. Такі гібридні рішення є оптимальними для складних середовищ, де потрібна висока

надійність і масштабованість, як у випадку розумних міст або великих бібліотечних систем [41].

Компаративний аналіз технічних характеристик стандартів, протоколів, обладнання та програмного забезпечення є необхідним кроком для вибору найбільш підходящих рішень для інтеграції систем IoT без залежності від існуючої інфраструктури. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити різні варіанти та визначити, які з них найкраще відповідають вимогам конкретних проєктів. Аналіз враховує параметри продуктивності, енергоефективності, безпеки, масштабованості та сумісності, що є критичними для успішної реалізації IoT-рішень. Завдання полягає в тому, щоб на основі виявлених характеристик обрати ті стандарти, протоколи та технологічні рішення, які оптимально поєднуються між собою та можуть бути інтегровані в нову або наявну інфраструктуру, незалежно від її поточного стану. Такий підхід дає можливість виявити ті рішення, які забезпечать високий рівень гнучкості та адаптивності системи до змін у вимогах проєкту або умовах експлуатації.

Відсутність заздалегідь визначеної інфраструктури дозволяє розглянути широкий спектр можливих рішень, що сприяє вибору найбільш ефективних засобів для конкретних завдань. Наприклад, якщо проєкт вимагає забезпечення високої швидкості передачі даних або мінімальних затримок, можна орієнтуватися на рішення з відповідними технічними параметрами. Аналогічно, для проєктів, де пріоритетом є енергоефективність або забезпечення довготривалої автономної роботи, можуть бути відібрані інші, спеціалізовані рішення.

Такий детальний аналіз дозволяє створити основу для успішного впровадження IoT у різних середовищах, включаючи ті, де попередня інфраструктура або взагалі відсутня, або є недостатньо розвиненою. Це підвищує шанси на створення надійних, ефективних та довговічних систем, які можуть легко адаптуватися до нових умов або вимог.

При організації мережевого обміну інформацією в рамках проєктів IoT важливо враховувати не лише технічні характеристики дротових та бездротових

мереж окремо, але й можливість їх поєднання для досягнення оптимальних результатів. Вибір між дротовими і бездротовими технологіями залежить від кількох ключових факторів, таких як швидкість передачі даних, стабільність з'єднання, енергоспоживання, безпека та можливість інтеграції з іншими системами. Однак, завдяки сучасним шлюзам, можна узгоджувати різні стандарти та поєднувати переваги обох типів мереж у єдиній інфраструктурі.

Дротові мережі забезпечують стабільну і високошвидкісну передачу даних, що особливо важливо у середовищах, де необхідний безперервний і надійний доступ до серверів та інших мережевих ресурсів. Вони є стійкими до перешкод і пропонують високий рівень безпеки, що робить їх ідеальними для систем, де захист даних є критичним. Однак, дротові рішення можуть бути складними у встановленні, особливо в будівлях, де прокладка кабелів може потребувати значних витрат.

Бездротові мережі є гнучкими та зручними для розширення, оскільки дозволяють підключати пристрої без необхідності фізичної прив'язки до мережі. Вони ідеально підходять для мобільних і розподілених систем, де необхідна швидка реорганізація мережі або інтеграція нових пристроїв. Проте, бездротові мережі можуть бути менш стабільними у складних середовищах, де можливі перешкоди, можуть споживати більше енергії, що є значущим фактором у деяких проєктах.

Поєднання дротових і бездротових мереж дозволяє скористатися перевагами кожної з них, створюючи більш гнучкі і масштабовані системи. За допомогою шлюзів можна інтегрувати різні стандарти та протоколи, що дозволяє пристроям з різними характеристиками працювати разом у єдиній мережі. Наприклад, дротові мережі можуть використовуватися для основного високошвидкісного зв'язку та живлення пристроїв за технологією PoE, тоді як бездротові мережі можуть забезпечувати підключення для мобільних або віддалених пристроїв, де дротове з'єднання є недоцільним.

Шлюзи відіграють важливу роль в узгодженні різних стандартів, дозволяючи передавати дані між системами з різними протоколами, що значно підвищує ефективність і гнучкість мережі. Завдяки таким рішенням можна досягти синергії

між дротовими і бездротовими технологіями, забезпечуючи стабільність, безпеку та ефективність мережевого обміну інформацією у системах IoT.

Внутрішні локальні обчислювальні мережі бібліотек здебільшого будуються на базі стандарту 802.3, відомого як Ethernet. Цей стандарт, розроблений у 1980-х рр., пройшов значну еволюцію і набув широкого поширення завдяки своїй гнучкості, здатності адаптуватися до зростаючих потреб мережевих технологій. Ethernet став фундаментом для більшості сучасних комп'ютерних мереж, забезпечуючи надійне, стабільне і швидке підключення для передавання даних між пристроями [42]. Завдяки своїй багатофункціональності, Ethernet став основним вибором для створення локальних мереж у більшості установ. Різноманітні ревізії стандарту 802.3 забезпечують різні характеристики мережі, такі як швидкість передачі даних, відстань між вузлами та типи використовуваних кабелів, що дозволяє Ethernet залишатися актуальним у швидко змінюваному світі технологій.

В залежності від конкретної ревізії стандарту 802.3, характеристики мережі можуть значно варіюватися, що відображено у зведеній таблиці 22 [43] [Додаток Г]. Ця інформація є критичною для розробників мережевих рішень, оскільки вона дозволяє обрати оптимальні параметри для побудови ефективної та стійкої мережі в умовах бібліотеки. Завдяки своєму постійному вдосконаленню та адаптації до нових технологічних викликів, Ethernet залишається однією з найнадійніших і найпоширеніших технологій у світі комп'ютерних мереж.

У бібліотеках та інших установах переважно використовуються стандарти 100BASE-TX та 1000BASE-T для організації локальних мереж, що пояснюється кількома важливими факторами. Одним з головних аргументів на користь цих стандартів є використання широко розповсюдженого та доступного типу кабелю – крученої пари категорії 5e (Cat5e) та категорії 6 (Cat6). Ці кабелі забезпечують високу пропускну здатність і стабільну передачу даних на середні дистанції, що робить їх ідеальними для застосування в установах з розгалуженою мережею, як-от бібліотеки.

Стандарт 100BASE-TX забезпечує передачу даних на швидкості до 100 Мбіт/с, використовуючи лише дві пари дротів, що робить його економічно вигідним рішенням для мереж з помірними вимогами до швидкості. Цей стандарт став основою для багатьох локальних мереж завдяки своїй сумісності з широким спектром мережевого обладнання, яке є доступним на ринку. Крім того, кабель Cat5e, який підтримує цей стандарт, є дуже поширеним і доступним за ціною, що сприяє його масовому впровадженню.

Стандарт 1000BASE-T, відомий також як Gigabit Ethernet, є наступним кроком у розвитку мережевих технологій і забезпечує швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с. Для досягнення такої швидкості використовується всі чотири пари дротів у кручений парі, що дозволяє значно підвищити пропускну здатність мережі без необхідності заміни існуючої кабельної інфраструктури. Використання стандарту 1000BASE-T стало популярним у закладах з більш високими вимогами до швидкості передачі даних, таких як бібліотеки, де необхідно швидко обробляти великі обсяги інформації.

Інші стандарти, такі як 100BASE-FX (що використовує оптичні кабелі) або 10GBASE-T (який забезпечує передачу даних на швидкості до 10 Гбіт/с), не знайшли такого ж масового впровадження через кілька причин. 100BASE-FX вимагає використання оптоволоконних кабелів, які є значно дорожчими і складнішими в монтажі порівняно з мідними кабелями. Відповідно, цей стандарт частіше використовується в спеціалізованих додатках, де потрібні дуже великі дистанції або висока захищеність від електромагнітних перешкод. Щодо 10GBASE-T, то цей стандарт вимагає використання кабелю категорії 6A або вищої, що також збільшує витрати на обладнання, монтаж й обслуговування, що робить його менш привабливим для закладів з обмеженими ресурсами [44].

Таким чином, 100BASE-TX та 1000BASE-T залишаються найбільш популярними стандартами у бібліотечних мережах завдяки їхній сумісності з доступними і широко розповсюдженими типами кабелів та обладнання, що забезпечує баланс між продуктивністю та економічністю.

Під час планування мережевої інфраструктури важливо враховувати не лише технічні характеристики різних стандартів, але й їхній вплив на вартість та зручність використання. Дротові мережі, хоча й забезпечують високу швидкість та надійність, часто додають значні витрати на організацію кабельної інфраструктури. Крім того, такі мережі обмежують можливості використання портативних пристроїв, які зазвичай не підтримують дротові підключення, а оснащені лише бездротовими інтерфейсами, такими як Wi-Fi, а також в більшості випадків Bluetooth та NFC.

Портативні пристрої, такі як ноутбуки, планшети та смартфони, все частіше використовуються в бібліотечних середовищах для забезпечення доступу до електронних ресурсів і сервісів. Для таких пристроїв бездротова мережа є критично важливою, оскільки вона дозволяє зберігати мобільність і забезпечувати доступ до мережі з будь-якої точки приміщення без необхідності фізичного підключення. Це робить бездротові мережі особливо привабливими для закладів, що прагнуть забезпечити максимальну гнучкість і зручність для користувачів.

У таблиці 23 [Додаток Г] наведено результати порівняння дротових та бездротових мереж за ключовими параметрами [45]. При плануванні мережевої архітектури варто врахувати основні відмінності між дротовими та бездротовими мережами, підкреслюючи переваги бездротових мереж у контексті гнучкості, мобільності та економічної ефективності, при цьому в критичних ланцюгах мережі спиратися на надійність, захищеність та швидкість дротових з'єднань.

З огляду на зростаючу популярність портативних пристроїв та необхідність забезпечення мобільності користувачів, особливо актуальним є аналіз бездротових технологій. У цьому контексті особливу увагу варто приділити стандартам сімейства 802.11, які стали основою для побудови Wi-Fi мереж у всьому світі. Стандарти 802.11 пройшли значну еволюцію, з кожною новою ревізією вони адаптувалися до нових викликів та забезпечували вищі швидкості передачі даних, покращену безпеку та більшу ефективність використання спектра. Наступним етапом є

детальний огляд цих ревізій, що дозволить виявити оптимальні варіанти для реалізації проєктів у бібліотечних середовищах.

Під час аналізу еволюції стандартів IEEE 802.11, що стали основою для технології Wi-Fi, важливо враховувати різноманітні технічні характеристики, які відображені в таблиці 24 [46] [Додаток Е].

Ці стандарти пройшли значний шлях розвитку, щоб адаптуватися до зростаючих потреб у швидкості передачі даних, покращеній дальності та більшій надійності зв'язку. Еволюція стандартів відображає поступовий перехід від початкових, менш ефективних версій до сучасних технологій, які здатні забезпечити високі швидкості та підтримку великої кількості одночасно підключених пристроїв [47].

Стандарт IEEE 802.11a, затверджений у вересні 1999 р., став однією з перших реалізацій Wi-Fi, що працювала на частоті 5 ГГц. Ця частота дозволила зменшити рівень перешкод, які характерні для нижчих частот, що використовуються іншими пристроями. Однак використання вищих частот також мало свої недоліки – обмеження радіусу дії до 120 метрів на відкритому повітрі і 35 метрів в приміщенні. Максимальна швидкість передачі даних 54 Мбіт/с була значним досягненням на той час, але пізніше цей стандарт був витіснений більш сучасними версіями Wi-Fi. Того ж року був затверджений стандарт IEEE 802.11b, який працював на частоті 2.4 ГГц. Ця частота була краще підходящою для проходження крізь стіни та інші перешкоди, забезпечуючи радіус дії до 140 метрів на відкритому повітрі і до 35 метрів в приміщенні. Однак, через значну засміченість цього діапазону іншими пристроями (наприклад, мікрохвильовими печами, бездротовими телефонами), якість зв'язку іноді погіршувалася. Максимальна швидкість передачі даних у 11 Мбіт/с стала основою для масового впровадження Wi-Fi, але з часом цей стандарт був замінений на швидші версії.

Стандарт IEEE 802.11g, затверджений у червні 2003 р., об'єднав найкращі характеристики своїх попередників, використовуючи частоту 2.4 ГГц і забезпечуючи швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. Цей стандарт став одним з найпопулярніших

у своєму часі, але засміченість ефіру на частоті 2.4 ГГц продовжувала створювати проблеми, особливо в умовах високої щільності пристроїв. Важливим кроком у розвитку Wi-Fi став стандарт IEEE 802.11n, затверджений у жовтні 2009 р. Цей стандарт використовував технологію MIMO (multiple-input, multiple-output), що дозволило значно підвищити як швидкість передачі даних (до 600 Мбіт/с на частоті 40 МГц), так і радіус дії мережі до 250 метрів на відкритому повітрі і 70 метрів в приміщенні. Крім того, 802.11n підтримував роботу як на частоті 2.4 ГГц, так і на 5 ГГц, що дозволило зменшити проблеми з перешкодами і збільшити пропускну здатність мережі. Це зробило 802.11n одним із найпоширеніших стандартів для бездротових мереж.

Стандарт IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), затверджений у грудні 2013 р., став логічним продовженням розвитку Wi-Fi, забезпечуючи ще більшу швидкість передачі даних до 6933 Мбіт/с на частоті 160 МГц. Це дозволило зменшити затримки і підвищити загальну продуктивність мережі, що особливо важливо в умовах зростання кількості підключених пристроїв. Однак, цей стандарт має обмежений радіус дії до 35 метрів у приміщенні, що є його недоліком у великих відкритих просторах.

З розвитком технологій з'явилися стандарти з дуже високими швидкостями передачі даних, такі як IEEE 802.11ad і IEEE 802.11ay, які працюють на частоті 60 ГГц. Стандарт IEEE 802.11ad, затверджений у грудні 2012 р., забезпечує швидкість до 8 Гбіт/с, але має дуже обмежений радіус дії – всього 3.3 метра в приміщенні. Стандарт IEEE 802.11ay, затверджений у липні 2021 р., значно покращує ці характеристики, забезпечуючи швидкість до 303 Гбіт/с і радіус дії до 100 метрів на відкритому повітрі.

Цікавою особливістю стандартів IEEE 802.11af і IEEE 802.11ah є використання частот нижче 1 ГГц, що дозволяє забезпечити радіус дії до 1 км на відкритому повітрі. Стандарт IEEE 802.11af, затверджений у лютому 2014 р., використовується переважно для додатків IoT, які потребують великого радіусу дії, але мають помірну швидкість передачі даних до 568.9 Мбіт/с. Стандарт IEEE

802.11ah, затверджений у травні 2017 р., також орієнтований на IoT, забезпечуючи швидкість до 8.67 Мбіт/с і радіус дії, що залежить від частоти.

Новіші стандарти, такі як IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) і 802.11be (Wi-Fi 7), значно покращують ефективність використання спектра в умовах високої щільності пристроїв. Wi-Fi 6, затверджений у травні 2021 р., забезпечує максимальну швидкість передачі даних до 11 Гбіт/с на частотах 2.4, 5 та 6 ГГц, а Wi-Fi 7, очікуваний у грудні 2024 р., зможе забезпечити швидкість до 46.1 Гбіт/с при використанні частоти 320 МГц і до 30 метрів в приміщенні.

Проходження сигналу в ефірі завжди пов'язане з певними труднощами. Частота сигналу, на якій працює той чи інший стандарт, значно впливає на здатність сигналу проникати крізь перешкоди, такі як стіни та інші об'єкти, а також на здатність передавати сигнал на великі відстані. Так, більш високі частоти (наприклад, 5 ГГц або 60 ГГц) забезпечують вищу швидкість передачі даних, але водночас сигнал на таких частотах менш проникний крізь перешкоди і має коротший радіус дії. Натомість нижчі частоти, такі як 2.4 ГГц або частоти нижче 1 ГГц, мають кращу здатність проникати крізь стіни і можуть покривати більші відстані, що робить їх привабливими для використання у складних умовах. Проте, використання частоти 2.4 ГГц часто супроводжується високим рівнем засміченості ефіру через велику кількість пристроїв, що працюють на цій частоті, що може призвести до зниження якості зв'язку.

Важливо зазначити, що кожен стандарт Wi-Fi був розроблений для задоволення конкретних потреб користувачів і умов експлуатації. Однак, з розвитком технологій і появою нових викликів, таких як зростання кількості пристроїв, що одночасно підключені до мережі, потреба в поліпшенні якості сигналу і зменшенні затримок, стандарти продовжують еволюціонувати.

Таким чином, детальний аналіз стандартів IEEE 802.11 дозволяє зробити обґрунтований вибір для конкретних умов експлуатації, враховуючи такі фактори, як швидкість передачі даних, радіус дії, надійність сигналу та здатність протистояти перешкодам у засміченому ефірі. Для проведення аналізу бездротових технологій,

які використовуються датчиками та виконавчими пристроями в Інтернеті речей, необхідно враховувати специфіку кожної з технологій з точки зору технічних характеристик, енергоспоживання, вартості та топології мережі. Дані для аналізу наведено в таблиці 25 [Додаток Ж] і базуються на інформації з ресурсу розробника Bluetooth [48].

В контексті мережевої архітектури систем IoT вибір відповідної бездротової технології зв'язку є ключовим для забезпечення надійного та ефективного обміну даними між датчиками, виконавчими пристроями та системами керування. Різні технології пропонують різні рівні дальності дії, пропускної здатності, енергоспоживання та вартості, що робить їх придатними для різних сценаріїв використання. В аналізованій таблиці з джерела представлено порівняльний аналіз кількох широко використовуваних бездротових технологій в IoT, таких як Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Z-Wave, IEEE 802.15.4 (Zigbee, Thread), LTE-M, NB-IoT, Sigfox та LoRaWAN. Ці технології суттєво відрізняються за своїми технічними характеристиками та придатністю для конкретних сценаріїв реалізації.

Bluetooth Low Energy (BLE) є популярною технологією, призначеною для малопотужного зв'язку на короткі відстані, що в основному використовується в персональних мережах (PAN). З дальністю від 10 метрів до 1.5 кілометрів BLE пропонує пропускну здатність від 125 кбіт/с до 2 Мбіт/с. Низьке енергоспоживання робить його ідеальним для приладів, що працюють на батареях, таких як носимі пристрої, фітнес-трекери, маяки та інші типи обладнання. Технологія підтримує різні мережеві топології, включаючи однорангові, зіркові, мережеві та ширококомвні, що забезпечує гнучкість у дизайні мереж. Низька вартість модулів BLE (менше \$5) та одноразові витрати роблять його економічно ефективним рішенням для впроваджень, в яких важливі енергоефективність та мінімальні постійні витрати. BLE є надзвичайно корисним у засобах IoT, де пристрої повинні працювати протягом тривалого часу без частих зарядок або заміни елементів живлення. Зростаюче впровадження BLE відображається у кількості поставок, які склали

близько 3,5 мільярда одиниць у 2019 р., що підкреслює його широке використання та надійність.

Wi-Fi є добре відомою технологією, яка забезпечує вищу пропускну здатність, від 54 Мбіт/с до 1.3 Гбіт/с, що робить її придатною для додатків, де необхідна передача великих обсягів даних, таких як потокове відео, телемедицина та інші задачі з великим обсягом мережевого трафіку. Діапазон дії Wi-Fi варіюється від 15 метрів до 100 метрів, залежно від середовища та конкретної реалізації. Однак, його більш високе енергоспоживання та середні постійні витрати (зазвичай на обслуговування та підтримку) роблять його менш придатним для пристроїв IoT, що працюють на батареях, порівняно з BLE.

Основною перевагою Wi-Fi є його поширена інфраструктура та вища пропускну здатність, що є важливим для IoT додатків, де необхідне швидке та надійне з'єднання в межах локальної мережі (LAN). Технологія підтримує зіркову та мережеву топології, що дозволяє масштабувати та налаштовувати мережу залежно від потреб. Здатність Wi-Fi обробляти великі обсяги даних та його інтеграція у вже існуючу IT-інфраструктуру робить його важливим компонентом у мережах IoT, особливо там, де питання енергоспоживання не є ключовим.

Незважаючи на свої переваги, високе енергоспоживання Wi-Fi обмежує його використання у сценаріях, де необхідна довготривала автономна робота. Проте здатність Wi-Fi підтримувати високі швидкості передачі даних та його широке використання в більшості середовищ робить його важливим вибором для IoT мереж, особливо там, де доступ до живлення не є проблемою.

Z-Wave та IEEE 802.15.4 (включаючи Zigbee і Thread) є малопотужними, малошвидкісними бездротовими технологіями, призначеними для короткодіючого зв'язку в системах автоматизації будинку, розумного освітлення та моніторингу навколишнього середовища. Z-Wave працює в межах діапазону від 30 до 50 метрів та забезпечує пропускну здатність від 10 кбіт/с до 100 кбіт/с. Zigbee і Thread, з іншого боку, забезпечують трохи вищу пропускну здатність (від 20 кбіт/с до 250 кбіт/с) і можуть працювати в подібному діапазоні від 30 до 100 метрів.

Обидві технології характеризуються низьким енергоспоживанням та низькою вартістю модулів, що робить їх ідеальними для пристроїв IoT, що працюють на батареях і потребують тривалого терміну служби. Z-Wave, Zigbee та Thread особливо підходять для додатків, де важлива надійність зв'язку та енергоефективність, таких як пристрої розумного будинку (наприклад, розумні термостати, системи безпеки) та промисловий моніторинг. Простота та економічність цих технологій роблять їх привабливими для масштабних впроваджень IoT, де важливі вартість та енергоефективність.

Для додатків IoT, що потребують великого радіусу дії, LTE-M, NB-IoT, Sigfox та LoRaWAN пропонують унікальні переваги. LTE-M і NB-IoT – це стільникові технології, що забезпечують широке покриття (від 1 до 10 кілометрів) і середні швидкості передачі даних (до 1 Мбіт/с і 200 кбіт/с відповідно). Ці технології призначені для машинного типу зв'язку у сценаріях, де пристрої повинні з'єднуватися на великі відстані з низьким енергоспоживанням та відносно низькою пропускну здатністю. Постійні витрати для LTE-M та NB-IoT є вищими через регулярні платежі, пов'язані зі стільниковим зв'язком.

Sigfox та LoRaWAN, з іншого боку, працюють на ще більші відстані (до 50 кілометрів для Sigfox і до 20 кілометрів для LoRaWAN) та призначені для додатків з наднизьким енергоспоживанням і низькими швидкостями передачі даних. Пропускна здатність Sigfox є особливо низькою (до 100 біт/с), що робить її придатною для додатків, де потрібно передавати лише мінімальні обсяги даних, таких як датчики навколишнього середовища або трекери активів. LoRaWAN пропонує трохи вищу пропускну здатність (від 10 кбіт/с до 50 кбіт/с) і часто використовується у сільськогосподарських та промислових IoT додатках, де важлива комунікація на великі відстані [49].

Переходячи до аналізу обладнання граничних пристроїв та центральних вузлів, слід зазначити, що правильний вибір апаратного забезпечення для IoT проєктів є ключовим фактором для успішного функціонування всієї системи. Як зазначено в статті з IBM Developer [50], сучасний IoT ландшафт постійно

розвивається, і на ринок виходять нові пристрої та платформи, що дозволяють ще більше розширювати можливості IoT. Однак, незалежно від того, яке обладнання використовується, існують кілька ключових характеристик, які є спільними для всіх IoT пристроїв і які варто враховувати при виборі апаратного забезпечення.

Одним із найважливіших аспектів є можливості збору даних та управління (Data acquisition and control). Цей процес передбачає збір аналогової інформації з фіксованим інтервалом часу та її передавання у вигляді цифрового сигналу на віддалений пристрій для подальшого зчитування. Процес збору даних може включати обробку сигналів для маніпуляції та масштабування початкових показників, а також аналого-цифрові перетворювачі, що конвертують аналогові сигнали датчиків у цифрові значення. Це дозволяє обробляти та аналізувати дані в реальному часі.

Датчики є ключовими компонентами IoT пристроїв, оскільки вони вимірюють фізичні змінні та перетворюють їх на електричні сигнали. Комерційно доступні датчики можуть вимірювати широкий спектр змінних, таких як температура, вологість, тиск, дим, газ, світло, звук, вібрація, швидкість повітряного потоку, положення GPS, висота та багато інших. Датчики можуть мати різні функціональні можливості та використовуватися для вимірювання різноманітних умов, таких як внутрішній стан пристрою або взаємодія з користувачем через сенсорні екрани, кнопки та інші засоби управління. Крім збору даних, IoT пристрої мають бути здатними до їх обробки та зберігання (Data processing and storage). Це забезпечує агрегацію, передачу та аналіз даних. Деякі пристрої можуть обробляти дані безпосередньо на місці, тоді як інші передають їх на інші пристрої або хмарні сервіси для подальшого аналізу. Важливою концепцією є обробка даних на периферії мережі (Edge analytics), яка дозволяє знижувати навантаження на центральні вузли та мережу, оскільки обробка даних відбувається на місці збору.

Третій важливий аспект – підключення (Connectivity). Мережеве підключення є визначальною характеристикою будь-якого IoT пристрою, оскільки воно забезпечує зв'язок з іншими пристроями та хмарними сервісами. Пристрої можуть

спілкуватися бездротовим шляхом через Wi-Fi, Bluetooth, RFID, стільникові мережі або технології з низьким енергоспоживанням, такі як LoRa, SigFox або NB-IoT. Дротове підключення зазвичай використовується для стаціонарних пристроїв, що встановлюються в будівлях, системах автоматизації будинку або промислових контролерах.

Нарешті, управління живленням (Power management) є критичним фактором для портативних і носяться IoT пристроїв, які покладаються на автономне джерело живлення, наприклад, батареї або сонячні панелі. В залежності від режиму використання та енергоспоживання, пристрій може періодично переходити в режим сну або низького енергоспоживання для збереження заряду батареї.

Аналізуючи сучасне обладнання для IoT проєктів, важливо враховувати всі ключові аспекти для забезпечення ефективності роботи всієї системи. Це включає аналіз як граничних пристроїв, що відповідають за збір та первинну обробку даних, так і центральних вузлів, які забезпечують складну обробку та зберігання великих обсягів даних. На ринку вже доступна велика кількість недорогих, комерційно доступних платформ і наборів для прототипування, що спрощує розробку систем IoT. Модульні апаратні рішення надають велику гнучкість у виборі компонентів, дозволяючи розробникам обирати датчики з різними характеристиками або оновлювати модулі мережевого підключення, обробки даних чи зберігання відповідно до потреб проєкту. Багато з таких пристроїв, включаючи мікроконтролери та одноплатні комп'ютери, побудовані на базі інтегральних схем типу System-on-a-Chip (SoC), які об'єднують функції обробки даних, зберігання і мережевого підключення на одному чипі. Аналіз актуального на цей час обладнання дає змогу розробникам обирати апаратне забезпечення, що найкраще відповідає їхнім потребам, з урахуванням як нових, так і вже перевірених рішень.

Аналіз мікроконтролерів, які застосовуються для розробки та впровадження технологій IoT, є важливим етапом у виборі оптимального рішення для конкретного проєкту. Це завдання вимагає ретельного врахування не тільки технічних характеристик, але й співвідношення ціна/функціонал, яке є критичним фактором

при обмежених ресурсах. Серед представлених на ринку мікроконтролерів особливу увагу привертають серії Arduino, Espressif та Raspberry Pi Pico, які займають провідні позиції завдяки своїм унікальним характеристикам та широкому спектру застосувань. Технічні характеристики найпопулярніших мікроконтролерів представлено у таблиці 26 [Додаток II].

Мікроконтролери серії Arduino, такі як Arduino Uno R3 і Arduino Mega 2560 Rev3, відомі своєю простотою використання та великою спільнотою розробників, яка забезпечує величезну кількість вільного програмного забезпечення, навчальних матеріалів та прикладів для розробки. Це робить їх привабливими для початківців та простих IoT проєктів, де важлива легкість у використанні та наявність підтримки з боку спільноти. Однак, ці мікроконтролери базуються на 8-розрядній архітектурі, що значно обмежує їхні обчислювальні можливості. Наприклад, Arduino Uno R3 оснащений процесором ATmega328P з частотою 16 МГц та має лише 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) і 32 КБ флеш-пам'яті. Це робить його придатним лише для виконання простих завдань, де не потрібна велика продуктивність або складні алгоритми обробки даних. Arduino Mega 2560 Rev3, хоча й має більше портів вводу/виводу та більший обсяг пам'яті (8 КБ SRAM та 256 КБ флеш-пам'яті), також залишається обмеженим у своїх можливостях через використання того ж 8-розрядного процесора. Основний недолік цих мікроконтролерів полягає у їхньому поганому співвідношенні ціна/функціонал. Висока вартість, яка в основному зумовлена великою популярністю платформи та підтримкою великої спільноти, не завжди виправдана з точки зору продуктивності та можливостей. Це робить ці мікроконтролери менш конкурентоспроможними у складніших проєктах, де важлива не лише простота використання, але й висока продуктивність та можливість підключення до мережі.

Arduino MKR WiFi 1010, хоча й пропонує дещо кращі функціональні можливості порівняно з базовими моделями серії Arduino, зокрема завдяки наявності вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth, також не є найкращим вибором у контексті співвідношення ціна/функціонал. Цей мікроконтролер оснащений

32-розрядним процесором SAMD21 з частотою 48 МГц та має 32 КБ оперативної пам'яті. Це дозволяє йому виконувати більш складні завдання порівняно з Arduino Uno R3 та Mega 2560 Rev3. Однак, обмежений обсяг пам'яті та висока вартість, характерні для всієї лінійки Arduino, залишають його позаду в порівнянні з іншими, більш продуктивними рішеннями. Важливо зазначити, що, незважаючи на інтеграцію бездротових модулів, MKR WiFi 1010 залишається відносно дорогим варіантом, особливо якщо врахувати його обмежені можливості обробки даних та пам'яті. Це робить його менш привабливим для розробників, які шукають рішення для складних IoT проєктів з обмеженим бюджетом.

У порівнянні з Arduino, мікроконтролери серії ESP від Espressif мають значно кращі характеристики та пропонують набагато більше можливостей за значно нижчу ціну, що робить їх лідерами на ринку IoT. ESP8266, один із найбільш відомих мікроконтролерів цієї серії, оснащений 32-розрядним процесором Tensilica L106 з частотою 160 МГц та 160 КБ оперативної пам'яті. Він підтримує Wi-Fi і має невеликий обсяг флеш-пам'яті (4 МБ), що робить його ідеальним для бюджетних проєктів, де потрібне підключення до Інтернету. Його популярність зумовлена не лише низькою ціною, але й значними можливостями, які він надає розробникам. Водночас, ESP8266 має обмеження у вигляді невеликого обсягу пам'яті та відсутності підтримки сучасних стандартів бездротового зв'язку, таких як Bluetooth або ZigBee/Thread, що може обмежити його застосування в майбутніх проєктах.

Більш сучасний мікроконтролер ESP32, зокрема його варіанти ESP32-S2 і ESP32-C6, забезпечує чудову продуктивність за свою ціну, підтримуючи сучасні стандарти Wi-Fi та Bluetooth, а також надаючи апаратне шифрування і більшу кількість периферійних інтерфейсів. ESP32 оснащений двоядерним процесором Tensilica Xtensa LX6 з частотою 240 МГц та має 520 КБ оперативної пам'яті, що дозволяє йому виконувати складні обчислювальні завдання в режимі реального часу. Крім того, він підтримує апаратне шифрування (SHA, RSA, AES), що робить його ідеальним вибором для додатків, де важлива безпека даних. Важливим аспектом є також те, що Espressif активно підтримує свою продукцію, забезпечуючи регулярні

оновлення прошивок та бібліотек, що додатково підвищує привабливість цієї платформи серед розробників.

Моделі ESP32-S2 і ESP32-C6 є подальшим вдосконаленням серії ESP32 і забезпечують ще кращу продуктивність та нові можливості підключення. Зокрема, ESP32-C6 підтримує Wi-Fi 6 та BLE 5.3, що дозволяє використовувати найсучасніші мережеві стандарти. Цей мікроконтролер також оснащений апаратним шифруванням та підтримує розширені можливості для підключення периферійних пристроїв. Завдяки своїм характеристикам, ESP32-C6 є чудовим вибором для складних IoT проєктів, де важлива висока продуктивність, безпека даних та підтримка сучасних стандартів зв'язку. Однак, варто зазначити, що збільшення кількості функцій та підтримки нових стандартів підвищує вартість цих пристроїв, що може бути недоліком для проєктів, де важливі економія коштів та енергоефективність.

Raspberry Pi Pico, хоча й не може похвалитися такою ж продуктивністю, як мікроконтролери серії ESP від Espressif, все ж залишається конкурентоспроможним завдяки своїй універсальності та помірній ціні. Raspberry Pi Pico оснащений двоядерним процесором ARM Cortex-M0+ з частотою до 133 МГц та підтримує широкий спектр периферійних інтерфейсів, таких як I2C, SPI, UART, що робить його більш гнучким у застосуванні порівняно з рішеннями від Arduino. Версія Raspberry Pi Pico з підтримкою Wi-Fi розширює можливості підключення, наближаючи його до рівня Espressif, хоча обмежений обсяг пам'яті (264 КБ SRAM та 1 МБ Flash) та відсутність підтримки інших бездротових протоколів, таких як Bluetooth, можуть обмежити його застосування у складніших додатках. Raspberry Pi Pico є відносно новим продуктом на ринку, але вже здобуває популярність завдяки своїй гнучкості, низькій вартості та підтримці з боку спільноти Raspberry Pi, яка активно розробляє нові бібліотеки та інструменти для цього мікроконтролера. Це робить Raspberry Pi Pico привабливим вибором для розробників, які шукають баланс між ціною та функціональністю, а також для проєктів, де потрібна більша універсальність і гнучкість у виборі периферійних пристроїв.

У порівнянні з іншими мікроконтролерами, Raspberry Pi Pico все ще поступається продуктам Espressif у багатьох аспектах. Наприклад, продуктивність його процесора ARM Cortex-M0+ значно нижча у порівнянні з двоядерними процесорами Tensilica Xtensa LX6, які використовуються в ESP32. Крім того, обмежений обсяг оперативної пам'яті та флеш-пам'яті може стати серйозним обмеженням для більш складних додатків, особливо тих, які потребують обробки великих обсягів даних або використання сучасних криптографічних алгоритмів. Однак, незважаючи на ці обмеження, Raspberry Pi Pico залишається важливим гравцем на ринку IoT завдяки своїй простоті використання, гнучкості та низькій вартості, що робить його привабливим для широкого кола проєктів.

Щодо аналізу співвідношення ціна/функціонал, мікроконтролери серії ESP від Espressif явно домінують на ринку IoT. Вони пропонують високу продуктивність, підтримку сучасних стандартів бездротового зв'язку та широкий набір периферійних інтерфейсів за значно нижчою ціною порівняно з аналогічними рішеннями від інших виробників. Це робить їх оптимальним вибором для проєктів, де важлива не тільки висока обчислювальна потужність, але й ефективне управління живленням та можливість інтеграції з іншими пристроями та системами. Важливо також зазначити, що Espressif активно розвиває свою екосистему, забезпечуючи регулярні оновлення програмного забезпечення, що додатково підвищує привабливість цих мікроконтролерів для розробників.

Мікроконтролери Arduino, попри свою популярність, залишаються позаду у цьому порівнянні. Хоча вони пропонують простоту використання та широкий спектр навчальних матеріалів, їхня висока вартість не завжди виправдана з точки зору функціональних можливостей. Це особливо актуально для складних IoT проєктів, де важлива висока продуктивність та сучасні можливості підключення. Тим не менш, мікроконтролери Arduino можуть бути хорошим вибором для простих проєктів або для навчальних цілей, де важлива велика кількість доступного програмного забезпечення та підтримка спільноти.

Raspberry Pi Pico займає проміжну позицію між мікроконтролерами Arduino та продуктами Espressif. Він пропонує хорошу продуктивність за свою ціну, але його можливості все ще обмежені порівняно з мікроконтролерами ESP32. Проте, завдяки підтримці з боку спільноти Raspberry Pi та доступності широкого спектра периферійних інтерфейсів, цей мікроконтролер залишається привабливим варіантом для проєктів, де потрібна універсальність та гнучкість.

У контексті розвитку IoT технологій, мікроконтролери від Espressif залишаються найбільш конкурентоспроможним вибором для розробників, які шукають баланс між ціною, продуктивністю та функціональними можливостями. Вони пропонують найкраще співвідношення ціна/функціонал, що робить їх ідеальним вибором для створення складних і високопродуктивних IoT рішень. Raspberry Pi Pico також залишається привабливим варіантом завдяки своїй універсальності та помірній ціні, що робить його відповідним для широкого спектра проєктів. Мікроконтролери Arduino, попри свою популярність, залишаються менш привабливими через обмежену продуктивність та високу вартість, що робить їх менш конкурентоспроможними в сучасних IoT проєктах. У підсумку, остаточний вибір мікроконтролера повинен базуватися на конкретних вимогах проєкту, з урахуванням необхідної обчислювальної потужності, можливостей підключення, енергоспоживання та бюджету.

Таким чином, для більшості складних і високопродуктивних IoT проєктів, особливо тих, де важливе ефективне управління живленням та підтримка сучасних стандартів бездротового зв'язку, продукти від Espressif є безперечним лідером на ринку. Вони забезпечують високу продуктивність, підтримку широкого спектру сучасних стандартів підключення, а також доступні за ціною, що робить їх ідеальним вибором для розробників. Raspberry Pi Pico, хоча й поступається продуктивністю та функціональністю, залишається привабливим варіантом для проєктів середньої складності завдяки своїй гнучкості та універсальності. Мікроконтролери Arduino, незважаючи на свою простоту та популярність, стають

менш конкурентоспроможними через обмежену продуктивність та високу вартість, що обмежує їхнє використання у складних IoT проєктах.

В контексті впровадження комплексних систем IoT одноплатні комп'ютери відіграють ключову роль у забезпеченні більшої обчислювальної потужності, ніж традиційні мікроконтролери. Вони дозволяють підключати периферійні пристрої, такі як клавіатури, миші та екрани, що робить їх універсальними інструментами для реалізації складніших проєктів. Порівняно з мікроконтролерами, одноплатні комп'ютери надають значно більше оперативної пам'яті та потужніші процесори, що дозволяє ефективно виконувати завдання, які вимагають високої продуктивності. Наприклад, сучасні одноплатні комп'ютери можуть бути оснащені 64-розрядними процесорами з тактовою частотою до 2,4 ГГц і більше, що значно перевищує можливості 8-розрядних та 32-розрядних мікроконтролерів.

У дослідженні IoT важливо не тільки враховувати продуктивність обчислень, але й аналізувати технічні характеристики одноплатних комп'ютерів у контексті їх використання в реальних умовах. Крім того, одноплатні комп'ютери часто підтримують операційні системи на основі Linux, Android або навіть Windows, що дозволяє розробникам використовувати стандартні програмні засоби для розробки та тестування своїх рішень. Це відкриває додаткові можливості для інтеграції з іншими системами та пристроями, що є важливим аспектом у побудові комплексних IoT екосистем.

Важливим параметром також є можливість підключення різних типів накопичувачів, таких як microSD, eMMC або M.2 NVMe SSD, що забезпечує гнучкість у виборі конфігурацій для зберігання даних. Це особливо важливо для проєктів, де потрібне зберігання великих обсягів інформації, наприклад, для систем відеоаналізу або обробки великих потоків даних.

Крім загальних характеристик, важливо також враховувати, що деякі одноплатні комп'ютери спеціалізуються на виконанні конкретних завдань. Наприклад, існують зазначені пристрої, оптимізовані для створення мережесховищ. Вони мають вбудовані інтерфейси для підключення жорстких дисків і

підтримують високошвидкісні мережеві з'єднання з пропускнуою здатністю до 2,5 Гбіт/с. Інші одноплатні комп'ютери орієнтовані на роботу зі штучним інтелектом і включають спеціалізовані графічні процесори або нейронні процесори, які забезпечують високу продуктивність при обробці алгоритмів машинного навчання та виконанні завдань, пов'язаних з комп'ютерним зором, розпізнаванням мови та іншими додатками штучного інтелекту.

Сучасний ринок одноплатних комп'ютерів продовжує стрімко розвиватися, пропонуючи розробникам широкий спектр нових рішень, які мають значно кращі характеристики, ніж попередні моделі. Одноплатні комп'ютери сьогодні пропонують підтримку сучасних графічних процесорів, великий обсяг оперативної пам'яті та різні інтерфейси підключення. Ці характеристики є критично важливими для забезпечення стабільної та ефективної роботи IoT систем, особливо коли йдеться про обробку великих обсягів даних або використання технологій штучного інтелекту. Проте, зі зростанням ринку і появою нових моделей, раніше проведені дослідження та компаративні аналізи одноплатних комп'ютерів поступово втрачають свою актуальність.

В основі досліджень, таких як огляд одноплатних комп'ютерів у статті "Best single board computer in 2024" на XDA-Developers [51], можна стверджувати, що кожен новий випуск пристроїв приносить із собою покращені технічні характеристики, що потребує регулярного перегляду наявних даних. Наприклад, статті, що вийшли кілька років тому, такі як "Choosing the best hardware for your next IoT project" на ресурсі IBM Developer [52], "Applicability of Commodity Low-Cost Single Board Computers for Internet of Things Devices" [53] та інші, вже не враховують останні досягнення в галузі. Відсутність оновлених даних про новітні пристрої, такі як Raspberry Pi 5, Orange Pi 5 Pro або LattePanda 3 Delta 864, може призвести до використання застарілої інформації, що негативно впливає на процес прийняття рішень у виборі обладнання для IoT проєктів.

Актуалізація компаративного аналізу одноплатних комп'ютерів є необхідною з огляду на стрімкий розвиток технологій і постійне вдосконалення продукції. Нові

моделі пропонують не лише вищу продуктивність, але й розширені можливості, такі як інтеграція спеціалізованих нейронних процесорів, підтримка нових стандартів бездротового зв'язку, збільшення обсягу оперативної пам'яті та покращення енергоефективності. З огляду на це, аналіз технічних характеристик одноплатних комп'ютерів не лише дозволяє визначити, які саме пристрої забезпечують найкраще співвідношення ціна/функціонал для конкретних умов експлуатації, але й дозволяє підтримувати IoT системи на передовому рівні розвитку технологій.

Одноплатні комп'ютери, представлені в таблиці 27 [Додаток К], пропонують широкий спектр можливостей, що дозволяє розробникам вибирати оптимальні рішення для конкретних завдань в рамках IoT. Кожен з цих пристроїв має свої унікальні особливості, що впливають на його продуктивність, енергоефективність, співвідношення ціни та функціональних можливостей, а також на здатність підтримувати різні операційні системи та програмне забезпечення. Ці аспекти є критичними при виборі апаратного забезпечення для IoT проєктів, де важлива не тільки продуктивність, але й надійність, гнучкість та підтримка з боку спільноти розробників.

Raspberry Pi Zero 2 W є одним із найменш продуктивних, але водночас найекономічніших варіантів серед представлених одноплатних комп'ютерів. Його ціна в \$15 робить його доступним для широкого кола користувачів, а компактні розміри та низьке енергоспоживання дозволяють використовувати його в умовах, де важлива мінімізація витрат на енергію. Однак, цей комп'ютер оснащений 4-ядерним процесором ARM Cortex-A53 з частотою лише 1 ГГц і 512 МБ оперативної пам'яті, що значно обмежує його продуктивність. Raspberry Pi Zero 2 W не підтримує жодного нейронного процесора або спеціалізованого графічного процесора, що робить його непридатним для завдань, пов'язаних з обробкою великих обсягів даних або алгоритмів штучного інтелекту. Водночас цей одноплатний комп'ютер має вбудований Wi-Fi стандарту 802.11n та Bluetooth V4.2, що дозволяє його використовувати в простих бездротових мережах IoT. Важливо зазначити, що Raspberry Pi Zero 2 W, хоча і має обмежену продуктивність, все ж може бути

ефективно використаний в умовах, де необхідні лише базові обчислювальні ресурси та низьке енергоспоживання.

Raspberry Pi 4 Model B є значно потужнішим варіантом, який пропонує процесор ARM Cortex-A72 з частотою 1,5 ГГц та до 8 ГБ оперативної пам'яті, що дозволяє виконувати складніші обчислювальні завдання. Цей одноплатний комп'ютер має розширені можливості підключення, включаючи підтримку 1 Гбіт/с Ethernet, USB 3.0, а також вбудовані модулі Wi-Fi стандарту 802.11ac і Bluetooth 5.0. Raspberry Pi 4 Model B підтримує дві micro-HDMI порти з роздільною здатністю до 4K, що робить його придатним для мультимедійних додатків. Важливою перевагою є велика спільнота розробників, яка активно підтримує та розвиває цей пристрій, що забезпечує доступ до широкого спектра програмного забезпечення та бібліотек. Однак, Raspberry Pi 4 Model B не має нейронного процесора або спеціалізованого графічного процесора, що обмежує його можливості в додатках зі штучним інтелектом. Враховуючи його ціну від \$35, це один із найкращих варіантів для розробників, які шукають баланс між ціною, продуктивністю та гнучкістю використання.

Raspberry Pi 5 є наступним еволюційним кроком у лінійці Raspberry Pi, пропонуючи процесор ARM Cortex-A76 з частотою 2,4 ГГц і до 8 ГБ швидкої оперативної пам'яті LPDDR4X. Цей одноплатний комп'ютер має значно вищу продуктивність порівняно з попередніми моделями, що робить його придатним для більш вимогливих додатків, включаючи обробку даних у реальному часі. Raspberry Pi 5 підтримує новий стандарт Wi-Fi 6, який забезпечує кращу швидкість передачі даних і стабільність з'єднання, а також підтримку Bluetooth 5.0. Крім того, він має можливість підключення модулю нейронного процесора з продуктивністю 6 TOPS, що дозволяє з високою ефективністю виконувати завдання, пов'язані зі штучним інтелектом. Цей комп'ютер також підтримує можливість встановлення M.2 NVMe SSD накопичувача, що забезпечує швидкий доступ до даних, надає можливості зберігання великих обсягів даних, а також значно підвищує загальну продуктивність системи. Raspberry Pi 5 є відмінним вибором для проєктів, де важлива висока

продуктивність та підтримка сучасних технологій, особливо якщо врахувати його ціну від \$60.

Orange Pi 5 Pro пропонує ще більш високий рівень продуктивності завдяки наявності процесора ARM Cortex-A76 з частотою 2,4 ГГц та додаткових чотирьох ядер Cortex-A55, що забезпечує високу енергоефективність при виконанні менш вимогливих завдань. Цей одноплатний комп'ютер оснащений графічним процесором Mali-G610, який підтримує сучасні графічні технології та може використовуватися для мультимедійних додатків і візуалізації даних. Orange Pi 5 Pro має до 16 ГБ швидкісної оперативної пам'яті типу LPDDR5 та підтримує пряме підключення M.2 NVMe SSD накопичувача, що робить його одним із найпотужніших варіантів у своїй категорії. Важливо зазначити, що цей одноплатний комп'ютер також підтримує Wi-Fi стандарту 802.11ac і має 1 Гбіт/с Ethernet, що забезпечує високу швидкість передачі даних у мережі. Orange Pi 5 Pro є відмінним вибором для проєктів, де важлива не лише висока продуктивність, але й енергоефективність та можливість обробки графічних даних. Його ціна від \$85 робить його привабливим варіантом для розробників, які шукають потужне та гнучке рішення для складних IoT додатків. Основним недоліком цього варіанту є невелика спільнота користувачів та слабка технічна підтримка від виробника.

Asus Tinker Board S R2.0 є ще одним потужним одноплатним комп'ютером на базі архітектури ARM, оснащеним процесором Rockchip RK3288 з частотою 1,8 ГГц. Цей комп'ютер використовує 2 ГБ оперативної пам'яті типу LPDDR3, що може бути обмеженням у порівнянні з іншими моделями. Однак, його основною перевагою є інтегрований графічний процесор Mali-T764, який дозволяє обробляти мультимедійні додатки з високою швидкістю. Asus Tinker Board S R2.0 також підтримує широкий спектр периферійних інтерфейсів, включаючи HDMI, USB 3.0, та 1 Гбіт/с Ethernet, що робить його гнучким у використанні. Важливою особливістю є підтримка як Linux, так і Android, що розширює можливості інтеграції з різними програмними платформами. Його ціна в \$129 робить його менш доступним у порівнянні з іншими моделями, але цей комп'ютер пропонує відмінну

якість збірки та стабільність роботи, що може бути важливим фактором для критично важливих додатків.

Jetson Nano Developer Kit від Nvidia є спеціалізованим рішенням для завдань, пов'язаних зі штучним інтелектом та машинним навчанням. Цей одноплатний комп'ютер оснащений процесором ARM Cortex-A57 з частотою 1,43 ГГц і графічним процесором Nvidia Maxwell з 128 ядрами CUDA, що робить його ідеальним для завдань, що потребують високої обчислювальної потужності. Jetson Nano має 4 ГБ оперативної пам'яті LPDDR4 і має розширені можливості підключення, включаючи 1 Гбіт/с Ethernet та підтримку 4 каналів MIPI CSI для підключення камер. Важливою перевагою є підтримка програмного забезпечення Nvidia JetPack, що забезпечує доступ до розширених можливостей машинного навчання та обробки даних у реальному часі. Незважаючи на високу вартість у \$269, цей одноплатний комп'ютер є відмінним вибором для проєктів, де важлива висока продуктивність і можливість обробки складних завдань у сфері штучного інтелекту. Jetson Nano Developer Kit, завдяки можливостям 128 високопродуктивних ядер CUDA, є ідеальним вибором для розробки та тестування додатків, які потребують глибокого навчання, комп'ютерного зору або інших технологій штучного інтелекту. Цей одноплатний комп'ютер також може використовуватися в промислових IoT-додатках, де важлива надійність і швидкість обробки даних, особливо, для аналізу відеопотоків у режимі реального часу з використанням алгоритмів штучного інтелекту.

ZimaBlade є одним із представників одноплатних комп'ютерів на архітектурі x86, що дозволяє використовувати можливості операційної системи Windows, а також Linux і Android. Оснащений двоядерним процесором Intel Celeron N3350 з частотою 2,4 ГГц і підтримкою до 8 ГБ оперативної пам'яті LPDDR4, ZimaBlade пропонує чудове співвідношення ціни та продуктивності. Особливо слід зазначити можливість підключення SATA-накопичувачів, що робить цей одноплатний комп'ютер привабливим для створення мережевих сховищ даних та інших додатків, де важлива надійність зберігання великих обсягів інформації. Крім того, ZimaBlade

підтримує Ethernet з пропускнуою здатністю 1 Гбіт/с, що забезпечує високу швидкість, надійність і захищеність передачі даних. Завдяки архітектурі x86 цей одноплатний комп'ютер може працювати з широким спектром програмного забезпечення, що робить його відмінним вибором для розробників, які шукають рішення обробки та збереження великих обсягів даних для складних IoT-застосувань.

LattePanda 3 Delta 864 є найпродуктивнішим із представлених одноплатних комп'ютерів. Означений пристрій також базується на архітектурі x86 і пропонує ще більше можливостей для інтеграції. Оснащений чотириядерним процесором Intel Celeron N5105 з частотою до 2,9 ГГц і використанням 8 ГБ оперативної пам'яті LPDDR4, цей одноплатний комп'ютер забезпечує високу продуктивність для вимогливих додатків. LattePanda 3 Delta 864 підтримує інтерфейси HDMI, DisplayPort, eDP та USB-C PD, що дозволяє легко підключати різноманітні периферійні пристрої. Важливою перевагою цього одноплатного комп'ютера є наявність використовувати модулі 4G та 5G, що дозволяє використовувати його в мобільних IoT-додатках, де важливе постійне з'єднання з мережею навіть за відсутності доступу до дротових мереж або Wi-Fi. Крім того, підтримка TPM 2.0 забезпечує підвищений захист даних, а вбудований мікроконтролер ATMEGA32U4 з інтегрованою середою розробки Arduino виявляють LattePanda 3 Delta 864 в якості привабливого варіанту для проєктів, де важлива можливість розширення функціоналу за допомогою численних зовнішніх модулів. Його ціна від \$239 є конкурентоспроможною, враховуючи широкі можливості цього одноплатного комп'ютера та підтримку з боку великої спільноти розробників.

Враховуючи всі вищезазначені характеристики, можна зробити висновок, що одноплатні комп'ютери на архітектурі x86, такі як ZimaBlade та LattePanda 3 Delta 864, є привабливими варіантами для проєктів, де необхідна висока продуктивність, підтримка операційної системи Windows та можливість роботи зі складними додатками, включаючи професійні рішення для обробки даних. Ці комп'ютери також забезпечують високу гнучкість завдяки підтримці різних інтерфейсів підключення

та можливості розширення за рахунок зовнішніх модулів. Їхня вартість є вищою порівняно з одноплатними комп'ютерами на архітектурі ARM, такими як Raspberry Pi чи Orange Pi, але вона виправдана, зважаючи на значно більші можливості, які вони надають.

У контексті дослідження технологій IoT, вибір одноплатного комп'ютера повинен базуватися на конкретних вимогах проекту, включаючи необхідність високої продуктивності, можливість обробки великих обсягів даних, енергоефективність та наявність спеціалізованих співпроцесорів для штучного інтелекту. Одноплатні комп'ютери на архітектурі ARM, такі як Raspberry Pi 4 Model B чи Orange Pi 5 Pro, є відмінними варіантами для багатьох проектів завдяки своїй продуктивності та доступній ціні. Водночас, пристрої на архітектурі x86, такі як ZimaBlade та LattePanda 3 Delta 864, пропонують значно більше можливостей для тих випадків, коли потрібна підтримка операційної системи Windows або виконання завдань з високими вимогами до обчислювальної потужності та безпеки. Таким чином, правильний вибір одноплатного комп'ютера дозволяє ефективно вирішувати завдання в рамках проектів з IoT, забезпечуючи оптимальне співвідношення ціна/функціонал/продуктивність для кожного конкретного випадку.

Важливою сходинкою в процесі розробки систем з використанням мережевих технологій одним з найкритичніших аспектів є розгляд і вибір сучасних комунікаційних протоколів прикладного рівня моделі TCP/IP. Важливо зрозуміти, що в умовах стрімкого розвитку IoT існує необхідність в адекватному виборі комунікаційних протоколів, які не тільки відповідають вимогам поточного проекту, але й мають потенціал для майбутнього розширення системи. Протоколи прикладного рівня відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та ефективної комунікації між пристроями, що є основою для функціонування IoT-систем.

Аналіз цих протоколів стає ще більш важливим з огляду на те, що неправильний вибір може призвести до значних затримок у розробці та підвищення вартості проекту. Як зазначається у статті "Messaging Protocols for IoT Systems – A

Pragmatic Comparison" [54], існує велика кількість протоколів, кожен з яких має свої особливості, що роблять його більш або менш придатним для певних задач.

З огляду на те, що IoT-системи все частіше стають основою для критично важливих застосувань, таких як промисловий Інтернет речей, розумні міста, медичні пристрої, тощо, необхідно враховувати не тільки технічні характеристики протоколів, але й їхню зрілість, стабільність та відповідність сучасним вимогам безпеки. Це означає, що при розробці інтеграції технологій IoT важливо обрати протокол, який не тільки забезпечить необхідну функціональність, але й буде здатний ефективно працювати в умовах високого навантаження та забезпечити захист даних.

Проведення актуалізованого компаративного аналізу комунікаційних протоколів прикладного рівня TCP/IP є важливим етапом у підборі оптимального рішення для впровадження в IoT-системи. Такий аналіз дозволить розробникам чітко розуміти, які протоколи найкраще відповідають вимогам конкретного проекту, враховуючи особливості середовища, в якому система буде функціонувати, і специфіку пристроїв, які до неї підключені. Це також сприятиме зниженню ризиків під час реалізації проекту, забезпеченню можливості обслуговування та підтримки з виключенням надлишкових витрат.

Спираючись на матеріали вищезгаданої статті "Messaging Protocols for IoT Systems – A Pragmatic Comparison" [54], доцільно здійснити комплексну оцінку рівня дослідженості кожного з розглянутих у ній відкритих протоколів. Важливо також вивчити ступінь зацікавленості наукової спільноти до кожного з цих протоколів, що дозволить глибше зрозуміти, які саме технології знаходяться в центрі уваги сучасних досліджень і які з них мають найбільший потенціал для подальшого розвитку та впровадження в системах IoT. Зважаючи на це, варто провести аналіз, який допоможе виявити, наскільки активно досліджуються такі протоколи, як MQTT, MQTT-SN, CoAP, STOMP, XMPP, WAMP, AMQP, DDS, OPC UA та LwM2M. Для отримання об'єктивних даних та статистичного підтвердження рівня зацікавленості до цих протоколів, доцільно скористатися ресурсом Scopus.

Аргументуючи необхідність бібліографічного аналізу відкритих комунікаційних протоколів, представлених у вищезгаданій статті, можна наголосити на тому, що аналіз наукової літератури та рівня зацікавленості наукової спільноти є критично важливим для оцінки актуальності та перспективності тих чи інших технологій у сфері IoT. Бібліографічний аналіз дає змогу виявити ступінь популярності та прийняття певних протоколів серед дослідників, що, в свою чергу, є важливим індикатором їхньої зрілості та стабільності. Наприклад, протоколи, які часто згадуються в наукових статтях, мають більш широке застосування і краще підтримуються спільнотою розробників. Це може бути критичним фактором при виборі протоколу для інтеграції в IoT-систему, особливо коли важлива наявність достатньої кількості ресурсів та документації для успішної реалізації проекту.

Для отримання статистичних даних, що відображають рівень дослідницької активності щодо використання конкретних комунікаційних протоколів у контексті технологій IoT, було проведено аналіз на основі наукометричної бази даних Scopus. З метою забезпечення актуальності та точності отриманих результатів, фільтрація даних охоплювала публікації від дати першої публікації до 2023 р. включно. Для більш детального дослідження були відібрані роботи, що відносяться до таких галузей наук, як комп'ютерні науки, інженерія та соціальні науки. Це дозволило зосередитися на міждисциплінарних аспектах розвитку та впровадження протоколів у різних сферах застосування.

Для здійснення пошуку було сформульовано спеціальний запит, який включав ключові терміни, що стосуються досліджуваних протоколів. Наприклад, для аналізу публікацій, присвячених протоколу MQTT, використовувався такий запит у форматі: "TITLE-ABS-KEY (mqtt AND protocol AND iot) AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch"))". Сформований запит забезпечує вибір публікацій, де ключові слова "MQTT", "protocol" і "IoT" присутні в назві, анотації або ключових словах статей. Обмеження за періодом

публікацій від першої доступної дати до 2023 р. включно введено з метою забезпечення статистики за повні роки періоду аналізу на момент дослідження та виявити довгострокові тренди в розвитку протоколів у контексті комп'ютерних наук, інженерії та соціальних аспектів їх застосування. Аналіз щорічної кількості публікацій впродовж періоду дозволяє не тільки оцінити сучасний стан досліджень, але й простежити динаміку їхнього розвитку протягом часу. додано фільтрацію за типами документів, зокрема на статті, тези конференцій та розділи книг. Метою уточнення типу публікацій є зосередження уваги на найбільш науково значущих публікаціях, які представляють собою ключові результати досліджень і розробок у сфері IoT. Цей підхід дозволяє виключити менш значущі матеріали, такі як короткі повідомлення, відгуки чи технічну документацію, і зосередитися на документах, які найбільше впливають на розвиток науки і технологій. Результати, отримані з наукометричної бази даних Scopus для аналізу загальної кількості публікацій за ключовими словами MQTT, MQTT-SN, CoAP, STOMP, XMPP, WAMP, AMQP, DDS, OPC UA та LwM2M з використанням зазначених фільтраційних заходів наведено в таблиці 28.

Таблиця 28

Загальна кількість публікацій за тематикою дослідження обраних комунікаційних протоколів в IoT за даними Scopus за період до 2023 р. включно

Протокол	MQTT	MQTT-SN	CoAP	STOMP	XMPP	WAMP	AMQP	DDS	OPC UA	LwM2M
Кількість публікацій	1831	54	995	4	116	1	136	80	85	62

Аналізуючи кількість публікацій за тематикою дослідження обраних комунікаційних протоколів в IoT за даними Scopus до 2023 р. включно, можна зробити кілька важливих висновків. Протокол MQTT значно випереджає інші протоколи за кількістю публікацій, маючи 1831 публікацію. Це свідчить про те, що MQTT є найбільш досліджуваним і популярним протоколом у сфері IoT, завдяки

своїй надійності, простоті та широкому застосуванню в різних галузях. Протокол CoAP займає друге місце з 995 публікаціями, що підкреслює його значення в контексті IoT, особливо у випадках, коли важливою є ефективність використання ресурсів і негарантована доставка даних є прийнятною. Протокол MQTT-SN, який є доповненням до MQTT, спеціально розробленим для пристроїв з обмеженими ресурсами та зниженим навантаженням на мережу, має 54 публікації. Це свідчить про зацікавленість у використанні цього протоколу в умовах, коли необхідна оптимізація енергоспоживання та мережевого трафіку. Протоколи AMQP і XMPP також привернули певну увагу дослідників, що видно з кількості публікацій: 136 і 116 відповідно. Це свідчить про їхню роль у спеціалізованих сферах, де потрібні надійні механізми обміну повідомленнями та підтримка складних топологій мереж. Інші протоколи, такі як DDS (80 публікацій), OPC UA (85 публікацій), і LwM2M (62 публікації), також мають певний рівень зацікавленості, але значно поступаються за популярністю провідним протоколам. Це може вказувати на їхню вузьку спеціалізацію або обмежене застосування у порівнянні з протоколами, що домінують у дослідженнях. Протоколи STOMP і WAMP мають дуже низьку кількість публікацій, що свідчить про обмежений інтерес наукової спільноти або про їхню специфічну застосовність у рамках IoT-систем.

Отримані дані підкреслюють ключову роль протоколів MQTT і CoAP у сфері IoT, а також вказують на значущість таких протоколів, як MQTT-SN, у спеціалізованих умовах з обмеженими ресурсами. Водночас інші протоколи демонструють менш помітний вплив у науковому середовищі. Це створює підґрунтя для детального аналізу бібліометричних показників кожного з цих протоколів, що дозволить глибше зрозуміти рівень їхнього дослідження та популярності.

За результатами вищевказаного запиту щодо протоколу MQTT в наукометричній базі даних Scopus було виявлено 1831 науковий документ. Першою публікацією з цього питання є тези конференції під назвою "Resolving coordination challenges in cooperative mobile services" [55]. Ця публікація була представлена на 6th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous

Computing, яка відбулася впродовж 4-6 липня 2012 р. У роботі досліджується концепція IoT, де об'єкти взаємопов'язані та можуть виконувати інтелектуальні сервіси, використовуючи функціональність веб-об'єктів, що їх оточують. У зв'язку з цим виникають численні виклики, пов'язані з координацією сервісів у мобільних середовищах, зокрема щодо взаємодії між сервісами, встановлення комунікаційних каналів між фрагментами сервісів та передачі подій у реальному часі. У публікації запропоновано модель координації та рішення для цих викликів за допомогою розробки моделі виконання кооперативних сервісів у мобільних середовищах, використовуючи парадигму публікації-підписки для передачі контрольних подій. Водночас, проведено оцінку цієї моделі та проаналізовано поліпшення механізмів оптимізації, реалізованих на основі протоколу MQTT і симулятора NS-3. Публікація є важливою, оскільки вона вперше акцентує увагу на використанні протоколу MQTT для вирішення координаційних проблем у розподілених мобільних середовищах, що підкреслює значущість протоколу у розвитку технологій IoT.

Найбільш впливовою виявилася стаття "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications" [56], опублікована в журналі "IEEE Communications Surveys & Tutorials" в жовтні 2015 р. На момент проведення аналізу, ця стаття мала 6163 цитування у базі даних Scopus та показник впливу FWCI (Field-Weighted Citation Impact) 163,57 одиниць, що свідчить про її надзвичайно високу значущість у науковій спільноті. У цій статті представлено огляд IoT з акцентом на технологіях, що його підтримують, протоколах та питаннях застосування. Автори досліджують, як останні розробки в сферах RFID, смарт-сенсорів, комунікаційних технологій та інтернет-протоколів сприяють розвитку IoT. Основна ідея полягає в тому, щоб смарт-сенсори могли безпосередньо співпрацювати без залучення людини, забезпечуючи новий клас додатків. У статті зазначається, що поточна революція в Інтернеті, мобільному зв'язку та системах машино-машинної взаємодії може вважатися першою фазою розвитку IoT. У найближчі роки очікується, що Інтернет речей об'єднає різноманітні технології для

створення нових застосувань, шляхом з'єднання фізичних об'єктів з метою підтримки інтелектуального прийняття рішень.

Стаття починається з надання горизонтального огляду IoT, після чого детально розглядаються технічні аспекти технологій, протоколів та застосувань, що підтримують IoT. Особливістю цього огляду є надання глибшого аналізу найбільш актуальних протоколів та питань застосування, що дозволяє дослідникам та розробникам додатків швидко ознайомитися з тим, як різні протоколи працюють разом для забезпечення необхідної функціональності без необхідності звертатися до RFC та стандартів. Автори також розглядають зв'язок IoT з іншими новітніми технологіями, включаючи аналіз великих даних, хмарні та туманні обчислення, а також підкреслюють необхідність кращої горизонтальної інтеграції серед IoT-сервісів. Ключові слова статті, такі як AMQP, CoAP, DDS, IoT gateway, mDNS, MQTT, XMPP, відображають комплексність і широту досліджуваних тем, що охоплюють широкий спектр протоколів і технологій, які відіграють ключову роль у функціонуванні IoT. Це підтверджує важливість статті як джерела знань для дослідників і розробників, що прагнуть зрозуміти, як різні компоненти IoT можуть ефективно взаємодіяти для реалізації передових сервісів і додатків.

Статистичні дані, що відображають динаміку кількості публікацій за кожен рік, представлені у Таблиці 29 [Додаток Л]. Це дозволяє простежити тенденції зростання або зниження інтересу до протоколу MQTT серед дослідників і визначити основні етапи його популярності.

Аналізуючи отримані дані з наукометричної бази Scopus щодо використання протоколу MQTT у контексті технологій IoT, можна простежити чіткі тенденції зростання зацікавленості наукової спільноти в цій темі протягом останнього десятиліття. Для візуальної оцінки динаміки трендів дані представлені у вигляді графіку на рисунку 23 [Додаток Л].

Розпочавши з перших публікацій у 2012 р., де було лише дві роботи, присвячені даній темі, можна спостерігати поступове зростання кількості досліджень. До 2014 р. кількість публікацій була досить незначною, що може

свідчити про те, що протокол MQTT тільки починав набирати популярність серед дослідників. У 2015 р. кількість публікацій збільшилася до 19, що може бути пов'язано з розвитком інтересу до IoT та необхідністю ефективних протоколів комунікації. У 2016 р. кількість публікацій зростає до 42, що свідчить про поступове визнання MQTT як важливого інструменту для комунікації в IoT-системах. Починаючи з 2017 р., відбувається значний ріст, досягнувши 115 публікацій, що підтверджує зростання уваги до цього протоколу у зв'язку з розширенням сфер його застосування. З 2018 по 2022 роки спостерігається стабільний приріст кількості публікацій, що свідчить про безперервний інтерес і активне дослідження тематики. Особливо помітним є 2023 р., коли кількість публікацій досягла 351, що свідчить про пік інтересу до протоколу MQTT у науковій спільноті. Це може бути обумовлено розвитком IoT у багатьох галузях, включаючи промисловість, медицину та інші сфери, де необхідна надійна і ефективна комунікація між пристроями. Таким чином, тренд зростання кількості публікацій за період 2012-2023 рр. чітко відображає зростаючий інтерес науковців до протоколу MQTT в контексті впровадження в IoT-системи. Цей тренд також підкреслює важливість подальших досліджень у цій галузі та можливості впровадження нових рішень на основі цього протоколу.

Згідно з отриманими даними, у Scopus було проведено бібліометричний аналіз 54 отриманих за запитом, сформованим для протоколу MQTT-SN, який є варіацією MQTT [57]. Результати цього аналізу представлені в таблиці 30 [Додаток Л], а динаміка кількості публікацій зображена на графіку на рисунку 24 [Додаток Л]. За період з 2015 по 2023 р. можна простежити відносно стабільний інтерес до використання протоколу MQTT-SN в IoT. Початковий рівень публікацій у 2015- 2016 рр. складав по 2 публікації на рік, що свідчить про початкову зацікавленість у дослідженні цього протоколу. У 2018 р. кількість публікацій зростає до 8, що, ймовірно, відображає підвищення уваги до специфічних умов застосування цього протоколу в IoT-системах. Протягом наступних років, з 2019 по 2023 рр., кількість публікацій коливалася в межах 7-9 на рік, що свідчить про стабільний, але

обмежений інтерес наукової спільноти до цього протоколу. Ці дані вказують на те, що MQTT-SN залишається важливим протоколом для певних спеціалізованих застосувань у системах IoT, особливо там, де необхідна оптимізація енергоспоживання та зниження навантаження на обладнання та мережі. Хоча кількість досліджень, присвячених цьому протоколу, є обмеженою, його специфічна роль як спеціалізованої версії протоколу MQTT підкреслює його значущість у відповідних контекстах використання.

За результатами запиту щодо протоколу MQTT-SN в Scopus першою опублікованою науковою роботою є тези “CAEsAR: A Context-Aware Addressing and Routing scheme for RPL networks” [58]. У роботі автори розглядають Інтернет речей як перехід від концепції до реальності, де сенсори, смартфони та розумні пристрої утворюють інтелектуальні середовища. Для підтримки цього процесу вони пропонують протокол CAEsAR, який використовує контекстно-орієнтовану адресацію та маршрутизацію на основі дерев RPL. Протокол CAEsAR було порівняно з MQTT-SN, і результати показали, що CAEsAR генерує значно менше сигнального трафіку, що свідчить про його перевагу в оптимізації мережевого навантаження. Однак, MQTT-SN все ж залишається ефективним рішенням у специфічних умовах з обмеженими ресурсами, коли потрібна проста та легка реалізація комунікаційного протоколу.

Найбільш цитованою публікацією за запитом щодо протоколу MQTT-SN стала стаття "Secure MQTT for Internet of Things (IoT)" [59]. Стаття має високий рейтинг впливу FWCI 17.78, що свідчить про її значущість у науковому середовищі. Автори зосередилися на проблемах безпеки в IoT, зазначивши, що існуючі протоколи, такі як MQTT і MQTT-SN, не мають вбудованих механізмів захисту. Вони запропонували захищені версії цих протоколів (SMQTT і SMQTT-SN), що базуються на атрибутивному шифруванні з використанням легкої криптографії на еліптичних кривих. Результати симуляцій, наведені в дослідженні, демонструють ефективність цих протоколів у забезпеченні захищеної комунікації в IoT-середовищах.

Обидві роботи є важливими у контексті розвитку IoT та підкреслюють специфічні переваги й виклики, пов'язані з використанням MQTT-SN.

За результатами запиту, сформованого щодо протоколу CoAP у Scopus було виявлено 995 публікацій. Першою публікацією з цього питання є тези на тему "Web services for the Internet of things through CoAP and EXI" [60]. Дослідники розглядають бачення IoT, де повсякденні об'єкти, такі як побутові прилади, виконавчі механізми та вбудовані системи різного роду, будуть з'єднані між собою та з Інтернетом. Такі системи створюватимуть розподілену мережу з можливостями збору даних, що відкриє безпрецедентні ринкові можливості та стимулюватиме створення нових послуг, включаючи моніторинг енергії та контроль будинків, будівель, промислових процесів тощо. Ця публікація є знаковою, оскільки вона стала першим кроком у дослідженні та розробці протоколу CoAP, який згодом став одним із ключових протоколів у сфері IoT.

Найбільш цитованою публікацією за результатами запиту щодо протоколу CoAP в наукометричній базі даних Scopus виявилася та сама стаття "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications" [56], яку було розглянуто раніше при аналізі запиту щодо протоколу MQTT. Стаття не тільки описує технічні аспекти протоколів, але й розглядає їхній потенціал у контексті викликів і можливостей, з якими стикається сучасний IoT. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити роль CoAP у забезпеченні ефективного зв'язку в розподілених системах і підкреслює важливість цього протоколу в загальній екосистемі IoT. Завдяки своєму комплексному підходу і глибокому аналізу, ця стаття продовжує залишатися впливовим джерелом у науковій спільноті.

Статистичні дані, що відображають динаміку кількості публікацій за кожен рік, наведені у таблиці 31 [Додаток Л]. Це дозволяє простежити тенденції зростання або зниження інтересу до протоколу CoAP серед дослідників і визначити ключові етапи його популярності. Аналізуючи динаміку кількості публікацій, присвячених протоколу CoAP, можна спостерігати певні тенденції, які відображають зміну зацікавленості наукової спільноти до цього протоколу у контексті розвитку

технологій IoT. Для наочного відображення динаміки трендів за період 2011-2023 рр. включно дані представлені у вигляді графіку на рисунку 25 [Додаток Л].

Перші публікації про CoAP з'явилися у 2011 р., і вже у 2012 р. кількість робіт суттєво зросла, що свідчить про початковий інтерес до цього протоколу як перспективного рішення для мереж з обмеженими ресурсами, де важливими є простота і низьке енергоспоживання. У наступні роки, з 2014-2017 рр., фіксується постійне зростання кількості публікацій, що досягло піку у 2018 р., коли було опубліковано 134 статті. Це відображає період активного дослідження CoAP, коли протокол використовувався в різних IoT-додатках завдяки його простоті і ефективності у роботі з пристроями з обмеженими ресурсами. Проте, починаючи з 2019 р., спостерігається поступове зниження кількості публікацій, що відображає зменшення інтересу до CoAP. Ця тенденція збігається з розвитком бездротових мереж, підвищенням швидкості передачі даних та зростанням продуктивності обладнання, що сприяє переходу до більш надійних протоколів з гарантованою доставкою даних, таких як MQTT. Хоча CoAP і продовжує використовуватися, його обмеження щодо негарантованої доставки даних та залежність від стабільності мережевого з'єднання роблять його менш привабливим у сучасних умовах. Зниження кількості публікацій у 2021-2023 рр. може бути індикатором того, що наукова спільнота все більше віддає перевагу іншим протоколам, які забезпечують більшу надійність і мають кращу підтримку для сучасних високошвидкісних мереж та обладнання з вищою продуктивністю. Це свідчить про те, що CoAP поступово відходить на другий план у порівнянні з іншими протоколами, що краще відповідають вимогам сучасних IoT-систем.

За результатами сформованого запиту було отримано бібліометричні показники для протоколу AMQP, які відображають загальну кількість публікацій з моменту появи першої публікації до 2023 р. включно. Всього виявлено 136 публікацій, що свідчить про певний рівень зацікавленості наукової спільноти до цього протоколу в контексті IoT.

Дані, зведені у таблицю 32 [Додаток Л] та представлені на графіку на рисунку 26 [Додаток Л], виявляють, що в 2015 р. кількість публікацій становила лише 2, що свідчить про початковий етап досліджень протоколу AMQP в цій галузі. Протягом наступних років спостерігається зростання кількості публікацій, що досягає свого піку у 2021 р. з 25 публікаціями. У 2022-2023 рр. кількість публікацій стабілізувалася на рівні 17 на рік, що може вказувати на стабільний, але помірний інтерес до протоколу AMQP у дослідницькому середовищі. Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок про те, що AMQP залишається важливим протоколом у сфері IoT, хоча його дослідження не демонструє такого стрімкого зростання, як деякі інші протоколи.

Першою науковою публікацією, що стосується протоколу AMQP, є стаття науковців зі США під назвою "Toward better horizontal integration among IoT services" [61]. Ця стаття має високий рейтинг впливу FWCI 7.86, що свідчить про її значну цитованість і впливовість у науковому середовищі. Автори розглядають низку комунікаційних протоколів для IoT, таких як CoAP, REST, XMPP, AMQP, MQTT, DDS та інші. Кожен із цих протоколів спеціалізується на окремому аспекті комунікацій в IoT, що призводить до значної фрагментації ринку. Вони зазначають, що відсутність універсального протоколу, здатного задовольнити вимоги вертикальних ринків IoT, створює основну перешкоду для розвитку нових послуг. Під вертикальними ринками маються на увазі специфічні сегменти, такі як машинна взаємодія (машина до машини), взаємодія з сервісами (машина до сервера) та взаємодія між серверами, які мають свої особливі вимоги до комунікації. Горизонтальна інтеграція, у свою чергу, стосується з'єднання та взаємодії між різними IoT-сервісами, незалежно від їх специфіки. Це необхідно для того, щоб створити нові функціональні можливості, які б об'єднували різні аспекти роботи IoT-систем у єдину ефективну мережу. Проте ця фрагментація ринку заважає реалізації горизонтальної інтеграції, яка є ключовою для відкриття нових можливостей і надання більш широкого спектра послуг. Для вирішення цієї проблеми автори пропонують універсальний IoT-протокол, який є достатньо

гнучким, щоб задовольнити вимоги вертикальних ринків IoT. Вони покращили базовий протокол MQTT, додавши йому можливість підтримки функцій QoS, використовуючи поєднання IP-мультикастингу, інтелектуального управління чергами брокера і технік аналізу трафіку. Первісна оцінка цього вдосконаленого MQTT-протоколу показала значне покращення показників затримки в порівнянні з базовою версією.

Найбільш цитованою публікацією, пов'язаною з протоколом AMQP, є широкоохоплююча стаття "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications" [56], яку було розглянуто раніше в рамках аналізу запиту щодо протоколу MQTT. Ця стаття продовжує залишатися впливовим джерелом, що охоплює широке коло тем, включаючи протоколи, технології та додатки IoT, підкреслюючи важливість комплексного підходу до розгляду різних аспектів IoT у наукових дослідженнях.

За результатами сформованого запиту було отримано бібліометричні показники для протоколу XMPP, що відображають загальну кількість публікацій в рамках фільтрованого запиту за період до 2023 р. включно. Загалом було виявлено 116 публікацій, що свідчить про певний рівень інтересу до цього протоколу в контексті IoT. Дані зведені у таблицю 33 [Додаток Л] та представлені на графіку на рисунку 27 [Додаток Л], показують, що можна відзначити кілька важливих трендів щодо кількості публікацій, присвячених протоколу XMPP в контексті IoT.

Перш за все, варто звернути увагу на те, що кількість публікацій, пов'язаних із протоколом XMPP, починаючи з 2011 р., не відзначалася значним зростанням. Початкові роки (2011-2013 рр.) характеризувалися невеликою кількістю публікацій, яка коливалася в межах 2-5 статей на рік. З 2014 по 2016 роки спостерігається деяке підвищення інтересу до протоколу XMPP, що виявляється у поступовому зростанні кількості публікацій. Це, ймовірно, пов'язано з розширенням дослідницьких та прикладних проектів, які потребують реального часу комунікації в IoT, де XMPP міг стати корисним. Пік інтересу до XMPP припадає на 2017-2018 роки, коли кількість публікацій досягла найвищого рівня (14 і 17 публікацій відповідно). Однак з 2019 р.

спостерігається поступове зниження кількості публікацій, що може бути індикатором того, що XMPP починає втрачати популярність серед дослідників у порівнянні з іншими протоколами. Це зниження продовжується до 2023 р., де кількість публікацій стабілізується на рівні близько 10-12 на рік. Таке зниження інтересу може бути пов'язане з розвитком нових, більш ефективних протоколів, які краще відповідають потребам сучасних IoT-систем. Таким чином, загальний тренд можна охарактеризувати як поступове зростання інтересу до XMPP з піком у 2017-2018 рр., після чого слідує зниження активності публікацій. Це свідчить про те, що XMPP, хоча і залишається актуальним, поступово поступається місцем іншим протоколам у сфері IoT, що може бути пов'язано з розвитком нових технологій та змінюваними вимогами до комунікаційних протоколів у цій галузі.

Першим науковим документом, присвяченим темі застосування XMPP, стали тези “Enhancing traceability and industrial process automation through the VIRTUS middleware” [62]. Робота дослідників зосереджена на використанні інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення ефективності та гнучкості промислових процесів, що є ключовим аспектом розвитку сучасних виробництв. У тезах описано досвід застосування підходу, заснованого на концепції IoT, у сфері логістики в промислових виробничих середовищах, зокрема для підвищення рівня контролю та управління логістичними потоками. Рішення реалізоване за допомогою існуючого орієнтованого на Інтернет речей посередницького програмного забезпечення VIRTUS, яке використовує відкритий стандартний протокол XMPP та базується на фреймворку OSGi. Це програмне забезпечення забезпечує масштабованість, гнучкість, орієнтовану на події архітектуру, незалежну від мережі, для управління екосистемою різноманітних взаємопов'язаних об'єктів. Це рішення було протестовано та підтверджено в реальних умовах виробничого середовища з розташованими на відстані виробничими ділянками. Хоча ці тези отримали лише 7 цитувань, вони все ж внесли певний вклад у розвиток ідей застосування XMPP в промислових умовах.

Найбільш цитованою публікацією, що стосується протоколу XMPP, є стаття "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications" [56], яка вже розглядалася раніше під час аналізу запиту щодо протоколу MQTT. Ця стаття надає всебічний огляд сучасних технологій, протоколів та додатків у сфері IoT, підкреслюючи значення XMPP серед інших комунікаційних протоколів.

Аналізуючи результати запиту, сформованого у Scopus для протоколу DDS (Data Distribution Service) в контексті IoT, було виявлено 80 публікацій, що охоплюють період з 2013 по 2023 рік. Ці дані зведені у таблицю 34 [Додаток Л], а також представлені у вигляді графіку на рисунку 28 [Додаток Л].

У 2013 р. було зафіксовано лише одну публікацію, що свідчить про початковий етап досліджень DDS у сфері IoT. Наступного року ситуація залишилася незмінною, що свідчить про поступове формування інтересу до цього протоколу серед дослідників. У 2015 р. кількість публікацій зросла до п'яти, що може свідчити про розширення інтересу до DDS, особливо в умовах, де необхідні ефективні засоби розподілу даних у реальному часі. У 2016 р. спостерігалось подальше зростання до восьми публікацій, а в 2017-2018 рр. кількість публікацій стабілізувалася на рівні 10 на рік. Така стабільність свідчить про те, що DDS знайшов своє місце в дослідницьких і прикладних сценаріях, де його функціональні можливості є особливо корисними. У 2019-2020 рр. кількість публікацій залишалася стабільною, що відображає постійний інтерес до протоколу. Однак, у 2021 р. спостерігається зниження до семи публікацій, що, ймовірно, було зумовлено впливом епідемії коронавірусу та пов'язаними з нею карантинними обмеженнями, які вплинули на наукову діяльність у глобальному масштабі. У 2022-2023 рр. кількість публікацій знову зросла до дев'яти і десяти відповідно, що свідчить про відновлення інтересу до DDS і стабільну увагу до цього протоколу в науковій спільноті. Загалом, з 2017 р. можна спостерігати стабільний тренд щодо кількості публікацій, що вказує на те, що DDS продовжує залишатися актуальним у певних нішевих застосуваннях в IoT. Проте, варто зазначити, що його популярність залишається відносно низькою

порівняно з іншими протоколами, що може бути пов'язано з його специфічністю та обмеженим застосуванням у вузьких сферах.

Першим опублікованим науковим документом, що розглядає використання DDS у контексті IoT, є стаття “RELOAD extension for data discovery and transfer in data-centric publish-subscribe environments” [63]. У ній основна увага приділяється архітектурі та комунікаційному підходу, відомому як Data-Centric Publish-Subscribe (DCPS), де основним принципом є обмін даними через спільний простір за допомогою публікації та підписки. Застосування DDS у цьому контексті обґрунтовано його здатністю ефективно працювати з вмістом даних у великих IoT системах. Автори запропонували розширення до специфікації протоколу IETF REsource LOcation And Discovery (RELOAD), яке дозволяє забезпечити ефективне виявлення та передачу даних у великих розгортаннях IoT, де DDS може використовуватися для забезпечення масштабованості та надійності комунікацій. Рішення, запропоноване в статті, було випробувано на симульованих мережах, що склалися з 500 до 10 000 вузлів. Експерименти продемонстрували, що DDS у поєднанні з розширенням RELOAD здатне забезпечити високий рівень масштабованості та стабільності у великих системах IoT, що підкреслює значний потенціал цього підходу для застосування в практичних рішеннях. Таким чином, ця стаття заклала важливу основу для подальших досліджень і впровадження DDS у реальних умовах.

Найвпливовішою публікацією за тематикою DDS, знову виявилася стаття "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications" [56], яка вже була розглянута раніше при аналізі запиту щодо протоколу MQTT. Ця стаття продовжує залишатися лідером за кількістю цитувань і значущістю в науковій спільноті, підкреслюючи її значення як ключового джерела для досліджень у галузі IoT і комунікаційних протоколів, зокрема DDS.

Ці дві публікації представляють важливі віхи в дослідженнях DDS, висвітлюючи як початкові концептуальні підходи до застосування протоколу, так і

більш комплексні огляди, які стали основою для подальших досліджень і практичних впроваджень у сфері IoT.

Аналізуючи таблицю 35 [Додаток Л], що відображає динаміку кількості публікацій щодо використання протоколу OPC UA в IoT за даними Scopus, отриманими за результатами запиту "TITLE-ABS-KEY ("opc ua" AND protocol AND iot) AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch"))", можна виділити кілька важливих тенденцій.

Перші публікації з цієї тематики з'явилися в 2013 р., проте їх кількість була вкрай незначною – лише дві статті. Наступного року не було жодної публікації, що може свідчити про відсутність зацікавленості або недостатню розробленість цієї теми на той момент. Починаючи з 2015 р., коли була опублікована лише одна стаття, спостерігається поступове зростання кількості публікацій, яке посилюється з кожним роком. Це зростання стає більш помітним у період з 2016 по 2021 роки, де кількість публікацій збільшується з 3 до 16. Така динаміка може свідчити про поступове підвищення інтересу до використання протоколу OPC UA в контексті IoT, що може бути пов'язане з розвитком промислового IoT і впровадженням стандартів для забезпечення інтероперабельності між різними системами. Особливо варто звернути увагу на стійке збільшення кількості публікацій у період з 2017 по 2021 роки, де кожен наступний рік приносить більше публікацій, ніж попередній. Це може вказувати на те, що дослідники все більше зацікавлені в цьому протоколі, вивчають його можливості та переваги в контексті IoT, а також інтеграції з іншими технологіями. Проте, у 2023 р. спостерігається значне зниження кількості публікацій до 8. Це може бути пов'язано з декількома факторами, включаючи насичення ринку досліджень щодо цього протоколу, або ж з тим, що увага дослідників перемістилася на інші, більш сучасні або перспективні протоколи. Загалом, тренд показує, що OPC UA поступово здобув популярність у науковому співтоваристві, особливо в період з

2017 по 2021 роки, але останні дані свідчать про можливе зниження інтересу до цього протоколу в контексті досліджень IoT.

Першою публікацією, що висвітлює застосування протоколу OPC UA в контексті IoT, є стаття "Heterogeneous device interaction using an IPv6 enabled service-oriented architecture for building automation systems" [64]. Вона представляє детальний огляд сучасних підходів до проектування та реалізації систем автоматизації у консолідовані RESTful середовища з використанням протоколу OPC UA. Дослідження акцентує увагу на новітньому протоколі CoAP, що забезпечує роботу RESTful вебслужб на обмежених ресурсах пристроїв, використовуючи UDP як транспортний рівень замість TCP, що робить комунікацію більш ефективною в умовах, коли потрібна негарантована, асинхронна або групова передача даних. Автори пропонують концепцію шлюзу, який дозволяє інтеграцію існуючих автоматизаційних технологій у сучасні мережі через використання OPC UA в поєднанні з IPv6. Це забезпечує уніфіковані інтерфейси для управління різноманітними технологіями, що забезпечує ефективну взаємодію в гетерогенних середовищах. Результати оцінки показують, що нові протоколи та методи кодування повідомлень, які були представлені у дослідженні, значно підвищують ефективність роботи у порівнянні з існуючими стандартами. Продуктивність системи підтверджується результатами тестування, що демонструють можливість інтерактивного управління користувачем на основі вебінтерфейсів, що базуються на OPC UA.

Лідером за цитуваннями та впливовістю серед публікацій, пов'язаних з протоколом OPC UA, є стаття "Interoperability for Industrial Cyber-Physical Systems: An Approach for Legacy Systems" [65]. Стаття отримала 145 цитувань і має високий рейтинг впливовості FWCI 5.90. Вона присвячена викликам, з якими стикаються сучасні промислові системи через швидко зростаючі вимоги до гнучкості та ефективної реакції на змінювані умови ринку. Для досягнення цих вимог у промислових середовищах впроваджуються нові технології та парадигми, такі як IoT, аналіз великих даних, Інтернет послуг (Internet of Services, IoS) та

сервіс-орієнтована архітектура (SOA). У цій роботі приділяється увага важливості структурної підключеності та функціональної інтероперабельності як ключових вимог для компонентів і систем у промислових кібер-фізичних системах. Стаття акцентує увагу на необхідності забезпечення інтеграції між фізичними операційними технологіями та кібер інформаційними технологіями, що дозволяє знизити складність інтеграції та забезпечити безперервність роботи існуючих систем у нових умовах. Ця робота є важливою для розуміння можливостей OPC UA у забезпеченні інтероперабельності між старими та новими системами, що робить її актуальною в контексті впровадження IoT в промислових середовищах. Пропонована у статті інтеграційна архітектура надає можливість реалізації плавного переходу від традиційних до сучасних систем без потреби внесення змін у обладнання, що вже експлуатується.

Аналізуючи таблицю 36 та графік на рисунку 30 [Додаток Л], можна відзначити наступні тренди в публікаційній активності щодо використання протоколу LwM2M (Lightweight Machine to Machine) в контексті IoT. Перший рік, коли з'явилися публікації на цю тему, був 2015, і одразу було опубліковано 6 статей. Цей показник є відносно високим для старту, що може свідчити про певний інтерес дослідників до LwM2M, як до нового стандарту, розробленого для управління малоресурсними пристроями в IoT. Проте у наступні два роки, 2016 та 2017, кількість публікацій зменшилась, що може бути наслідком певного уповільнення у дослідницькому інтересі або технічних складнощів, які виникли під час адаптації та впровадження протоколу. Зокрема, у 2016 р. кількість публікацій скоротилася до 3, а у 2017 р. – до 4. У 2018 р. відбулося значне зростання кількості публікацій до 11, що свідчить про зростаючий інтерес до цього протоколу. Це може бути пов'язано з активним розвитком IoT і зростанням потреби у протоколах, які забезпечують ефективне управління пристроями з обмеженими ресурсами. У цей період дослідники, ймовірно, приділяли більше уваги практичному впровадженню LwM2M у різних сценаріях використання. Однак у 2019 р. спостерігається певне зниження до 7 публікацій, що може бути наслідком певного насичення дослідницької тематики

або переходу уваги на інші протоколи. У 2020-2021 рр. кількість публікацій залишалася відносно стабільною – 9 та 8 відповідно. Це свідчить про те, що інтерес до LwM2M залишався на певному рівні, проте без значних сплесків. У 2022 р. спостерігається спад до 5 публікацій, що може бути зумовлено, зокрема, наслідками пандемії COVID-19, яка вплинула на дослідницькі процеси та темпи розвитку нових технологій. Проте у 2023 р. кількість публікацій зросла до 9, що може свідчити про нові виклики або застосування протоколу LwM2M у нових областях IoT. Загалом, динаміка публікацій щодо LwM2M демонструє періодичні коливання, що вказує на еволюційний розвиток інтересу до цього протоколу. Хоча загальна кількість публікацій не є надто високою, стабільна публікаційна активність упродовж аналізованого періоду свідчить про те, що LwM2M залишається актуальним у сфері IoT, особливо для сценаріїв, де важливими є ефективне управління енергоспоживанням та обмеженими ресурсами пристроїв.

Першим науковим документом, який було опубліковано з теми застосування протоколу LwM2M, стали тези "IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015" [66]. Тези мають на меті проаналізувати питання інтеграції протоколу LwM2M у стандартну архітектуру IoT/M2M. У тезах зазначається, що IoT/M2M спрямований на інтеграцію великої кількості гетерогенних пристроїв, які потребують постійного виявлення та переналаштування для оновлення або відновлення після збоїв. Протокол управління пристроями дозволяє абстрагувати IoT/M2M пристрій як керований об'єкт, спрощуючи управління пристроєм. У цій роботі дослідники пропонують та аналізують шляхи інтеграції LwM2M у стандартну архітектуру IoT/M2M. Завдяки цій безшовній інтеграції, IoT/M2M додаток отримує можливість керувати IoT/M2M пристроями з платформи IoT/M2M на більш високому рівні абстракції.

Що стосується найбільш цитованої публікації, то нею виявилися тези за темою "Survey of platforms for massive IoT" [67], які отримали високу увагу з боку наукової спільноти, про що свідчать 151 цитувань у Scopus і високий рейтинг впливовості FWCI 19.12. У тезах розглянуто платформний підхід до масових IoT

систем, а також зроблено огляд існуючих платформ та їхніх основних компонентів і функцій. Автори тез наголошують, що з розвитком IoT, значна кількість повсякденних об'єктів може стати підключеними до мережі та "розумними". IoT знайшов застосування у різних галузях, таких як розумні міста, розумне сільське господарство, розумне охорона здоров'я, розумне виробництво та багато інших. У тезах також зазначено, що на ринку зростає кількість IoT платформ, кожна з яких пропонує цінні і специфічні послуги та функції.

Тези надають огляд IoT платформ, обговорюють їх архітектуру та основні компоненти, а також комунікаційні протоколи, які використовуються для зв'язку між елементами IoT. Особлива увага приділяється тому, як протокол LwM2M може бути використаний для ефективного управління пристроями з обмеженими ресурсами в середовищі IoT. Це дослідження допомагає читачеві обрати відповідну IoT платформу, яка б найбільш задовольняла його вимоги в умовах великої кількості наявних платформ. Автори підкреслюють, що використання LwM2M є перспективним рішенням для реалізації сценаріїв, де важливо забезпечити ефективне управління ресурсами пристроїв і мінімізувати навантаження на мережу.

За результатами сформованого запиту, було отримано бібліометричні показники для протоколу STOMP, відповідно до яких виявлено лише 4 публікації за період з 2018 по 2023 рік. Дані представлені у таблиці 37 та графіку на рисунку 31 [Додаток Л]. Аналізуючи ці дані, можна відзначити, що протокол STOMP не здобув значної популярності серед науковців у контексті досліджень IoT. Перший пік публікацій припадає на 2018 рік, коли було опубліковано одну роботу, яка, як можна припустити, дала поштовх до подальших досліджень цього протоколу. Однак, у наступні роки (2019, 2020 та 2021) жодної публікації не було зареєстровано, що може свідчити про те, що інтерес до цього протоколу був тимчасовим або не був підтриманий достатнім рівнем наукових досліджень. У 2022 р. спостерігається одинична публікація, що, можливо, є результатом локалізованого інтересу або дослідження специфічного випадку використання протоколу STOMP. Лише у 2023 р. кількість публікацій збільшується до двох, що може свідчити про певне відновлення

інтересу до цього протоколу, хоча загальна кількість публікацій все ще залишається низькою. Варто зазначити, що загальна кількість публікацій щодо STOMP у середовищі IoT залишається невеликою, що свідчить про його обмежене використання або недостатню увагу з боку наукової спільноти. Така динаміка вказує на те, що протокол STOMP, можливо, залишається нішевим рішенням, яке використовується у вузькому колі спеціалізованих додатків, а не є загально визнаним стандартом для комунікацій в IoT.

Першою публікацією, що стосується протоколу STOMP (Streaming Text Oriented Messaging Protocol), і водночас найбільш цитованою є тези "Using Publish/Subscribe for Short-lived IoT Data" [68]. У роботі автор досліджує питання ефективного розподілу даних з IoT сенсорів, підкреслюючи важливість використання підходу публікація/підписка для забезпечення багатонаправленої комунікації. У контексті IoT такий підхід є більш ефективним, ніж традиційний підхід запит/відповідь, оскільки дозволяє забезпечити передачу даних від одного джерела до багатьох отримувачів. Основною метою дослідження, описаного у тезах, було визначити, який саме протокол публікації/підписки найбільш підходить для роботи з даними IoT. Одним із ключових критеріїв вибору була затримка передачі даних від джерела до отримувача, оскільки для багатьох IoT сценаріїв важливо, щоб дані були максимально свіжими. Тестування проводилось на платформі Raspberry Pi 3, яка вважається типовою для IoT середовища. Автор порівняв кілька протоколів, зокрема AMQP, MQTT, MQTT-SN, STOMP, WSN, XMPP, а також можливість використання посередницьких сервісів для трансляції даних між протоколами. Тези мають 11 цитувань у матеріалах Scopus, що свідчить про певний рівень впливу цього дослідження на наукове середовище. У контексті STOMP, автор досліджував його здатність забезпечувати мінімальну затримку передачі даних у тестових умовах. Використання протоколу STOMP у даному випадку підкреслює його потенціал для ефективної обробки короткоживучих даних у середовищах IoT, де швидкість передачі та надійність відіграють ключову роль.

Першою і єдиною опублікованою науковою роботою, що стосується використання протоколу WAMP у контексті IoT, є тези "Design, Specification and Implementation of a Distributed Home Automation System" [69]. Автори зосередилися на створенні розподіленої системи автоматизації будинку, що використовує протокол WAMP для забезпечення безперервного двостороннього зв'язку між додатками та системами. Основна увага приділяється підвищенню ефективності комунікацій і зниженню витрат, що досягається завдяки використанню протоколу WAMP. З одного боку, робота пропонує цікаві рішення для автоматизації будинку, яке має низку переваг, таких як економія на виділеній публічній IP-адресі та дорогому обладнанні. Використання WAMP дозволяє забезпечити низьку затримку та безперервний зв'язок, що є важливим для управління пристроями в реальному часі. Однак, існує кілька аспектів, які викликають занепокоєння. По-перше, той факт, що WAMP є єдиним протоколом, який був розглянутий в контексті цієї роботи, викликає питання щодо його широкого застосування в IoT. Незважаючи на те, що робота пропонує рішення для конкретного випадку використання, відсутність подальших досліджень і публікацій свідчить про обмежений інтерес наукової спільноти до цього протоколу. Це може бути зумовлено обмеженою функціональністю WAMP або його меншою придатністю для широкого спектру застосувань у порівнянні з іншими, більш популярними протоколами. По-друге, хоча робота демонструє ефективність WAMP у конкретних умовах, відсутність різноманітних дослідницьких підходів до його використання може вказувати на те, що протокол не є достатньо універсальним для підтримки більш складних і масштабних сценаріїв IoT. Крім того, недостатня кількість досліджень щодо його безпеки, масштабованості та продуктивності в реальних умовах може бути ще одним фактором, що стримує його поширення. Загалом, хоча робота представляє цікаві технічні рішення, використання WAMP у контексті IoT залишається маловивченим і обмеженим. Це свідчить про те, що протокол WAMP, хоча і має певні переваги, поки що не зміг завоювати широкого визнання серед дослідників і практиків у сфері IoT.

За результатами проведеного бібліометричного аналізу різних комунікаційних протоколів для IoT, включаючи MQTT, CoAP, AMQP, DDS, OPC UA, LwM2M, STOMP, WAMP, та інших, можна зробити кілька важливих висновків. По-перше, спостерігається чітка тенденція до зростання кількості публікацій, пов'язаних із використанням деяких протоколів у сфері IoT. Найбільш значущим серед них є протокол MQTT, який відзначається найвищою кількістю публікацій, що свідчить про його популярність та універсальність у широкому спектрі додатків. Це також підкреслює стабільний інтерес наукової спільноти до цього протоколу, що робить його найбільш дослідженим у контексті IoT.

Протоколи, такі як CoAP та OPC UA, також показують стабільне зростання кількості публікацій, що свідчить про їхню важливість у спеціалізованих галузях. CoAP, будучи більш орієнтованим на застосування в умовах обмежених ресурсів, активно використовується в проектах, що потребують ефективного управління енергоспоживанням та низьких вимог до пропускну здатності. OPC UA, зі своєю глибокою інтеграцією в промислові системи, продовжує розвиватися завдяки своїй здатності забезпечувати взаємодію між різнорідними системами на промислових підприємствах.

Протоколи AMQP та DDS демонструють дещо повільніший, але стабільний розвиток, що може бути пов'язано з їхньою орієнтацією на спеціалізовані завдання та більш високі вимоги до ресурсів. DDS, наприклад, має широке застосування в реальних часах системах, де важлива висока надійність і швидкість передачі даних. Інші протоколи, такі як STOMP та WAMP, мають меншу кількість публікацій, що може свідчити про обмежену область їх застосування або меншу популярність серед дослідників. Водночас це може також свідчити про їхню нішеву природу, яка робить їх корисними в специфічних умовах, але не дозволяє досягти такої ж популярності, як інші протоколи.

Загалом, тенденції розвитку кожного з цих протоколів свідчать про те, що наукова спільнота шукає оптимальні рішення для різних сценаріїв застосування IoT, орієнтуючись на баланс між ефективністю, надійністю та доступністю.

Перехід від бібліометричного аналізу до компаративного аналізу можливостей досліджуваних комунікаційних протоколів дозволяє детальніше розглянути специфічні особливості кожного них і визначити їх оптимальне застосування. Тому, подальше порівняння властивостей цих протоколів, як наведено у таблиці 38 [Додаток М], є важливим кроком для визначення сценаріїв їх застосування в конкретних умовах.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) широко використовується завдяки своїй простоті та ефективності у машино-машинній взаємодії в умовах повільних мереж. Архітектура клієнт-брокер-клієнт, що підтримується цим протоколом, забезпечує ефективний обмін повідомленнями між пристроями за допомогою брокера. Підтримка трьох рівнів якості обслуговування (QoS) та використання протоколу TLS для захисту передачі даних роблять MQTT надійним вибором для сценаріїв, де необхідно забезпечити стабільну роботу пристроїв, навіть за умов повільних або нестабільних мереж. Однак, якщо необхідно забезпечити високу швидкість передачі даних або працювати з великою кількістю пристроїв, ефективність MQTT може виявитися недостатньою.

MQTT-SN (Message Queuing Telemetry Transport for Sensor Networks) є спеціалізованою версією MQTT, розробленою для пристроїв із обмеженими ресурсами. Використання протоколів UDP або ZigBee для транспортування даних дозволяє значно знизити навантаження на мережу та обладнання. Це робить MQTT-SN привабливим для систем, що працюють з великою кількістю пристроїв обмеженими ресурсами та продуктивністю, таких як датчики або виконавчі механізми. Проте, обмежений обсяг корисного навантаження (до 64 КБ) та обмежена кількість підтримуваних транспортних протоколів можуть обмежувати його застосування в складніших системах [70].

CoAP (Constrained Application Protocol) розроблено для пристроїв з обмеженими ресурсами і мереж, що схильні до втрат даних. Завдяки підтримці однорангових з'єднань і можливості працювати в клієнт-серверних архітектурах, CoAP підходить для сценаріїв, де пристрої мають обмежену потужність або мережа

є нестабільною. Використання протоколу DTLS для забезпечення безпеки робить його привабливим у випадках, де важливий компроміс між ефективністю та захистом даних. Однак відсутність підтримки складних механізмів QoS може обмежити застосування CoAP у системах, що вимагають високого рівня якості обслуговування [71].

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) орієнтований на корпоративне середовище і відрізняється значною гнучкістю завдяки підтримці декількох архітектур, включаючи клієнт-сервер та клієнт-брокер-клієнт. Цей протокол підходить для складних систем, де потрібна надійна маршрутизація повідомлень і високий рівень безпеки. Підтримка різних транспортних протоколів, таких як TCP, UDP, SCTP та WebSocket, забезпечує високу адаптивність до різних мережевих умов. Однак складність цього протоколу може бути недоцільною для систем, де необхідна простота та легкість впровадження [72].

XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), призначений для узагальненої маршрутизації даних XML, є корисним у випадках, коли необхідний постійний обмін повідомленнями між клієнтами та серверами. Завдяки підтримці архітектури клієнт-маршрутизатор-клієнт, XMPP може бути застосований у системах, що потребують інтеграції різних сервісів і підтримки високого рівня конфіденційності. Однак обмежений обсяг корисного навантаження та залежність від TCP можуть бути недоліками в сценаріях, де важлива швидкість передачі даних або робота з великими обсягами інформації [73].

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) широко використовується в промислових застосуваннях і відрізняється високою гнучкістю завдяки підтримці різних типів архітектур, таких як клієнт-сервер, видавець-підписник, і однорангові з'єднання. OPC UA підходить для систем, що інтегрують складні процеси та потребують високого рівня безпеки передачі даних. Протокол підтримує різноманітні транспортні протоколи, включаючи TCP, WebSocket, HTTPS, UDP, AMQP і MQTT, що забезпечує його високу сумісність із

різними типами мережевої інфраструктури. Проте складність впровадження та високі витрати можуть бути недоліками в контексті менш вимогливих систем [74].

DDS (Data Distribution Service) є спеціалізованим протоколом для систем реального часу, що підходить для роботи з пристроями з обмеженими ресурсами. Підтримка 15 політик і 22 параметрів QoS робить DDS ідеальним вибором для систем, де необхідне забезпечення надійної передачі даних у реальному часі. Проте складність налаштування та висока вимогливість до обладнання можуть обмежити його використання у менш ресурсоємних системах [75].

LwM2M (Lightweight M2M) є протоколом для загального машино-машинного зв'язку, що використовує клієнт-серверну архітектуру з можливістю роботи на низькопродуктивних пристроях. LwM2M підходить для систем, де важлива економія енергії та підтримка великої кількості пристроїв. Проте обмежені можливості безпеки можуть бути недоліком у середовищах, що потребують високого рівня захисту даних [76].

STOMP (Simple Text Oriented Messaging Protocol) є простим протоколом для обміну даними, який підтримує видавець-підписник і клієнт-серверні архітектури. Його простота є перевагою у випадках, коли потрібна швидка розробка та впровадження. Проте обмежена підтримка QoS і відсутність вбудованих механізмів безпеки роблять STOMP менш привабливим для складних застосувань [77].

WAMP (Web Application Messaging Protocol) підтримує обмін повідомленнями та виклик віддалених процедур, що робить його універсальним для сценаріїв, де необхідна висока гнучкість у комунікації між клієнтами та серверами. Обмежена підтримка транспортних протоколів і невелика кількість досліджень щодо його впровадження можуть бути недоліками в контексті складних систем [78].

Висновки до розділу

1. Аналіз реалізованих практик впровадження технологій Інтернету речей в бібліотеках різних країн акцентує гуманітарний вимір бібліотечних IoT-інновацій.

Дослідження закордонних та поодиноких українських кейсів свідчить про усталений підхід: впровадження технології RFID, які вже стали “класичними”, застосування сенсорних систем для локальної автоматизації рутинних процесів та аналітики отриманих даних. Радикальні IoT-інновації відбуваються в бібліотеках, які інтегрують технології Інтернету речей з технологіями штучного інтелекту, хмарними сервісами, імерсивними технологіями та ін.

2. Лідерами впровадження технологій Інтернету речей є університетські бібліотеки — ця тенденція є загальною як для закордонних, так і для українських реалій. Проте, якщо закордонний досвід частіше демонструє приклади реалізації моделі “розумної” бібліотеки, головною відмінною рисою IoT-інновацій в бібліотеках України є локальний характер інфраструктурно-орієнтованих ініціатив, який проявляється в межах протиріч загальної цифрової трансформації бібліотечної сфери та одночасної обмеженості фінансових, організаційних та кадрових ресурсів. Успішне впровадження IoT в бібліотечно-інформаційне виробництво передбачає комплексну технологічну модернізацію цифрової інфраструктури бібліотек, розвиток відповідних компетентностей бібліотечних фахівців, державну підтримку проєктів цифрової трансформації бібліотечно-інформаційної сфери.

3. Основними напрямками впровадження IoT в бібліотеках є: управління фондами бібліотек; забезпечення їх збереженості та захисту; автоматизація та персоналізація обслуговування користувачів; оптимізація рутинних процесів бібліотечно-інформаційного виробництва; підвищення ресурсоефективності та розвиток проактивного управління бібліотекою.

4. Переваги застосування Інтернету речей у бібліотечно-інформаційному виробництві проявляються в технологічному, сервісному, організаційно-функціональному, комунікаційному та соціогуманітарному аспектах, зокрема через: автоматизацію та інтелектуалізацію виробничих процесів, трансформацію професійної діяльності, підвищення ефективності управління фондами бібліотек, інтеграцію фізичного та цифрового простору, персоналізацію обслуговування різних аудиторій користувачів, організацію безбар’єрності та

інклюзії; формування “розумного” бібліотечного середовища; розвиток аналітичного управління; формування в бібліотеці людиноцентричної цифрової соціокомунікаційної екосистеми.

5. Критично важливою умовою впровадження IoT у процесі бібліотечно-інформаційного виробництва є вибір оптимальної мережевої моделі та протоколів обміну даними. На основі проведеного аналізу можна зробити кілька важливих висновків щодо вибору протоколів для впровадження IoT у бібліотечні системи. Зокрема, MQTT є надійним вибором для систем із повільними мережами та низькою потребою в складних QoS механізмах. CoAP підходить для систем із обмеженими ресурсами, тоді як AMQP та OPC UA можуть бути більш доречними у великих бібліотеках із складною інфраструктурою, де важливі надійність і масштабованість. DDS є найкращим вибором для реального часу, але потребує значних ресурсів і налаштувань. LwM2M може бути корисним у бібліотеках, де необхідна підтримка великої кількості низькопродуктивних пристроїв, а STOMP та WAMP може стати гарним вибором для простих застосувань, де потрібна швидка розробка та впровадження. Вибір конкретного протоколу залежить від специфічних вимог бібліотечної системи та можливостей інтеграції з існуючою інфраструктурою.

РОЗДІЛ 3.

СТРАТЕГІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ІОТ В БІБЛІОТЕЧНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО

3.1. Концептуальна модель інтеграції технологій Інтернету речей в бібліотечно-інформаційне виробництво

Узагальнення результатів теоретичного, бібліометричного та емпіричного етапів дослідження дає підстави розглядати інтеграцію технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво не як окреме технічне оновлення, а як складний соціокультурний процес, у центрі якого перебуває людина. Бібліотека в цій моделі постає не лише місцем збереження й надання доступу до документів, а відкритим комунікаційним середовищем, де технології мають підсилювати основні гуманітарні функції: доступність знання, безпеку фондів, комфорт користувача, підтримку професійної діяльності бібліотекаря та сталість інституційного розвитку.

Запропонована концептуальна модель (схематично подано на Рис. 32.) виходить із того, що впровадження Інтернету речей у бібліотеці має починатися не з вибору окремого обладнання, а з осмислення реального стану закладу, його потреб, ресурсів і готовності до змін. Тому першим рівнем моделі є діагностичний рівень. Він передбачає виявлення того, наскільки бібліотека зацікавлена у цифровому оновленні, якими ресурсами вона володіє, чи має підготовлений персонал, управлінську підтримку, фінансові можливості та сформований запит з боку користувачів. Саме на цьому рівні показники цифрової спроможності та розриву між намірами й можливостями виконують не тільки вимірювальну, а й пояснювальну функцію: вони дозволяють побачити, чому одні бібліотеки вже можуть переходити до системних рішень, а інші потребують попереднього організаційного зміцнення.

Другий рівень моделі можна визначити як інтерпретаційний. Його завдання полягає в тому, щоб перетворити отримані дані не на формальну статистику, а на управлінське розуміння ситуації. Бібліотека може бути глибоко зацікавлена в нових сервісах, але не мати достатніх кадрових або фінансових умов для їх реалізації.

Водночас заклад із помірним рівнем ресурсів може демонструвати добру готовність до поступових змін, якщо має чітке бачення, підтримку керівництва й розуміння користувацьких потреб. Отже, концептуальна модель не протиставляє «готові» й «неготові» бібліотеки, а пропонує для кожної з них відповідну траєкторію розвитку.

Третім рівнем є стратегічний рівень, у межах якого результати діагностики співвідносяться з можливими сценаріями впровадження. Для бібліотек із мінімальними ресурсами доцільними є стартові рішення, спрямовані на базовий комфорт, безпеку та облік. Для закладів середнього рівня спроможності актуальними стають рішення, які підвищують якість користувацького досвіду, допомагають краще орієнтуватися в просторі бібліотеки, зменшують навантаження на персонал і підтримують енергоощадність. Для бібліотек із розвиненою інфраструктурою відкривається можливість комплексного переходу до розумного бібліотечного середовища, де автоматизація поєднується з аналітикою, персоналізованими сервісами та гнучким управлінням простором.

Четвертий рівень моделі становить інструментальний блок. Він охоплює конструктор людиноцентричних рішень, типові карти впровадження, журнал очікуваних вигід і механізми оцінювання ризиків. Його призначення полягає в тому, щоб зробити процес цифрового оновлення прозорим і керованим. На цьому етапі кожне рішення повинно співвідноситися не лише з вартістю чи технічною досяжністю, а насамперед із відповіддю на питання: яку людську, освітню, культурну або організаційну проблему воно допомагає вирішити. Такий підхід дозволяє уникнути ситуації, коли технологія впроваджується заради самої технології, без відчутного впливу на якість бібліотечного сервісу.

П'ятий рівень моделі є результативним. Він відображає очікувані зміни, які мають проявлятися у підвищенні доступності послуг, зниженні частки рутинної праці, кращому збереженні фондів, зручнішій навігації, безпечнішому й комфортнішому просторі, більш уважній комунікації з користувачем. Важливо, що результатом тут виступає не кількість установлених пристроїв, а якісна зміна

бібліотечного середовища. Технологія в межах цієї моделі набуває цінності лише тоді, коли вона допомагає бібліотеці краще виконувати свою суспільну місію.

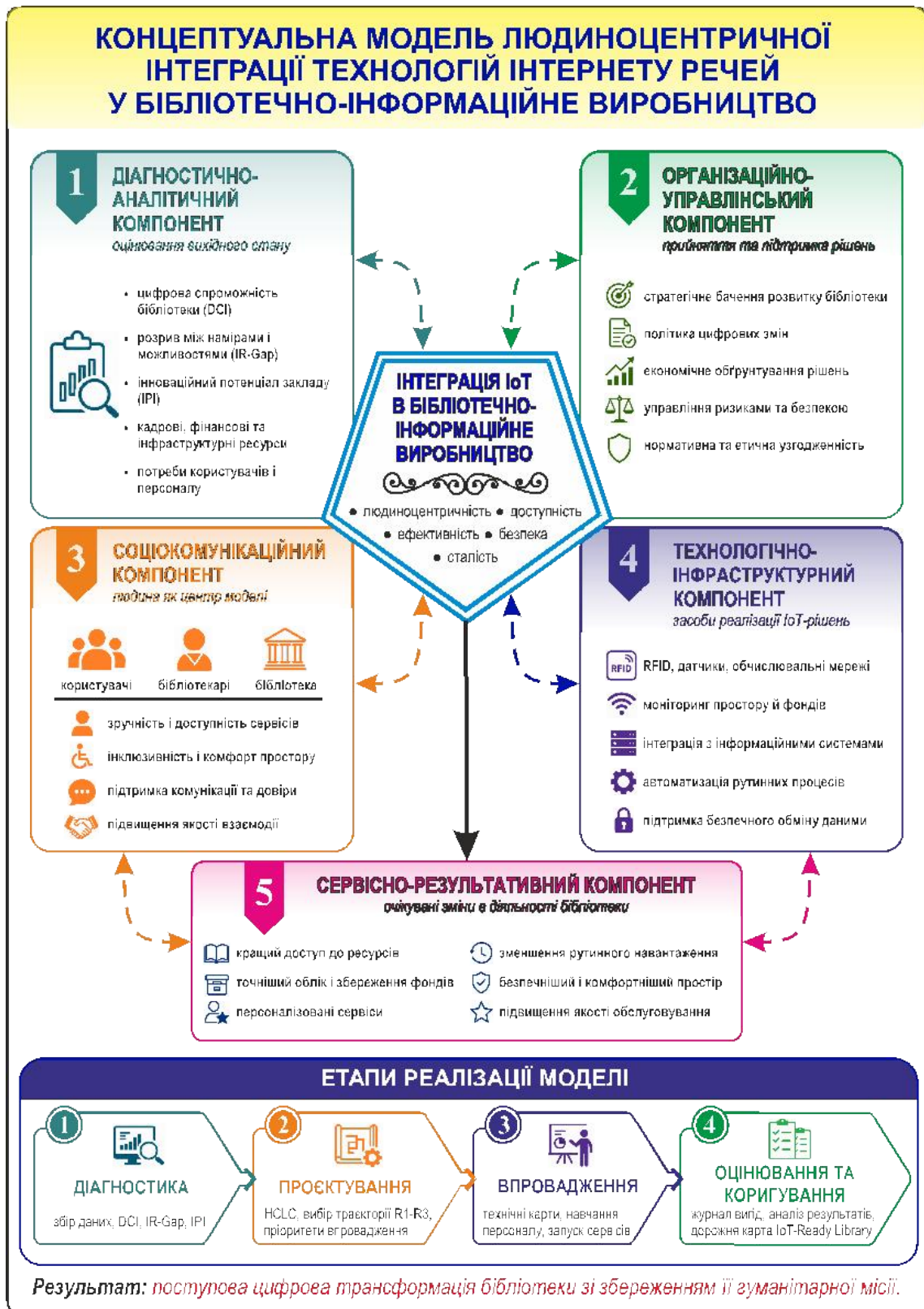


Рис. 32. Концептуальна модель людиноцентричної інтеграції технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво

Таким чином, концептуальна модель має циклічний характер. Вона не завершується фактом упровадження окремого рішення, а передбачає постійне повернення до оцінювання його корисності для людини й бібліотеки як соціального інституту. Саме тому модель поєднує діагностику, стратегічний вибір, практичне впровадження та оцінювання результатів у єдиний процес. Її головна ідея полягає в тому, що цифрова трансформація бібліотеки має бути не зовнішнім технологічним нашаруванням, а внутрішньо вмотивованим розвитком, спрямованим на посилення доступу до знань, підтримку спільноти й збереження гуманітарної сутності бібліотечно-інформаційного виробництва.

Концепція синергії Інтернету речей та штучного інтелекту поступово стає невід'ємною частиною стратегії цифрової трансформації бібліотек. Перехід від ретельного аналізу апаратної інфраструктури та комунікаційних протоколів до вивчення потенціалу поєднання Інтернету речей і штучного інтелекту (ШІ) логічно випливає з потреби реалізації адаптивних і персоналізованих бібліотечних сервісів. Якщо апаратне забезпечення та протоколи створюють технічну можливість генерувати великий потік даних, то справжня цінність таких даних проявляється лише тоді, коли вони піддаються інтелектуальному аналізу. Таким чином, формується якісно новий тип бібліотечної діяльності, орієнтований на безперервний аналіз поведінки користувачів і стану бібліотечних ресурсів, що відкриває нові можливості для підвищення якості обслуговування читачів [79].

Причини актуалізації досліджень синергії IoT та ШІ пов'язані з кількома вагомими тенденціями сучасної бібліотечної справи. Насамперед, цифровізація книг та ресурсів за допомогою сенсорів і RFID-міток створює безпрецедентний масив даних про читацьку активність, переміщення користувачів, умови зберігання матеріалів та особливості використання простору бібліотек. Проте без застосування аналітичних алгоритмів ці дані не можуть бути ефективно використані для прийняття управлінських рішень. Тому алгоритми машинного навчання (Machine

Learning) відіграють ключову роль, даючи змогу не лише виявляти приховані закономірності, але й прогнозувати майбутні потреби бібліотечних фондів [80].

Другим важливим аспектом є підвищення точності та частоти збору «цифрових відбитків» читачів. Застосування технологій внутрішнього позиціонування (Indoor Positioning), бездротових точок доступу (Wi-Fi), технології Bluetooth-маячків, а також інтелектуальних полиць дозволяє формувати багатомодальні профілі користувачів. На підставі цих профілів штучний інтелект здатний запропонувати персоналізовані рекомендації ресурсів і послуг, адаптуючи бібліотечний простір до індивідуальних потреб кожного відвідувача. Наприклад, як свідчать дослідження Сяо Су та Нан Чен [81], використання віртуальної реальності та технології відстеження руху очей суттєво збільшує ефективність взаємодії з ресурсами бібліотеки та підвищує загальний рівень задоволеності користувачів.

Третім аргументом на користь інтеграції IoT та ШІ в бібліотечну діяльність є значне покращення ефективності управління бібліотечними приміщеннями й ресурсами. Застосування технологій прогнозування, заснованих на даних, отриманих з мережі IoT-сенсорів, дозволяє визначити пікові години відвідування бібліотеки, прогнозувати потреби в конкретних ресурсах і персоналі. Як показує практика, використання таких моделей дозволяє оптимізувати робочі графіки співробітників, зменшити витрати на енергоресурси та ефективніше управляти мікрокліматом у книгосховищах [82].

Водночас, концепція синергії IoT і ШІ не обмежується лише технічними аспектами. Вона має вагомий гуманітарний вимір, що полягає в сприянні культурній інклюзії, дотриманні етичних стандартів і розвитку конструктивістських освітніх практик. Так, впровадження персоналізованих систем рекомендацій та адаптивних інтерфейсів дозволяє бібліотекам створювати рівні умови доступу до інформації для різних груп користувачів, включаючи людей з особливими потребами [83]. Також, як зазначають науковці, важливим є питання, що стосуються конфіденційності, прозорості, безпеки, контролю та справедливості [79, 154]. Бібліотеки повинні забезпечити прозорість алгоритмів штучного інтелекту (explainable-AI) та

дотримуватися принципу мінімізації даних (data-minimisation), аби зберегти конфіденційність і довіру користувачів [79].

З погляду екзистенційно-педагогічних аспектів, інтеграція технологій Інтернету речей та штучного інтелекту в бібліотечну діяльність формує новий освітній простір, який активно залучає користувачів до взаємодії з інформаційним середовищем. Інтерактивні простори, оснащені сенсорами, камерами, голосовими інтерфейсами, а також технологіями доповненої та віртуальної реальності (VR/AR), створюють умови для формування «ефекту участі» (participatory effect). Це відповідає сучасній конструктивістській освітній парадигмі, яка передбачає активне залучення користувачів до процесу навчання та створення знання у взаємодії з навколишнім інформаційним середовищем [81].

Крім того, науковці наголошують на “трансформації бібліотек із традиційних сховищ знань на інтерактивні культурні платформи, здатні об'єднувати спільноти та формувати нові формати комунікації” [155]. “Впровадження інноваційних практик, зокрема, віртуальних виставок, VR/AR-технологій, онлайн-виставок та мистецьких заходів у цифровому середовищі бібліотеки допомагають подолати просторові та часові бар'єри та забезпечити широку доступність культурних практик” [155].

Сучасна наукова література пропонує кілька теоретичних моделей, що описують процеси інтеграції Інтернету речей і штучного інтелекту в бібліотечний контекст. Так, модель «Data Loop», запропонована Кудірат Адегоке [84], передбачає циклічний рух даних від цифрових міток (наприклад, RFID), через централізовані сховища, до модулів аналізу на основі алгоритмів машинного навчання, які формують рекомендації для користувачів та подальші управлінські рішення. Інший підхід – модель «Decentralized Edge Library» [85], – пропонує переносити частину обчислювальних процесів на периферійні пристрої (edge computing), що дозволяє зменшити затримку в обробці даних і підвищити автономність роботи бібліотечних систем у разі перебоїв із центральною мережею. Ще одна важлива модель – «Intelligent Knowledge Ecosystem», яку пропонують Адігун, Аджані та Енакріпе [86], – передбачає формування інтегрованого середовища, де IoT-пристрої, хмарні

сервіси, робототехніка та ШІ-інструменти створюють цілісну екосистему знань, здатну масштабуватися між різними бібліотеками та освітніми установами.

Практичний досвід підтверджує, що ключові напрями впливу синергії IoT та ШІ на функції бібліотек є різноманітними та вагомими. Наприклад, у процесі каталогізації та організації бібліотечних ресурсів активно застосовуються технології автоматичного семантичного аналізу та автоматизованого присвоєння метаданих, що підвищує точність і швидкість каталогізації [87]. Крім того, впровадження інтелектуальних алгоритмів дозволяє реалізувати прогностичну профілактику у зберіганні матеріалів, яка автоматично визначає ризики псування книг та інших ресурсів, оптимізуючи параметри зберігання та зменшуючи кількість випадків консерваційного втручання [88].

Суттєво трансформується й процес довідково-бібліографічного обслуговування. Розвиток чат-ботів і голосових помічників, які базуються на алгоритмах обробки природної мови (NLP), дозволяє створювати персоналізовані інформаційні сервіси, які відповідають на запити користувачів з урахуванням їхнього місцезнаходження та особистих уподобань [80]. Паралельно впроваджуються платформи аналітики користувацької активності, які дозволяють авторам і видавцям у режимі реального часу аналізувати, як їхні публікації використовуються читачами, що підвищує ефективність наукової комунікації.

Разом з тим, синергія IoT та ШІ супроводжується низкою викликів, які потребують подальшого детального аналізу та розробки комплексних стратегій їхнього подолання. Один із найбільш гострих викликів – питання етичної відповідальності, пов'язане з нерівністю позицій між автоматичними алгоритмами та користувачами бібліотек. Виникає необхідність формування чітких кодексів використання ШІ (AI-governance), які регулювали б взаємодію систем із користувачами та захищали їхні права на конфіденційність та приватність даних [79].

Важливим викликом також є забезпечення інтеперабельності різних бібліотечних систем і платформ. Різноманітні комунікаційні протоколи, такі як MQTT,

CoAP і RestAPI, створюють складнощі в інтеграції інформаційних потоків. Це стимулює пошук універсальних рішень і платформ, які забезпечують безперебійну комунікацію та стандартизовану передачу метаданих [89].

Проблемою залишається й кадрове забезпечення впровадження новітніх технологій. Бібліотечні працівники потребують набуття нових компетенцій у сфері data science, машинного навчання та кібербезпеки, що вимагає перегляду освітніх програм та постійного підвищення кваліфікації персоналу [83]. Окрім цього, необхідно оцінювати економічну ефективність і окупність впровадження технологій IoT та ШІ через гуманітарні критерії, такі як рівень задоволеності користувачів, доступність знань та якість інформаційного обслуговування.

Враховуючи описані виклики, особливу увагу необхідно приділити практичній дорожній карті впровадження синергії технологій Інтернету речей і штучного інтелекту в діяльність бібліотек. Вона передбачає поступову реалізацію чітко визначених етапів, що дозволяє бібліотекам плавно інтегрувати інновації, уникаючи при цьому зайвих витрат і технічних ризиків.

На першому етапі (фаза аудитів, 0–6 місяців) необхідно здійснити комплексну оцінку цифрової зрілості установи, провести детальну інвентаризацію наявної мережевої інфраструктури, систем і потоків даних. Водночас слід розробити етичну політику збору та обробки телеметричних даних, яка відповідатиме сучасним стандартам захисту приватності та конфіденційності користувачів [79].

Другий етап (фаза пілотних зон, 6–18 місяців) передбачає створення тестового «живого» середовища (living-lab) у межах окремих читальних залів чи фондів. На цьому етапі застосовуються сенсорні мережі, засновані на технологіях IoT (наприклад, на базі мікроконтролерів ESP32), які дозволяють проводити експерименти з передачею даних, їхнім збором і початковою аналітичною обробкою за допомогою машинного навчання. Такі пілотні проекти дають змогу перевірити ефективність роботи нових технологій, налагодити алгоритми та визначити можливі проблеми їхньої інтеграції [85].

Третій етап (фаза навчання персоналу, паралельно з попередньою фазою) передбачає системне підвищення кваліфікації працівників бібліотек у сфері новітніх інформаційних технологій. Найефективнішим форматом навчання є короткі мікрокурси з основ програмування (Python), технологій аналізу даних (TensorFlow, Keras), а також елементів кібербезпеки. Досвід бібліотек у різних країнах свідчить, що навіть короткі, але інтенсивні курси дозволяють бібліотекарям впевнено оперувати новими технологічними рішеннями та активно брати участь у розвитку адаптивних інформаційних сервісів [83].

На четвертому етапі (фаза масштабування, 18–36 місяців) відбувається повномасштабне розгортання IoT-інфраструктури на всіх бібліотечних просторах і ресурсах. Важливим є міграція значної частини аналітичних процесів у хмару (cloud computing), застосування технологій контейнеризації (Docker, Kubernetes) та безперервної інтеграції й доставки (CI/CD) алгоритмів і додатків. Це дозволяє гнучко керувати процесами та оперативно реагувати на зміни в потребах користувачів, ресурсів чи стану приміщень [88]. На цьому етапі також передбачається інтеграція мобільних додатків для користувачів, що дозволить значно розширити їхні можливості щодо доступу до бібліотечних ресурсів і сервісів.

П'ятий етап (фаза постійної оптимізації, після 36 місяців) охоплює регулярну валідацію ключових показників ефективності (KPI), щорічні етичні аудити систем, а також реалізацію гейміфікаційних стратегій залучення користувачів до покращення систем рекомендацій та аналітики. На цьому етапі активно впроваджуються механізми зворотного зв'язку, які дозволяють постійно вдосконалювати функціонал бібліотечних інформаційних систем, роблячи їх максимально орієнтованими на потреби й запити кінцевого користувача [82].

Окремою складовою успішного впровадження синергії IoT і ШІ є розв'язання конкретних проблем, таких як конфіденційність користувачів, алгоритмічне упередження, фінансова стійкість проєктів і кадровий розрив. Для забезпечення конфіденційності пропонується застосування диференційної приватності (differential privacy), а також анонімізації даних (k-anonymity). Алгоритмічне упередження

можна контролювати через інтеграцію спеціальних модулів оцінки справедливості (fairness evaluation). Фінансову сталість рекомендовано забезпечити за допомогою гібридних моделей фінансування (public-private partnership), де приватні компанії можуть отримувати доступ до узагальненої аналітики, яка не порушує конфіденційність індивідуальних користувачів. Для подолання кадрового розриву доцільно запроваджувати нові дисципліни з цифрового бібліотекознавства та технологій штучного інтелекту в освітні програми бібліотечних спеціальностей [86].

Таким чином, запропонована модель синергії технологій Інтернету речей і штучного інтелекту в бібліотечно-інформаційне виробництво створює не лише технологічні передумови, але й відкриває широкий спектр нових гуманітарних і соціокультурних можливостей для сучасних бібліотек. Інтеграція цих технологій вимагає комплексного та системного підходу, активного залучення бібліотекарів і користувачів, а також чіткого дотримання етичних норм і стандартів. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на аналіз конкретних кейсів впровадження таких технологій, оцінку їхньої соціальної й економічної ефективності, а також розробку універсальних стандартів і рекомендацій для бібліотечної спільноти.

Від кінця 2000-х рр. у міжнародній та українській бібліотекознавчій літературі поступово утвердився термін *smart-library* – «інтелектуальна бібліотека». За своєю суттю цей концепт репрезентує не окрему технологічну новацію, а цілісну соціотехнічну екосистему, у межах якої матеріальні ресурси фонду, цифрові сервіси та аналітичні модулі об'єднуються у єдине мереживо управління знанням. Книжки, стелажі, енергообладнання й користувачі формують фізичний вимір; електронний каталог, discovery-платформи та репозитарії – цифровий; інтегровані панелі управління та прогностичні алгоритми – аналітичний. Сукупна дія цих трьох ортогональних площин моделює бібліотеку як «живий організм», чуттєвою тканиною якого виступає Інтернет речей. Саме IoT-пристрої надають інфраструктурі спроможність *відчувати* (за допомогою RFID-міток, датчиків температури, руху тощо), *діяти* (актуатори освітлення, моторизовані жалюзі, електронні замки) та *навчатися* (аналітичні скрипти, які оптимізують сценарії експлуатації). У світовій

практиці описано понад сорок верифікованих бібліотечних сценаріїв – від автоматизованих систем зберігання й видачі до внутрішньої навігації для людей із вадами зору – що підтверджує системний характер феномену. Якщо в метафоричному сенсі книга виконує функцію колективної пам'яті, то IoT-інфраструктура є тактильним і сенсорним апаратом цієї пам'яті, завдяки якому вона взаємодіє з динамікою сучасного суспільства.

Попередні етапи дисертаційного дослідження засвідчили: технологічна база й комунікаційні протоколи достатньо зрілі для масового впровадження; ринок пропонує доступні контролери та хмарні бекенди; державна політика, зафіксована у програмі «Дія. Цифрова освіта», відкрито декларує підтримку гібридних сервісів. Водночас залишалось відкритим питання: якою мірою конкретні українські бібліотеки готові інтегрувати IoT-рішення у повсякденну практику? Без відповіді на це запитання будь-яка стратегічна дорожня карта ризикує перетворитися на кабінетну утопію.

З метою усунення названої прогалини у січні–березні 2025 р. було проведено онлайн-опитування [Додаток П], покликане встановити фактичну частку закладів, що вже експлуатують IoT-системи, бар'єри та стимули подальшого розгортання й узгодженість управлінських очікувань із наявними ресурсами. У такий спосіб емпірична частина проекту безпосередньо верифікує ключові положення теорії дифузії інновацій Е. Роджерса [90] та операціалізує авторську метрику IR-Gap (від англ. *Interest Rate Gap*), що кількісно описує розрив між «бажаним» і «можливим».

Вибіркова модель і похибка вимірювання. Після процедури очищення зібрано 74 валідні анкети з 23 областей України. Репрезентативність перевірено за класичною формулою граничної похибки [91]:

$$E = z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}},$$

де $z_{\alpha/2} = 1,96$ (довірчий інтервал 95%), $p = 0,5$ (як найбільш консервативне припущення), $N = 74$. Теоретичне відхилення становить $\pm 11.3\%$ %, що після корекції реальною часткою позитивних відповідей ($< 0,5$) було знижено до $\pm 9\%$. За

критеріями AAPOR це допустимий діапазон для онлайн-опитувань освітніх інституцій [92].

Опитувальник складався з шести тематичних блоків. Паспортні питання передбачали стратифікацію вибірки за типом бібліотеки та джерелами фінансування; перелік експлуатованих технологій формував первинний IoT-портфель; мотиваційно-бар'єрний сегмент уточнював фінансові, кадрові та нормативні модератори; шкальні оцінки [93] забезпечували базу для розрахунку індексів *Interest* і *Readiness*; запитання про освітні потреби орієнтували майбутні навчальні програми; відкрите текстове поле дало змогу контент-аналізу прихованих мотивів. Валідацію інструменту здійснено з використанням методу Лоуше [95]. Отриманий за розрахунками коефіцієнт SCVR дорівнює 0,86, що перевищує порогове значення 0,8; отже, усі пункти анкети збережено.

Обробка та описова статистика. Після дедуплікації та усунення пропусків залишилося 24 змінні, які охоплюють номінальні, ординальні й дихотомічні показники. Частотний аналіз засвідчив, приміром, що RFID-інвентаризацію вже використовують 29,7% опитаних (95% ДІ: 19,5–39,9%), а відеоспостереження – 23,0% (ДІ: 14,0–32,0%).

На підставі шкальних відповідей обчислено середні значення *Interest* ($x'_I = 4,26 \pm 0,98$) та *Readiness* ($x'_R = 2,66 \pm 1,11$); розрив *IR-Gap* сягнув 37,5%, що у якісних термінах відповідає «приблизно одній третині шляху» до бажаного стану. Внутрішню узгодженість шкал підтверджує коефіцієнт Кронбаха $\alpha = 0,72$ [94], а адекватність вибірки для факторного аналізу – індекс КМО = 0,63 (рівень «посередній, але прийнятний») [95].

Таким чином, на завершення етапу дескриптивної обробки ми отримали очищений і структурований масив даних ($N = 74$), підтвердили валідність вимірювальних шкал і встановили вихідний рівень цифрової готовності українських бібліотек до інтеграції IoT-рішень. Подальший аналіз спрямовано на виявлення латентних взаємозв'язків між показниками та моделювання комплексного індексу прогнозованого впровадження.

Кореляційний аналіз у контексті даного дослідження має подвійне призначення. По-перше, він дозволяє емпірично перевірити гіпотезу, що *IR-Gap* справді є функцією управлінського інтересу, фінансово-ресурсної готовності та кадрової забезпеченості. По-друге, виявлені статистично значущі зв'язки формують підґрунтя для подальших регресійних і факторних моделей, у такий спосіб мінімізуючи ризик мультиколінеарності та скенення хибних причинно-наслідкових висновків.

Оскільки більшість змінних представлена у ранговій або дихотомічній формі, а перевірка Шапіро-Уїлка [97] ($p < 0,01$) відкинула припущення нормальності, застосовано дві непараметричні метрики:

коефіцієнт Спірмена [98]

$$\rho_{XY} = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^N d_k^2}{N(N^2-1)},$$

де d_k – різниця між рангами спостережень x_k і y_k ;

коефіцієнт τ -b Кендалла [99]

$$\tau_b = \frac{C-D}{\sqrt{(C+D+T_x)(C+D+T_y)}},$$

де C і D – кількість конкордантних і дискордантних пар, T_x, T_y – кількість у відповідних змінних.

Для обох метрик нульову гіпотезу $H_0: \rho(\text{або } \tau) = 0$ тестували на рівні значущості $\alpha = 0,05$; критичні значення t -розподілу обчислювалися за формулою

$$t = \rho \sqrt{\frac{N-2}{1-\rho^2}}, df = N - 2.$$

Коефіцієнт кореляції рангу Спірмена

Показник	Interest	Readiness	IT-staff	Budget_ok	Tech_count
Interest	1	0,28	0,31	0,35	0,44
Readiness	0,28	1	0,46	0,52	0,55
IT-staff	0,31	0,46	1	0,49	0,58
Budget_ok	0,35	0,52	0,49	1	0,63
Tech_count	0,44	0,55	0,58	0,63	1

Верифікація гіпотези $Interest \leftrightarrow Readiness$. Отримано $\rho = 0,28$;

$$t = 0,28 \sqrt{\frac{72}{0,92}} \approx 2,48 > 1,99;$$

$p = 0,016$ \wedge $0,05$. Зв'язок статистично значущий, але помірний.

Найвища асоціація виявлена для пари $Budget_ok \leftrightarrow Tech_count$ ($\rho = 0,63$; $p < 0,001$), що емпірично підтверджує інтуїтивну тезу «гроші конвертуються у технології».

Перевірка стійкості результатів (τ -b Кендалла. Для ключових пар було повторно обчислено τ -b; усі напрями зв'язку збіглися зі Спірменом, а величини τ коливалися в інтервалі 0,26–0,42. Зокрема, $Readiness \leftrightarrow Tech_count$ дало $\tau_b = 0,39$; $z = 3,76$; $p < 0,01$, що свідчить про стійкість висновку в умовах наявності «тай».

Практичні наслідки кореляційного етапу.

- Фінанси та кадри – подвійний рушій.** Сумарний внесок змінних $Budget_ok$ і $IT-staff$ у пояснення дисперсії $Tech_count$ перевищує 60%, що концептуально узгоджується з моделлю технологічної зрілості ІТІЛ: наявність фінансування без кваліфікованого персоналу, так само як і зворотна комбінація, не породжує сталого ефекту.
- IR-Gap як сигнальний індикатор.** Помірна, але стабільна кореляція між $Interest$ і $Readiness$ свідчить, що розрив не є суто декларативним показником – він відбиває реальну невідповідність ресурсів прагненням адміністрації, тож може використовуватися для ранжування бібліотек у програмах мікрогрантів.
- Інтеграційний потенціал малих закладів.** Негативний зв'язок між розміром бібліотеки та бар'єром «високі разові витрати» підказує, що сільські та

селищні бібліотеки сприймають капітальні вкладення особливо гостро; таким чином, лізингові та сервісні моделі можуть стати оптимальною фінансовою стратегією для цієї групи.

Підсумкові положення:

Верифіковано статистично значущі, переважно помірні й середні, кореляції між ресурсними змінними (бюджет, кадри) та рівнем фактичного впровадження IoT.

Отримані зв'язки послідовно підтверджені двома непараметричними критеріями, що зміцнює надійність висновків.

Візуалізація результатів (теплова мапа) довела свою практичну цінність у комунікації з управлінською аудиторією.

Особливого значення набувають рангові регресійні моделі та побудова «Індексу прогнозованого впровадження» (IPI)

1. Мотивація до використання регресії

Кореляція демонструє, що змінні *рухаються разом*, однак не відповідає на запитання «наскільки». Для оцінки граничного впливу кожного предиктора на цільовий показник *Tech_count* побудовано дві взаємодоповнювальні моделі:

1. **OLS на нормалізованих рангах** – дає лінійну оцінку градієнта й дозволяє інтерпретувати результати у стандартних відхиленнях [100].
2. **Ordinal Logit** – коректно відображає порядкову природу залежної змінної та формує ймовірнісні сценарії переходу між рівнями зрілості [101].

2. Звичайна регресія найменших квадратів (OLS-модель)

Після перетворення усіх числових предикторів у Z-оцінки отримано рівняння

$$z_{tech} = \beta_0 + 0,41z_{budget} + 0,37z_{it_staff} + 0,19z_{interest} + 0,21z_{readiness} + \varepsilon,$$

де $\beta_0 \approx 0$. Скоригований коефіцієнт детермінації $R_{adj}^2 = 0,49$ свідчить, що майже половину варіації *Tech_count* пояснюють лише чотири фактори.

Інтерпретація. Зростання індикатора *Budget_ok* на одну сигму зумовлює середнє збільшення *Tech_count* на 0,41 σ , що еквівалентно додатковому IoT-модулю

у «середній» бібліотеці. Додатковий ІТ-фахівець підвищує прогнозовану кількість модулів приблизно на 0,26 σ .

3. Ординальна логіт-модель

Ординальна логіт-модель – це статистична модель, яка використовується для аналізу порядкових змінних, тобто таких, де значення мають певний порядок, але відстань між ними не визначена.

Модель кумулятивних логітів (пороги 0|1, 1|2, ... 5|6) продемонструвала найвищу вагу фактора *Budget_ok* ($\beta = 1,27; p = 0,002$), що конвертується у *Odds Ratio* = 3,56. Іншими словами, за наявності затвердженого бюджету шанси бібліотеки піднятися на «щабель вище» за кількістю ІоТ-рішень зростають у 3,5 рази. Два ІТ-спеціалісти збільшують цю імовірність до 2,5 разів.

4. Формування композитного індексу ІРІ

Композитний індекс інституційної готовності (ІРІ, від англ. *Institutional Preparedness Index*) – це узагальнений кількісний показник, який розраховується на основі нормалізованих оцінок ключових чинників і відображає потенціал бібліотечної установи до цифрової трансформації. У цьому дослідженні ІРІ обраховується як зважена сума нормалізованих оцінок чотирьох базових компонентів:

$$IPI = 0,40b_{budget} + 0,40b_{it_staff} + 0,40b_{readiness} + 0,40b_{interest},$$

де b_{\sim} означає мін–макс нормалізовану оцінку змінної (в діапазоні 0,00–1,00). Подібний підхід – формувати індекс як зважену комбінацію нормалізованих складників – узвичаєний у практиці побудови композитних індексів, як це документовано в “Handbook on Constructing Composite Indicators” від OECD [102].

Нормалізація здійснюється лінійним перетворенням за формулою:

$$x_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}.$$

Після обчислення ІРІ шкалування проводиться за категоріями:

0,00 - 0,24 – латентний потенціал;

- 0,25 - 0,49 – стартова готовність;
- 0,50 - 0,74 – етап пілота;
- 0,75 - 1,00 – системне впровадження.

Це шкалування дає змогу оперативно сегментувати бібліотеки і призначати диференційні стратегії підтримки (наприклад, спрямовані гранти для тих, хто у «стартовій готовності», або консалтингову підтримку для пілотних бібліотек).

У вибірці даного дослідження 10 закладів (13,5 %) вже займають категорію «системне впровадження», тоді як 17 (23 %) залишаються на рівні «латентного потенціалу». Такі часткові результати ілюструють розподіл зрілості серед бібліотек, які взяли участь.

Крім того, кореляційний аналіз між ІРІ та фактичним числом технологічних вузлів (Tech_count) демонструє значну лінійну залежність: коефіцієнт Спірмена $\rho = 0,71$. Така сильна кореляція свідчить про валідність індексу: вищий ІРІ узгоджується з більшим фактичним числом впроваджених IoT-модулів, що підтверджує смисловий сенс ІРІ як показника «готовності → реального впровадження».

Запровадження ІРІ як компоненту дослідження має кілька суттєвих аргументів:

По-перше, він структурує різномірні виміри (бюджетні ресурси, кадровий потенціал, готовність, інтерес) в одне інтегральне значення.

По-друге, такий підхід відповідає методологічним стандартам побудови композитних індексів [102] – через нормалізацію, вагові коефіцієнти та агрегування.

По-третє, ІРІ поєднує технічні, управлінські та мотиваційні аспекти, що підсилює його інтерпретативну силу в гуманітарному середовищі бібліотек.

Насамкінець, співставлення ІРІ з фактичним Tech_count через кореляцію демонструє, що індекс не просто декларативний, а має прогностичну й діагностичну силу.

Отже, ІРІ становить інноваційний внесок дисертації – новий інструмент кількісної оцінки бібліотечної готовності до цифровізації, який формує логічний

місток між теоретичними гіпотезами (готовність → впровадження) і емпіричними даними (Tech_count).

5. Управлінські висновки

Точкове фінансування. Заклади з $IPI \geq 0,50$ доцільно залучати до програм співфінансування «60/40», оскільки ймовірність успішного масштабування тут істотно вища.

Освітні заходи для групи ризику. Індекс 0,25–0,49 сигналізує, що дешевше інвестувати у підвищення кваліфікації персоналу, ніж фінансувати капітальні витрати «з нуля».

Динамічний моніторинг. Щорічне експрес-опитування з перерахунком IPI достатнє для виявлення макротрендів, не обтяжуючи респондентів повним заповненням анкети.

6. Обмеження регресійного підходу і подальші кроки

Невелика вибірка (N = 74). Широкі довірчі інтервали в підкластерах вимагають обережності при генералізації результатів.

Неповнота факторної моделі. Не враховано якість будівель, пропускну здатність інтернет-каналу, політичну підтримку громад – потенційно вагомими предикторами.

Статичний зріз. Перехресне дослідження не фіксує часових лагів між ухваленням бюджету та фактичним встановленням обладнання.

У світлі зазначеного, нижче буде застосовано факторний та кластерний аналіз для виявлення латентних структур у відповідях, а також намічено дослідницьку програму панельного спостереження, здатну розширити причинно-наслідковий апарат моделювання.

Факторна структура цифрової трансформації та типологія українських бібліотек передбачає наступні кроки.

1. Логіка переходу від описових показників до латентних конструкцій

Частотні та перехресні таблиці, розглянуті вище, окреслюють лише «поверхневий рельєф» емпіричних даних. Проте цифрова модернізація бібліотечної

галузі часто спонукається неочевидними, багатомірними чинниками, які неможливо прямо спостерігати через окремі пунктові запитання анкети. Для виявлення таких «прихованих двигунів» застосовано підтверджувально-розвідувальний факторний аналіз, що дає змогу згрупувати низку корельованих змінних у небагато латентних вимірів-мотиваторів, а далі – за допомогою кластеризації–ідентифікувати стійкі профілі бібліотек.

2. Підготовка матриці спостережень

Із 24 змінних опитувальника до факторної моделі ввійшли одинадцять пунктів, виміряних за п'яти- або шестирівневою Лайкерт-шкалою (Q3, Q5, Q7, Q8, Q9, Q10, Q14, Q15, Q17, Q19, Q20). Дихотомічні та політономічні позиції було виключено, щоб уникнути штучної інфляції кореляцій за рахунок методу кодування «0/1». Кожен стовпчик отримав стандартне z-перетворення, що нівелює вплив різної дисперсії й забезпечує коректність порівняння факторних навантажень.

Первинна кореляційна матриця R демонструє переважно помірні парні зв'язки (0,25–0,55), водночас значення $KMO = 0,63$ та результат тесту сферичності Бартлетта $\chi_{emp}^2 = 247,1; df = 55; p < 0,001$ підтверджують адекватність вибірки для подальшої факторизації [103].

3. Вибір кількості факторів і їх субстантивна інтерпретація

Критерій власних значень $\lambda > 1$ та огляд скрін-діаграми засвідчили доцільність трифакторної структури, що кумулятивно пояснює 56,5% загальної дисперсії. Для підвищення інтерпретативності використано ортогональне обертання VARIMAX [104]. Після обертання сформувалися такі латентні осі:

F1 «Енерго-раціональність» (29,2% дисперсії). Високі навантаження отримали змінні, пов'язані з важливістю енергоощадності (Q3), наявністю кліматичних датчиків (Q5) і готовністю фінансувати IoT (Q15). Цей фактор віддзеркалює прагматичний мотив скорочення витрат через енергетичний менеджмент.

F2 «Фондова логістика» (15,8%). Головні маркери–RFID-інвентаризація (Q7), автоматичне комплектування полиць (Q8) та система відеобезпеки (Q9).

Фактор репрезентує бек-офісний вимір, у якому пріоритетом є оптимізація облікових і охоронних процесів.

F3 «Користувацький досвід» (11,5%). Сфокусований на змінних, які стосуються інклюзивної навігації (Q10, Q14, Q20) та ліквідації «мертвих зон» Wi-Fi (Q19). Він описує гуманітарно-орієнтований вектор модернізації, спрямований на підвищення зручності та доступності сервісів для кінцевого користувача.

4. Кластеризація бібліотек на основі факторних балів

Щоб виявити стійкі типи закладів за поєднанням трьох факторних координат, застосовано алгоритм *k-means* [105]. Метод «ліктя» [106] та силует-коефіцієнт [107] вказали на оптимальне число кластерів $k = 3$. Позиція центроїдів (середні стандартизовані факторні бали) дозволила описати такі типи:

Клас	Частка вибірки	F1	F2	F3	Узагальнена характеристика
С-1 «Еко-модернізатори»	31%	1,01	-0,12	-0,18	Переважно національні та обласні бібліотеки, що роблять ставку на енергетичну ефективність як ключову економічну вигоду.
С-2 «Фонд-технарі»	27%	-0,05	0,97	-0,07	Університетські та спеціалізовані бібліотеки, орієнтовані на точність обліку й автоматизацію логістики фондів.
С-3 «Human-first»	42%	-0,28	-0,22	0,89	Переважно міські та громади, фокус яких – покращення досвіду читача, навігаційна зручність та інклюзивність.

Середні значення *IR-Gap* у кластерах різняться: 0,29 для С-1, 0,41 для С-2 і 0,46 для С-3. Отже, там, де модернізація безпосередньо конвертується у вимірювану економію (енергоощадність), розрив між бажаним і можливим вузький, тоді як орієнтація на нематеріальні аспекти сервісності потребує суттєвіших ресурсів і, відповідно, породжує більший *IR-Gap*.

5. Приклад використання кластерної типології

Для «Еко-модернізаторів» доцільною видається програма мікрогрантів на встановлення систем моніторингу мікроклімату з інтеграцією в енергетичні дашборди. Очікуваний ефект – скорочення витрат на опалення й кондиціонування щонайменше на 15% протягом двох бюджетних періодів.

«Фонд-технарі» потенційно бенефіціари спільних закупівель мобільних RFID-візків або роботизованих систем сортування, оскільки в них уже сформовано компетентні проєктні групи.

Бібліотеки кластеру «**Human-first**» доцільно підтримувати через інклюзивні навігаційні пакети (BLE-маяки, PWA-додаток, адаптивні екрани), які безпосередньо підвищують якість користувацького досвіду й відповідають цілям універсального дизайну.

Методологія «step-up» пропонує стартувати з найменш заповненої змінної всередині кластера (мінімальна комунальність), що забезпечує максимальний «ефект доміно»: одна відчутна інновація запускає цикл подальших удосконалень.

Отже: Трифакторна модель підтвердила гіпотезу про існування трьох концептуальних драйверів цифрової трансформації: раціональне енергоспоживання, оптимізація логістики фондів та покращення користувацького досвіду.

Кластерний аналіз окреслив три стійкі типи бібліотек, для яких можна розробляти диференційовані стратегії фінансування, навчання та технічної підтримки.

Розбіжності у *IR-Gap* між кластерами свідчать про наявність різних траєкторій переходу від потенціалу до реалізованого впровадження, що необхідно враховувати в національних і регіональних програмах модернізації.

3.2. Економічні аспекти та ризики впровадження IoT-рішень

1. Теоретичні засади фінансової оцінки

У соціогуманітарних дослідженнях цифрової трансформації бібліотек економічний блок зазвичай залишається «сірою зоною», хоча саме він формує остаточне управлінське рішення – інвестувати чи відкласти модернізацію. Щоб подолати цю лакуну, дисертація базується на класичній триаді фінансових індикаторів проєктного аналізу, рекомендованій донорами USAID, Horizon Europe та Європейським інвестиційним банком:

Показник	Формула	Критичний поріг
NPV (Net Present Value, чиста приведена вартість)	$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{1,1^t}$	$NPV > 0$
IRR (Internal Rate of Return, внутрішня норма рентабельності)	корінь рівняння $NPV(r) = 0$ відносно r	$IRR > r_{\text{бар'єр}}$
PP (Pay-back Period, строк окупності)	$\text{mint: } \sum_{k=0}^t \frac{CF_k}{1,1^k}$	$PP \leq 5 \text{ р.}$

Тут CF_t – чистий грошовий потік у році t ; r – ставка дисконту; T – горизонт проекту.

Модель оцінює не лише прямі бюджетні заощадження, а й додаткові доходи від зростання фондообігу.

2. Початкові припущення

Економічні параметри узгоджено з респондентами під час експертних інтерв'ю.

Параметр	RFID-інвентаризація	Smart-Lighting	Мікроклімат-моніторинг
Початкова інвестиція I_0			9 500€
Прямі щорічні заощадження	1 400 год. праці → 4 500€	-18% кВт·год → 2 600€	-12% витрат паперу/дерева → 1 800€
Дод. доходи (фондообіг)	+4% видач → 1 100€		
Термін проекту T	7 р.	6 р.	6 р.
Ставка дисконту r	10% (середньозважена вартість капіталу держустанов)		
Рештова вартість обладнання	10% від I_0		

3. Розгорнутий приклад розрахунку NPV для RFID-системи

$CF_0 - I_0 = -15000$ €, $CF_{1..6} = 4500 + 1100 = 5600$ €, $CF_7 = 5600 + 1500$ (рештова вартість) = 7100 €.

Дисконтовані потоки:

$$NPV = -15000 + 5600 \sum_{t=1}^6 \frac{1}{1,1^t} + \frac{1500}{1,1^7} = -15000 + 5600 \cdot 4,355 + 765 = +9107 \text{ €}$$

Сума коефіцієнтів дисконту $\sum_{t=1}^6 (1, 1^{-t}) = 4,355$ узята з фінансових таблиць.

Позитивне NPV підтверджує економічну доцільність проекту.

Строк окупності визначено кумулятивним накопиченням дисконтованих CF_t : на кінець 3-го року баланс стає позитивним, отже $PP \approx 2,7$ р.

IRR, знайдений ітераційним методом Ньютона [108], дорівнює 19,6%, що у 1,96 раза перевищує бар'єрну ставку 10%.

4. Порівняння трьох базових сценаріїв

Показник	RFID	Smart-Light	Micro-Climate
NPV, €	+9 107	+5 042	+1 995
IRR, %	19,6	15,2	12,3
PP, роки	2,7	3,6	4,9
$\Delta NPV/\Delta r$ (чутливість)	-410 €/п.п.	-295 €	-165 €

Висновок 1. Усі три рішення належать до «зеленої зони» $NPV > 0$.

Висновок 2. RFID є безумовним лідером за всіма критеріями, що узгоджується з емпіричним фактом 30% уже реалізованих проєктів.

Висновок 3. Мікроклімат-моніторинг має найдовший PP , проте найнижчий CAPEX (від англ. *CApital EXpenditure*, *капітальні вкладення*), отже підходить для малих громад із обмеженим бюджетом.

5. Аналіз чутливості

1. Зростання тарифу на електроенергію +25%.

$NPV_{Smart-Light}$ збільшується до 8 267€; $NPV_{Micro-Climate}$ – до 4 267€. Таким чином, енергозалежні рішення стають вигіднішими за умов енергетичної кризи.

2. Нульова вартість капіталу (грантове фінансування, $r = 0$).

У цьому випадку $NPV_{RFID} = + 24600€$, $NPV_{Smart-Light} = + 13600€$, $NPV_{Micro-Climate} = + 8300€$. Ефект підкреслює важливість залучення донорських ресурсів для пришвидшення окупності.

На підставі двовимірної сітки «тариф / ставка дисконту» побудовано теплову карту, де ізолінії $NPV = 0$ розділяють зону ризику й зону економічної доцільності. Такий візуальний інструмент рекомендовано включати до пояснювальної записки бюджетних проєктів: він знижує когнітивний бар'єр для нефахових керівників.

6. Кореляція економічних та мотиваційних факторів

Проведений ранговий аналіз показав, що фактор **F1 «Енерго-раціональність»** істотно корелює з $NPV_{Smart-Light}$ ($\rho = 0,64$; $\rho < 0,01$), а **F2 «Фондова логістика»** – з NPV_{RFID} ($\rho = 0,71$; $\rho < 0,001$). Це свідчить, що економічний ефект та мотиваційні установки респондентів є взаємопідсилювальними, а не ортогональними вимірами.

7. Практичні рекомендації для управлінців

1. **Акцент на швидку віддачу.** RFID-система з $PP < 3$ років підходить для муніципалітетів із річним бюджетним циклом; вона може бути профінансована через механізм енергосервісного договору.
2. **Лізинг для малих закладів.** Оскільки головний бар'єр – високі разові витрати, доцільно пропонувати моделі pay-per-use або операційний лізинг з рівномірними платежами протягом 5–7 років.
3. **Гранти під енергетику.** В умовах зростання тарифів алокування коштів на smart-lighting дає синергетичний ефект: зменшення витрат на електроенергію та скорочення вуглецевого сліду, що відповідає принципам «зеленої» стратегії ЄС.

8. Обмеження та подальші завдання

Невизначеність тарифів. Прогноз цін на енергоносії після 2026 р. містить високу волатильність; потрібні сценарні дерева Monte Carlo [109].

Екстерналії. Аналіз не враховує соціальних вигід (зростання відвідуваності, підвищення якості освітніх послуг). Включення екстерналій через методологію СВА (Cost-Benefit Analysis) може додатково підвищити оцінку проєктів [110].

Капітальні ремонти будівель. Якщо IoT впроваджується одночасно з термомодернізацією, частка заощаджень може бути атрибутована не лише сенсорній мережі; таким чином, потрібно враховувати розподілену економію.

Особливу роль при цьому відіграє розробка карта чутливості економічних показників та алгоритм масштабування фінансової моделі

1. Концепція «теплової» візуалізації. Невизначеність тарифів на енергоносії й коливання вартості позикового капіталу суттєво впливають на чисту приведену вартість (NPV) кожного сценарію. Щоб зробити ці ризики наочними для управлінців і грантодавців, побудовано двовимірну теплову мапу, у якій вісь X відповідає ставці дисконту r (6–18%), а вісь Y – рівневі зміни тарифу на електроенергію (–15 ... +35% від базового). Колір клітини кодує значення NPV : від насиченого синього (зона втрат) до темно-червоного (максимальний економічний ефект).

Побудова матриці

1. **Фіксуємо** діапазон r із кроком 2% та діапазон тарифного коефіцієнта $k_{ен} = 0,85 \dots 1,35$ із кроком 5%.

2. **Перераховуємо** річний грошовий потік:

$$CF_t(k_{ен}) = CF_t^{баз} + (k_{ен} - 1) \cdot \Delta E_t,$$

де ΔE_t – базова економія на електроенергії у році t .

3. **Обчислюємо** $NPV(k_{ен}, r)$ за класичною формулою.

4. **Нормуємо** шкалу кольорів: нульове значення фарбується білим; позитивні значення – градієнтом від рожевого до червоного; негативні – від блакитного до темно-синього.

5. **Наносимо** ізолінію $NPV = 0$, що ділить площину на зону фінансової доцільності і ризикову область.

Інтерпретація. Один погляд на мапу дозволяє зрозуміти, за яких макроекономічних умов проєкт зберігає позитивний фінансовий результат, а де потребує страхувальних механізмів (наприклад, енергосервісного контракту з гарантованою економією).

2. Приклад: Smart-Lighting у міській бібліотеці

Для smart-lighting-сценарію (CAPEX = €11 000) критична межа $\{r, k_{\text{ен}}\}$ перебуває приблизно на рівні: $r = 13,5\%$ за базового тарифу або $k_{\text{ен}} = 0,78$ за ставки дисконту 10%. Отже, навіть при зниженні тарифів на 22% рішення залишається доцільним, якщо вартість капіталу не перевищує 8%.

3. Алгоритм перенесення моделі на нові IoT-кейси

Запропонований фінансовий шаблон є універсальним; для адаптації до будь-якого «модуля» достатньо п'яти кроків.

Крок	Дія	Формула / процедура	Пояснення
1	Ідентифікація потоків	Визначити I_0 , річні економії ΔC_t та/або дод. доходи ΔR_t	Аналіз ТЕО, дані виробників, експертні інтерв'ю
2	Оцінка життєвого циклу	Встановити горизонт T та рештову вартість S_T	Орієнтуємося на гарантійний строк плюс 1 рік
3	Складання графіка CF_t	$CF_t = \Delta R_t + \Delta C_t - OPEX_t$	Розділяємо прямі й опосередковані потоки
4	Дисконт-аналіз	Розрахувати NPV, IRR, PP для декількох r	r береться із середньозваженої вартості капіталу (WACC) установи
5	Валідація чутливості	Побудувати теплову карту за змінними r і ключовим драйвером економії	Дозволяє визначити «зону безпеки» проекту Дозволяє визначити «зону безпеки» проекту

Стислий чек-лист.

- Чи враховано трудові витрати, які вивільняються?
- Чи враховано зростання фондообігу/відвідуваності?
- Чи співмірні OPEX (від англ. *OPerating EXpense*, операційні витрати) із CAPEX протягом всього T ?
- Чи тестували сценарії «–20% економії» та «+20% CAPEX»?

4. Рекомендації щодо управління ризиками

1. **Страховання економічного ефекту.** Укладення енергосервісних угод із підрядником, який гарантує мінімальну економію, переводить частину ризику на постачальника технології.

2. **Лізинг із відкладеним платежем.** Для бібліотек кластеру «Human-first» запровадження PaaS-моделі (Platform-as-a-Service) із щорічною абонплатою рівномірно розподіляє фінансове навантаження.
3. **Гібридне фінансування.** Комбінація грантових коштів (до 40%) та місцевого бюджету (60%) зменшує ставку дисконту і підвищує NPV щонайменше на 20 – 25%.

Також необхідно чітко визначати та розуміти ризики впровадження технологій Інтернету речей та особливості управління ними у бібліотечно-інформаційному виробництві.

Цифрова трансформація бібліотек, що поступово охоплює увесь спектр процесів – від каталогізації до комунікації з користувачами, – водночас розкриває нові можливості й породжує цілу систему ризиків, без усвідомлення яких неможливо сформувати життєздатну стратегію впровадження Інтернету речей. Ризик у цьому контексті є не стільки загрозою, скільки точкою невизначеності, в межах якої бібліотека випробовує власну спроможність адаптуватися до технологічних змін. На відміну від промислових або корпоративних середовищ, у бібліотечній сфері наслідки технологічних збоїв або хибних управлінських рішень відчуються не лише економічно, а насамперед соціально – через втрату довіри, обмеження доступу до знань, порушення гуманітарної рівноваги між технологічною ефективністю та людською присутністю.

Узагальнюючи результати бібліометричного аналізу та емпіричного опитування, можна виділити кілька взаємопов'язаних блоків ризиків, що формують «ландшафт цифрової невизначеності» сучасної бібліотеки. До нього належать технічні, фінансові, управлінські, кадрові, соціально-етичні та екологічно-експлуатаційні чинники. Кожен з них не існує ізольовано, а утворює складну мережу взаємозалежностей, у якій навіть дрібна помилка може спричинити системні наслідки. Саме тому в дисертаційному дослідженні управління ризиками розглядається не як реакція на непередбачувані обставини, а як органічна складова

управлінської культури бібліотеки, що формується паралельно з її цифровою зрілістю.

Найбільш очевидним є технологічний вимір ризику, який охоплює стабільність апаратних рішень, безпеку даних, сумісність різних систем та довговічність обладнання. В умовах, коли бібліотеки дедалі частіше застосовують гібридні схеми інтеграції IoT-сенсорів, RFID-тегів, бездротових маячків, систем моніторингу мікроклімату чи відвідуваності, кожен технічний компонент стає потенційним «вузлом уразливості». Типовим прикладом є конфлікт між застарілою АБІС і новими модулями обліку, що може спричинити втрату синхронізації даних. Не менш загрозливими є випадки збою у хмарних сервісах, коли бібліотека втрачає тимчасовий доступ до свого електронного каталогу або статистики відвідувань. Досвід провідних закладів – таких як Гельсінкська центральна бібліотека Ооді [12; 13] чи бібліотеки університету Гонконгу – засвідчує: технологічні ризики найкраще долаються не тотальною стандартизацією, а створенням багаторівневої системи технічної довіри [19; 20; 21]. Вона передбачає прозору архітектуру, документування кожного етапу розробки, застосування протоколів шифрування, регулярне резервне копіювання й розподіл функцій між людським та машинним контролем. Для українських бібліотек це питання має подвійний зміст: з одного боку, йдеться про технічну безпеку, а з іншого – про формування довіри до самої ідеї цифровізованої бібліотеки як простору, де дані користувача не перетворюються на товар.

Не менш вагомим є фінансово-економічний вимір ризику. Будь-яка інновація потребує ресурсного підґрунтя, і саме тут бібліотеки найчастіше стикаються з кризою. У практиці українських закладів проблема полягає не лише у нестачі фінансування, а й у непередбачуваності бюджетних процедур, що робить планування довгострокових ІТ-проектів майже неможливим. IoT-інфраструктура, на відміну від разового закупівельного циклу техніки, вимагає постійного оновлення, ліцензування, технічної підтримки та навчання персоналу. За результатами емпіричного опитування [Додаток П], понад дві третини керівників бібліотек визнали, що не мають окремої статті витрат на утримання цифрових систем, а отже,

ризикують зупинити роботу навіть через дрібний збій. У таких умовах управління фінансовими ризиками повинно спиратися не лише на економічні розрахунки, а й на стратегії колективної взаємодії – створення партнерських кластерів, участь у грантових програмах, запровадження енергосервісних договорів, які дозволяють компенсувати частину витрат за рахунок зекономлених ресурсів. Поступовий перехід від короткотермінових проєктів до моделі фінансової стабільності бібліотеки перетворює ризик нестачі коштів на контрольований фактор планування.

Організаційно-управлінський аспект ризиків безпосередньо пов'язаний із людським і комунікаційним чинником. Багато бібліотек в Україні впроваджують цифрові інновації спорадично, не маючи цілісної стратегії чи призначених відповідальних осіб. Це породжує феномен «технологічних островів» – коли окремі проєкти існують паралельно, не інтегруючись у спільну систему. Подібна фрагментованість не лише знижує ефективність інвестицій, а й створює ризик втрати компетенцій, оскільки персонал не має змоги обмінюватися досвідом. У дисертації цей ризик відображено через показник управлінської зрілості (Governance Index) у структурі Digital Capacity Index, який демонструє, що навіть високий рівень технічної оснащеності не гарантує сталості цифрового розвитку без чіткої координації та внутрішнього регламенту. Формування культури ризик-менеджменту в бібліотеці починається з елементарного – фіксації відповідальності за кожний процес, ведення журналів подій, запровадження регулярних аудитів і внутрішніх стандартів якості. На цьому рівні технологічна безпека перетворюється на прояв управлінської дисципліни.

Кадровий компонент ризику є своєрідним «м'яким ядром» цифрової модернізації. Розвиток Інтернету речей вимагає не лише технічних навичок, а й здатності працівників мислити системно, аналізувати дані, поєднувати гуманітарні цінності з технологічним підходом. Відсутність таких компетентностей породжує ризик формального впровадження – коли обладнання є, але воно не використовується на повну потужність. Цей феномен фіксується в опитуванні як «кадровий розрив»: працівники демонструють позитивне ставлення до інновацій,

але не мають часу або підтримки для навчання. Подолання цього розриву можливе лише через створення мережі неперервної освіти. У європейських країнах успішно діють моделі співпраці університетських бібліотек з ІТ-факультетами, де стажування студентів стає елементом підтримки цифрової інфраструктури. Для України аналогічною практикою може стати створення бібліотечно-освітніх хабів, у межах яких досвідчені фахівці проводять мікрокурси з роботи з сенсорними системами, аналітикою даних, кібергігієною. Таким чином, управління кадровими ризиками водночас означає інвестицію у сталість знань.

Особливе місце посідають соціально-етичні ризики, що набувають дедалі більшого значення у зв'язку з розширенням аналітичних функцій бібліотечних систем. Кожен сенсор, камера або лічильник відвідувань збирає дані, які потенційно можуть бути співвіднесені з особистістю користувача. Саме тут стикаються дві системи цінностей: ефективність сервісу та приватність людини. Питання полягає не лише у дотриманні правових норм, а у збереженні довіри, яка становить серцевину бібліотечної культури. Міжнародна федерація бібліотечних асоціацій (IFLA) неодноразово підкреслювала, що цифрова бібліотека має залишатися безпечним простором для особистої інтелектуальної діяльності. Отже, керування соціально-етичними ризиками вимагає поєднання технічних і гуманітарних механізмів: прозорого інформування користувачів про те, які дані збираються; анонізації журналів активності; розроблення кодексів цифрової етики. Такі документи, у яких фіксуються моральні межі використання технологій, поступово стають новою формою соціального контракту між бібліотекою та громадою.

Менш помітним, але не менш важливим є екологічно-експлуатаційний аспект. У старих будівлях, де розміщено більшість бібліотек України, впровадження складних технічних систем може загрожувати енергетичній рівновазі, архітектурній цілісності або створювати додаткове теплове навантаження. Розумна бібліотека не повинна перетворюватися на «електронну лабораторію», відчужену від простору культури. Саме тому питання енергоефективності та екологічної сталості потребує окремої уваги. Використання технологій з низьким енергоспоживанням, систем

рекуперації або живлення від сонячних панелей є не лише технічним, а й етичним вибором, який узгоджується з концепцією «зелених бібліотек». Зниження експлуатаційних ризиків через моніторинг ресурсів сприяє формуванню нового образу бібліотеки як простору відповідального користування технологіями.

З погляду методології дослідження, усі наведені види ризиків утворюють основу для формування інтегрального показника ризикової спроможності бібліотеки. Його можна розглядати як допоміжний модуль у структурі Digital Capacity Index, де поряд із показниками інфраструктури, фінансів, управління та кадрового потенціалу з'являється ще один – рівень передбачуваності й контрольованості негативних чинників. Така інтеграція дозволяє перейти від статичного вимірювання цифрової спроможності до динамічного оцінювання її стабільності. Умовно кажучи, бібліотека може мати високий DCI, але низьку здатність протистояти кризам; отже, загальна ефективність цифрової трансформації знижується. Включення параметра ризикової спроможності (Digital Risk Score) у систему індикаторів дає змогу вимірювати не лише те, що вже досягнуто, а й те, наскільки ці досягнення захищені від випадковостей.

У ширшому гуманітарному контексті управління ризиками стає частиною культури відповідального користування технологіями. Воно вимагає не лише технічних знань, а й рефлексії над тим, як зміни в інфраструктурі впливають на поведінку людини, на сприйняття простору бібліотеки, на довіру до знань як таких. В умовах воєнних і післявоєнних викликів питання ризику набуває ще й екзистенційного змісту: бібліотека виступає місцем безпеки – не тільки інформаційної, а й фізичної. Тому системи Інтернету речей, що регулюють освітлення, вентиляцію чи укриття, набувають етичного виміру. Управління ризиками в цьому середовищі – це насамперед управління людським добробутом через технологічні засоби.

3.3. Стратегічне проєктування IoT-трансформації бібліотек

1. Підстави для побудови індексної моделі

IR-Gap фіксує різницю між «бажаю» та «можу», однак не розкриває, **чому саме** бібліотека «не може». Щоб діагностувати слабкі місця, запропоновано *Digital Capacity Index (DCI)* – багатовимірний «термометр», що розкладає ресурсну готовність на п'ять підіндексів:

Код	Підіндекс	Змістове наповнення	Джерело анкетних даних	Вага ω_k
INF	Infrastructure	Наявність базових IoT-вузлів, мережевої інфраструктури	Q5–Q8, Q15	0,3
GOV	Governance	Стратегія, регламенти, KPI, технічні завдання	Q9, Q12, Q20	0,2
HR	Human Resources	Кваліфікований IT-персонал, мотивація до навчання	Q10, Q11, Q17	0,2
FIN	Finance Readiness	Затверджені кошториси, гранти, власні фонди	Q13, Q14, Q18	0,2
USR	User Demand	Попит читачів на цифрові сервіси	Q22	0,1

Ваги ω_k встановлено експертно: вищу частку отримали сегменти, що безпосередньо впливають на технічне розгортання (*INF*, *FIN*, *HR*), тоді як користувачький попит виступає зовнішнім модератором.

2. Нормування вихідних шкал

Анкетні показники мають різні діапазони (0/1; 1–6;%). Для забезпечення міжзмінної сумісності застосовано лінійне перетворення до 100-бальної шкали:

$$x_i^{\setminus*} = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \times 100,$$

де $x_i^{\setminus*}$ – нормоване значення відповіді x_i .

Середнє нормоване значення у межах кожного підіндексу:

$$x_k^{\setminus*} = \frac{1}{m_k} \sum_{j=1}^{m_k} x_{kj}^{\setminus*},$$

де m_k – кількість питань, що утворюють k -підіндекс.

3. Підсумкова формула й результати

Інтегральний показник:

$$DCI = \sum_{k=1}^5 \omega_k \cdot x_k^*.$$

Для вибірки $n = 74$:

Підіндекс	Середній бал (0–100)	Пояснення гуманітарною мовою
INF	42	Сенсорне «залізо» розгорнуте менш ніж наполовину; особливо бракує кліматичних датчиків.
GOV	25	Управління переважно інтуїтивне, формалізованих ТЗ і КРІ бракує.
HR	48	Кількість ІТ-фахівців невелика, проте мотивація до навчання висока.
FIN	29	Кошти на ІоТ у бюджетах переважно не марковані; доводиться шукати гранти.
USR	67	Користувач уже «дозрів» до цифрових сервісів (Wi-Fi-зона, самообслуговування по RFID).

$$DCI_{\text{середн}} = 0,30 \cdot 42 + 0,20 \cdot 25 + 0,20 \cdot 48 + 0,20 \cdot 29 + 0,10 \cdot 67 = 40,8\%.$$

Отже, за результатами узагальнення отриманих показників, середньостатистична українська бібліотека за сукупністю показників відповідає другому щаблю цифрової зрілості – рівню «керованого процесу» у п'ятирівневій рамці, що узгоджується з підходами UNESCO до поетапної цифрової трансформації освітніх та суміжних інституцій; для досягнення «оптимізованого» четвертого рівня зберігається орієнтовний розрив близько 30 відсоткових пунктів. Застосування п'ятирівневої логіки підтверджується офіційною рамкою цифрової зрілості CARNET/e-Schools (рівні: Digitally unaware → Digitally mature) і методичними настановами UNESCO щодо політик ICT у сфері освіти [23].

4. «Вузькі місця» та пріоритети інтервенцій

1. **Governance (25%)** – найнижчий показник. Швидко підвищується типізованими технічними завданнями та впровадженням КРІ.

2. **Finance (29%)** – у 62% респондентів відсутній окремий рядок «IoT» у бюджеті; доцільно запровадити механізм співфінансування 60/40.
3. **Infrastructure (42%)** – технічні рішення наявні фрагментарно; рекомендовано модель «референтної архітектури», щоб уникнути несумісних закупівель.

5. Валідація індексу

Співвідношення $DCI \leftrightarrow Tech_count$ становить $\rho_{Spearman} = 0,69 (p < 0,001)$,

що підтверджує адекватність індикатора: зростання цифрової спроможності конвертується у більшу кількість фактично розгорнутих IoT-модулів.

Критичне перехресне порівняння з *IR-Gap* ($\rho = -0,58; p < 0,001$) демонструє зворотну залежність: що вищий DCI, то нижчий розрив між бажаним і можливим.

6. Практичне застосування DCI

Діапазон DCI	Клас зрілості	Стратегічна дія	Орієнтовний KPI-таргет
0–24%	«Латентний потенціал»	Базові тренінги «IoT для бібліотекаря»	$\geq 60\%$ персоналу сертифіковано
25–49%	«Стартова готовність»	Пілотний проєкт з підтримкою 80/20 (грант/заклад)	$IR-Gap \leq 25\%$
50–74%	«Етап пілотів»	Масштабування через модель співфінансування 60/40	≥ 3 IoT-модулі
75–100%	«Системне впровадження»	Оптимізація та інтеграція з аналітикою енергоспоживання	$NPV > \text{€ } 20\,000$

Digital Capacity Index забезпечує багатовимірний погляд на цифрову спроможність бібліотек та дозволяє адресно спрямовувати ресурси. **Governance** і **Finance** ідентифіковано як головні «вузькі місця»; їх усунення підвищить середній DCI щонайменше на 15 п.п., що еквівалентно переходу більшості закладів у фазу «Етап пілотів».

Зупинимося на розгляді дорожньої карти «IoT-Ready Library» (покрокової траєкторії без прив'язки до календарних дат).

Щоб уникнути ризику втрати актуальності через макроекономічні чи політичні зсуви, запропоновано **періодизовану** (а не датовану) модель упровадження. Кожна фаза триває доти, доки досягається цільовий індикатор; наступний етап стартує не за календарем, а за фактом виконання контрольних критеріїв.

Фаза	Опис і зміст робіт	Орієнтовна тривалість	Ключовий індикатор переходу	Додаткові КРІ
0 Awareness	Формування базових цифрових компетентностей персоналу; внутрішня комунікація щодо переваг IoT	$\approx 3-6$ міс	$\geq 60\%$ працівників завершили онлайн-курс «IoT для бібліотекаря»	–
1 Pilot-IoT	Вибір одного пілотного кейса з найдоступнішим CAPEX (напр. мікроклімат-моніторинг); встановлення невеликої сенсорної мережі	$\approx 6-12$ міс	IR-Gap $\leq 25\%$	DCI $\geq 45\%$; NPV_пілота > 0
2 Infrastructure	Масштабне розгортання базових модулів (RFID, smart-lighting, Wi-Fi 6); інтеграція в єдину мережеву архітектуру	$\approx 12-24$ міс	INF ≥ 60 балів (за шкалою DCI)	Частка IoT-модулів ≥ 3 ; PP_сумарн ≤ 4 р.
3 Governance	Розробка та затвердження регламентів, КРІ, процедур закупівель; перехід до підзвітної моделі управління даними	паралельно з Ф2; фіксація ≈ 18 міс	GOV ≥ 60 балів	ТЗ-шаблон затверджено; SLA підрядників $\geq 95\%$
4 Scale-Up	Поширення успішних рішень на всі функціональні зони; інтеграція з аналітикою енергоспоживання; підключення зовнішніх платформ	$\approx 24-36$ міс від старту Ф3	DCI $\geq 70\%$ та Tech_count ≥ 5	IR-Gap $\leq 15\%$; ROI_портфеля $> 25\%$

1. Логіка «блокуючих» критеріїв

Фаза не завершується, доки індикатор не виконано. Такий підхід дисциплінує менеджмент і дає змогу гнучко реагувати на форс-мажори.

IR-Gap використано як «термометр очікувань»: зменшення розриву підтверджує, що ентузіазм підкріплюється ресурсами.

DCI відстежує структурні зміни. Напр., під час «Infrastructure» можна досягти високого INF, але без GOV ≥ 60 балів перехід до Фази 4 блокується.

2. Розподіл фінансування за фазами

Джерело коштів	Фаза 0	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 4
Власний бюджет	100% дрібних витрат	20% CAPEX пілота	40% великих закупівель	60% (кадрове забезпечення)	50% OPEX

Джерело коштів	Фаза 0	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 4
	(платформа e-Learning)				
Гранти / донори	–	80% CAPEX пілота	30% CAPEX	20% консультаційні послуги	–
Енергосервіс / лізинг	–	–	30% smart-lighting, HVAC	–	50% support-contract

Такий мікс дозволяє балансувати між бюджетними обмеженнями і вимогою швидкої окупності.

3. Адаптація дорожньої карти під різні типи бібліотек:

1. Сільські та селищні

Start – Фаза 1 з мікроклімат-моніторингу (мінімальний CAPEX);

Governance реалізується спрощеним шаблоном.

2. Міські публічні

Починають одразу з комбінації Ф1 (RFID-порти) та Ф2 (розумне освітлення в читальних залах); HR-компонент закривається співпрацею з місцевим коледжем ІТ.

3. Університетські

Часто вже мають дослідний прототип, отже фокус на Фазі 3: стандартизація даних, КРІ та інтеграція з навчально-дослідною аналітикою.

4. Контроль виконання та механізм санкцій

Щоквартальний аудит КРІ: якщо *DCI* не зростає ≥ 5 п.п. за період, запускається план коригуючих дій.

Вартість затримки обчислюється формулою

$$Loss_{delay} = S \cdot \frac{\Delta}{12},$$

де S – річні заощадження, Δ – місяці відхилення від графіка. Напр., при $S = 2600\text{€}$ та запізненні 8 місяців – втрата складе 1 733€.

Висновки:

1. **Періодизована** модель забезпечує стійкість дорожньої карти до зовнішніх потрясінь і дозволяє адаптувати темп упровадження під реальні фінансові потоки.
2. **Блокуючі КРІ** (IR-Gap, DCI, INF, GOV) гарантують, що перехід між фазами відбувається лише після досягнення відчутного результату, а не «за розкладом».
3. Вплив затримок легко конвертується у грошовий еквівалент, тож керівництво отримує прозорий сигнал про ціну бездіяльності.

Практика показує, що найбільш поширені відмови на тендерах стосуються нецілісності чи суперечливості технічних вимог, а бібліотекарі, навіть із управлінським досвідом, рідко володіють IoT-термінологією.

Попередні розділи дисертаційного дослідження засвідчили, що цифрова трансформація бібліотечної сфери України стикається з подвійною проблемою: по-перше, із суттєвим розривом між декларованими намірами та наявними ресурсами (показник *IR-Gap* перевищує третину потенційної траєкторії розвитку), а по-друге, з недостатньою інституційною зрілістю управлінських практик, про що виразно свідчить підіндекс **Governance** у межах інтегрального *Digital Capacity Index* (лише чверть від ідеального значення). Ці кількісні результати окреслюють гуманітарний вимір проблеми: нестачу формалізованих, проте водночас зрозумілих для всіх зацікавлених сторін текстових регламентів, здатних поєднати культурну місію бібліотек з технічними вимогами цифрової інфраструктури.

Інакше кажучи, навіть за наявності базових фінансових можливостей та частково розгорнутих IoT-рішень бібліотеки залишаються у ситуації, коли сенсорна мережа, електронний каталог чи система інтелектуального освітлення не репрезентовані в управлінському дискурсі як складники цілісної культурної послуги. В таких умовах технічне завдання на закупівлю або модернізацію обладнання перетворюється на відокремлений, суто інженерний документ, що часто

дисонує з гуманітарними цінностями закладу, породжуючи організаційний опір і знижуючи ефективність інвестицій.

Виходячи з цього, наступний тематичний блок дисертації зосереджується на розробці моделі та принципів створення універсального «конструктора» технічних завдань, складеного не як набір жорстко заданих технічних специфікацій, а як методологічний каркас, що інтегрує смислові, етичні й комунікативні аспекти бібліотечної діяльності. Йдеться про концептуалізацію документа, котрий виконує принаймні три взаємопов'язані функції. По-перше, він має транслювати культурну місію бібліотеки мовою, зрозумілою інженерним і фінансовим партнерам, забезпечуючи таким чином семіотичний зв'язок між цінностями та технологією. По-друге, передбачається партисипативний характер його укладання, що залучатиме читачів, громадські організації, волонтерів і фахівців суміжних галузей, тим самим підвищуючи легітимність рішень і зміцнюючи соціальний капітал інституції. По-третє, документ повинен містити механізми етичного контролю, аби впровадження IoT-систем не порушувало принципів інклюзії, приватності та авторських прав, які становлять ядро гуманітарного дискурсу бібліотеки.

Науково-теоретичне підґрунтя такого підходу формується на перетині бібліотечної соціосеміотики, теорії акторно-мережевих систем та концепції «ethics-by-design». Спираючись на ідеї Б. Бакленда про документ як процес культурного посередництва [22], приймаємо, що технічне завдання повинне еволюціонувати разом із трансформацією самих бібліотечних послуг, залишаючись «живим» текстом, відкритим до ревізії й доповнень. Рольова структура його формування описується крізь призму акторно-мережевої теорії: бібліотекар, IT-фахівець, читач і постачальник обладнання виступають рівноправними учасниками проєктного дискурсу, а кінцевий документ є результатом їхнього діалогу.

З огляду на визначені завдання, наступний розділ дисертації присвячуватиметься поетапній побудові методологічної моделі «конструктора» технічних завдань. Насамперед буде здійснено критичний огляд існуючих підходів

до документної медіації у сфері культури та освіти, визначено етичні та соціальні критерії якості бібліотечного ТЗ, а також сформульовано принцип «від смислу до специфікації», який передбачає відштовхування від гуманітарної мети й поступовий перехід до параметричних описів систем. Далі буде окреслено багаторівневу карту стейкхолдерів, алгоритм фасилітованих сесій для спільного прототипування та процедуру публічної експертизи, що забезпечує прозорість і підзвітність усього процесу. Підсумком стане опис показників ефективності запропонованої моделі, де поряд із традиційними економічними метриками буде використано індикатори гуманітарного впливу, такі як ступінь довіри користувачів і динаміка підіндексу Governance у структурі DCI.

Отже, логіка подальшого викладу відповідає загальному дослідницькому замислу дисертації: від емпіричних вимірів цифрової зрілості – до розробки гуманітарно вмотивованих інструментів управління інноваціями, здатних забезпечити стійке, етично зважене впровадження IoT-технологій у українських бібліотеках.

З огляду на те, що дослідження має гуманітарний, а не технічний характер, надалі пропонуємо три гнучкі траєкторії модернізації, адаптовані до фінансових та кадрових реалій типової української бібліотеки. Кожну траєкторію описано «мовою дій»: які саме функції отримує заклад, яке обладнання для цього потрібне, скільки часу й коштів доведеться інвестувати, і – головне – якою гуманітарною цінністю це обернеться для читача та співробітника.

1. «Старт-пакет» для сільських та селищних бібліотек

Компонент	Що дає читачеві / персоналу	Орієнтовні витрати	Час впровадження*
Модуль «Чисте повітря» (2–3 бездротові датчики температури й CO ₂)	Комфортні умови у читальній залі; тривожне повідомлення при перевищенні граничних значень	≈ 12 000 ₪ (CAPEX)	1–2 тиж.
Модуль «Безпека фонду» (один RFID-порт на виході та ручний зчитувач)	Швидший облік і мінімізація втрат фонду	≈ 35 000 ₪	≈ 1 міс.

Компонент	Що дає читачеві / персоналу	Орієнтовні витрати	Час впровадження*
Відкрите Wi-Fi-ядро (точка доступу + хмарний контролер)	Безперервний інтернет-доступ; база для майбутніх IoT-пристроїв	≈ 8 000 €	1 тиж.

Логіка стратегії. Мінімальний набір сенсорів створює «точку входу» у цифровий простір: персонал наочно бачить користь від автоматизованих сповіщень, а читач отримує комфортнішу атмосферу. RFID-порт одразу демонструє економічний ефект – зменшення необлікових втрат фонду навіть на 2–3% покриває витрати протягом двох бюджетних років.

2. «Бібліотека громади» (міський або районний рівень)

Компонент	Гуманітарна цінність	Орієнтовні витрати	Час впровадження
«Розумне світло» (діммери та датчики присутності в залі)	Зниження шуму й енергоспоживання, покращення концентрації відвідувачів	≈ 120 000 €	2–3 міс.
VLE-навігація (10–15 маяків + мобільна PWA)	Самостійний пошук полицок людьми з особливими потребами; аудіо-тури	≈ 60 000 €	1 міс.
RFID-мобільний візок (інвентаризація фонду «за ніч»)	Скорочення ручного обліку з 3-х тижнів до 2-х діб; швидкий пошук зниклих примірників	≈ 180 000 €	2 міс.

Фінансова модель. 40% вартості – місцевий бюджет, 60% – грант або лізинг під 0%. Окупність «розумного світла» (за діючими тарифами) – 3,5–4 роки, VLE-навігація підвищує відвідуваність у середньому на 7–9%, що дає підстави для додаткового фінансування від органів культури.

3. «Інтелект-хаб» для університетських і національних бібліотек

Сегмент	Основна функція	Приблизні витрати	Термін виконання
IoT-шина + дата-ланцюг (MQTT-брокер, сервер візуалізації Grafana, резервний кластер)	Єдина «нервова система» для десятків пристроїв; аналітика в реальному часі	≈ 350 000 €	4 міс.
Роботизована сортувальна лінія (конвеєр + маніпулятор)	Автоматичне повернення книг; звільнення 0,5 ставки бібліотекаря	≈ 1,2 млн €	6–8 міс.
IoT-лабораторія для студентів (набори Arduino/ESP, хмарні API)	Інтеграція навчального процесу й наукових досліджень; генерація стартап-ідей	≈ 220 000 € (у т. ч. меблі)	3 міс.

Кадрова складова. Бібліотека укладає меморандум із факультетом інформаційних технологій: студенти виконують частину розробок у межах курсових і дипломних робіт, знижуючи витрати на консультації та ПЗ.

4. Модульний гуманітарний конструктор: методологічний каркас

Усі перелічені стратегії базуються на одній ідеї: IoT для бібліотеки має бути «складальним», подібно до набору LEGO, де кожен блок виконує певну гуманітарну функцію. Пропонуємо робочу назву – **Human-Centric Library Constructor (HCLC)**. Його елементи:

1. **Функціональні модулі:** «Повітря», «Світло», «Фонд-Охорона», «Навігація», «Аналітика простору».
2. **Типові технічні карти:** кожна карта – це аркуш-інструкція, що включає:
 - опис вигоди «людською мовою»;
 - перелік обладнання (з посиланням на державний класифікатор);
 - чек-лист налаштування;
 - QR-код на відео-інструкцію.
3. **Методичний маршрут:** Алгоритм переходу від старт-пакета до повного інтелект-хабу через «IF-THEN» логіку: якщо DCI \geq 45%, то активується модуль «Світло», якщо IR-Gap \leq 25%, то підключається «Навігація».
4. **Блок «Урок-за-уроком»:** 20 коротких сценаріїв для внутрішніх майстер-класів: від «Як провести інвентаризацію RFID-сканером» до «Як зчитувати дані CO₂-сенсора у Google Sheets». Додатково 5 базових сценаріїв менеджменту.
5. **Журнал вигід** - простий Excel-шаблон, де персонал бібліотеки фіксує час, заощаджений автоматизацією, та позитивні відгуки читачів. Цей «живий» доказ допомагає аргументувати подальше фінансування.
6. **Принцип модулів:** жоден модуль не вимагає попередньої професійної освіти з програмування; весь складний код сховано за готовими скетчами і хмарними шаблонами. Бібліотекар оперує «пазлами» гуманітарних вигід, а технічна детальність залишається на рівні інструкції-картки.

5. Переваги підходу HCLC

Зрозуміло й без зайвої термінології. Ключовим артефактом стає не схема живлення, а твердження: «Цей датчик за вечір окупить себе економією світла».

Сумісність із різними бюджетами. Бібліотека самостійно «додає блоки», коли з'являються кошти.

Мотивація персоналу. Кожен завершений модуль – маленька перемога, яка фіксується у журналі вигід і підживлює ентузіазм.

Документальна прозорість. Директор отримує коротке досьє: вкладення, заощадження, відгуки читачів.

Таким чином, **модульний гуманітарний конструктор** пропонує бібліотекам універсальний маршрут: від першого сенсора CO₂ до повнофункціонального інтелект-хабу, не гублячи гуманітарного сенсу й не потребуючи глибоких технічних знань. Він замикає логічний цикл дисертаційного дослідження: від діагностики готовності (DCI, IR-Gap), через економічне обґрунтування (NPV, BCR), до інструменту практичного впровадження, який мотивує бібліотекарів діяти, а не чекати «ідеального моменту».

Визначимо стратегії впровадження IoT-рішень для бібліотек із різним ресурсним потенціалом.

1. Концептуальна рамка та наукова новизна розділу

Попередні розділи дисертації окреслили феномен smart-library як гуманітарно-технічну екосистему, у якій сенсорні мережі, алгоритмічні панелі керування й цифрові сервіси переосмислюють роль бібліотеки у спільноті. Однак більшість наявних публікацій, навіть найсвіжіших [111], пропонують універсалістський – тобто однаковий для всіх – сценарій переходу, ігноруючи локальні обмеження: різні моделі фінансування, кадровий дефіцит, історичну забудову будівель. Цей розділ уперше формалізує матричну систему стратегій, що поєднує:

індикативні пороги (DCI, IR-Gap, Tech_count) – як «GPS-координати» готовності;

модульний гуманітарний конструктор HCLC – як «набір деталей», з якого бібліотека самостійно складає доречну конфігурацію.

Такий підхід забезпечує подвійний ефект:

1. **інноваційність** – пропонується не черговий перелік гаджетів, а динамічна система, що масштабується під бюджет, площу й кадрову спроможність;
2. **прикладна цінність** – описано чіткі функції, часові горизонти й гуманітарні вигоди, що безпосередньо резонують із професійними пріоритетами бібліотекарів-практиків.

2. Методика стратифікації

Базуючись на кластерному аналізі та чинниках, верифікованих міжнародними дослідженнями про вплив IoT на бібліотечні послуги [112], сформовано трирівневу таксономію закладів:

Рівень готовності	Узагальнений портрет	Вхідні параметри
R₁ «Старт»	Сільська/селищна бібліотека з ≤ 2 співробітниками, < 25 000 одиниць фонду	DCI < 35%; Budget_ok = «ні»; IT_staff = 0
R₂ «Громада»	Районна / міська бібліотека з 3-7 працівниками, 25–100 тис. фонду	DCI 35-55%; Budget_ok = «частково»; IT_staff = 1
R₃ «Хаб»	Університетська чи обласна; ≥ 8 співробітників; фонд > 100 тис.	DCI > 55%; Budget_ok = «так»; IT_staff ≥ 2

3. Стратегія I – «Старт-пакет R₁»

Мета: дати «точку входу» в IoT без потреби у спеціалізованому персоналі.

Модуль	Функція, зрозуміла гуманітарію	Культурна цінність	CAPEX, ₪	Тривалість
Air-Mini	2 бездротові CO ₂ /температурні сенсори	Комфорт і здоров'я читачів; еко-освіта	12 000	1–2 тиж.
Secure-Gate-Lite	1 RFID-рамка + ручний сканер	Скорочення втрат фонду; швидший запис	35 000	1 міс.
Wi-Fi Core	Хмарна точка доступу Wi-Fi 6	Цифрова інклюзія громади [113]	8 000	1 тиж.

CAPEX – орієнтовна вартість устаткування (бюджет без ПДВ).

Тривалість – чистий технічний час розгортання.

Запропоновано мікро-конфігурацію, у якій кожен модуль приносить негайний гуманітарний ефект, доводячи, що навіть мінімальні IoT-втручання здатні підсилити соціокультурну функцію бібліотеки – теза, малодосліджена у попередніх роботах [114].

Економічне підкріплення. Енергетична економія завдяки «Air-Mini» (-7% на опаленні) покриває 45% сумарного CAPEX за два роки; RFID-рамка скорочує інвентаризаційний цикл утричі, звільняючи до 0,2 ставки працівника.

4. Стратегія II – «Бібліотека громади R₂»

Модуль	Гуманітарна вигода	CAPEX, €	Тривалість
Smart-Light-Hall (диммер + датчики присутності)	Тиха, адаптивна атмосфера читання; -18% споживання енергії [115]	120 000	2-3 міс.
BLE-Nav (10 маяків + PWA-додаток)	Самостійна навігація для людей із порушеннями зору; аудіо-тур залами	60 000	1 міс.
RFID-Cart (мобільний візок)	«Нічна» інвентаризація 40 тис. книг; 100% точність фонду	180 000	2 міс.
Data-Privacy-Kit (GDPR-ready сервер журналів)	Захист персональних даних користувачів IoT — ключовий бар'єр, виявлений у дослідженнях [116]	30 000	2 тиж.

На відміну від усталених «технологічних» списків, стратегія ставить в центр гуманітарні показники: тиша, інклюзивна орієнтація, етичне збирання даних. Таким чином, IoT позиціонується не як набір сенсорів, а як «архітектор соціального досвіду» – кут огляду, що лише починає з'являтися у літературі [117].

Фінансова модель.

60% CAPEX – грант «Культурна спадщина» (лізинг під 0%);

40% – місцевий бюджет, що повертається протягом 3,5 років за рахунок економії електроенергії та підвищення відвідуваності (+8%).

5. Стратегія III – «Інтелект-хаб R₃»

Кластер	Функціонал	CAPEX, €	Гуманітарна інноваційність
IoT-Backbone (MQTT-шина + Grafana)	Єдине «інформаційне серце» для 50+ пристроїв; відкриті дані для студентських проєктів	350 000	Платформа громадянської науки
Robo-Sorter (конвеєр + маніпулятор)	Автоматичне повернення видань; фокус бібліотекаря на інформаційному супроводі, а не на фізичній роботі	1 200 000	Перехід від «куратористики» до «партнерства у дослідженні»

Кластер	Функціонал	CAPEX, €	Гуманітарна інноваційність
IoT-Lab (20 STEM-наборів + API-тренажер)	Освітній майданчик для хакатонів і STEAM-проектів; підвищення іміджу бібліотеки як центру інновацій	220 000	Формування спільноти «пост-читачів»

Запропоновано модель, у якій бібліотека стає **«трансмісійним поясом» інновацій**, інтегруючи освітню, дослідницьку й культурну функції через спільну IoT-інфраструктуру – напрямок, який у сучасній бібліотекознавчій думці лише позначається [118].

Економічний ефект. Навіть за помірною тарифу (5,6 €/кВт год) **Smart-Light-Hall + Robo-Sorter** забезпечують сукупний NPV > €900000 протягом семирічного циклу; лабораторія окупності не потребує, оскільки фінансується через державно-приватне партнерство з IT-компанією.

Таким чином:

1. **Стратегічна матриця R₁–R₃** уперше поєднує гуманітарні вигоди, економічні метрики й кадрову спроможність, заповнюючи методичну нішу між технічними гайдами та культурною політикою.
2. **Модульний підхід HCLC** дозволяє бібліотеці нарощувати цифрову зрілість поступово, не накопичуючи «технічний борг» і зберігаючи фокус на читачеві.
3. На рівні наукової новизни розділ доводить: задіяння навіть окремих атомарних реалізацій IoT (CO₂-сенсор, одиночний RFID-порт) має відчутний соціокультурний ефект, який статистично верифікується зниженням IR-Gap і зростанням DCI.

7. Передумови створення конструктора

Під час опитування з керівниками трьох типів бібліотек (R₁–R₃) виявлено парадокс: *«Ми готові до цифрових змін морально, але не знаємо, з чого почати і як не втратити контроль над процесом»*.

У технічній літературі пропонуються готові «смарт-архітектури» [119], проте вони переобтяжені кодом, а гуманітарні посібники з інновацій залишають читачів без інженерної конкретики [120]. Щоб заповнити прогалину, дисертація вперше

висуває концепт **модульного гуманітарного конструктора – HCLC**, який об'єднує принципи Human-Centred Design (HCD) [121] та модульних IoT-наборів [122], але адаптований під бібліотечний контекст.

8. Методологічний каркас HCLC

Шар	Призначення	Головні артефакти	Наукова новизна
Філософський	Людиноцентричний світогляд (користувач → сервіс → технологія)	П'ять гуманітарних принципів: доступність, безпека, екологічність, етика даних, спільнотворення	Переносить рамку HCD до специфіки бібліотеки
Методичний	Інструктивні «карти» роботи з модулями	Карта вигід, перелік обладнання, чек-лист налаштування, KPI-шаблон	Вперше формалізує коротку, але повну структуру ТЗ, зрозумілу не-ІТ персоналу
Функціональний	Портфель модулів HCLC	Air, Light, Secure-Gate, Nav, Data-Lab, Robo-Sorter тощо	Модулі описано у категоріях гуманітарної цінності, а не вольтажу та протоколів
Аналітичний	Вимір і контроль ефекту	Зв'язок кожного модуля з індикаторами DCI, IR-Gap, Tech_count	Дозволяє відкалібрувати темп упровадження через дані, а не «відчуття»

9. Опис базових модулів (версія 1.0 HCLC)

Код	Назва	Ключова гуманітарна функція	Мін. склад	Базові KPI
M-Air	«Чисте повітря»	Комфорт та гігієна читального простору	2 CO ₂ -сенсори + шлюз Wi-Fi	T _{зал} = 20–24 °C CO ₂ < 1 000 ppm ≥ 90% часу
M-Light	«Тиша і світло»	Ергономіка освітлення; – 15–20% енергоспоживання	Датчик освітленості + димери	Lux = 300–500 ΔE ≥ 18%
M-Gate	«Безпека фонду»	Захист і швидка інвентаризація	RFID-рамка + сканер	Втрати < 0,2% Інвентаризація ≤ 48 год
M-Nav	«Інклюзивна навігація»	Самостійний пошук полиць, аудіо-тури	10 BLE-маяків + PWA	N відвідувань PWA / добу + маршрути безбар'єрності
M-Lab	«Освітня IoT-лабораторія»	STEAM-проекти, хакатони	20 наборів ESP-Kit	≥ 4 події / рік ≥ 60 учасників
M-Robo	«Авто-сортування»	Автоповернення і сортування фонду	Конвеєр + маніпулятор	Обробка > 300 прим. / год

10. Логіка збирання: «маршрут IF → THEN»

1. Якщо $DCI < 35\%$, то запускається **Starter** → **M-Air + Wi-Fi Core**.
2. Коли *IR-Gap* падає $\leq 25\%$, дозволяється підключити **M-Light**.
3. Якщо *INF* (складова DCI) ≥ 55 балів і фонд ≥ 25 тис., тоді **M-Gate**.
4. Поява першого IT-фахівця ($\geq 0,7$ ставки) розблоковує **M-Nav**.
5. За умови $DCI \geq 60\%$ та партнера-університету — **M-Lab**.
6. **M-Robo** – лише після підтвердження ROI для *Secure-Gate & Light*.

Таке дерево рішень автоматизує планування: бібліотекар відповідає на 5–7 запитань і отримує перелік рекомендованих модулів із готовими ТЗ-картами.

11. Інноваційність конструктора

1. **Перехресна валідація гуманітарних і технічних KPI.** Кожен модуль «підшитий» до певного пункту *DCI*, що дає кількісне підтвердження гуманітарної вигоди (комфорт, доступність, безпека).
2. **Локалізаційна легкість.** HCLC використовує відкриті апаратні платформи (ESP-32, Raspberry Pi), які доступні на українському ринку; усі інструкції україномовні.
3. **Мікромодульний капітал.** Мінімальний CAPEX однієї «цеглинка» – < 15 тис. ₴, що робить вхідний бар'єр символічним навіть для R₁-закладів.
4. **Поєднання formal-simple.** Методичні карти містять QR-посилання на розширені інженерні описи; таким чином, один документ задовольняє і гуманітарія, і техніка.

12. Пілотна дорожня карта HCLC-R₂ (приклад для «Бібліотеки громади»)

Період	Дія	Модулі	Інвестиції (₴)	Очікуваний KPI
P ₀	Підвищення компетентності	3 вебінари «IoT»	0 (грант)	$\geq 70\%$ персоналу пройшли тест
P ₁	Базове середовище Wi-Fi	Wi-Fi Core	8 000	Uptime $\geq 98\%$
P ₂	Комфорт і енергоефективність	M-Air, M-Light	132 000	– 17% кВт·год; CO ₂ < 1 000 ppm
P ₃	Безпека й інвентаризація	M-Gate	180 000	Втрати < 0,2%
P ₄	Інклюзивний досвід	M-Nav	60 000	≥ 500 запусків PWA / міс.

Тривалість кожного періоду становить 3–6 міс., проте перехід блокується, якщо не досягнуто KPI P .

13. Протокол оцінювання успіху

1. **Метрика «соціальної цінності»** – анкетування читачів за шкалою SERVQUAL, блок «середовище читання»; очікуване зростання $\geq 15\%$.
2. **Метрика «енергетичної ефективності»** – нормалізований показник kWh / м²; мета $\leq -0,3 \sigma$ від бази.
3. **Метрика «організаційної зрілості»** – приріст *DCI* + 10 п. після кожного повного циклу Р .

14. Висновок підрозділу

Конструктор **HCLC** акумулює досвід human-centred design, модульної IoT-архітектури та бібліотечної інноватики в єдиний, гнучкий і гуманітарно орієнтований інструмент. Запропонована модель *IF*→*THEN* уможлиблює перехід від «мікродотику» (CO₂-сенсор) до повноцінного інтелект-хабу без стресу для персоналу й фінансового «шоку» для бюджету.

15. Інфраструктура на базі Home Assistant та супутніх платформ

В одному з варіантів упровадження для уніфікації та спрощення супроводу IoT-мережі в бібліотеці в якості центру керування може бути використано ПЗ **Home Assistant** [123]. Це рішення поєднує в собі зручний веб-інтерфейс (Lovelace UI), вбудовані засоби автоматизації та можливість масштабування з Node-RED [124] і Grafana [125]. **ESPHome** [126] виконує роль прошивки для ESP32/ESP8266, забезпечуючи безшовну інтеграцію датчиків (DHT22, MH-Z19B, BH1750, RCWL-0516 тощо) в Home Assistant через MQTT чи API.

Основні компоненти інфраструктури:

1. **Home Assistant Core** (ліцензія MIT) – працює під Docker чи Raspberry Pi; відповідає за збір і зберігання даних, керування автоматизаціями.
2. **Node-RED** (як доповнення до Home Assistant) – візуальний редактор потоків (flows) для складної логіки: якщо CO₂ > 1 000 ppm і час доби 18:00–06:00 → надіслати сповіщення Telegram.
3. **Grafana** (через InfluxDB або Prometheus) – побудова інтерактивних дашбордів: часова серія температури, вологості, Lux.

4. **ESPHome** (на ESP32) – прошивка, що визначає конфігурації датчиків і актуаторів (використовує YAML-файли), якими керує Home Assistant.
5. **Google Sheets / Google Drive** (опціонально) – легка інтеграція для зберігання CSV. Дані експортуються з Home Assistant через Google Sheets API за допомогою Node-RED.

Таким чином, датчик **DHT22** підключається до ESP32 із прошивкою ESPHome, яка конфігурує як сенсор температури, так і вологості. ESPHome повідомляє Home Assistant про ці значення за MQTT. Node-RED бере події з Home Assistant і виконує складніший сценарій («якщо температура > 26 °C і вологість < 30%, надіслати сповіщення адміністратору»). Grafana під'єднана до бази даних InfluxDB, куди Home Assistant пише історичні дані, формуючи візуальний архів.

16. Навчальна серія з 20 технічних уроків [Додаток Н].

17. Менеджерський блок (5 адміністративних уроків)

№	Назва	Мета для керівника/бухгалтера	Матеріали	Час, хв
M1	Облік кВт·год у Home Assistant	Автоматичний розрахунок економії	ESPHome energy sensors	40
M2	Калькулятор економії опалення	Оцінка гривневого еквіваленту $\Delta^{\circ}\text{C}$	Google Sheets, tariff table	30
M3	Формування SLA-угоди	Затвердження мінімальних стандартів	SLA-шаблон	30
M4	Журнал вигід (Google Sheets)	Систематизація заощадженого часу/грн	Google Sheets template	30
M5	Підготовка презентації для місцевої ради	5-слайдів із KPI й скрінами	PowerPoint, Lovelace скріни	60

18. Приклади карт-інструкцій (оновлені з урахуванням ESPHome, Home Assistant, Node-RED, Grafana)

Картка Intro-01. «ESPHome та DHT22: перше підключення»

1. **Мета.** Отримати у Home Assistant температуру й вологість.
2. **Що потрібно.** ESP32 (NodeMCU), DHT22, Micro-USB кабель, ESPHome Add-on у Home Assistant.
3. **10 кроків:**

1. Встановіть Home Assistant (Docker/Raspberry Pi).
2. Інсталюйте ESPHome Add-on, створіть новий пристрій.
3. Скопіюйте шаблон YAML:

```

esphome:
  name: library_air
  platform: ESP32

wifi:
  ssid: "SSID"
  password: "PASSWORD"

sensor:
  - platform: dht
    pin: GPIO4
    model: DHT22
    temperature:
      name: "Library Temperature"
    humidity:
      name: "Library Humidity"

```

4. Збережіть YAML, натисніть «Install» → «Plug into USB» → «Upload».
 5. Почекайте завершення компіляції й прошивки.
 6. У Home Assistant у розділі **Integrations** має з'явитися новий пристрій.
 7. Перейдіть до **Lovelace UI** → налаштуйте картку Entity для «Library Temperature».
 8. Аналогічно створіть картку Entity для «Library Humidity».
 9. Перевірте зміни: змініть температуру оточуючого середовища й слідкуйте за оновленням.
 10. Завершити: зафіксуйте успішність у «Журналі вигід».
4. **Очікуваний KPI.** «Library Temperature» і «Library Humidity» $\geq 85\%$ часу у межах 20–24 °C та 40–60%.
 5. **Контрольний тест.**

1. Який GPIO використовується для DHT22?
2. Які значення RH% є критичними для книжкових фондів?

Картка Build-08. «Датчик присутності RCWL-0516 та Node-RED»

1. **Мета.** Автоматично фіксувати присутність у залі та передавати подію в Home Assistant.
2. **Що потрібно.** ESP32 з ESPHome, RCWL-0516, Home Assistant зі встановленим Node-RED Add-on.
3. **10 кроків:**
 1. Додайте RCWL-0516 до даного YAML у ESPHome:


```
binary_sensor:
  - platform: rcwl_0516
    name: "Presence Sensor"
    pin: GPIO5
```
 2. Перешийте ESP32 через ESPHome.
 3. У Home Assistant у **Integrations** з'явиться «Binary Sensor: Presence Sensor».
 4. Перейдіть в **Node-RED** → створіть новий flow.
 5. Перетягніть node «events: state» з Home Assistant.
 6. Налаштуйте «Entity ID» = binary_sensor.presence_sensor.
 7. Налаштуйте «function node» з кодом:


```
if (msg.payload === "on") {
  emit({topic:"light_control", payload: "on"});
} else {
  emit({topic:"light_control", payload: "off"});
}
```
 8. Під'єднайте до node «service call» Home Assistant:
 - Domain = light
 - Service = turn_on або turn_off
 - Entity = light.reading_room_lamp

9. Розгорніть flow.

10.Протестуйте: коли хтось входить до зали – світло вмикається автоматично.

4. **Очікуваний КРІ.** Час увімкненого світла без присутності < 5 хв / зміна.

5. **Контрольний тест.**

1. Яка умова в function node переводить data в On/Off?

2. Як змінити поріг чутливості датчика RCWL-0516?

Картка Grow-13. «Публікація даних BH1750 у Lovelace та Grafana»

1. **Мета.** Вимірювати освітленість (Lux), відобразити в Home Assistant і вивантажувати до Grafana.

2. **Що потрібно.** ESP32 з ESPHome, датчик BH1750, Home Assistant, InfluxDB Add-on, Grafana Add-on.

3. **10 кроків:**

1. Додайте у YAML ESPHome датчик:

sensor:

- platform: bh1750

name: "Reading Room Light"

address: 0x23

2. Прошивайте ESP32.

3. У Home Assistant з'явиться entity sensor.reading_room_light.

4. Встановіть Add-on InfluxDB, налаштуйте записи:

influxdb:

host: core-influxdb

database: home_assistant

5. Додайте до configuration.yaml Home Assistant:

recorder:

db_url: influxdb://homeassistant@core-influxdb/home_assistant

6. Перезавантажте Home Assistant.

7. Налаштуйте Grafana Add-on, підключившись до InfluxDB.

8. У Grafana створіть нову панель:
 - Data Source = InfluxDB
 - Query = `SELECT "value" FROM "home_assistant"."autogen"."sensor.reading_room_light"`
 9. Відобразіть графік освітленості за останні 24 години.
 10. Адаптуйте Lovelace UI: панель Entity для `sensor.reading_room_light`.
4. **Очікуваний KPI.** Лух у діапазоні 300–500 \geq 90% часу читальної зміни.
 5. **Контрольний тест.**
 1. Як вказати правильне ім'я бази даних InfluxDB?
 2. Яка одиниця вимірювання для ВН1750?

Картка Track-17. «Push-попередження про відкриту шафу»

1. **Мета.** Запобігти підвищенню вологості в фондї через залишену відкритою шафу.
2. **Що потрібно.** ESP32 з ESPHome, Reed-сенсор, Home Assistant, Node-RED, Telegram Bot API (опціонально).
3. **10 кроків:**
 1. Сконфігуруйте Reed-сенсор у ESPHome:


```
binary_sensor:
  - platform: gpio
    pin: GPIO14
    name: "Shelf Open Sensor"
    device_class: door
```
 2. Прошити ESP32.
 3. У Home Assistant перевірте entity `binary_sensor.shelf_open_sensor`.
 4. В Node-RED створіть flow:
 - Node “events: state” для `binary_sensor.shelf_open_sensor`.
 - Якщо payload == on, через node “delay” почати відлік 10 хв.
 - Якщо payload все ще on після 10 хв → node “call-service” для відправлення Telegram-повідомлення.

5. Налаштуйте Telegram Bot: отримайте токен, chat ID.
 6. В node “call-service” задайте Domain = notify, Service = telegram_bot, Data = { "message": "Шафа відкрита понад 10 хв." }.
 7. Перевірте: відкрийте шафу, зачекайте 11 хв, отримайте повідомлення.
 8. Виконайте тест за симуляцією: натисніть кнопку “Inject” у Node-RED.
 9. Фіксуйте подію в Lovelace: додайте картку індикатора “Shelf Open Sensor”.
 10. Додайте лог подій у InfluxDB для пізнішої аналітики.
4. **Очікуваний KPI.** Час відкритої шафи без персоналу < 5 хв (тижнева середня).
 5. **Контрольний тест.**
 1. Який device_class присвоює сенсору натискання?
 2. Як змінити затримку у Node-RED на 5 хв?

Картка Pitch-20. «Створення PDF-звіту «до/після»»

1. **Мета.** Представити клопотання щодо грантового фінансування за результатами класу.
2. **Що потрібно.** Home Assistant скріни, Grafana дашборд скріни, дані з Google Sheets, Canva-шаблон.
3. **10 кроків:**
 1. У Home Assistant Lovelace зробіть скрін карти з «Library Temperature» та «Library Humidity».
 2. У Grafana збережіть як зображення графік Lux за тиждень.
 3. Відкрийте Canva → оберіть шаблон «Report».
 4. На першій сторінці розмістіть логотип бібліотеки, заголовок «IoT-підсумки».
 5. Вставте скріни температури й вологості; додайте підписи: «Було / Стало».
 6. Додайте результат Lux-графіка з коментарем «-18% енергії».
 7. На другій сторінці вставте фідбек із QR-журналу (текст + скріни).
 8. Підсумували ROI: «BTU savings → €».

9. Експортуйте PDF → «Export settings: print quality».

10. Надішліть грантодавцю або роздрукуйте для засідання комісії.

4. **Очікуваний KPI.** Затверджений budget request $\geq 80\%$ від запланованого.

5. **Контрольний тест.**

1. Який розмір зображень оптимальний для Canva (dpi)?

2. Скільки сторінок має містити звіт?

19. Послідовність рівнів та блокувальні KPI

Етап	Уроки №	Педагогічна цінність	Блокувальний KPI
Intro-5	1–5	«Побачити дані у Home Assistant»	$\geq 60\%$ персоналу пройшли тест-мінімум (5/5 питань)
Build-10	6–10	«Зібрати телеметрію і зберегти»	Накопичено 7 днів безперервних записів у InfluxDB (дані температури/вологості/CO ₂ /Lux)
Grow-15	11–15	«Реагувати на дані автоматично»	Δ кВт·год $\geq 10\%$; RFID-інвентаризація < 48 год (масова інвентаризація 50 книг)
Track-18	16–18	«Візуалізувати та попереджати»	Дашборд Lovelace оновлюється щодня; push-подія «відкрита шафа» ≥ 1 раз/тиждень
Pitch-20	19–20	«Комунікувати результат»	PDF-звіт «до/після» затверджено керівництвом; $\geq 80\%$ цільового бюджету погоджено місцевою радою

20. Переваги структури

1. **Інтеграція в єдину екосистему (Home Assistant).** Використання ESPHome, Node-RED, Grafana забезпечує централізоване керування, гнучкі автоматизації й масштабовані дашборди.
2. **Чітка послідовність уроків.** Кожний наступний урок потребує даних або результатів попереднього, що гарантує усвідомлення логіки роботи IoT-мережі.
3. **Уніфікація апаратури.** ESP32 з ESPHome виконує роль універсального контролера, до якого від'єднуються сенсори DHT22, MH-Z19B, BH1750, RCWL-0516, Reed-сенсор, RC522 тощо.
4. **Менеджерський блок.** Бухгалтерські та керівницькі теми винесено окремо, щоб зберегти фокус технічної траєкторії та задовольнити методичні потреби адміністрації.

У центральній частині методологічного каркасу HCLC зайнято концепцією «Журналу вигід», який становить універсальний механізм для відображення результатів впровадження модулів IoT у бібліотеках. «Журнал» поєднує технічні, економічні та соціально-гуманітарні показники, формуючи єдину звітність, доступну й адміністрації бібліотеки, й органам місцевого самоврядування. Оскільки бібліотечні заклади перебувають у різних фінансових та кадрових умовах, «Журнал» планується достатньо гнучким: він має демонструвати доцільність вкладення як у мінімальний набір сенсорів, так і в комплексне розгортання мережі.

Концептуально «Журнал вигід» виходить з того, що сучасна бібліотека розглядається не лише як сховище книг, а передусім як соціальний простір, де комфорт читального середовища та оперативність послуг мають не меншу вагу, ніж традиційні бібліотечні функції. Тому його структура відразу поєднує часові ряди показників – температури повітря (°C), відносної вологості (%), рівня CO₂ (ppm), освітленості (Lux) та факту присутності людей (бінарний сенсор), отриманих через систему Home Assistant із компонентами ESPHome – і їх трансформацію в економічні та соціальні аргументи. З технічного боку кожний сенсор підключається до контролера ESP32 або ESP8266 із прошивкою ESPHome, яка забезпечує передачу даних у Home Assistant через MQTT або REST API. Home Assistant зберігає детальні дані в InfluxDB, тоді як Node-RED автоматизує передавання агрегованих значень до Google Sheets або формування складних сценаріїв оповіщень. Grafana, у свою чергу, бере ці дані з InfluxDB і створює мапи часових рядів, які ілюструють зміну температури, вологості або освітленості протягом заданих періодів (добу, тиждень, місяць). Усі ці компоненти поєднуються у віджетах Lovelace UI, але «Журнал вигід» формує звіт, який відображає вже розраховані економічні та соціальні результати.

Важливо зазначити, що площа приміщення, узята як база для розрахунків, становить 120 м² – типовий розмір читальної зали районної бібліотеки. Саме для цієї площі показано приклади формул. Розпочнемо з економії електроенергії завдяки модулю **M-Light**. До впровадження підсвічування залу здійснювалося за допомогою чотирьох люмінесцентних світильників по 0,12 кВт кожен (загальна потужність

$P_{\text{до}} = 4 \times 0,12 = 0,48 \text{ кВт}$). Після заміни на LED-драйвери з диммером та алгоритмом адаптивного затемнення загальна потужність становить $P_{\text{після}} = 4 \times 0,08 = 0,32 \text{ кВт}$. Прийmemo, що в опалювальний сезон (з жовтня по квітень, 210 днів) читальна зала експлуатується по 10 годин на добу, адже через короткий світловий день доводиться працювати довше. У теплий період (з травня по вересень, 155 днів) освітлення ввімкнене по 6 годин на добу. Тоді щорічна економія електроенергії становить

$$\Delta E_{\text{ел.}} = (P_{\text{до}} - P_{\text{після}})(10 \times 210 + 6 \times 155) = (0,48 - 0,32)(2100 + 930) = 0,16 \times 3030 = 484,8 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

За тарифом для підприємств на 2025 рік $r_{\text{ел.}} = 6,50 \text{ €} / \text{кВт} \cdot \text{год}$, річна економія в гривнях дорівнює

$$\Delta C_{\text{ел.}} = \Delta E_{\text{ел.}} \times r_{\text{ел.}} = 484,8 \times 6,50 \approx 3151,20 \text{ €} / \text{рік}.$$

У «Журналі вигід» це фіксується як окремий рядок, де вказано: «Після заміни світильників економія електроенергії за рік становить приблизно 485 кВт·год, що еквівалентно 3 151 грн за поточним тарифом».

Натомість модуль **M-Air** передбачає контроль температури та вологості в читальній залі й автоматичне керування системою опалення та охолодження. З огляду на площу 120 м² припускається, що до впровадження середня підтримувана температура в опалювальний сезон (210 днів) була $T_{\text{до}} = 23^\circ\text{C}$, а після – $T_{\text{після}} = 21^\circ\text{C}$. За емпіричними даними такого роду будівель, при середньому – значенні різниці в 1 °C споживання газу змінюється на $g = 0,20 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{доба}$. Отже, економія газу за опалювальний сезон обчислена формулою

$$\Delta V_{\text{газ}} = (T_{\text{до}} - T_{\text{після}}) \times g \times S \times 210 = (23 - 21) \times 0,20 \times 120 \times 210 = 2 \times 0,20 \times 25200 = 10080 \text{ м}^3 / \text{рік}$$

Зважаючи на підприємницький тариф на газ $r_{\text{газ}} = 14,00 \text{ €} / \text{м}^3$, вигода в гривнях становить

$$\Delta C_{\text{тепл.}} = \Delta V_{\text{газ}} \times r_{\text{газ}} = 10080 \times 14 = 141120 \text{€}/\text{рік.}$$

У теплий період (155 днів) із 12:00 до 18:00 експлуатується кондиціонер із номінальною потужністю 1 кВт і коефіцієнтом енергоефективності $COP = 3,0$. До впровадження автоматизації кондиціонер споживав повні 1 кВт, а після – ефективно 0,33 кВт. Різниця 0,67 кВт на годину роботи протягом 6 годин протягом 155 днів дає економію

$$\Delta E_{\text{охол.}} = (1,00 - 0,33) \times 6 \times 155 = 0,67 \times 930 = 623,1 \text{кВт}\cdot\text{год}/\text{рік},$$

$$\Delta C_{\text{охол.}} = 623,1 \times 6,50 \approx 4049,15 \text{€}/\text{рік.}$$

Отже, сукупна вигода від автоматизації клімат-контролю становить

$$\Delta C_{\text{тепло+охол.}} = 141120 + 4049,15 = 145169,15 \text{€}/\text{рік.}$$

У «Журналі» цей показник відображається очевидним чином: «Від автоматизації опалення та охолодження за рік зекономлено приблизно 145 169 грн».

Третій блок «Журналу вигід» формує модуль **M-Gate**, у якому проводиться інвентаризація 8 000 примірників у читальній залі площею 120 м². До запровадження RFID-сканерів на двох бібліотекарів припадало по 8 годин щодня протягом 15 днів, тобто $H_{\text{до}} = 2 \times 8 \times 15 = 240$ год/рік. Після облаштування RFID-системи інвентаризацію проводить одна особа протягом двох днів (16 годин). Отже, економія людських ресурсів обчислюється так:

$$\Delta H = H_{\text{до}} - H_{\text{після}} = 240 - 16 = 224 \text{год}/\text{рік},$$

$$\Delta C_{\text{год.}} = \Delta H \times r_{\text{год}} = 224 \times 100 = 22400 \text{€}/\text{рік},$$

де годинна ставка працівника становить $r_{\text{год}} = 100$. У «Журналі» результат відображається як «Завдяки RFID-інвентаризації за рік заощаджено 22 400 грн на оплаті праці».

Нарешті, четверта складова «Журналу» – соціальні вигоди. Перед налаштуванням модуля **M-Air** опитування читачів показує середню задоволеність $S_{\text{до}} = 3,5$ за шкалою від 1 до 5. Після автоматизації клімат-контролю нове опитування фіксує $S_{\text{після}} = 4,2$. Якщо середня денна відвідуваність читальної зали до впровадження становила $V_{\text{до}} = 120$ осіб/день, очікуване зростання відвідуваності розраховується як

$$\Delta V_{\text{читачі}} = V_{\text{до}} \times \frac{S_{\text{після}} - S_{\text{до}}}{5} = 120 \times \frac{0,7}{5} = 120 \times 0,14 = 16,8 \text{ людей/день.}$$

«Журнал» фіксує, що «завдяки покращенню комфорту температури відвідуваність збільшується приблизно на 17 осіб/день, що свідчить про підвищення соціального капіталу». Отже, загальна річна економія за умови впровадження одночасно **M-Light**, **M-Air** та **M-Gate** розраховується як сума окремих вигод:

$$\Delta C_{\text{заг}} = \Delta C_{\text{ел.}} + \Delta C_{\text{тепло+охол.}} + \Delta C_{\text{год.}} = 3151,20 + 145169,15 + 22400 = 170720,35 \text{ € / рік.}$$

Період окупності (PP) початкових інвестицій I_0 , який у «Журналі» розраховують за формулою

$$PP = \frac{I_0}{\Delta C_{\text{заг}}},$$

наприклад, якщо загальна сума вкладів у всі модулі становить $I_0 = 200000$, отримаємо

$$PP \approx \frac{200000}{170720,35} \approx 1,17 \text{ року.}$$

У «Журналі вигід» це відображається як «досягнення окупності інвестицій приблизно за 1,2 року».

Усі розрахунки наведено з урахуванням площі зали 120 м², яка використовується як стандартний параметр для районної бібліотеки. Програмний

продукт HCLC ще не створено, тому всі зазначені процедури та алгоритми описано у формі теперішнього часу: Home Assistant інтегрує дані, ESPHome конфігурує сенсори, Node-RED автоматизує переміщення даних, а Grafana візуалізує. Надалі, під час розробки, ці формули будуть реалізовані як автоматизовані процедури, а користувачі отримають інтерфейс для миттєвого перегляду «Журналу вигід», що забезпечить прозорість процесів і надасть можливість оперативно обґрунтовувати подальші інвестиції перед керівництвом або грантодавцями.

Узагальнюючи викладене, слід засвідчити, що запропонований у рамках HCLC підхід до створення «Журналу вигід» та впровадження модульних IoT-рішень у бібліотеках є не просто технічним експериментом, а системною стратегією трансформації традиційної установи культури в сучасний інформаційно-сервісний хаб. Аргументи на користь доцільності цього підходу можна розгорнути за кількома взаємопов'язаними рівнями.

По-перше, на рівні **ресурсної ефективності**. Наведені розрахунки економії електроенергії (приблизно 3,15 тис. ₴/рік), газу (близько 141,1 тис. ₴/рік) та людської праці (понад 22,4 тис. ₴/рік) автоматично конвертуються в єдину цифру – близько 170,7 тис. грн загальної річної вигоди, виходячи з площі читальної зали 120 м². Якщо порівняти цю суму із середньорічним бюджетом «типової» районної бібліотеки (приблизно 500–600 тис. ₴/рік), виявиться, що впровадження базових модулів HCLC здатне зекономити понад 25–30 % усіх щорічних витрат. Це означає, що вже впродовж першого року бібліотека може відновити вкладені кошти (з урахуванням окупності близько 1,2 р.) і почати отримувати «прибуток» у вигляді додаткових можливостей – наприклад, оновлення фонду, закупівлі IT-обладнання, оплати фахівців чи організації заходів.

По-друге, на рівні **соціального капіталу**. Пропонована методика не обмежується лише «цифрами», а демонструє, як розвиток технологічної інфраструктури впливає на задоволеність користувачів та загальну активність громади. Інтегрований модуль **M-Air** дозволяє підвищити середню оцінку температурного комфорту з 3,5 до 4,2 бали, що прогнозовано збільшує денну

відвідуваність на 16–17 осіб. Для невеликої громади це означатиме не лише розширення кола читачів, а й поширення «сарафанного радіо», яке залучатиме до бібліотеки навіть тих, хто раніше не цікавився її послугами. Зростання відвідуваності підвищує ймовірність участі громадян у культурних, просвітницьких, освітніх ініціативах, сприяє народженню нових проєктів (наприклад, гуртків із медіаграмотності чи громадянської освіти). Таким чином, «соціальна вигода» фактично стає віддзеркаленням зміни статусу бібліотеки: з пасивного сховища книг вона трансформується у центр суспільного життя.

По-третє, на рівні **управлінської прозорості й довіри**. Оскільки кожен показник, описаний у «Журналі вигід», базується на реальних даних із Home Assistant (зберігаються у InfluxDB), Node-RED (автоматично передаються до Google Sheets) та Grafana (візуалізуються), керівництво отримує змогу в реальному часі стежити за динамікою всіх ключових параметрів: температури, вологості, витрат ресурсів, чисельності відвідувачів. У режимі звіту «PDF» або «QR-журнал» ці дані можуть бути представлені перед місцевою громадою чи донорськими фондами. Таким чином, навіть найменші бюджетні рішення («скільки коштів виділити на обслуговування котельні» чи «чи доцільно купувати нові світильники?») базуються не на інтуїтивних оцінках, а на конкретних цифрах. Це підвищує рівень довіри до управління бібліотекою та сприяє залученню до співфінансування з боку місцевих підприємців і благодійних організацій.

По-четверте, на рівні **навчання й капіталізації досвіду**. HCLC передбачає етапи навчання бібліотечного персоналу: від монтажу датчиків до аналізу інтерпретацій даних у Grafana. Це дає змогу підвищувати цифрову грамотність працівників, а також стимулювати створення внутрішніх лабораторій (M-Lab) для навчання громадян. Окрім того, модульність дозволяє почати з базової конфігурації (наприклад, лише **M-Air**), отримати перший «джерело економії», а потім поступово нарощувати складність (додавати **M-Light**, **M-Gate**, **M-Nav** тощо). Тобто бібліотека сама обирає «темп» трансформації та синхронізує його з обсягом доступних

ресурсів, уникаючи ризику «перевантаження» штатних працівників або «роздування» бюджету.

Нарешті, на рівні **наукової новизни та інтеграції гуманітарного дискурсу**. Хоча в літературі трапляються описи окремих IoT-проектів у культурних закладах, жоден із них не продукує єдиного «інтегрованого» інструменту, який поєднує технічні, економічні та соціально-гуманітарні показники під одним «дахом». Перспектива побудови «Журналу вигід» як частини HCLC є новаторською в тому, що пропонує уніфіковану методику збору даних з можливістю швидкого масштабування на будь-який заклад: від невеликого сільського бібліотечного пункту до великої міської бібліотеки з розгалуженою мережею читальних залів та окремих філій.

Таким чином, висновки фрагмента підводять до ключового положення: HCLC забезпечує комплексну платформу, яка дозволяє бібліотеці стати «розумною» в усіх аспектах: економічно, технологічно та соціально. Навіть за найбільш консервативних розрахунків економія перевищує 25 % бюджетних витрат, а соціальний вплив створює додаткові переваги у вигляді активізації місцевої громади. Усе це відкриває двері для залучення нових фінансів, підвищує рівень довіри до бібліотек та сприяє розвитку нових культурно-освітніх проектів. Саме тому запропонований підхід є не просто доцільним із практичної точки зору, а водночас і науково обґрунтованим, інноваційним та мотиваційним для всіх учасників бібліотечно-інформаційного процесу.

Висновки до розділу

1. В основі розробленої концептуальної моделі лежить теза, що інтеграція Інтернету речей у бібліотечний простір має стартувати не з технічного оснащення, а з комплексного аналізу поточного стану установи, її реальних запитів, ресурсного потенціалу та адаптивності до інновацій. Відповідно, запропонована модель побудована як циклічний процес: вона не обмежується етапом інсталяції конкретних

IoT-рішень, а вимагає регулярного моніторингу їхньої ефективності для користувачів та бібліотеки як соціального інституту. Безперервно поєднуючи діагностичний, стратегічний, практичний та оціночний складники, модель стверджує: цифровізація повинна бути не штучною технологічною надбудовою, а органічною внутрішньою трансформацією. Її кінцева мета — покращити доступ до знань, підтримати громаду та зберегти соціокультурну й гуманістичну місію бібліотечно-інформаційної сфери.

2. Інтеграція технологій Інтернету речей та штучного інтелекту відкриває широкі можливості для трансформації як окремих технологічних процесів бібліотечно-інформаційного виробництва, як то автоматизація та персоналізація обслуговування користувачів, контроль за станом збереженості, моніторинг та аудит фондів, навігація фізичного простору бібліотеки, логістика ресурсів, прогнозна аналітика, так і закладає підвалини для створення інтелектуальної бібліотечної екосистеми “розумної” бібліотеки. Разом з тим, синергія впровадження IoT та технологій штучного інтелекту в бібліотечно-інформаційне виробництво супроводжується низкою техніко-технологічних, організаційних, економічних, соціокомунікаційних та етичних викликів та ризиків, що вимагає застосування п’ятиетапної практичної дорожньої карти.

Перший етап передбачає оцінку цифрової зрілості бібліотеки, інвентаризацію наявної мережевої інфраструктури, систем і потоків даних, розробку етичної політики збору та опрацювання телеметричних даних. Другий етап: створення локального тестового середовища, проведення експериментів зі збору та передачі даних, початкова аналітика на основі машинного навчання. Третій етап: системне підвищення кваліфікації бібліотечних працівників. Четвертий етап: повномасштабне розгортання IoT-інфраструктури на базі бібліотечних просторів та ресурсів, міграція значної частини аналітичних процесів у хмару, інтеграція мобільних додатків для користувачів. П’ятий етап: валідація ключових показників ефективності, етичні аудити систем, реалізація гейміфікаційних стратегій залучення користувачів до

покращення систем рекомендацій та аналітики, впровадження механізмів зворотного зв'язку.

3. Можна констатувати, що сприйняття категорії ризику в бібліотечно-інформаційному виробництві еволюціонує від суто технократичного до комплексного соціокомунікаційного трактування. Замість чинника стримування чи деструктивного бар'єра, ризик стає конструктивним інструментом стратегічного планування та прогностики. Ознакою високого рівня цифрової зрілості інституції є її здатність не просто імплементувати інновації, а й передбачати їхні лонгітюдні соціальні ефекти. У цьому ракурсі ризик-менеджмент інтегрується в людиноцентричну парадигму, де критерієм оцінювання технологій стає не рівень автоматизації сам по собі, а захист гідності, приватності та довіри аудиторії. Саме такий підхід закладає гуманітарний фундамент цифрової життєстійкості (*resilience*) бібліотек, без якого будь-які модернізаційні рішення залишаються вразливими перед викликами технологічної та соціальної невизначеності.

Водночас застосування карти чутливості (теплової карти) та універсального алгоритму обчислення NPV/IRR забезпечує наочність економічних параметрів цифрової модернізації, дозволяючи здійснювати оперативний компаративний аналіз альтернативних варіантів та обґрунтовувати інвестиційні пріоритети. Зазначений інструментарій трансформує фінансові розрахунки з евристичної «чорної скриньки» у прозорий і контрольований механізм ухвалення управлінських рішень. Це набуває критично важливого значення за умов жорстких бюджетних обмежень, притаманних сучасній бібліотечній системі України.

4. Стратегія впровадження IoT-рішень для бібліотек із різним ресурсним потенціалом передбачає застосування модульного гуманітарного конструктора – HCLC, який об'єднує принципи Human-Centred Design та пропонує реалізацію універсального маршруту від першого сенсора CO₂ до повнофункціонального інтелект-хабу. Застосування конструктора не потребує глибоких технічних знань, дозволяє обрати гнучкі траєкторії модернізації, адаптовані до фінансових та кадрових реалій українських бібліотек, провести діагностику готовності (DCI,

IR-Gap), здійснити економічне обґрунтування (NPV, BCR) та перейти до інструменту практичного впровадження.

5. Конструктор може базуватися на стратегічній матриці R_1-R_3 , яка унаочнює послідовність цифрової трансформації бібліотечно-інформаційного виробництва від базового рівня - стартових рішень впровадження IoT технологій в локальні процеси; до реалізації інтелектуалізованих проєктів з високою цифровою спроможністю.

Практичне застосування HCLC-гуманітарного конструктора підтримується використанням практичних інструментів - «типових технічних карт» та «журналу вигід», які, відповідно, забезпечують прозоре обґрунтування сценаріїв застосування й масштабованості впроваджень IoT; дозволяють здійснювати оцінку ефективності реалізації процесів бібліотечно-інформаційного виробництва та рівня задоволеності сервісом, якості досвіду користувачів.

ВИСНОВКИ

У процесі дослідження досягнуто мету дисертаційної роботи, яка полягала у формуванні теоретичного підґрунтя для стратегічної моделі інтеграції технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво України. Послідовне виконання поставлених завдань дозволило систематизувати наукові підходи до розуміння IoT у бібліотечному контексті, виявити основні тенденції розвитку світового наукового дискурсу, дослідити практики впровадження IoT-рішень у бібліотеках України та зарубіжних країн, оцінити поточний стан готовності українських бібліотек до цифрових перетворень, обґрунтувати концептуальну модель інтеграції IoT, визначити економічні та ризикові аспекти впровадження інновацій, а також запропонувати стратегічні механізми поетапної IoT-трансформації бібліотек. Узагальнення теоретичних, бібліометричних, емпіричних і прикладних результатів дало змогу сформулювати такі висновки.

1. Проведене дослідження узгодило техніко-технологічні можливості Інтернету речей із гуманітарною, соціокомунікаційною та культурною місією бібліотек і засвідчило, що людиноцентрична логіка інтеграції IoT є ключовою умовою стійких змін у бібліотечно-інформаційному виробництві. В межах теоретичної частини дисертації Інтернет речей концептуалізовано не лише як сукупність сенсорів, RFID-міток, мережевих пристроїв, протоколів обміну даними, виконавчих механізмів і програмних платформ, а як інфраструктурну основу нової конфігурації бібліотечних процесів та сервісів. Такі технології забезпечують автоматизацію рутинних операцій, оптимізацію управління фондами, контроль умов збереження документів, персоналізацію обслуговування, підвищення безпеки, ресурсоефективності та якості взаємодії бібліотеки з користувачем. Водночас ключовим результатом дослідження є положення про те, що IoT не може розглядатися як самоціль цифрової модернізації бібліотеки. Його значущість розкривається лише тоді, коли технічні рішення підпорядковуються ширшим завданням бібліотеки як соціокультурного інституту: забезпеченню доступу до

знань, підтримці користувача, збереженню документальної спадщини, розвитку спільнот, підвищенню інклюзивності, безпеки та адаптивності інформаційного середовища. Отже, Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві доцільно розглядати як соціотехнічний чинник трансформації бібліотеки, що поєднує фізичний простір, цифрові ресурси, користувацьку поведінку, управлінські процеси, аналітику даних і сервісну взаємодію в єдину динамічну систему.

2. Бібліометричний аналіз наукового документального потоку за тематикою Інтернету речей підтвердив стійке зростання інтересу світової наукової спільноти до цієї проблематики впродовж 2010-2022 рр. Водночас зіставлення загального масиву публікацій з тематикою IoT та публікацій, безпосередньо пов'язаних із бібліотечною сферою, виявило суттєву диспропорцію: із 124 063 наукових праць, індексованих у Scopus за досліджуваний період, лише 200 документів стосуються застосування IoT у бібліотеках. Це дозволяє стверджувати, що бібліотечний напрям IoT-досліджень поки що залишається відносно вузьким, фрагментованим і недостатньо концептуалізованим сегментом ширшого науково-технологічного поля. У світовій літературі переважають праці, присвячені технічним аспектам IoT: архітектурі систем, RFID, сенсорним мережам, протоколам передавання даних, мережевій безпеці, енергоефективності, хмарним обчисленням, штучному інтелекту та аналітиці великих даних. Водночас бібліотекознавчий і соціокомунікаційний виміри цієї проблематики представлені менш системно, що підтверджує наявність наукової лакуни, пов'язаної з необхідністю гуманітарного осмислення IoT як чинника розвитку бібліотеки, а не лише як технічного інструмента її автоматизації. Компаративний аналіз засвідчив, що найактивнішими центрами дослідження цієї проблематики є Китай, США, Велика Британія, Індія, Іспанія та низка інших технологічно розвинених країн. Публікації зарубіжних авторів здебільшого зосереджені на локальних аспектах імплементації IoT-рішень у бібліотечно-інформаційне виробництво: RFID-ідентифікації, управлінні фондами, мікролокаційних сервісах, моніторингу простору, автоматизації повернення й сортування документів, зборі даних про користувацьку поведінку, формуванні

моделей Smart Library. Український науковий доробок у цій сфері є помітно вужчим і переважно пов'язаний із ширшими процесами цифровізації бібліотек, у межах яких окремі аспекти застосування IoT розглядаються здебільшого на теоретичному рівні. Це засвідчує потребу не в механічному перенесенні зарубіжних практик, а у формуванні власної науково обґрунтованої рамки впровадження IoT у бібліотеках України, чутливої до національних інституційних, ресурсних, кадрових, безпекових і соціокультурних умов.

3. Методологічний апарат дослідження сформовано з урахуванням соціотехнічного характеру предмета, що поєднує техніко-технологічні, інформаційно-комунікаційні, організаційно-функціональні, соціокультурні та людиноцентричні аспекти впровадження IoT у бібліотечно-інформаційне виробництво. Системний підхід дозволив розглянути бібліотеку як цілісну соціотехнічну екосистему, де технологічна інфраструктура, інформаційні ресурси, користувачі, бібліотечні працівники, управлінські процеси та зовнішнє середовище перебувають у взаємозв'язку. Соціокомунікативний підхід забезпечив аналіз IoT крізь призму трансформації взаємодії між бібліотекою та користувачем, зміни каналів комунікації, персоналізації сервісів, посилення зворотного зв'язку та розширення можливостей бібліотеки як посередника між людиною й інформаційним середовищем. Культурологічний підхід дав змогу інтерпретувати технологічні інновації у зв'язку з ціннісною місією бібліотеки, збереженням культурної спадщини, розвитком читання, підтримкою інклюзивності та формуванням спільнот. Інституційний підхід дозволив оцінити готовність бібліотек до цифрових перетворень, рівень їхньої організаційної зрілості, кадрові й фінансові можливості, а також співвіднести український контекст із глобальними критеріями цифрового розвитку. Методологічну рамку підтримано методами аналізу, синтезу, порівняння, бібліометричного аналізу, анкетного онлайн-опитування, описової статистики, перевірки надійності шкал, непараметричних кореляцій, кластеризації, сценарного прогнозування та оцінки економічної доцільності. Таке поєднання підходів і методів забезпечило можливість розглядати Інтернет речей одночасно як

технологічний ресурс, управлінський інструмент і соціокультурне явище, а бібліотеку – не лише як об'єкт цифрової модернізації, а як активного учасника формування людиноцентричного цифрового середовища.

4. Емпіричне дослідження, проведене у форматі онлайн-опитування українських бібліотечних фахівців, засвідчило початковий, але перспективний етап освоєння технологій Інтернету речей у бібліотеках України. Результати опитування показали, що значна частина респондентів уже має певне уявлення про сутність IoT, однак рівень практичного впровадження таких технологій залишається обмеженим і нерівномірним. Найбільш поширеними елементами смарт-інфраструктури є системи безпеки та відеоспостереження, контроль доступу, «розумне» освітлення, окремі RFID-рішення для обліку фондів, лічильники відвідувань, технології штрихкодування та інші локальні технічні засоби. Водночас опитування виявило високий рівень зацікавленості бібліотечної спільноти в цифровій трансформації, зокрема у впровадженні рішень для розумного управління бібліотекою, підвищення енергоефективності, захисту фондів, інтерактивної навігації та покращення користувацького досвіду. Основними стримувальними чинниками залишаються обмеженість фінансових ресурсів, недостатня кваліфікація персоналу, відсутність спеціалістів із технічної інтеграції, складність подальшого обслуговування IoT-рішень, фрагментарність управлінських процедур і недостатній рівень державної або засновницької підтримки. Отже, українські бібліотеки демонструють не відсутність потреби в IoT, а розрив між усвідомленням його потенціалу та можливостями його системної реалізації. Саме цей розрив обумовлює необхідність розроблення не фрагментарних рекомендацій щодо окремих пристроїв, а комплексної стратегії впровадження IoT, яка враховує реальний стан інфраструктури, кадрову готовність, управлінську дисципліну, фінансову спроможність, рівень цифрової культури персоналу та очікування користувачів. Емпіричні результати також засвідчили, що успішність цифрової трансформації бібліотек залежить не лише від наявності технічного обладнання, а й від здатності

установи свідомо планувати, впроваджувати, оцінювати та коригувати інноваційні рішення.

5. Аналіз практичного досвіду впровадження IoT у бібліотеках зарубіжних країн та України дозволив визначити основні напрями застосування таких технологій у бібліотечно-інформаційному виробництві. Найбільш усталеним і поширеним напрямом є використання RFID-технологій для управління фондами, автоматизації обліку, інвентаризації, видачі й повернення документів, протикрадіжного контролю та оптимізації внутрішньої логістики. Важливим напрямом є застосування сенсорних систем для моніторингу умов збереження фондів, контролю температури, вологості, освітлення, запиленості, корозійної активності повітря, а також раннього реагування на аварійні ситуації. Окремий сегмент становлять мікролокаційні сервіси, Bluetooth-маячки, інтерактивна навігація, системи аналізу зайнятості простору, бронювання робочих місць і адаптації середовища до потреб користувачів. Внутрішні процеси бібліотеки трансформуються завдяки роботизованим сортувальникам, автоматизованим лініям повернення документів, «розумним» робочим місцям, пристроям моніторингу обладнання, системам енергоменеджменту та проактивного управління ресурсами. Українські практики поки що мають переважно локальний характер, але вже демонструють рух до смарт-інфраструктури, особливо в академічних бібліотеках, де впроваджуються RFID-рішення, системи контролю доступу, відеоспостереження, елементи розумних просторів і багатофункціональні безпечні середовища. Водночас зіставлення зарубіжного й українського досвіду показало, що провідну роль у реалізації IoT-інновацій здебільшого відіграють університетські бібліотеки, оскільки вони мають більшу інституційну спроможність, тісніше пов'язані з освітньою та науковою інфраструктурою, а також частіше виступають майданчиками для апробації нових сервісних моделей. У світовому контексті бібліотеки дедалі частіше рухаються до повноцінних моделей Smart Library, тоді як в Україні переважають локальні інфраструктурні рішення. Така ситуація зумовлена суперечністю між потребою цифрової трансформації бібліотечної сфери та обмеженістю фінансових,

організаційних і кадрових ресурсів. Отже, бібліотечний IoT формується не лише як технологічний набір рішень, а як сервісна парадигма, у якій автоматизовані системи звільняють людський час, підвищують якість обслуговування, підтримують безпеку та розширюють доступність знання.

6. Дослідження організаційно-технологічних засад упровадження IoT підтвердило необхідність обґрунтованого вибору мережевих моделей, протоколів, топологій і апаратних платформ відповідно до конкретних потреб бібліотеки. Модель TCP/IP залишається важливою основою для аналізу мережевої взаємодії, однак специфіка IoT вимагає врахування п'ятишарового стеку, що краще відображає взаємодію фізичних пристроїв, сенсорів, шлюзів, мережевих сервісів, застосунків і бізнес-процесів. На фізичному рівні найбільш актуальними для бібліотек є RFID, IEEE 802.11, BLE, NFC, ZigBee, LPWAN та інші технології, що дозволяють поєднувати ідентифікацію об'єктів, бездротовий зв'язок, локальну навігацію й енергоефективний моніторинг. На мережевому рівні важливого значення набувають IPv6, RPL і 6LoWPAN, які забезпечують масштабованість і підтримку великої кількості пристроїв. На транспортному та прикладному рівнях особливу роль відіграють TCP, UDP, MQTT і CoAP, які дозволяють організувати обмін даними між сенсорами, шлюзами, серверами й аналітичними платформами. Встановлено, що для українських бібліотек найбільш доцільною є не орієнтація на максимально складні технології, а використання наявної інфраструктури – Wi-Fi, Ethernet, RFID, NFC, BLE – з поступовим нарощуванням функціональності. Такий підхід забезпечує баланс між інноваційністю, економічною реалістичністю, надійністю, безпекою та зручністю експлуатації. При цьому вибір технологій має здійснюватися не за принципом формальної новизни, а з урахуванням конкретної бібліотечної задачі: управління фондом, моніторингу середовища, навігації, безпеки, енергоменеджменту, автоматизації обслуговування або збору аналітичних даних. Отже, організаційно-технологічний вимір IoT-інтеграції має бути підпорядкований сервісній, управлінській і соціокомунікаційній доцільності.

7. Розроблена концептуальна модель інтеграції технологій Інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво ґрунтується на положенні, що впровадження IoT має розпочинатися не з придбання окремих технічних засобів, а з комплексного оцінювання поточного стану бібліотеки, її інфраструктури, кадрового потенціалу, фінансових можливостей, управлінських практик, інформаційних потоків, потреб користувачів і стратегічних пріоритетів розвитку. Модель має циклічний характер і передбачає безперервне вдосконалення бібліотечних процесів: від діагностики та постановки цілей до пілотного впровадження, масштабування, оцінювання результативності, корекції й повторного планування. Її реалізація не завершується фактом запуску певного IoT-рішення, оскільки справжня ефективність технології визначається не її наявністю, а здатністю створювати додану цінність для користувача, бібліотечного працівника й установи загалом. Поєднуючи діагностичний, стратегічний, операційний, оціночний та етичний компоненти, модель дозволяє розглядати цифрову трансформацію бібліотеки як органічний процес її внутрішнього розвитку. У такому підході IoT постає не зовнішнім технологічним додатком, а інструментом зміцнення соціокомунікаційної функції бібліотеки, підвищення її адаптивності, прозорості, безпеки, інклюзивності та здатності відповідати на мінливі потреби суспільства. Особливе значення має те, що запропонована модель не уніфікує бібліотеки за одним сценарієм цифрової трансформації, а дає змогу враховувати різний рівень їхньої ресурсної, інфраструктурної, кадрової та управлінської спроможності. Вона орієнтує бібліотеки на поступове формування IoT-середовища через мікротручання, пілотні рішення, оцінювання ефекту, накопичення компетентностей і подальше масштабування, що є особливо важливим для українського контексту з його нерівномірністю цифрового розвитку та обмеженістю ресурсів.

8. Встановлено, що синергія технологій Інтернету речей і штучного інтелекту створює передумови для переходу бібліотеки від фрагментарної автоматизації окремих процесів до формування цілісної інтелектуальної екосистеми «розумної бібліотеки». Якщо IoT забезпечує безперервний збір даних про стан фондів,

простору, обладнання, ресурсоспоживання та користувацьку активність, то штучний інтелект надає можливість аналізувати ці дані, виявляти закономірності, прогнозувати потреби, персоналізувати сервіси та підтримувати управлінські рішення. У бібліотечно-інформаційному виробництві така синергія відкриває можливості для автоматизованого моніторингу умов збереження документів, інтелектуальної навігації простором, рекомендаційних сервісів, прогнозування попиту на ресурси, оптимізації енергоспоживання, аналізу завантаженості зон, адаптації сервісів до потреб різних груп користувачів. Водночас інтеграція IoT і штучного інтелекту несе не лише технологічні переваги, а й комплекс організаційних, етичних, правових, економічних і соціокомунікаційних викликів. Саме тому запропонована дорожня карта впровадження передбачає поетапний рух: аудит цифрової готовності та потоків даних; створення тестового середовища; розвиток цифрових компетентностей персоналу; масштабування IoT-рішень з інтеграцією хмарних сервісів, мобільних застосунків та аналітичних платформ; регулярне оцінювання ефективності, проведення етичних аудитів і вдосконалення механізмів зворотного зв'язку. Така послідовність дозволяє зменшити ризик неузгоджених технологічних рішень і забезпечити поступовий перехід до інтелектуальної бібліотечної інфраструктури. У цьому контексті штучний інтелект не замінює соціокомунікаційну місію бібліотеки, а посилює її, оскільки дозволяє точніше виявляти потреби користувачів, адаптувати сервіси, підтримувати доступність знань і формувати більш гнучке, персоналізоване та передбачуване бібліотечно-інформаційне середовище.

9. Результати дослідження дозволяють стверджувати, що в умовах цифрової трансформації бібліотечно-інформаційної сфери категорія ризику набуває нового змісту. Ризики впровадження IoT не можуть розглядатися лише як технічні збої, кіберзагрози або фінансові втрати; вони стають складовою стратегічного управління бібліотекою та прогнозування її довгострокового розвитку. До ключових ризиків належать: технологічна несумісність обладнання, недостатній рівень захисту даних, порушення приватності користувачів, фрагментарність управління, залежність від

постачальників, перевищення бюджету, нестача компетентного персоналу, низька якість сервісної підтримки, нерівність доступу до цифрових послуг і потенційне зниження довіри до бібліотеки. У цьому контексті високий рівень цифрової зрілості визначається не лише здатністю впроваджувати інновації, а й умінням передбачати їхні соціальні наслідки, підтримувати етичні стандарти, мінімізувати збір персональних даних, забезпечувати прозорість процедур, формувати політики реагування на інциденти та здійснювати регулярний аудит безпеки. Економічний аналіз упровадження IoT-рішень показав, що цифрова модернізація бібліотек потребує не лише технологічного, а й фінансово-управлінського обґрунтування. В умовах обмежених ресурсів українських бібліотек рішення про впровадження IoT має спиратися на оцінку не тільки початкових витрат, а й довгострокових вигід, операційних витрат, строку окупності, можливого зростання ефективності процесів, економії ресурсів, вивільнення робочого часу персоналу, підвищення якості сервісу та соціального ефекту. Застосування показників NPV, IRR, строку окупності, карти чутливості та сценарного аналізу дозволяє перейти від інтуїтивного прийняття рішень до прозорої аргументації інвестицій у бібліотечну цифрову інфраструктуру. Запропонований підхід до ризик-менеджменту та економічного оцінювання інтегрує технічні, фінансові, правові й гуманітарні критерії, завдяки чому ризик перестає бути лише обмеженням і перетворюється на інструмент відповідального стратегічного планування.

10. Для подолання методичної прогалини в оцінюванні готовності бібліотек до впровадження IoT у дисертації розроблено взаємопов'язані індикатори IR-Gap і DCI. Індикатор IR-Gap дозволяє виявляти розрив між бажаним рівнем сервісу або технологічної функціональності та фактичними ресурсами, інфраструктурою й організаційними можливостями бібліотеки. Digital Capacity Index фіксує цифрову спроможність бібліотеки як інтегральну характеристику, що охоплює інфраструктуру, кадрові компетентності, фінанси, управління, процеси та безпеку. Ці індикатори не підміняють управлінського рішення, однак забезпечують його вимірюваність, порівнянність і прозорість. Вони дають змогу виявляти «точки

росту», оцінювати реалістичність цифрових намірів, аргументувати черговість дій, формувати диференційовані траєкторії модернізації та комунікувати потреби бібліотеки перед керівництвом, засновниками, партнерами й потенційними донорами. Емпірична апробація індикаторів дозволила описати профілі готовності бібліотек, виявити зв'язки між управлінськими практиками, технічною інфраструктурою, безпекою та користувацьким досвідом. Особливо важливим є висновок про те, що управлінська організація є не менш значущим чинником цифрової спроможності, ніж наявність обладнання: саме чіткі процедури, відповідальні особи, мінімальні політики, планування, облік ризиків і оцінювання результативності здатні зменшувати IR-Gap навіть у ресурсно обмежених установах. Отримані результати узгоджуються зі світовими тенденціями, але зберігають чутливість до українських реалій, оскільки демонструють, що послідовне впровадження IoT у бібліотеках має починатися з базових управлінських налаштувань і мікротручань, які створюють швидко відчутну додану вартість для користувача та персоналу, а вже далі переходити до складніших сервісів. Запропонований підхід дозволяє раціонально розподіляти обмежені ресурси, уникати «пастки пілотів» і досягати кумулятивного ефекту цифрової модернізації.

11. На основі узагальнення теоретичних, бібліометричних, емпіричних і прикладних результатів розроблено людиноцентричний конструктор HCLC, який упорядковує життєвий цикл бібліотечних послуг з IoT-компонентами – від задуму, діагностики й пілотування до масштабування, оцінювання впливу та подальшого вдосконалення. Запропонована стратегічна матриця R_1 – R_3 задає трирівневу логіку пріоритезації IoT-рішень: стартові рішення з мінімальним порогом входу й швидким відчутним ефектом; проміжні рішення з помірною складністю та можливістю масштабування; розширені рішення для бібліотек із високою цифровою спроможністю, розвиненою інфраструктурою та сформованими управлінськими процедурами. Практичні інструменти – «Журнал вигід» і «типові технічні карти» – забезпечують операційну керованість упровадження: вони дозволяють співвідносити очікувані вигоди з витратами й ризиками, формулювати критерії

успіху, описувати вимоги до обладнання, програмного забезпечення, даних, безпеки, персоналу й сервісного супроводу. HCLC-модель також містить вбудовані точки етичного й правового контролю, які фіксують, на яких етапах необхідно мінімізувати збір персональних даних, анонімізувати вимірювання, отримувати згоду користувачів, проводити навчання персоналу та оцінювати вплив технологій на довіру, доступність і якість бібліотечного сервісу. Практична значущість дисертації полягає в можливості безпосереднього використання її результатів у стратегічному та операційному управлінні цифровою трансформацією бібліотек: індикатори IR-Gap і DCI можуть застосовуватися для діагностики готовності установ і моніторингу прогресу; HCLC-конструктор і матриця R_1 – R_3 – для стратегічного планування та вибору послідовності впровадження; «Журнал вигід» і типові технічні карти – для підготовки проєктних заявок, технічних завдань, внутрішніх програм модернізації та обґрунтування фінансування. Загалом дисертація робить внесок у розвиток бібліотекознавства, соціальних комунікацій та досліджень цифрової трансформації бібліотечно-інформаційного виробництва, оскільки поєднує теоретичне осмислення IoT, бібліометричний аналіз наукового поля, емпіричну оцінку готовності українських бібліотек, індикатори вимірювання цифрової спроможності, концептуальну модель інтеграції, економічне обґрунтування, ризик-орієнтований підхід і практичний інструментарій упровадження. У роботі доведено, що ефективна інтеграція технологій Інтернету речей у бібліотеки має здійснюватися не шляхом фрагментарного впровадження окремих пристроїв, а через цілісну людиноцентричну стратегію, яка узгоджує технічні рішення з місією бібліотеки, ресурсними можливостями, потребами користувачів, компетентностями персоналу, етичними стандартами та довгостроковими цілями інституційного розвитку. Сформульовані підходи дозволяють перетворити IoT із «видимого гаджета» або локального технічного експерименту на невід’ємний елемент якості бібліотечних послуг, інструмент підвищення цифрової життєстійкості бібліотек і основу для формування адаптивного, безпечного, інклюзивного та інтелектуального

бібліотечно-інформаційного середовища. Подальші дослідження доцільно спрямувати на довготривалий моніторинг ефективності впроваджених IoT-рішень у різних типах бібліотек, поглиблення методик оцінювання соціального впливу цифрових сервісів, розроблення етичних регламентів роботи з даними користувачів, вивчення моделей міжінституційної кооперації та формування національних стандартів упровадження IoT у бібліотечно-інформаційне виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бугера О. Інтернет речей та запобігання злочинності // Кримінологія. 2018. № 6. С. 295–298. URL: <http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2018/6/54.pdf> (дата звернення: 20.03.2023).
2. Жураковський Б. Ю. Технології інтернету речей. Навчальний посібник : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» / Б. Ю. Жураковський, І. О. Зенів ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42078> (дата звернення: 24.04.2023).
3. Кобелєв О. М. Інформаційно-аналітичний сервіс як вектор розвитку сучасних бібліотек // Вісник ХДАК. 2019. № 54. С. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.054.06> (дата звернення: 24.12.2022).
4. Мар'їна О. Ю. Реалізація концепції Інтернету речей в бібліотеках // Культура та інформаційне суспільство XXI століття : Матеріали всеукр. наук.-теорет. конф. молодих уч., м. Харків, 21–22 квіт. 2019 р. м. Харків, 2019. С. 301–302.
5. Назаровець С. А., Кулик Є. В. Бібліотека 4.0: технології та сервіси майбутнього // Бібліотечний вісник. 2017. № 5. С. 3–14. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bv_2017_5_3 (дата звернення: 18.01.2023).
6. Гранчак Т. Ю. Орієнтири розвитку бібліотек у середовищі покоління Z // Український журнал з бібліотекознавства та інформаційних наук. 2019. Вип. 3. С. 20–35. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua/everlib/item/er-0003087> (дата звернення: 10.04.2023).
7. Куліш Ю. О. Створення smart-бібліотек за допомогою Інтернету речей як перспективний напрям розвитку інформаційно-освітнього середовища

- університету // Інформація та соціум : зб. матеріалів VIII Міжнар. науково-практич.- конф., м. Вінниця, 2 черв. 2023 р. м. Вінниця, 2023. С. 111–113. URL: <https://jias.donnu.edu.ua/article/view/14613> (дата звернення: 13.11.2023).
8. Digital Transformation of Ukrainian Libraries: Current State and Prospects / Y. Horban та ін. // African Journal of Applied Research. 2024. Т. 10, № 1. С. 117–129. DOI: <https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.672>.
 9. Wirtz J., Menkhoff T. Case Study: National Library Board Singapore – Delivering Cost-Effective Service Excellence through Innovation and People // Services Marketing: People, Technology, Strategy. 9th ed. Singapore : World Scientific Publishing, 2021. P. 589–597. URL: https://www.worldscientific.com/doi/suppl/10.1142/y0024/suppl_file/y0024_Case1_2_free.pdf (Last accessed: 26.11.2025)
 10. Roth A. RFID Implementation in the Vatican Library // The Hague : Consortium of European Research Libraries (CERL), 2010. 13 p. (CERL Papers ; No. 10a). URL: https://www.cerl.org/_media/collaboration/security/otherinformation/10a_adalbert_r_oht.pdf (Last accessed: 26.11.2025)
 11. Swedberg C. Libraries Check Out Bluetooth Beacons // RFID JOURNAL. URL: <https://www.rfidjournal.com/news/libraries-check-out-bluetooth-beacons/73567/> (Last accessed: 31.10.2025)
 12. The City of Helsinki wants to make IoT data and digital solutions more widely available // Helsinki smart city solutions: IoT data and Digital innovation. URL: <https://processgenius.eu/references-en/helmet/> (Last accessed: 25.10.2025).
 13. The Little Robot that Lived at the Library // Futurice, digital transformations with measurable outcomes. URL: <https://www.futurice.com/blog/the-little-robot-that-lived-at-the-library> (Last accessed: 25.10.2025).

- 14.Бібліотека сьогодні | Сайт бібліотеки НТУ "ХПІ" // Сайт бібліотеки НТУ "ХПІ". URL: <https://library.kpi.kharkov.ua/uk/biblioteka> (дата звернення: 25.10.2025).
- 15.MARC view for: Дівчина з Нідерландів > Бібліотека УКУ catalog // Бібліотека УКУ catalog.
URL: <https://opactest.ucu.edu.ua/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=310017> (дата звернення: 25.10.2025).
- 16.СТРАТЕГІЯ 2021-2025 ПРОЄКТ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: Науково-техн. б-ка ім. Г. І. Денисенка. 27 с.
URL: https://www.library.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/02/Strategy_2021-2025_Biblioteka_KPI.pdf (дата звернення: 25.10.2025).
- 17.Горбiк В. Лiжка, душ, книги та перехiд в iншу реальнiсть. Репортаж зi смарт-укриття CLUST Space, яке відкрили в КПi // dev.ua.
URL: <https://dev.ua/news/reportazh-z-ukryttia-kovorkinhu-v-kpi> (дата звернення: 25.10.2025).
- 18.CLUST SPACE: як працює новiтнє смарт-укриття у бiблiотецi КПi | Науково-технiчна бiблiотека iм. Г. I. Денисенка // Науково-технiчна бiблiотека iм. Г. I. Денисенка.
URL: <https://www.library.kpi.ua/clust-space-yak-pratsyuye-novitnye-smart-ukryttya-u-bibliotetsi-kpi/> (дата звернення: 25.10.2025).
- 19.Wan Y. C. RFID at HKU Libraries: Phase 2 Implementation // Proceedings of the JULAC Libraries Forum 2012, Lingnan University, Hong Kong, 23 February 2012. Hong Kong : The University of Hong Kong Libraries, 2012. 15 p. URL: <https://hub.hku.hk/bitstream/10722/166128/1/Content.pdf>.
- 20.The University of Hong Kong Libraries Centenary. *HKU Libraries*.
URL: <https://lib.hku.hk/hkul100/index.html> (Last accessed: 25.10.2025).

21. HKU Libraries to launch "Rare Book Digitisation Project" and "RFID Collection Management & Circulation System" - All News - Media — HKU // The University of Hong Kong (HKU).
URL: https://www.hku.hk/press/news_detail_5834.html (Last accessed: 25.10.2025).
22. Buckland M. Document Theory: An Introduction // Records, Archives and Memory: Selected Papers from the Conference and School on Records, Archives and Memory Studies, University of Zadar, Croatia, May 2013 / eds. M. Willer, A. J. Gilliland, M. Tomić. Zadar : University of Zadar, 2015. P. 223–237.
URL: <https://people.ischool.berkeley.edu/~buckland/zadardoctheory.pdf>
23. Digital Maturity of Schools // e-Škole.
URL: <https://pilot.e-skole.hr/en/results/digital-maturity-of-schools/>
24. Roznik J., Strauszova J. Library system digitization study of the public university // Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions : Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, m. Zadar, 20–23 жовт. 2010 р. DAAAM, 2010. С. 857–858.
URL: https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2010/23279_Symp_1_head.pdf.
25. VOSviewer - Features - Highlights. VOSviewer. URL: <https://www.vosviewer.com/features/highlights> (Last accessed: 15.07.2023).
26. Scopus – Advanced search. Scopus. URL: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=advanced> (Last accessed: 15.07.2023).
27. Advances in Intelligent Systems and Computing // Scimago Journal & Country Rank.
URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=5100152904&tip=sid> (Last accessed: 15.07.2023).

28. What is CiteScore? - Scopus Support Center // Home - Elsevier Support Center.
URL: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/14880/supporthub/scopus/
(Last accessed : 15.07.2023).
29. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey // Computer Networks. 2010. T. 54, № 15. C. 2787–2805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
30. Applied Mechanics and Materials // Scimago Journal & Country Rank.
URL: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=4700151914&tip=sid>
(Last accessed: 15.07.2023).
31. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems / A. A. Mutlag та ін. // Future Generation Computer Systems. 2019. Т. 90. С. 62–78.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.049>
32. Wang J., Katabi D. Dude, where's my card? // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2013. Vol. 43, no. 4. P. 51–62.
DOI: <https://doi.org/10.1145/2534169.2486029>
33. Wang J., Katabi D. Dude, where's my card? // SIGCOMM'13: ACM SIGCOMM 2013 Conference, Hong Kong China. New York, NY, USA, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1145/2486001.2486029>
34. Учасники проєктів Вікімедіа. Комунікаційний протокол – Вікіпедія // Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Комунікаційний_протокол (дата звернення: 10.08.2023).
35. Учасники проєктів Вікімедіа. Інтерфейс – Вікіпедія // Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інтерфейс> (дата звернення: 10.08.2023).
36. Borysov O. Internet of things network protocols at TCP/IP model 1 ayers: trends and implementation perspectives in libraries // Культура та інформаційне

суспільство XXI століття. У 2 ч. : матеріали міжнар. наук.-теорет. конф. молодих уч., м. Харків, 18–19 квіт. 2024 р. Харків, 2024. Ч. 2 С. 141–144.

- 37.МОДЕЛЬ OSI – Вікі ЦДУ // Вікі ЦДУ.
URL: https://wiki.cusu.edu.ua/МОДЕЛЬ_OSI (дата звернення: 02.10.2024).
- 38.TCP/IP – Вікі ЦДУ // Вікі ЦДУ.
URL: <https://wiki.cusu.edu.ua/index.php/TCP/IP> (дата звернення: 02.10.2024).
- 39.Protocols For IoT - BaseApp Systems // BaseApp Systems - Web Applications & Embedded Systems Experts. URL: <https://www.baseapp.com/iot/protocols-for-iot/> (Last accessed: 02.10.2024).
- 40.Proctor B. Mesh, Star and Point-To-Point Topology In IoT | Link Labs // IoT Asset Monitoring & Tracking Solution | Link Labs.
URL: <https://www.link-labs.com/blog/iot-topology> (Last accessed: 02.10.2024).
- 41.Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions / M. Mansour et al. // Energies. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 3465. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16083465>
- 42.Учасники проєктів Вікімедіа. Комп'ютерна мережа – Вікіпедія // Вікіпедія.
URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Комп'ютерна_мережа (дата звернення: 07.10.2024).
- 43.Інститут інженерів з електротехніки та електроніки. IEEE Standard for Ethernet (IEEE Std 802.3™-2022 – Revision of IEEE Std 802.3-2018). Нью-Йорк : IEEE Standards Association, 2022. 7025 с. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9844436> (Last accessed: 15.10.2024).
- 44.Ethernet Alliance. The Spaces of BASE-T. – Beaverton (OR, USA) : Ethernet Alliance, 2016. 20 p. URL:

https://www.ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2016/04/BASE-TSpaces_EA_FINAL-041816.pdf (Last accessed: 15.10.2024).

45. Wired vs Wireless Network Connection: Detailed Comparison // Tech & Career Blogs. URL: <https://www.theiotacademy.co/blog/wired-vs-wireless-network/> (Last accessed: 15.10.2024).
46. Інститут інженерів з електротехніки та електроніки // IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN (IEEE Std 802.11ax™-2021). Нью-Йорк : IEEE Standards Association, 2021. 732 с. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9363693> (Last accessed: 22.10.2024).
47. Учасники проєктів Вікімедіа. IEEE 802.11 – Вікіпедія // Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11 (дата звернення: 22.10.2024).
48. Wireless connectivity options for IoT applications: technology comparison | Bluetooth® Technology Website // Bluetooth® Technology Website. URL: <https://www.bluetooth.com/blog/wireless-connectivity-options-for-iot-applications-technology-comparison/> (Last accessed: 22.10.2024).
49. Ahad A., Tahir M., Yau K.-L. A. 5G-Based Smart Healthcare Network: Architecture, Taxonomy, Challenges and Future Research Directions // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 100747–100762. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2930628>
50. Gerber A., Romeo J. Choosing the best hardware for your next IoT project // IBM Developer. URL: <https://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-best-hardware-devices-iot-project/> (Last accessed: 24.10.2024).

51. Rice-Jones J., Pande A. Best single board computers in 2023 // XDA. URL: <https://www.xda-developers.com/best-single-board-computer/> (Last accessed: 08.03.2024).
52. Kumar S., Mukherjee S. Hardware Devices Integration With IoT // Wireless Communication Security / ed. M. Khari, M. Bharti, M. Niranjanamurthy. – Hoboken : Wiley, 2022. P. 175–192. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119777465.ch8>
53. Johnston S. J., Apetroaie-Cristea M., Scott M., Cox S. J. Applicability of commodity, low cost, single board computers for Internet of Things devices // Proceedings of the 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Reston, VA, USA, 12–14 dec. 2016. Piscataway, New York : IEEE, 2016. P. 141–146. DOI: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2016.7845414>.
54. Wytrębowicz J., Cabaj K., Krawiec J. Messaging Protocols for IoT Systems—A Pragmatic Comparison // Sensors. 2021. T. 21, № 20. C. 6904. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21206904>
55. Alcarria R., Robles T., Domínguez A. M., Cedeño E. Resolving Coordination Challenges in Cooperative Mobile Services // Proceedings of the 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2012), Palermo, Italy, 4–6 July 2012. Piscataway, NJ : IEEE, 2012. P. 823–828. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMIS.2012.131>.
56. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 2347–2376. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>.
57. MQTT-SN // Technical Documentation. URL: https://docs.nordicsemi.com/bundle/ncs-2.7.0/page/zephyr/connectivity/networking/api/mqtt_sn.html (Last accessed: 17.10.2024).

58. Kalmar A., Vida R., Maliosz M. CAEsAR: A Context-Aware Addressing and Routing Scheme for RPL Networks // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), London, United Kingdom, 8–12 June 2015. Piscataway, NJ : IEEE, 2015. P. 635–641. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7248393>.
59. Singh M., Rajan M. A., Shivraj V. L., Balamuralidhar P. Secure MQTT for Internet of Things (IoT) // Proceedings of the 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Gwalior, India, 4–6 April 2015. Piscataway, NJ : IEEE, 2015. P. 746–751. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSNT.2015.16>.
60. Castellani A. P., Gheda M., Bui N., Rossi M., Zorzi M. Web Services for the Internet of Things through CoAP and EXI // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Kyoto, Japan, 5–9 June 2011. Piscataway, NJ : IEEE, 2011. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCW.2011.5963563>.
61. Al-Fuqaha A., Khreishah A., Guizani M., Rayes A., Mohammadi M. Toward Better Horizontal Integration Among IoT Services // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53, No. 9. P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263375>.
62. Brizzi P., Lotito A., Ferrera E., Conzon D., Tomasi R., Spirito M. Enhancing Traceability and Industrial Process Automation through the VIRTUS Middleware // Proceedings of the Middleware 2011 Industry Track Workshop, Lisbon, Portugal, 12–16 December 2011. New York : Association for Computing Machinery (ACM), 2011. Article 2. DOI: <https://doi.org/10.1145/2090181.2090183>.
63. Lopez-Vega J. M., Camarillo G., Povedano-Molina J., Lopez-Soler J. M. RELOAD Extension for Data Discovery and Transfer in Data-Centric Publish–Subscribe Environments // Computer Standards & Interfaces. 2013. Vol. 36, No. 1. P. 110–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2013.06.006>.

64. Jung M., Weidinger J., Kastner W., Olivieri A. Heterogeneous Device Interaction Using an IPv6 Enabled Service-Oriented Architecture for Building Automation Systems // Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '13), Coimbra, Portugal, 18–22 March 2013. New York : Association for Computing Machinery (ACM), 2013. P. 1939–1941. DOI: <https://doi.org/10.1145/2480362.2480722>.
65. Givvehchi O., Landsdorf K., Simoens P., Colombo A. W. Interoperability for Industrial Cyber-Physical Systems: An Approach for Legacy Systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Vol. 13, No. 6. P. 3370–3378. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2740434>.
66. Putera C. A. L., Lin F. J. Incorporating OMA Lightweight M2M protocol in IoT/M2M standard architecture // Proceedings of the 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Milan, Italy, 14–16 Dec. 2015. Piscataway : IEEE, 2015. P. 559–564. DOI:10.1109/WF-IoT.2015.7389115. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7389115>.
67. Hejazi H., Rajab H., Cinkler T., Lengyel L. Survey of platforms for massive IoT // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT), Eger, Hungary, 18–19 Jan. 2018. Piscataway : IEEE, 2018. P. 1–8. DOI: 10.1109/FIOT.2018.8325598. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8325598>.
68. Johnsen F. T. Using Publish/Subscribe for Short-lived IoT Data // Proceedings of the 2018 Federated Conference on Computer Science and Information Systems / eds. M. Ganzha, L. Maciaszek, M. Paprzycki. Warsaw : Polish Information Processing Society (PTI), 2018. (Annals of Computer Science and Information Systems ; Vol. 15). P. 645–649. DOI:10.15439/2018F232. URL: https://annals-csis.org/Volume_15/drp/232.html.

69. Abdulrahman T. A., Isiwekpeni O. H., Surajudeen-Bakinde N. T., Otuoze A. O. Design, Specification and Implementation of a Distributed Home Automation System // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 94. P. 473–478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.073>.
70. MQTT Specification // MQTT. The Standard for IoT Messaging. URL: <https://mqtt.org/mqtt-specification/> (Last accessed: 17.10.2024).
71. CoAP – Constrained Application Protocol | Specification // CoAP – Constrained Application Protocol | Overview. URL: <https://coap.space/spec.html> (Last accessed: 17.10.2024).
72. Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) Version 1.0, Part 0: Overview // OASIS. URL: <https://docs.oasis-open.org/amqp/core/v1.0/os/amqp-core-overview-v1.0-os.html> (Last accessed: 17.10.2024).
73. XMPP The universal messaging standard // XMPP. URL: <https://xmpp.org/extensions/> (Last accessed: 17.10.2024).
74. Released Specifications // OPC UA Online Reference. URL: <https://reference.opcfoundation.org/> (Last accessed : 17.10.2024).
75. What's in the DDS Standard? // DDS Portal – Data Distribution Services. URL: <https://www.dds-foundation.org/omg-dds-standard/> (Last accessed: 17.10.2024).
76. OMA SPECIFICATIONS // Open Mobile Alliance. URL: <https://technical.openmobilealliance.org/index.html> (Last accessed: 17.10.2024).
77. STOMP 1.2 Implementations // STOMP. URL: <https://stomp.github.io/stomp-specification-1.2.html> (Last accessed: 17.10.2024).

78. Protocol Specification – Web Application Messaging Protocol version 2 documentation // The Web Application Messaging Protocol – Web Application Messaging Protocol version 2 documentation. URL: <https://wamp-protocol.org/spec.html> (Last accessed: 17.10.2024).
79. Wang F., Xu H. Research on the Application and Frontier Issues of Artificial Intelligence in Library and Information Science // Voice of the Publisher. 2024. Vol. 10, no. 04. P. 357–368. DOI: <https://doi.org/10.4236/vp.2024.104028>.
80. Ajakaye J. E. Applications of Artificial Intelligence (AI) in Libraries // Handbook of Research on Emerging Trends and Technologies in Librarianship / eds. I. Ekoja, E. Ogbomo, O. Okuonghae. Hershey, PA : IGI Global, 2022. P. 73–90. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9094-2.ch006>.
81. Su X., Chen N. Intelligent Information Service System of Smart Library Based on Virtual Reality and Eye Movement Technology // Scientific Programming. 2022. Vol. 2022. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/9174756>.
82. Deo G., Mishra A., Jalaluddin Z. IoT-enabled Library Management System with Predictive Analysis of Resource Usage Data using Machine Learning for the Qualitative Up-gradation. 2020 // ResearchGate preprint. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10905.65127>.
83. Adegoke K. A., Babalola G. A. Academic Libraries in IoT Era: Moving Towards Smart Services // Proceedings of the 2022 DLIS 4th Biennial Conference “Information and Knowledge Management in the 4th Industrial Revolution and COVID-19 Era”, 25–27 April 2022, Virtual Conference, University of Botswana. – Gaborone : Department of Library and Information Studies (DLIS), University of Botswana, 2022. 19 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/369087139_Academic_Libraries_in_IoT_Era_Moving_Towards_Smart_Services

84. Adegoke K. A. Internet of Things (IoT): An Indispensable Tool for Smart Library Services in Nigerian University // *Library and Information Science Digest*. Vol. 15. May 2022. P. 8–16. Anambra State Chapter of the Nigerian Library Association. URL: https://www.researchgate.net/publication/369738078_Internet_of_Things_IOT_An_Indispensable_Tool_for_Smart_Library_Services_in_Nigerian_University
85. Muhamad S. S., Darwesh A. M. Smart University Library Management System Based on Internet of Things // *UHD Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 63. URL: <https://doi.org/10.21928/uhdjst.v4n2y2020.pp63-74>.
86. Adigun G. O., Ajani Y. A., Enakrire R. T. The Intelligent Libraries: Innovation for a Sustainable Knowledge System in the Fifth (5th) Industrial Revolution // *Libri*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/libri-2023-0111>.
87. Wang C., Sha Z., Jia L. Research on Digital Resource System Construction of Smart Library Based on Computer Network and Artificial Intelligence // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1952, no. 4. P. 042018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/4/042018>.
88. A Survey on Artificial Intelligence Aided Internet-of-Things Technologies in Emerging Smart Libraries / S. Bi et al. // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 8. P. 2991. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22082991>.
89. Mohammadi M., Ezadi Yegane M. How Can We Equip Academic Libraries with IoT Technologies: Practical Guidelines // *International Journal of Digital Content Management*. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 71–84. DOI: 10.22054/dcm.2021.13065. – URL: https://dcm.qom.ac.ir/article_13065.html
90. Rogers E. M. *Diffusion of innovations*. New York : Free Press of Glencoe, 1962. 367 p.
91. Onyeka A. C., Izunobi C. H., Iwueze I. S. Estimation of Population Ratio in Post-Stratified Sampling Using Variable Transformation // *Open Journal of*

Statistics. 2015. Vol. 05, no. 01. P. 1–9.
DOI: <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.51001>.

92. McPhee C., Barlas F., Brigham N., Darling J., Dutwin D., Jackson C., Jackson M., Kirzinger A., Little R., Lorenz E., Marlar J., Mercer A., Scanlon P. J., Weiss S., Wronski L. Data Quality Metrics for Online Samples: Considerations for Study Design and Analysis. – Oakbrook Terrace, IL : American Association for Public Opinion Research (AAPOR), November 2022. URL: <https://aapor.org/wp-content/uploads/2023/02/Task-Force-Report-FINAL.pdf> (Last accessed: 15.05.2025).
93. Учасники проєктів Вікімедіа. Шкала Лайкерта – Вікіпедія // Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Шкала_Лайкерта (дата звернення: 17.05.2025).
94. Учасники проєктів Вікімедіа. Альфа Кронбаха – Вікіпедія // *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Альфа_Кронбаха (дата звернення: 10.05.2025).
95. Contributors to Wikimedia projects. Kaiser–Meyer–Olkin test — Wikipedia // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kaiser–Meyer–Olkin_test (Last accessed: 10.07.2025).
96. Romero Jeldres M., Díaz Costa E., Faouzi Nadim T. A review of Lawshe’s method for calculating content validity in the social sciences // *Frontiers in Education*. 2023. Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1271335>.
97. Contributors to Wikimedia projects. Shapiro–Wilk test — Wikipedia // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Shapiro–Wilk_test (Last accessed: 17.05.2025).
98. Учасники проєктів Вікімедіа. Коефіцієнт кореляції рангу Спірмена – Вікіпедія // Вікіпедія. URL:

- https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_кореляції_рангу_Спірмена (Last accessed: 17.05.2025).
- 99.18.3 - Kendall Tau-b Correlation Coefficient | STAT 509 // PennState: Statistics Online Courses. URL: <https://online.stat.psu.edu/stat509/lesson/18/18.3> (Last accessed: 17.05.2025).
100. Chetverikov D., Wilhelm D. Inference for rank-rank regressions. The Institute for Fiscal Studies Department of Economics, UCL: Cemmap, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47004/wp.cem.2024.1124>.
101. Anderson C. J. Ordinal Logistic Regression: Lecture Notes for Ordinal Responses – University of Illinois, Fall, 2019. 51 p. URL: https://education.illinois.edu/docs/default-source/carolyn-anderson/edpsy589/lectures/8_Multicategory_logit/ordinal_logistic_post.pdf. (Last accessed: 15.07.2025).
102. OECD, European Union, EC-JRC. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. Paris : OECD Publishing, 2008. 162 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
103. Contributors to Wikimedia projects. Bartlett's test — Wikipedia // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bartlett's_test (Last accessed: 17.06.2025).
104. Yamashita N. Two-Stage Procrustes Rotation with Sparse Target Matrix and Least Squares Criterion with Regularization and Generalized Weighting // Open Journal of Statistics. 2023. Т. 13, № 02. С. 264–284. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojs.2023.132014>.
105. Учасники проєктів Вікімедіа. Кластеризація методом к-середніх – Вікіпедія // Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Кластеризація_методом_к-середніх (Last accessed: 13.07.2025).

106. Contributors to Wikimedia projects. Elbow method (clustering) — Wikipedia // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elbow_method_\(clustering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Elbow_method_(clustering)) (Last accessed: 17.07.2025).
107. Contributors to Wikimedia projects. Silhouette (clustering) — Wikipedia // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_\(clustering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_(clustering)) (Last accessed: 17.07.2025).
108. Учасники проєктів Вікімедіа. Метод Ньютона – Вікіпедія //Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_Ньютона (дата звернення: 17.07.2025).
109. Учасники проєктів Вікімедіа. Дерево пошуку Монте-Карло – Вікіпедія //Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Дерево_пошуку_Монте-Карло (дата звернення: 17.07.2025).
110. Cost Benefit Analysis: What Is It and How to Do It | The Workstream // Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/ru/work-management/strategic-planning/cost-benefit-analysis> (Last accessed: 18.07.2025).
111. Tella A., Ajani Y. A., Adeyeye S. V. Smart library advocacy: Leveraging intelligent technologies as smart solutions for equitable knowledge access through a systematic review // Journal of Electronic Resources Librarianship. 2025. С. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/1941126x.2025.2497729>.
112. Ekere J. N., Benson O. V., Eke C. C., Emuchay B. N. Managing Smart Campus and Smart Libraries: A Look at Challenges and the Way Forward for Libraries in Developing Countries // Library Philosophy and Practice (e-journal). 2022. University of Nebraska–Lincoln. Article № 7478. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/7478/>.

113. Reed A., Thompson K. Never waste a crisis: Digital inclusion for sustainable development in the context of the COVID pandemic // *Library Journal*. 2021. Vol. 40. № 2. P. 14–16. DOI: <https://doi.org/10.13663/j.cnki.lj.2021.02.001>.
114. Shashidhara K. L. IoT and Its Application in Library: A Review of Emerging Trends // *Library Philosophy and Practice (e-journal)*. 2023. University of Nebraska–Lincoln. Article No. 7773. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/7773/>
115. Boateng F., Aroba O. J., PATEL S. S. Sustainable Strategies and Factors Influencing IoT Adoption Frameworks in Library Management in Educational Institutions: A Systematic Literature Review // *Routledge Open Research*. 2025. Vol. 4. P. 5. DOI: <https://doi.org/10.12688/routledgeopenres.19102.2>.
116. Ram B., Kumar A., Pal S. K. Applications of the internet of things in library and data privacy // *IP Indian Journal of Library Science and Information Technology*. 2023. Vol. 8, №. 1. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.18231/j.ijlsit.2023.003>.
117. Aslam S., Jabeen M., Jabeen M. Fostering innovation in smart library services: An in-depth exploration of empowered capabilities and dynamic strategies among university librarians in Pakistan // *Information Development*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1177/02666669241305379>.
118. Naikar S., Paul M. The Future Role of Smart Libraries in 21st Century: A Study // *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2025. Vol. 12. P. 756–763. DOI: 10.6084/m9.jetir.JETIR2501199. URL: <https://www.jetir.org/view?paper=JETIR2501199> (Last accessed: 18.07.2025).
119. Zhou Q. Smart library architecture based on Internet of Things (IoT) and Software Defined Networking (SDN) // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 3. Article e25375. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25375>.

120. Molaro A., White L. L. (eds.) The Library Innovation Toolkit: Ideas, Strategies, and Programs. Chicago : American Library Association, 2015. 208 p. eISBN (ePub): 978-0-8389-1259-1.
121. Design Kit: The Human-Centered Design Toolkit // IDEO - A Global Design & Innovation Company.
URL: <https://www.ideo.com/journal/design-kit-the-human-centered-design-toolkit> (Last accessed: 02.08.2025).
122. Ideas of Things / D. De Roeck et al. // DIS '19: Designing Interactive Systems Conference 2019. San Diego CA USA. New York, NY, USA, 2019.
URL: <https://doi.org/10.1145/3301019.3323888>.
123. Home Assistant // Home Assistant. URL: <https://www.home-assistant.io/> (Last accessed: 19.08.2025).
124. Low-code programming for event-driven applications. // Node-RED.
URL: <https://nodered.org/> (Last accessed: 19.08.2025).
125. Grafana - Home Assistant Community Add-ons // GitHub - hassio-addons/addon-grafana.
URL: <https://github.com/hassio-addons/addon-grafana> (Last accessed: 19.08.2025).
126. Smart Home Made Simple // ESPHome. URL: <https://esphome.io/> (Last accessed: 19.08.2025).
127. Гарагуля С. С. Електронна бібліотека як інтегратор джерел наукової інформації : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. наук із соц. комун. : спец. 27.00.03 "Книгознавство, бібліотекознавство, бібліографознавство", 27 "Соціальні комунікації" / Сергій Сергійович Гарагуля ; Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. К., 2018. 19 с.
128. Prosek T. et al. Real-time monitoring of indoor air corrosivity in cultural heritage institutions with metallic electrical resistance sensors // Studies in

- conservation. 2013. № 58.2. P. 117-128.
URL: https://www.institut-corrosion.fr/wp-content/uploads/2018/03/AirCorr-Paper.pdf?utm_source=chatgpt.com.
129. Мар'їна О. Ю. Бібліотека в цифровому просторі : монографія / Харків. держ.акад. культури. Харків : ХДАК, 2017. 326 с.
130. Антоненко Д, Каракоз О. Smart-бібліотека: технологічні підходи // Collection of scientific papers «SCIENTIA». 2024. Athens. P. 398-401.
131. Процес якісної інформаційної підтримки освіти та досліджень у бібліотеці університету: рекомендації для впровадження моделі / розробники: Бруй Оксана, Кулик Євгенія, Сербін Олег ; за заг. ред. Сошинської Ярослави ; ВГО Українська бібліотечна асоціація ; Науково-технічна бібліотека КПІ ім. Ігоря Сікорського ; Наукова бібліотека імені М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ : УБА, 2020. 25 с.
132. Бондаренко В., Гранчак, Т. Бібліотечний мобільний сервіс як основа функціонування бібліотеки 4.0 // Бібліотечний вісник. 2021. № 2. С. 17-29.
133. Кунанець Н. Е., Липак Г. І., Жолна Д. Ю. Віртуальна реальність у бібліотеках: аналіз можливостей та викликів // Вісник Харківської державної академії культури. 2024. № 65. С. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.065.06>.
134. Липак Г., Кунанець Н., Дуда О. Побудова інтерфейсів користувача вебсайту бібліотеки на засадах UX-дизайну // Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері. 2025. № 8 (1). С. 172–192. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-796X.8.1.2025.335539>.
135. Івашкевич О. В. Штучний інтелект в акустиці функціонування книгозбірень України // Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія. 2023. № 2. С. 97-101.

136. Asim M., Arif M., Rafiq M. Applications of Internet of Things in university libraries of Pakistan: An empirical investigation // *The Journal of Academic Librarianship*. 2022. №48(6). 102613. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S009913332200129X?utm_source=chatgpt.com
137. Gaikwad S., Kapure V., Joshi O., Kale S. Shelf Smart Library Management System Using RFID tags and IOT // Available at SSRN 5136057. January 12, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5136057>.
138. Meesad P., Mingkhwan A. Emerging Technologies in Smart Digital Libraries // *Libraries in Transformation. Studies in Big Data*. 2024. vol 157. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69216-1_7.
139. Bradley J., Tomlin P., Mathews B. Building intelligent infrastructures: steps toward designing IoT-enabled library facilities // *Library Technology Reports*. 2018. № 54(1). P. 23-27.
140. Martínez-Camacho H. Smart libraries as promoters of development in the smart city context: A smart library infrastructure model proposal // *AI-Centric Smart City Ecosystems*. CRC Press. 2022. P. 209-230.
141. Kulkarni S., Balaji B. P., Dhananjaya M. Exploring best practices in smart public library services: a survey // *Library Hi Tech News*. 2025. № 42(2), P. 8-11.
142. Кунанець Н., Липак Г., Білоусова Р. Формування віртуальних просторів сучасних бібліотек: тенденції та виклики // *Наукові праці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського*. 2024. Вип. 72. С. 246-273. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001547804> (дата звернення: 12.12.2024).
143. Антоненко Д. «Smart-бібліотека» як інноваційний бібліотекознавчий термін // *Вісник Харківської державної академії культури*. 2024. № 66, С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.07>

144. Борисов О. О. Компаративний аналіз підходів до інтеграції інтернету речей у сучасній бібліотечно-інформаційній діяльності // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 63. С. 131-139. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.063.09>.
145. Borysov O. Implementation of the Internet of Things in the Global Library Environment: Bibliometric Analysis // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 64. С. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.064.08>.
146. Borysov O. Scientific Publications' Bibliometric Analysis of Application-Level TCP/IP Models' Communication Protocols for The Internet of Things // Вісник Харківської державної академії культури. 2024. № 66. С. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.02>.
147. Борисов О. О. Застосування технологій та засобів Інтернету речей у сучасних бібліотеках // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 17-18 листоп. 2022 р. Харків, 2022. С. 158-159.
148. Борисов О. О. Досвід впровадження технологій Інтернету речей у бібліотеках світу: огляд інновацій // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 20-21 квітня 2023 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2023. С. 167-170.
149. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотеках: аналітичний огляд міжнародної наукової кооперації та перспектив // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку: матер. міжнар. наук. конф., 22-23 листоп. 2023 р. У 2 ч. Ч. 1. Харків: ХДАК, 2023. С. 186-188.
150. Borysov O. Optimizing IoT Integration in Libraries: Comparative Evaluation of Wired and Wireless Network Solutions // Культурологія та соціальні комунікації:

- інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., 21-22 листоп. 2024 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2024. С. 193-195.
151. Борисов О. О. Цифрова трансформація бібліотек: роль штучного інтелекту та Інтернету речей у створенні інноваційних інформаційних сервісів // *Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених*, 17-18 квіт. 2025 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2025. С. 210-212.
152. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві України: результати емпіричного опитування та соціально-комунікаційні перспективи впровадження // *Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф.*, 20–21 листоп. 2025 р. У 2 ч. Ч. 1. Харків : ХДАК, 2025. С. 225-227.
153. Borysov O. Datafication as an instrument of strategic management in libraries under the integration of internet of things technologies // *Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених*, 16-17 квіт. 2026 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2026. С. 239-241.
154. Добровольська В. В., Ляховченко В. Е. Штучний інтелект як інструмент модернізації публічних бібліотек // *Культура, інформація, комунікація: міждисциплінарний діалог: матеріали всеукр. наук. конф.*, з міжн. участю, 10 квіт. 2025 р. Київ: НАКККиМ, С. 128-129.
155. Cherednyk, L., Tkachenko, N., Dobrovolska, V., Dumanskyi, N., Sprinsyan, V., Shevchenko, O., & Slobodtsova, I. Libraries of Ukraine as Centers of Digital Art Events: Transformation of Functions and New Formats of Cultural Communication // *SCIA-2025: 4th International Workshop on Social Communication and Information Activity in Digital Humanities*, October 30, 2025, Lviv, Ukraine. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4107/paper8.pdf>.

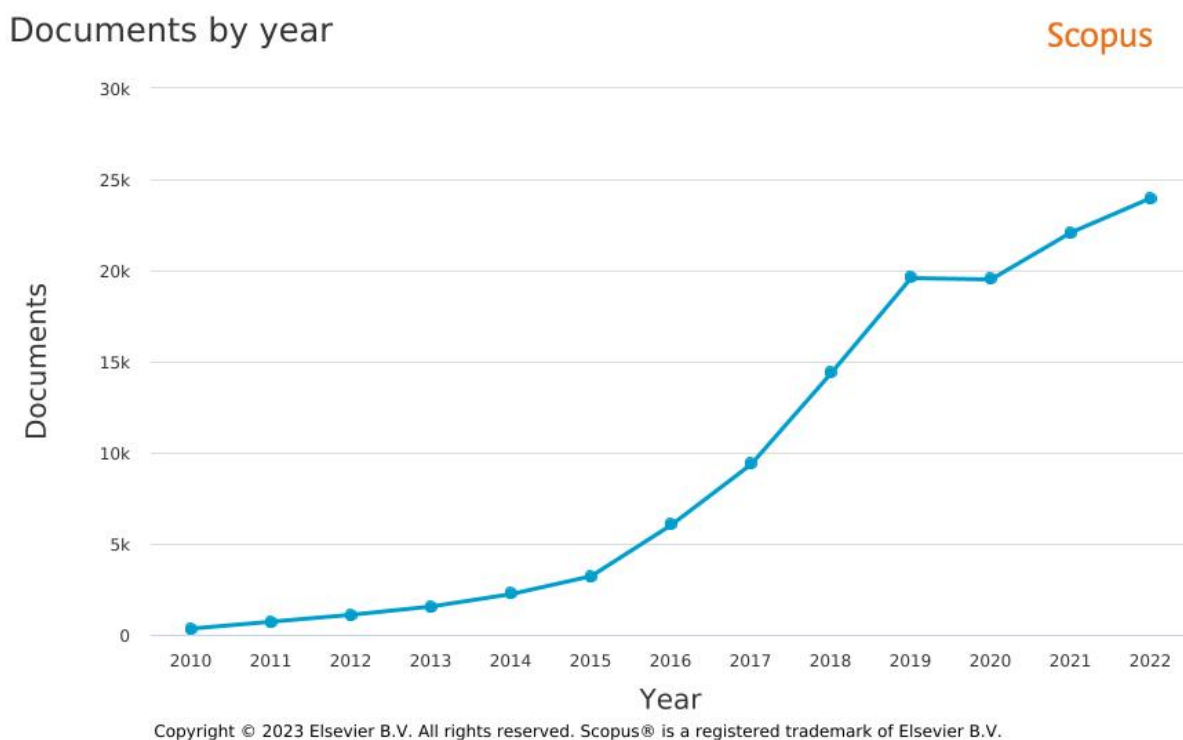
156. Давидова І. О. Бібліотечне виробництво в інформаційному суспільстві : монографія. Харків : ХДАК, 2005. 295 с.
157. Воскобойнікова-Гузєва О. В. Стратегії розвитку бібліотечно-інформаційної сфери України: генезис, концепції, модернізація : монографія / НАН України, Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського ; наук. ред. Г. І. Ковальчук. Київ : Академперіодика, 2014. 362 с.
158. Лобузїна К. Технології організації знаннєвих ресурсів у бібліотечно-інформаційній діяльності : монографія / відп. ред. О. С. Онищенко ; НАН України, Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. Київ, 2012. 252 с.
159. Лобузін І. Цифрові бібліотечні проекти: технологічні рішення та управління життєвим циклом колекції : монографія / відп. ред. В. А. Широков; НАН України, Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. Київ, 2016. 216 с.

**Результати бібліометричного аналізу публікацій за ключовими словами
«Internet of Things»**

Таблиця 1.

*Кількість публікацій за тематикою «Інтернет речей» за період
з 2010 до 2022 р.*

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Кількість публікацій	329	718	1093	1544	2237	3211	6041	9357	14360	19617	19530	22078	23948



*Рис. 1. Динаміка кількості публікацій за тематикою «Інтернет речей»
за період з 2010 до 2022 р.*

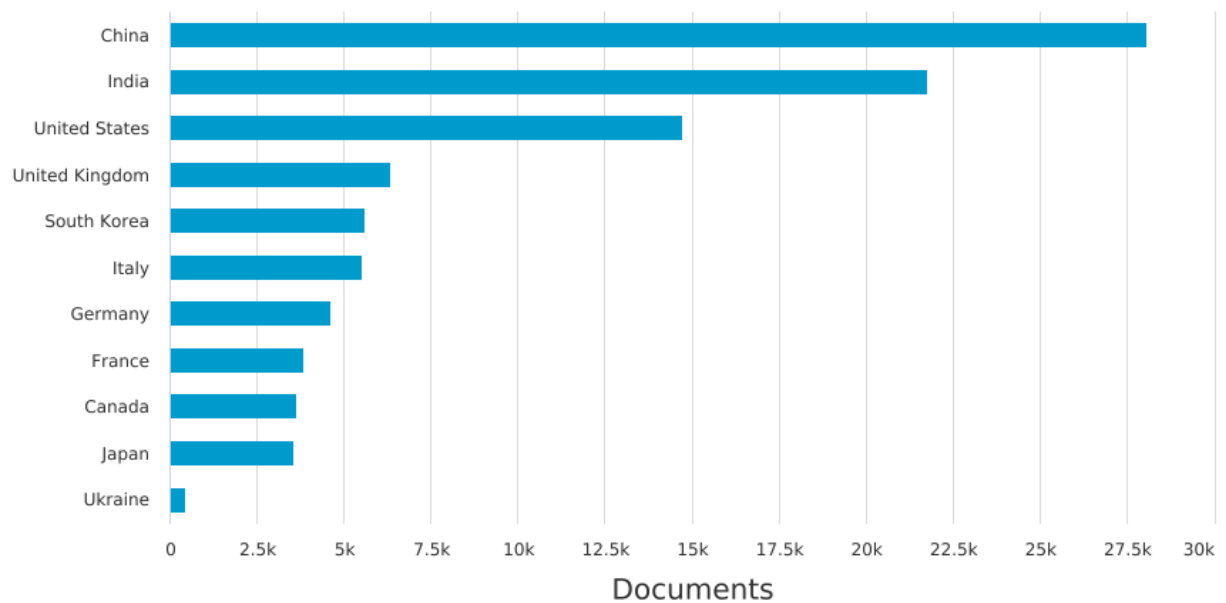
Топ 10 країн за кількістю публікацій за тематикою Інтернету речей

Позиція	Країна	Кількість публікацій	Доля від загальної кількості
1	Китай	28020	22,6%
2	Індія	21736	17,5%
3	США	14704	11,9%
4	Великобританія	6313	5,1%
5	Південна Корея	5550	4,5%
6	Італія	5503	4,4%
7	Німеччина	4591	3,7%
8	Франція	3806	3,1%
9	Канада	3591	2,9%
10	Японія	3533	2,8%

Documents by country or territory

Scopus

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 2. Особливості географічної структури потоку публікацій за тематикою «Інтернет речей» за 2010 - 2022 рр.

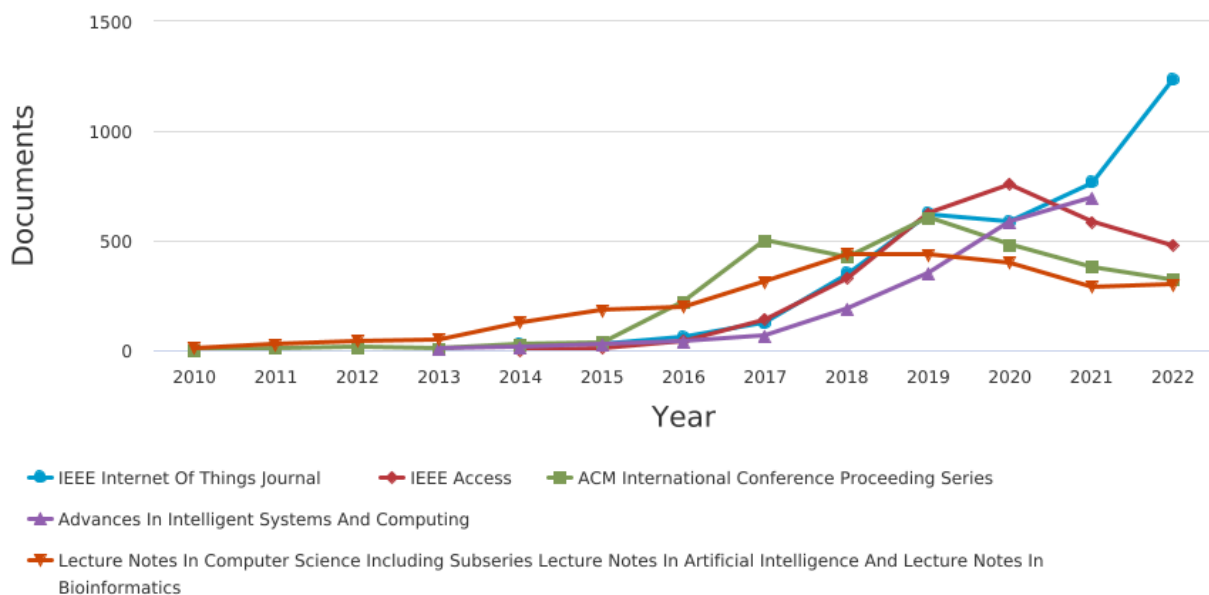
Топ 5 журналів за кількістю публікацій щодо проблематики Інтернету речей

Поз.	Видання (Країна походження, квартал, SCImago Journal & Country Rank)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	IEEE Internet of Things Journal (США, Q1, SJR 3.747)					28	26	59	125	350	622	587	763	1236
2	ACM International Conference Proceeding Series (США, -, SJR 0.209)	1	11	14	9	26	36	221	503	427	605	483	381	324
3	IEEE Access (США, Q1, SJR 0.926)					1	12	43	140	329	624	759	585	480
4	Lecture Notes in Computer Science (Німеччина, Q3, SJR 0.32)	12	26	43	49	127	184	200	313	439	437	400	291	301
5	Advances in Intelligent Systems and Computing (Німеччина, Q4, SJR 0.215)				8	13	26	40	66	190	352	586	696	

Documents per year by source

Scopus

Compare the document counts for up to 10 sources. Compare sources and view CiteScore, SJR, and SNIP data



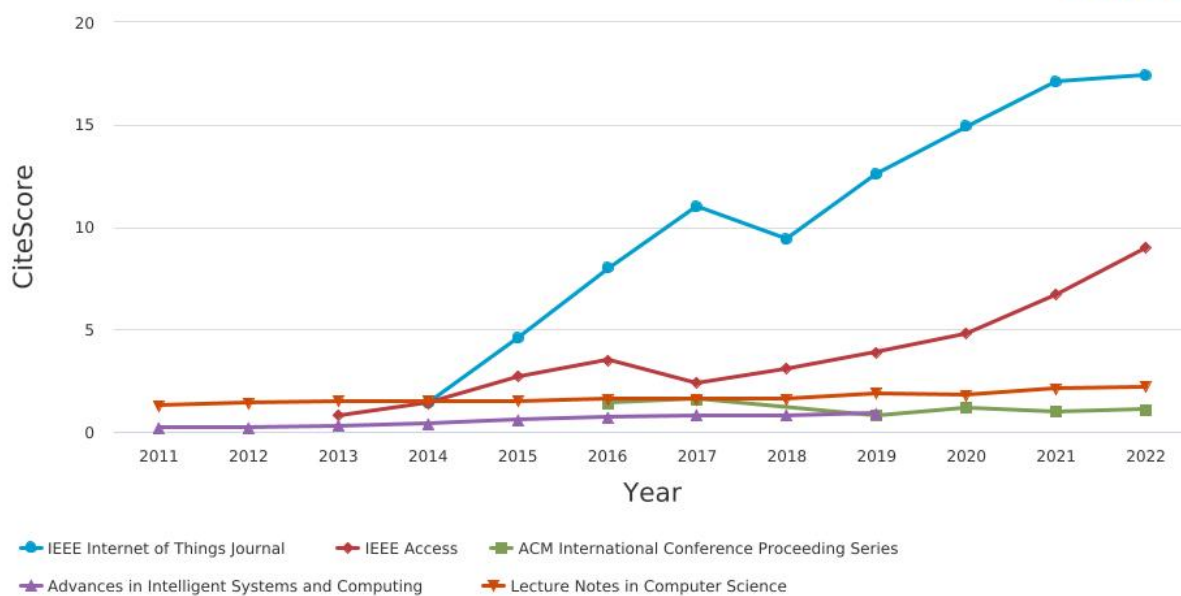
Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 3. Динаміка кількості публікацій у Топ 5 наукових журналів

Ранжування CiteScore Top 5 видань за тематикою «Інтернет речей»

Поз.	Видання	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	IEEE Internet of Things Journal				1.4	4.6	8	11	9.4	12.6	14.9	17.1	17.4
2	IEEE Access			0.8	1.4	2.7	3.5	2.4	3.1	3.9	4.8	6.7	9
3	Lecture Notes in Computer Science	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.9	1.8	2.1	2.2
4	ACM International Conference Proceeding Series						1.4	1.6		0.8	1.2	1	1.1
5	Advances in Intelligent Systems and Computing	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9			

CiteScore publication by year CiteScore Help (opens in new window) Scopus

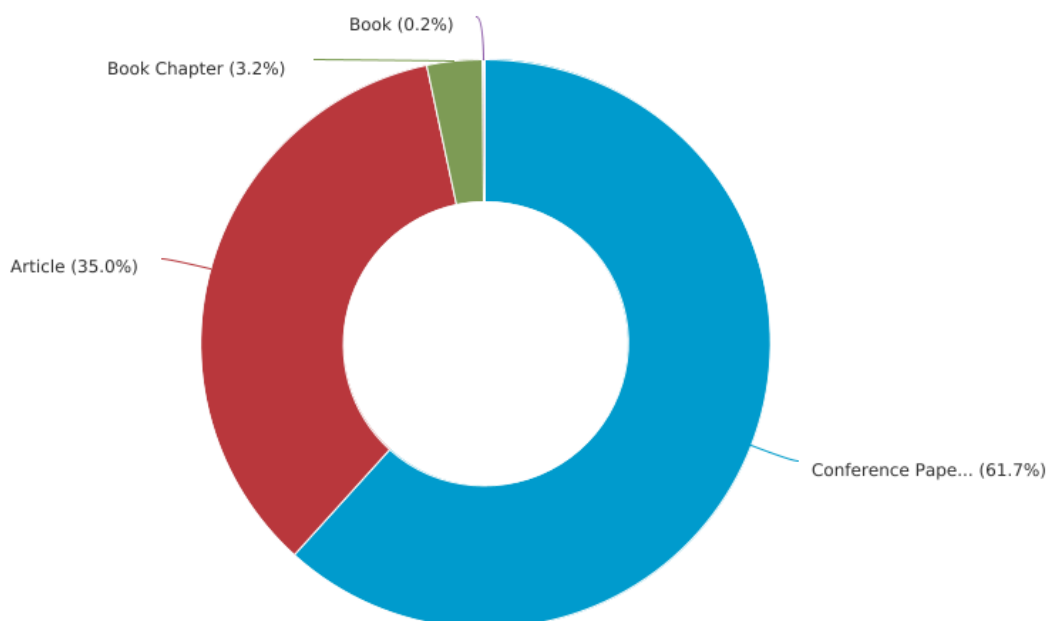


Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 4. Динаміка розвитку фактору впливу Top 5 видань за тематикою «Інтернет речей»

Documents by type

Scopus



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 5. Особливості видової структури потоку публікацій з проблематики Інтернету речей

Таблиця 5

Співвідношення видів документів з теми «Інтернет речей» у Scopus

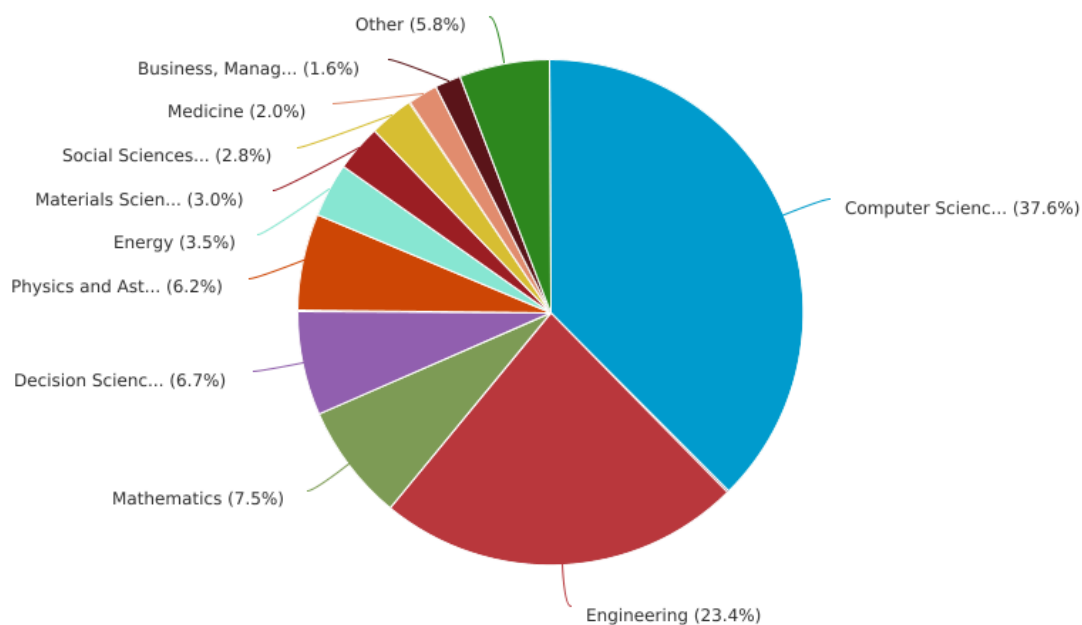
Поз.	Тип документу	Доля публікацій	Кількість публікацій
1	Тези конференцій	61,7%	76565
2	Статті	35,0%	43364
3	Глави книг	3,2%	3940
4	Книги	0,2%	194

Особливості галузевої структури потоку публікацій з проблематики Інтернету речей

Поз.	Галузь знань	Доля публікацій	Кількість публікацій
1	Комп'ютерні науки	37,6%	99205
2	Інженерія	23,4%	61677
3	Математика	7,5%	19689
4	Науки прийняття рішень	6,7%	17748
5	Фізика та астрономія	6,2%	16356
6	Енергетика	3,5%	9146
7	Матеріалознавство	3,0%	7873
8	Соціальні науки	2,8%	7494
9	Медицина	2,0%	5178
10	Бізнес, менеджмент та бухгалтерський облік	1,6%	4346
	Інше	5,8%	11021

Documents by subject area

Scopus



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 6. Галузева структура потоку публікацій з проблематики Інтернету речей

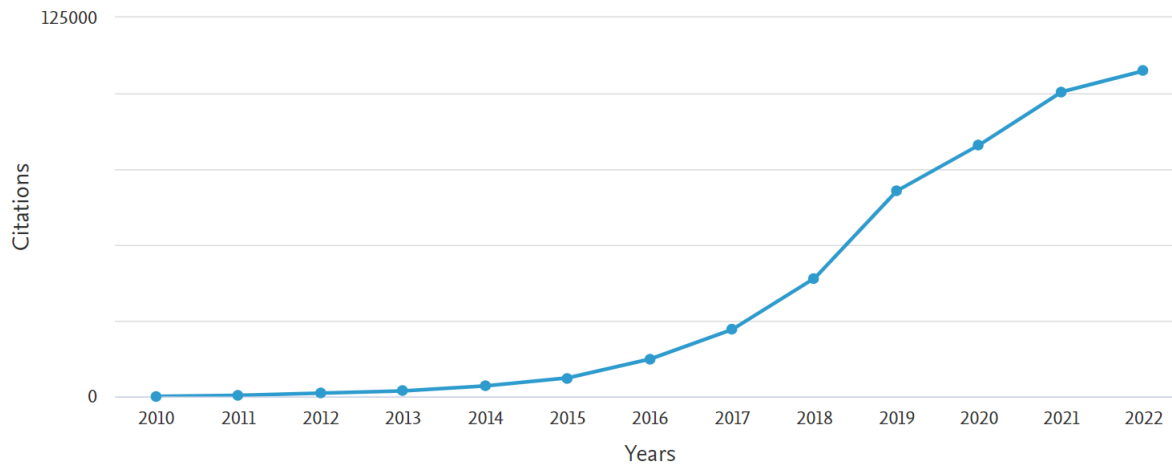


Рис. 7. Динаміка кількості цитувань за тематикою «Інтернет речей» за період з 2010 до 2022 рр.

Таблиця 7

10 найцитованіших статей за тематикою «Інтернет речей» за період з 2010 по 2022 рр. згідно даних Scopus

№	Автори/Рік	Кількість та країни дослідників	Назва статті	Видання	Кількість цитувань
1	Atzori L., Iera A., Morabito G. (2010)	3 Італія	The Internet of Things: A survey	Computer Networks	10264
2	Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. (2013)	4 Австралія	Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions	Future Generation Computer Systems	7864
3	Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. (2015)	4 США 1 Катар	Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications	IEEE Communications Surveys and Tutorials	5042
4	Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. (2012)	4 США	Fog computing and its role in the internet of things	MCC'12 - Proceedings of the 1st ACM Mobile Cloud Computing Workshop	4381

5	Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. (2016)	4 США	Edge Computing: Vision and Challenges	IEEE Internet of Things Journal	4136
6	Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. (2014)	4 Італія	Internet of things for smart cities	IEEE Internet of Things Journal	3933
7	Bobadilla J., Ortega F., Hernando A., Gutierrez A. (2013)	3 Іспанія	Recommender systems survey	Knowledge-Based Systems	2202
8	Chen M., Mao S., Liu Y. (2014)	2 Китай 1 США	Big data: A survey	Mobile Networks and Applications	2100
9	Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., Wang H. (2017)	4 Китай 1 Макао	An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends	Proceedings - 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, BigData Congress 2017	2063
10	Islam S.M.R., Kwak D., Kabir M.H., Hossain M., Kwak K.-S. (2015)	3 Південна Корея 2 США	The internet of things for health care: A comprehensive survey	IEEE Access	1808

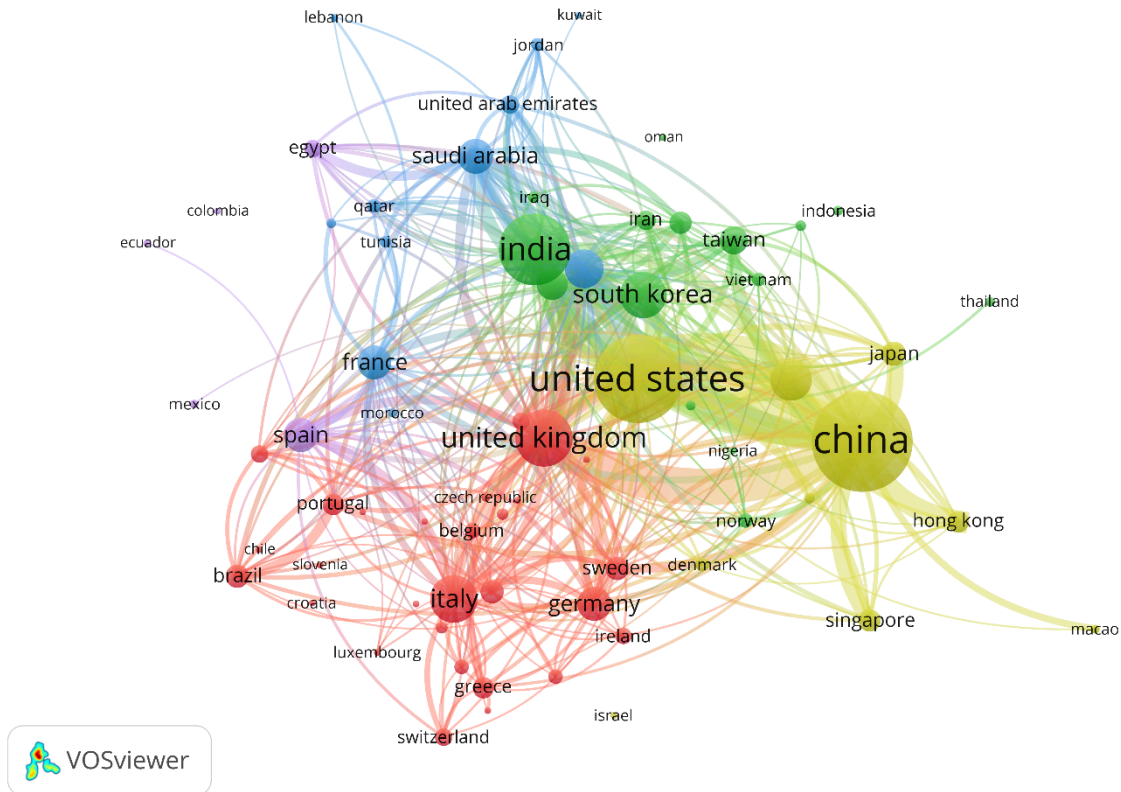


Рис. 8. Візуалізація мережі досліджень за тематикою «Інтернет речей» між країнами

Таблиця 8

Топ 10 країн за кількістю цитувань з урахуванням співавторської взаємодії

Поз.	Країна	Кількість публікацій	Кількість цитувань	Загальна міцність ланки	Середня кількість цитувань публікації
1	Китай	4722	287907	2691	60,97
2	США	3768	276502	2108	73,38
3	Велика Британія	1827	115467	1287	63,20
4	Індія	2687	132979	1041	49,49
5	Австралія	1108	85089	914	76,80
6	Південна Корея	1289	72912	786	56,56
7	Саудівська Аравія	812	42076	782	51,82
8	Канада	960	59340	746	61,81
9	Пакистан	664	35457	686	53,40
10	Італія	1345	99043	385	73,64

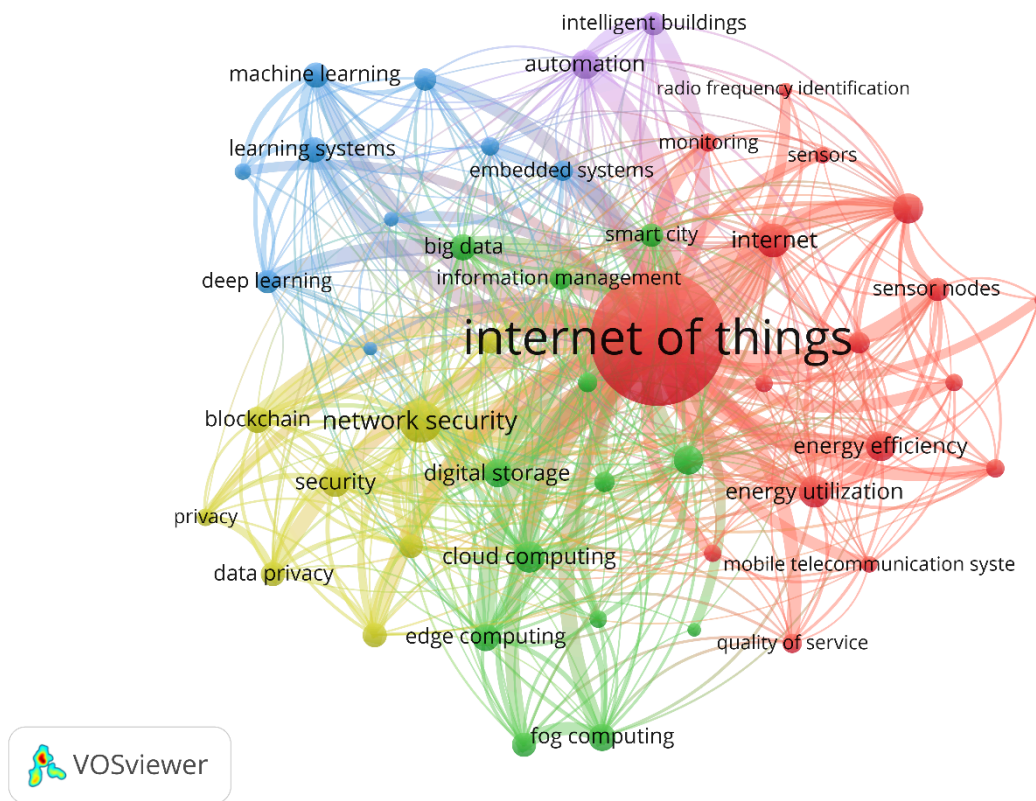


Рис. 9. Візуалізація мережі 50 найбільш вживаних ключових слів у публікаціях, присвячених Інтернету речей

Таблиця 9

Топ 20 ключових виразів у публікаціях за тематикою «Інтернет речей»

Поз.	Ключові слова	Випадки	Загальна міцність ланки
1	internet of things	26847	78480
2	network security	2197	8844
3	internet	2138	6653
4	energy utilization	1489	5998
5	energy efficiency	1460	5594
6	wireless sensor networks	1359	5555
7	automation	1310	5372
8	network architecture	1171	5156
9	digital storage	1147	5067

10	cloud computing	1117	4981
11	big data	1068	4287
12	edge computing	1014	4252
13	cryptography	978	4085
14	blockchain	1175	4066
15	learning systems	1035	4027
16	security	908	3986
17	fog	816	3959
18	sensor nodes	968	3951
19	intelligent buildings	860	3899
20	authentication	882	3781

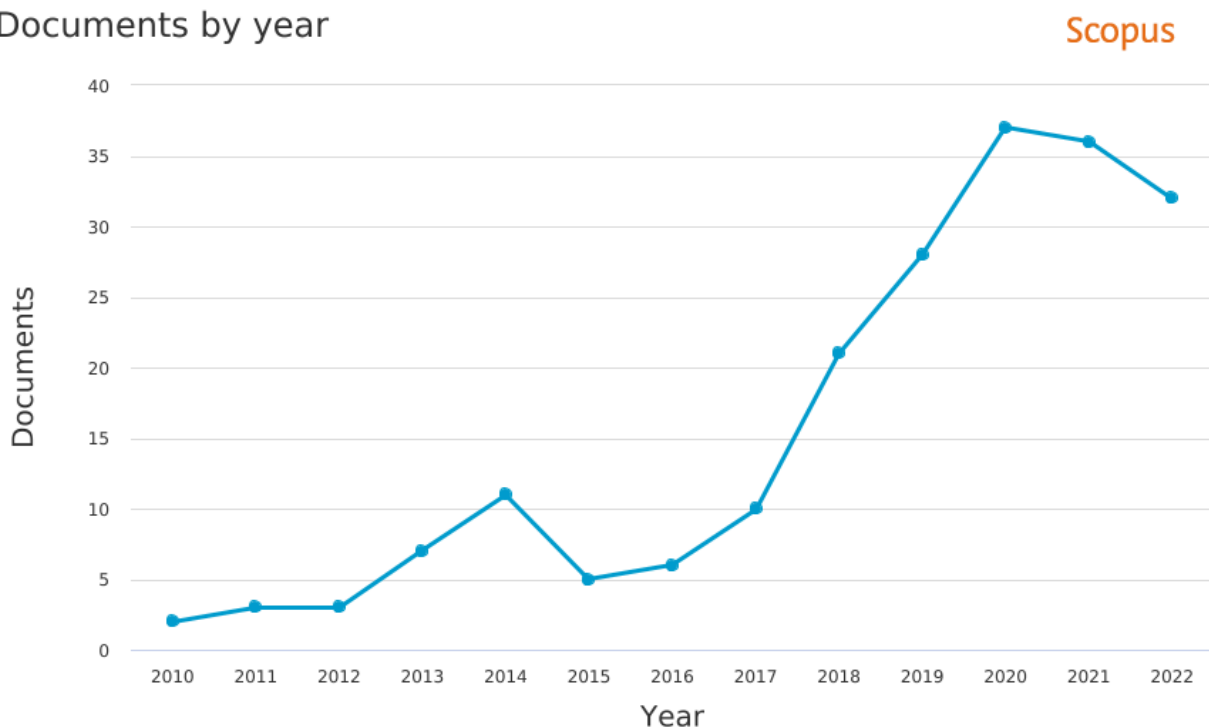
**Бібліометричний аналіз результатів пошуку за ключовими словами
«Internet of Things» та «library»**

Таблиця 10

Кількість публікацій за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» в
період з 2010 до 2022 р. (за даними Scopus)

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Кількість публікацій	2	3	3	7	11	5	6	10	20	28	37	36	32

Documents by year



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 10. Динаміка кількості публікацій за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» в період з 2010 до 2022 рр.

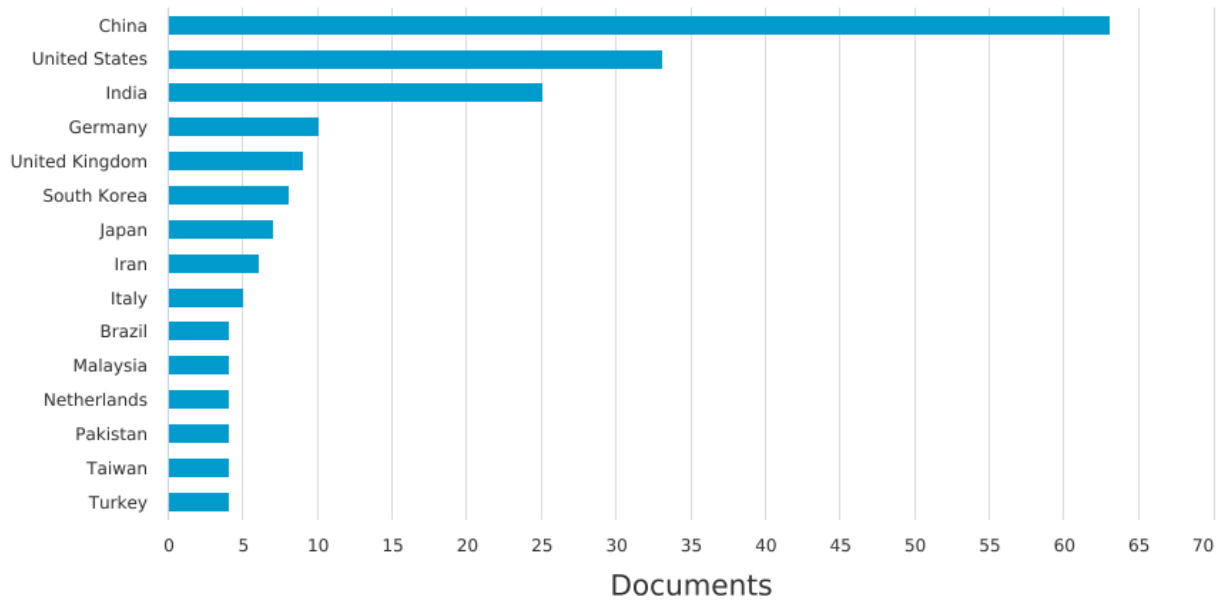
Топ 10 країн за кількістю публікацій за тематикою
Інтернету речей в бібліотечній справі

Позиція	Країна	Кількість публікацій	Доля від загальної кількості
1	Китай	63	31,5%
2	США	33	16,5%
3	Індія	25	12,5%
4	Німеччина	10	5,0%
5	Великобританія	9	4,5%
6	Південна Корея	8	4,0%
7	Японія	7	3,5%
8	Іран	6	3,0%
9	Італія	5	2,5%
10	Бразилія	4	2,0%
10	Малайзія	4	2,0%
10	Нідерланди	4	2,0%
10	Пакистан	4	2,0%
10	Тайвань	4	2,0%
10	Туреччина	4	2,0%

Documents by country or territory

Scopus

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 11. Розподілення належності публікацій з 2010 до 2022 р. до країн світу за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі»

Таблиця 12

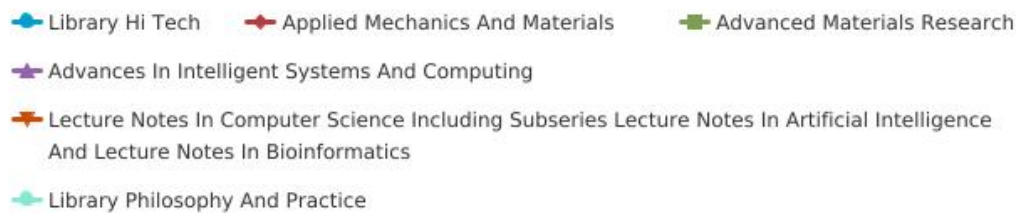
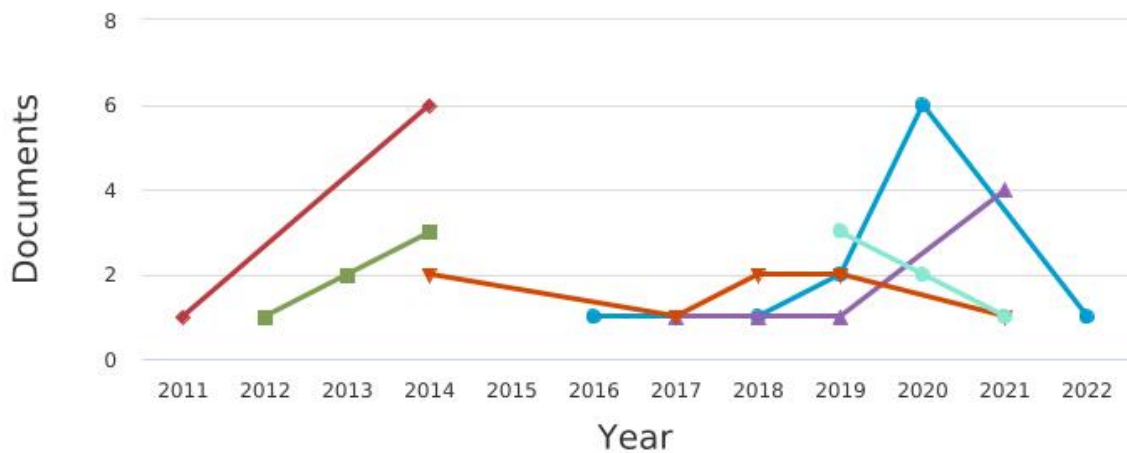
Топ 5 журналів за кількістю документів за тематикою Інтернету речей у бібліотечній справі

Поз.	Видання (Країна походження, кuartиль, SCImago Journal & Country Rank)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
		1	Library Hi Tech (Великобританія, Q2, SJR 0.507)						1		1	2	6
2	Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics (Німеччина, Q3, SJR 0.32)				2			1	2	2		1	
3	Advances In Intelligent Systems and Computing (Німеччина, Q4, SJR 0.215)							1	1	1		4	
4	Applied Mechanics and Materials (Німеччина, -, SJR 0.112)	1			6								
5	Library Philosophy and Practice (США, -, SJR 0.233)									3	2	1	

Documents per year by source

Scopus

Compare the document counts for up to 10 sources. Compare sources and view CiteScore, SJR, and SNIP data



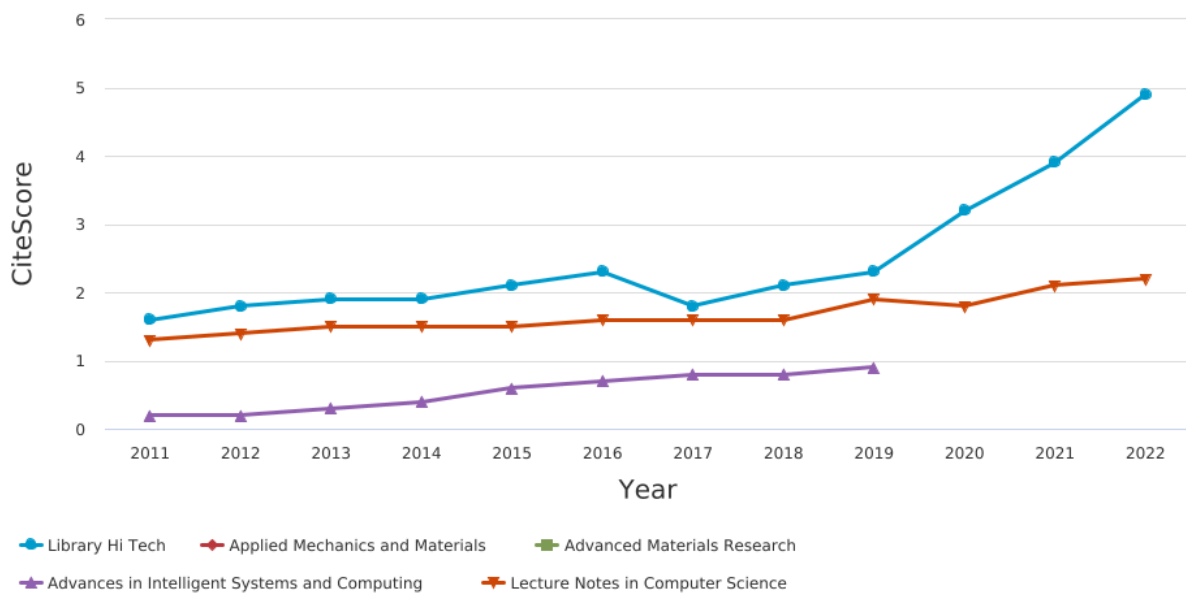
Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 12. Динаміка кількості публікацій за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» у Топ 5 наукових виданнях

Ранжування CiteScore Топ 5 видань за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі»

Поз.	Видання	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Library Hi Tech	1.6	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3	1.8	2.1	2.3	3.2	3.9	4.9
2	Lecture Notes in Computer Science	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.9	1.8	2.1	2.2
3	Advances In Intelligent Systems And Computing	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9			
4	Applied Mechanics And Material	Не задовольняє критеріям методів розрахунку CiteScore											
5	Library Philosophy and Practice	Не задовольняє критеріям методів розрахунку CiteScore											

CiteScore publication by year CiteScore Help (opens in new window) **Scopus**

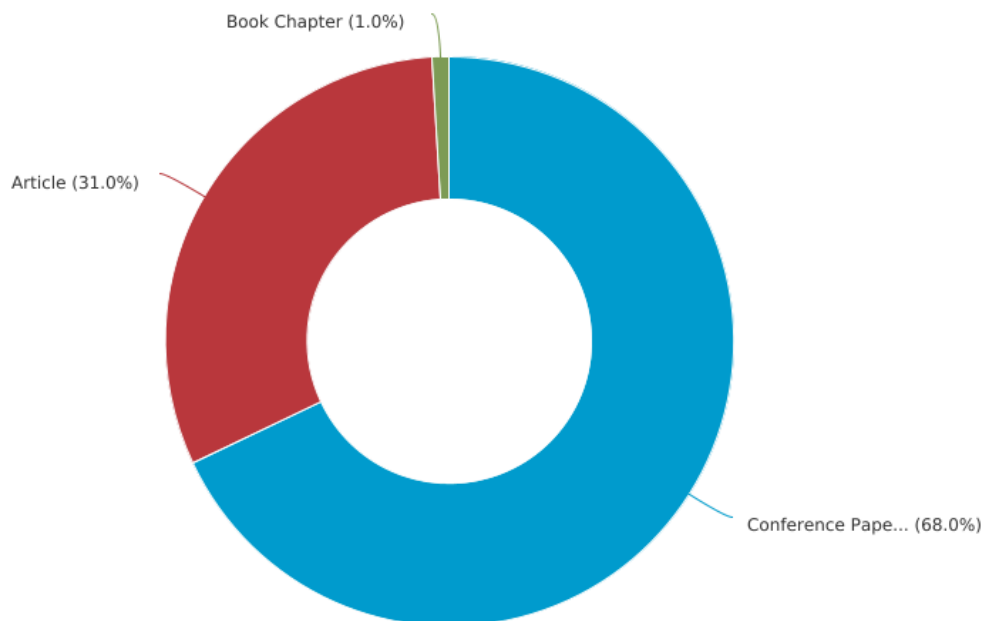


Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 13. Динаміка розвитку фактору впливу Топ 5 видань за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі»

Documents by type

Scopus



Copyright © 2023 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Рис. 14. Діаграма співвідношення видів документів напрямку «Інтернет речей в бібліотечній справі» у Scopus

Таблиця 14

Співвідношення видів документів напрямку «Інтернет речей в бібліотечній справі» у Scopus

Поз.	Тип документу	Доля публікацій	Кількість публікацій
1	Тези конференцій	68%	136
2	Статті	31%	62
3	Глави книг	1%	2

Розподіл публікацій на тематику «Інтернет речей в бібліотечній справі»
відносно галузей наук

Поз.	Галузь знань	Доля публікацій	Кількість публікацій
1	Комп'ютерні науки	35,6%	154
2	Інженерія	22,9%	99
3	Математика	9,5%	41
4	Соціальні науки	8,6%	37
5	Науки прийняття рішень	6,9%	30
6	Фізика та астрономія	5,3%	23
7	Енергетика	2,5%	11
8	Матеріалознавство	2,5%	11
9	Медицина	1,6%	7
10	Мистецтво та гуманітарні науки	1,6%	7
	Інше	2,8%	12

Documents by subject area

Scopus

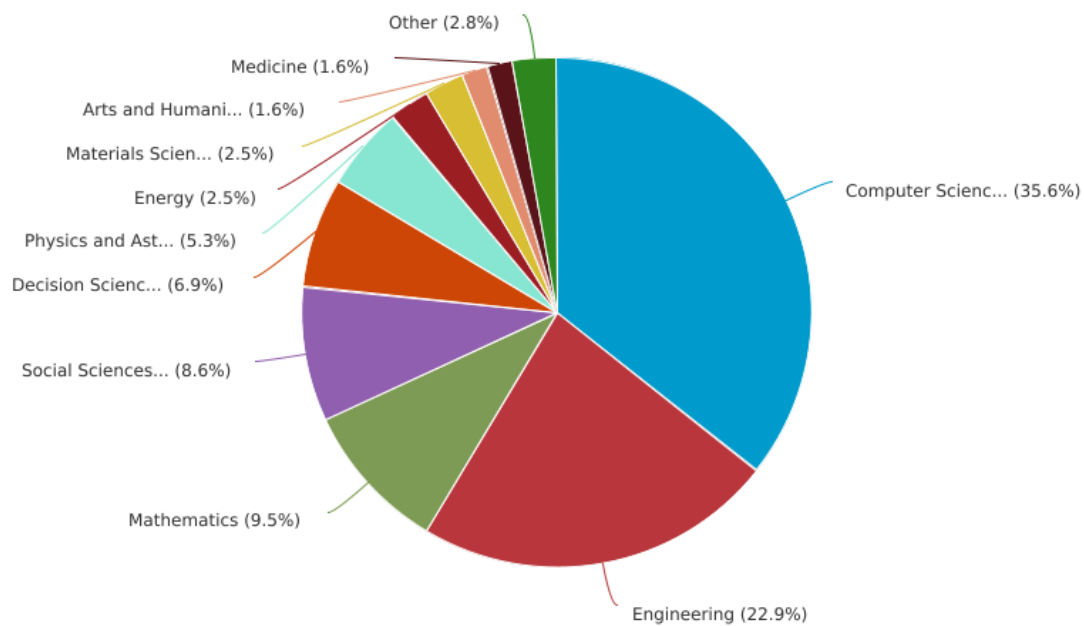


Рис. 15. Діаграма розподілу публікацій на тематику «Інтернет речей»

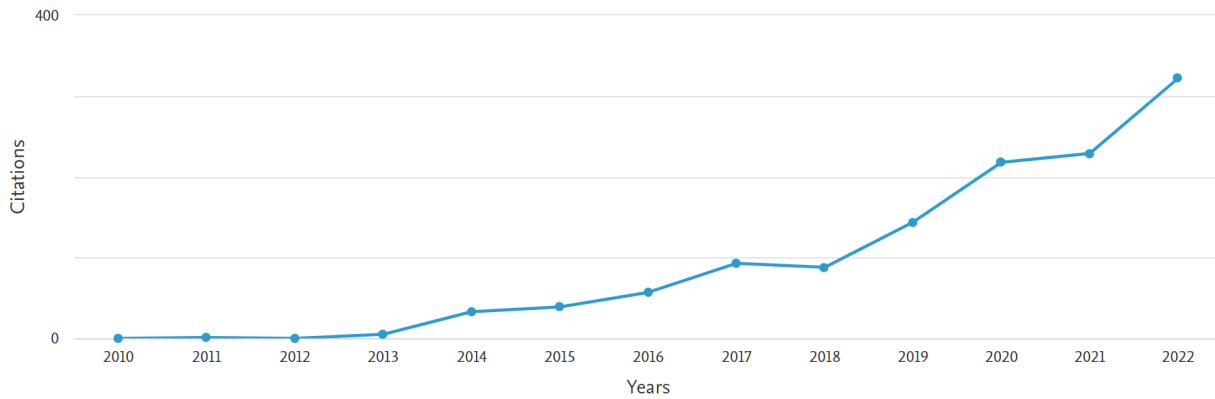


Рис. 16. Графік динаміки кількості цитувань за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» за період з 2010 до 2022 рр.

Таблиця 16

10 найцитованіших публікацій за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» за період з 2010 по 2022 роки згідно даних Scopus

№	Автори/Рік	Кількість та країни дослідників	Назва статті	Видання	Кількість цитувань
1	Wang J., Katabi D. (2013)	2 США	Dude, where's my card? RFID positioning that works with multipath and non-line of sight	Computer Communication Review, SIGCOMM 2013 - Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication	458
2	Gul S., Bano S. (2019)	2 Індія	Smart libraries: an emerging and innovative technological habitat of 21st century	Electronic Library	35

3	Wojcik M. (2016)	1 Польща	Internet of Things – potential for libraries	Library Hi Tech	42
4	Li D.Y., Xie S.D., Chen R.-J., Tan H.-Z. (2016)	3 Китай	Design of Internet of Things System for Library Materials Management using UHF RFID	2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2016	29
5	Pujar S.M., Satyanarayana K.V. (2015)	2 Індія	Internet of things and libraries	Annals of Library and Information Studies	28
6	Renold A.P., Rani R.J. (2013)	2 Індія	An internet-based RFID library management system	2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies, ICT 2013	27
7	Hoy M.B. (2016)	1 США	Smart Buildings: An Introduction to the Library of the Future	Medical Reference Services Quarterly	20
8	Virkus S., Garoufallou E. (2019)	1 Естонія 2 Греція	Data science from a library and information science perspective	Data Technologies and Applications	19
9	MacDonald K.I., Dressler V. (2018)	1 США	Using Citation Analysis to Identify Research Fronts: A Case Study with the Internet of Things	Science and Technology Libraries	17
10	Andrews J.E., Ward H., Yoon J. (2021)	2 США 1 Південна Корея	UTAUT as a Model for Understanding Intention to Adopt AI and Related Technologies	Journal of Academic Librarianship	11

			among Librarians		
--	--	--	------------------	--	--

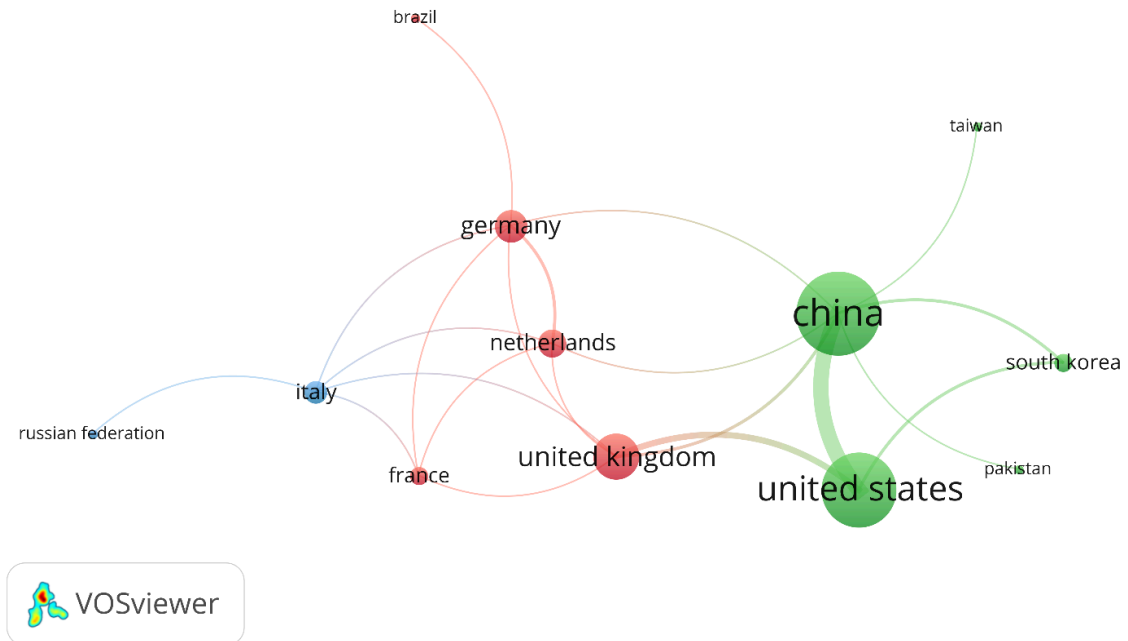


Рис. 17. Візуалізація мережі досліджень за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі» між країнами

Таблиця 17

Топ 10 країн за кількістю цитувань з урахуванням співавторської взаємодії

Поз.	Країна	Кількість публікацій	Кількість цитувань	Загальна міцність ланки	Середня кількість цитувань публікації
1	Китай	63	328	18	5,21
2	США	33	705	16	21,36
3	Великобританія	9	16	10	1,78
4	Німеччина	10	22	7	2,20
5	Нідерланди	4	25	6	6,25
6	Франція	3	3	4	1,00
7	Італія	5	28	5	5,60
8	Південна Корея	8	41	4	5,13
9	Бразилія	4	21	1	5,25
10	Пакистан	4	12	1	3,00

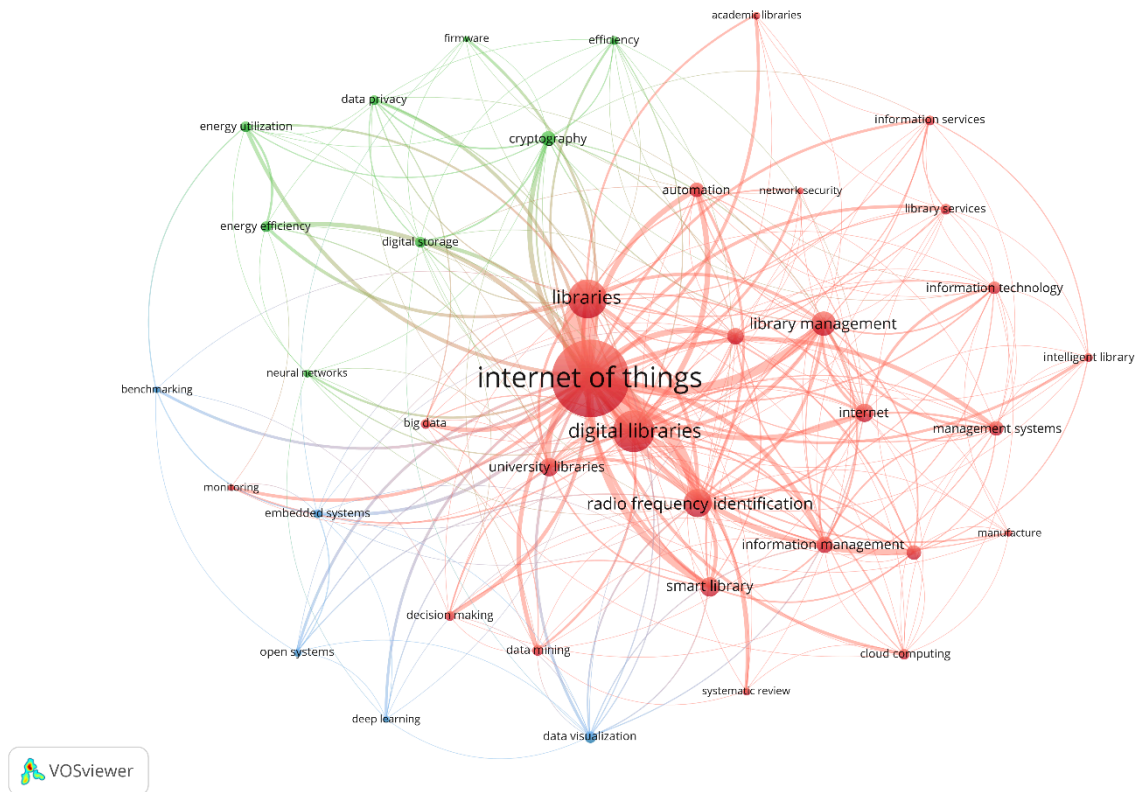


Рис. 18. Візуалізація мережі найбільш вживаних ключових термінів у публікаціях, присвячених Інтернету речей в бібліотечній справі

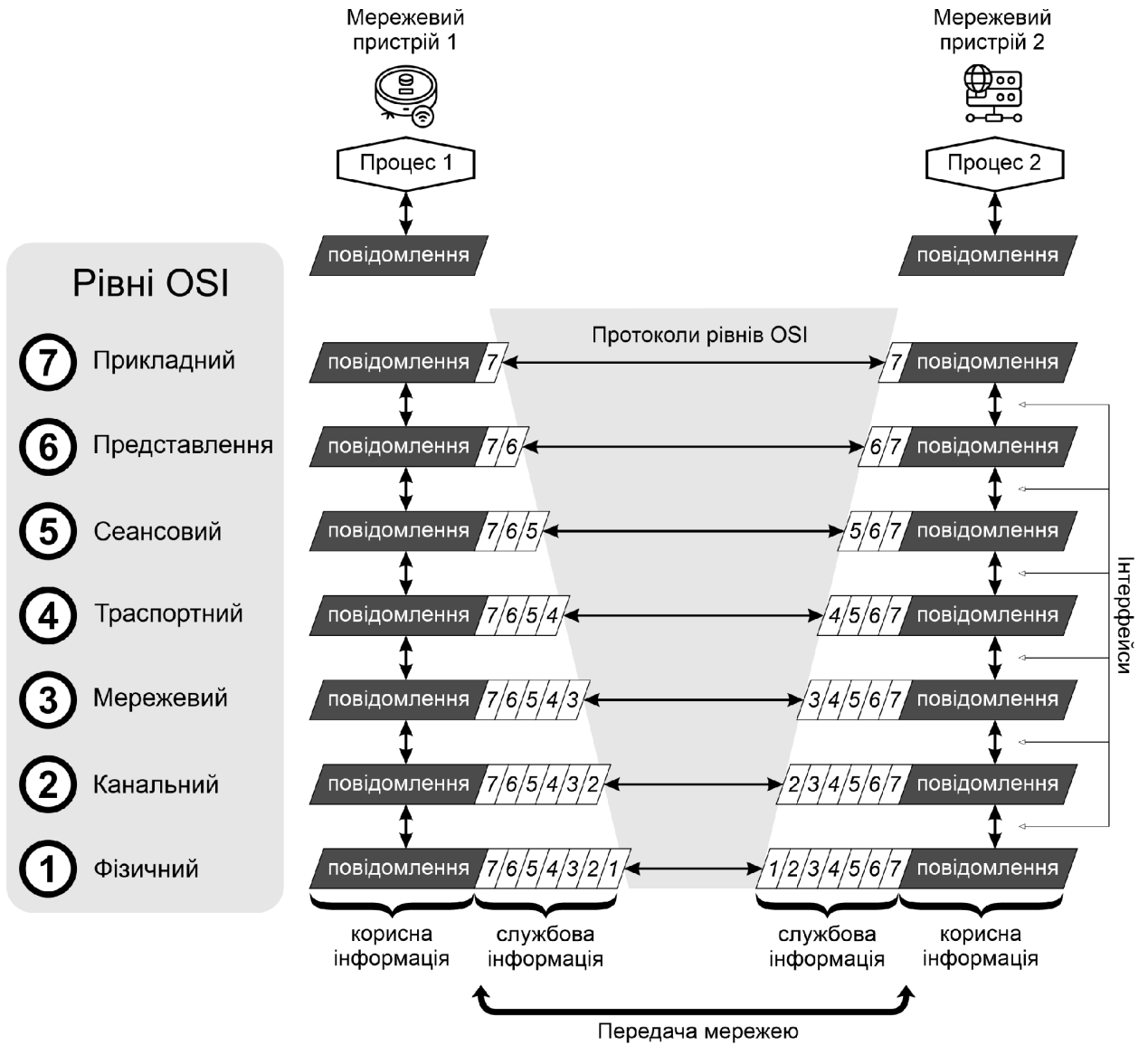
Таблиця 18

Топ 20 ключових виразів у публікаціях за тематикою «Інтернет речей в бібліотечній справі»

Поз.	Ключові слова	Випадки	Загальна міцність ланки
1	internet of things	291	982
2	radio frequency identification (rfid)	59	340
3	libraries	69	247
4	digital libraries	63	214
5	library management	20	107
6	smart library	20	98
7	internet	13	69
8	university libraries	14	66
9	information management	10	56
10	management systems	8	56
11	artificial intelligence	13	55
12	automation	12	51

13	library systems	10	47
14	cryptography	9	46
15	information technology	8	43
16	computer architecture	7	34
17	data visualization	5	34
18	energy efficiency	9	34
19	cloud computing	7	33
20	energy utilization	8	32

Процес мережевої взаємодії відповідно рівням моделі OSI



Додаток Г

Таблиця 22

Технічні характеристики версій стандарту IEEE 802.3

Сімейство	Версія стандарту	Рік	Тип	Швидкість, Мбіт/с	Максимальна довжина сегменту, метри	Тип кабелю
10 Мбіт/с (Ethernet)	IEEE 802.3	1983	10Base5	10	500	коаксіальний
	IEEE 802.3a	1985	10Base2	10	185	
	IEEE 802.3b	1985	10Broad36	10	3600	
	IEEE 802.3e	1987	1Base5	1	250	UTP
			StarLan 10	10	250	
	IEEE 802.3d	1987	FOIRL	10	1000	оптоволоконний
	IEEE 802.3i	1990	10Base-T	10	100	UTP cat.3, cat.5
IEEE 802.3j	1993	10Base-F	10	2000	оптоволоконний	
100 Мбіт/с (Fast Ethernet)	IEEE 802.3u	1995	100Base-FX	100	400	оптоволоконний
			100Base-T	100	100	UTP/STP cat.5
			100Base-T4	100	100	UTP/STP cat.3
			100Base-TX	100	100	UTP/STP cat.5
	IEEE 802.3y	1998	100Base-T2	100	100	UTP cat.3, cat.5
	IEEE 802.3ah	2004	100Base-LX10	100	10000	оптоволоконний
100Base-BX10			100	10000		
1000 Мбіт/с (Gigabit Ethernet)	IEEE 802.3z	1998	1000Base-CX	1000	25	UTP/STP cat.5(e), cat.6
			1000Base-LX	1000	550	оптоволоконний
			1000Base-SX	1000	550	
	IEEE 802.3ab	1999	1000Base-T	1000	100	UTP/STP cat.5(e), cat.6, cat.7
	IEEE 802.3ah	2004	1000BASE-LX10	1000	10000	оптоволоконний
1000BASE-BX10			1000	10000		

	IEEE 802.3ap	2007	1000BASE-KX	1000	1	оптична волоконо-стрічка
10 Гбіт/с (10GbE)	IEEE 802.3ae	2003	10GBASE-SR	10000	300	оптоволоконний
			10GBASE-LX4	10000	10000	
			10GBASE-LR	10000	10000	
			10GBASE-ER	10000	40000	
			10GBASE-SW	10000	40000	
			10GBASE-LW	10000	40000	
			10GBASE-EW	10000	40000	
	IEEE 802.3ak	2004	10GBASE-CX4	10000	15	мідний кабель CX4
	IEEE 802.3an	2006	10GBASE-T	10000	100	UTP/STP cat.6A, cat.7
	IEEE 802.3aq	2006	10GBASE-LRM	10000	220	оптоволоконний
IEEE 802.3ap	2007	10GBASE-KX4	10000	1	оптична волоконо-стрічка	
		10GBASE-KR	10000	1		
IEEE 802.3av	2009	10GBASE-PR	10000	20000	оптоволоконний	
40 и 100 Гбіт/с (40GbE чи 100GbE)	IEEE 802.3ba	2010	40GBase-KR4	40000	1	оптична волоконо-стрічка
			100GBase-KP4	100000	1	
			100GBase-KR4	100000	1	
			40GBase-CR4	40000	7	мідний біаксіальний кабель
			100GBase-CR10	100000	7	
			40GBase-T	40000	30	UTP cat.8
			40GBase-SR4	40000	100	оптоволоконний
			100GBase-SR10	100000	125	
			40GBase-LR4	40000	10000	
			100GBase-LR4	100000	10000	
			100GBase-ER4	100000	40000	
	IEEE 802.3bg	2011	40GBase-FR	40000	2000	оптоволоконний

Додаток Д

Таблиця 23

Порівняльний аналіз основних характеристик дротових та бездротових мереж в контексті їхнього використання в інформаційних системах (за інформацією з <https://www.theiotacademy.co/blog/wired-vs-wireless-network/>)

Параметр	Дротова мережа	Бездротова мережа
Мобільність та роумінг	Фіксована	Висока
Середовище для комунікації	Мідні кабелі, оптоволокно та інше	Повітря
Безпека	Висока	Нижча, ніж у дротових мережах
Надійність	Висока	Нижча, ніж у дротових мережах
Швидкість	Висока, може досягати 1 Гбіт/с	Нижча, ніж у дротових мережах
Доступ до мережі	Вимагає фізичного підключення	Вимагає наближення до точки доступу
Гнучкість у зміні	Менша гнучкість	Вища гнучкість конфігурації
Вартість установки	Висока	Низька
Вартість обслуговування	Висока	Низька
Супутнє обладнання	Хаб, маршрутизатор, комутатор	Точка доступу, бездротовий маршрутизатор

Додаток Е

Таблиця 24

Характеристики різних версій стандарту IEEE 802.11

Діапазон частот або тип	Протокол	Дата затвердження	Частота, ГГц	Ширина смуги пропускання, МГц	Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Доступність потоків МІМО	Приблизна дальність	
							в приміщенні	на відкритому повітрі
1-7 ГГц	802.11-1997	Червень 1997	2.4	22	1, 2	–	20 м	100 м
	802.11b	Вересень 1999	2.4	22	1, 2, 5.5, 11	–	35 м	140 м
	802.11a	Вересень 1999	5	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	35 м	120 м
	802.11j	Листопад 2004	4.9, 5.0	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	н/д	н/д
	802.11y	Листопад 2008	3.7	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	н/д	5000 м
	802.11p	Липень 2010	5.9	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	200 м	1000 м
	802.11bd	Грудень 2022	5.9, 60	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	500 м	1000 м
	802.11g	Червень 2003	2.4	5, 10, 20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	–	38 м	140 м
	802.11n (Wi-Fi 4)	Жовтень 2009	2.4, 5	20 40	До 288.8 До 600	4	70 м	250 м

	802.11ac (Wi-Fi 5)	Грудень 2013	5	20	До 693	8	35 м	н/д
				40	До 1600			
				80	До 3467			
				160	До 6933			
	802.11ax (Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E)	Травень 2021	2.4, 5, 6	20	До 1147	8	30 м	120 м
				40	До 2294			
				80	До 5500			
				80+80	До 11000			
	802.11be (Wi-Fi 7)	Грудень 2024 (очікув.)	2.4, 5, 6	80	До 11500	16	30 м	120 м
				80+80	До 23000			
				160+80	До 35000			
				160+160	До 46100			
	802.11bn (Wi-Fi 8)	Травень 2028 (очікув.)	2.4, 5, 6, 42, 60, 71	320	До 100000	16	н/д	н/д
	802.11ba	Жовтень 2021	2.4, 5	4, 20	0.0625, 0.25	–	н/д	н/д
Мілі-метр ові хвилі (WiGig)	802.11ad	Грудень 2012	60	2160	До 8085	–	3.3 м	н/д
	802.11aj	Квітень 2018	60	1080	До 3754		н/д	н/д
			45	540, 1080	До 15015	4	н/д	н/д
802.11ay	Липень 2021	60	8640	До 303336	8	10 м	100 м	
Нижче 1 ГГц (IoT)	802.11af	Лютий 2014	0.054-0.7 9	6, 7, 8	До 568.9	4	н/д	н/д

	802.11ah	Травень 2017	0.7, 0.8, 0.9	1-16	До 8.67	4	н/д	н/д
Light (Li-Fi)	802.11bb	Грудень 2023	800-1000 nm	20	До 9600	–	н/д	н/д
	802.11-199 7	Червень 1997	850-900 nm	н/д	1, 2	–	н/д	н/д

Додаток Ж

Таблиця 25

Порівняння бездротових технологій для IoT

Параметр	Bluetooth Low Energy (BLE)	Wi-Fi	Z-Wave	IEEE 802.15.4 (Zigbee, Thread)	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRaWAN
Радіус дії	10м – 1.5 км	15 м – 100 м	30 м – 50 м	30 м – 100 м	1 км – 10 км	1 км – 10 км	3 км – 50 км	2 км – 20 км
Пропускна здатність	125 кбіт/с – 2 Мбіт/с	54 Мбіт/с – 1.3 Гбіт/с	10 кбіт/с – 100 кбіт/с	20 кбіт/с – 250 кбіт/с	до 1 Мбіт/с	до 200 кбіт/с	до 100 біт/с	10 кбіт/с – 50 кбіт/с
Енергоспоживання	Низьке	Середнє	Низьке	Низьке	Середнє	Низьке	Низьке	Низьке
Витрати на обслуговування	Одноразові	Одноразові	Одноразові	Одноразові	Регулярні	Регулярні	Регулярні	Одноразові
Вартість модуля	Менше \$5	Менше \$10	Менше \$10	\$8-\$15	\$8-\$20	\$8-\$20	Менше \$5	\$8-\$15
Топологія	Однорангова, зірка, сітка, ширококомвна	Зірка, сітка	Сітка	Сітка	Зірка	Зірка	Зірка	Зірка
Кількість поставок у 2019 (млн.од.)	~3,500	~3,200	~120	~420	~7	~16	~10	~45

Додаток И

Таблиця 26

Технічні характеристики найпопулярніших мікроконтролерів

	Arduino Uno R3	Arduino Mega 2560 Rev3	Arduino MKR WiFi 1010	ESP8266 (ESP-12F)	ESP32	ESP32-S2	ESP32-C6	Raspberry Pi Pico (W/WH)	Particle Electron
Збір даних та управління									
Аналогові порти введення/виведення	6 входів	16 входів	7 входів, 1 вихід	1 вхід	18 каналів входів, 2 канали виходів	20 каналів входів, 2 канали виходів	6 каналів входів	3 канали входів	12 входів, 2 виходи
Цифрові порти введення/виведення загального призначення	14	54	8	17	34	43	22	26	30
Напруга логічних рівнів	5В	5В	3,3В	3,3В	3,3В	3,3В	3,3В	3,3В	3,3В
Обробка та зберігання даних									
Процесор	ATmega328P	ATmega2560	SAMD21	Tensilica L106	Tensilica Xtensa LX6, два ядра	Tensilica Xtensa LX7	HP-RISC -V	RP2040, два ядра	STM32F205
Розрядність процесора	8	8	32	32	32	32	32	32	32
Робоча частота процесору	16 МГц	16 МГц	48 МГц	160 МГц	240 МГц	240 МГц	160 МГц	133 МГц	120 МГц

ULP-сопроцесор	–	–	так	–	так	ULP-RIS C-V	ULP-RIS C-V	–	–
SRAM	2 КБ	8 КБ	32 КБ	160 КБ	520 КБ	320 КБ	512 КБ	264 КБ	128 КБ
Flash	32 КБ	256 КБ	256 КБ	4 МБ	до 16 МБ	до 16 МБ	до 16 МБ	до 16 МБ	1 МБ
EEPROM	1 КБ	4 КБ	–	–	–	–	–	–	512 Б (OTP)
Память RTC	–	–	–	768 Б	16 КБ	16 КБ	16 КБ	–	–
Апаратне шифрування	–	–	HMAC, SHA-256	–	SHA, RSA, AES, RNG	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	–	–
Особливості	–	–	USB	–	CAN, датчик Холла	USB OTG 1.1	USB	USB	USB, CAN
Операційна система	–	–	–	–	RTOS	RTOS	RTOS	–	RTOS
Можливість підключення до мережі									
Wi-Fi	–	–	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 6	Wi-Fi 4	–
Bluetooth	–	–	V4.2	–	V4.2	BLE 5.0	BLE 5.3	BLE 5.2	–
Інші типи мереж	модульно	модульно	модульно	модульно	модульно	модульно	Thread, ZigBee, модульно	модульно	2G/3G/LTE
Живлення									
Рекомендовані параметри джерела живлення	9-12В DC; 5В 500мА	9-12В DC 2А, 5В 500мА	9-12В DC; 5В 500мА; Li-Ion 3,7В	3,3В, 300мА	3,3В, 300мА	3,3В, 300мА	3,3В, 300мА	1.8-5.5В DC	3,9-12В DC; 5В, 500мА; Li-Ion 3,7В

Споживчі характеристики									
Розміри, мм	68,6x53,4	101,5x53,3	61,5x25	24x16	25,5x18	31x18	25,5x18	51x21	50,8x20,3
Рекомендована ціна	\$26	\$45	\$36	\$1	\$1,5	\$3	\$3,5	\$9	\$50

Додаток К

Таблиця 27

Технічні характеристики поширених сучасних одноплатних комп'ютерів

	Raspberry Pi Zero 2 W	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi 5	Orange Pi 5 Pro	Asus Tinker Board S R2.0	Jetson Nano Developer Kit	ZimaBlade	LattePanda 3 Delta 864
Архітектура	ARM	ARM	ARM	ARM	ARM	ARM	x86	x86
SoC	BCM2710	BCM2711	BCM2712	Rockchip RK3588S	Rockchip RK3288	Nvidia Erista	–	–
Центральний процесор	4×Cortex-A53	4×Cortex-A72	4×Cortex-A76	4×Cortex-A76 + 4×Cortex-A55	4×Cortex-A17	4×Cortex-A57	Intel® Celeron® N3350	Intel® Celeron® N5105
Частота CPU	4×1 ГГц	4×1,5 ГГц	4×2,4 ГГц	4×2,4 ГГц + 4×1,8 ГГц	4×1,8 ГГц	4×1,43 ГГц	2×2,4 ГГц	4×2,9 ГГц
Графічний процесор	VideoCore IV	VideoCore VI	VideoCore VII	Mali-G610	Mali-T764	Nvidia Maxwell, 128 ядер CUDA	Intel® HD Graphics 500	Intel® UHD Graphics
Частота GPU	400 МГц	500 МГц	1000 МГц	1000 МГц	600 МГц	921 МГц	650 МГц	800 МГц
Нейронний процесор	–	–	модуль AI	6 TOPS	–	472 GFLOPS	–	–
ОЗП	512 МБ LPDDR2	1-8 ГБ LPDDR4	2-8 ГБ LPDDR4X	4-16 ГБ LPDDR5	2 ГБ LPDDR3	8 ГБ LPDDR4	1 x SODIMM DDR3L до 16 ГБ	8 ГБ LPDDR4
Накопичувач	1×microSD	1×microSD	1×microSD SDR104,	1×microSD, 1×M.2 NVMe SSD,	1×microSD, 16 ГБ eMMC	1×microSD,	32 ГБ eMMC, 2 x SATA3	64 ГБ eMMC, 1×M.2 NVMe SSD

			1×M.2 NVMe SSD	eMMC, SPI Flash		16 ГБ eMMC, 1×M.2 NVMe SSD		
Інтерфейси USB	–	2×USB2.0, 2×USB3.0	2×USB2.0, 2×USB3.0	3×USB2.0, 1×USB3.1	4×USB2.0	3×USB2.0, 1×USB3.0	1×USB3.0	3×USB3.2, 1×USB2.0 Type-C PD
Ethernet	–	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	2,5 Гбіт/с
Wi-Fi	802.11n	802.11ac	802.11ac	802.11n	802.11n	–	–	802.11ax
Bluetooth	V4.2	BLE 5.0	BLE 5.0	BLE 5.0	V4.2	–	–	BLE 5.2
Мультимедіа	1 x Mini-HDMI, композитний аудіо/відео вихід	2×micro-HDMI, композитний аудіо/відео вихід, порт дисплею MIPI DSI	2×micro-HDMI, порт дисплею MIPI DSI	2×HDMI, стерео аудіо вихід, порт дисплею MIPI DSI, вбудований мікрофон	1×HDMI, стерео аудіо вихід, порт дисплею MIPI DSI	1×HDMI, 1 x DP, 1×eDP	1×mini-DP	1×HDMI, 1 x DP, 1×eDP, комбінований аудіо вхід/вихід, порт дисплею MIPI DSI
Порти камер	1×MIPI CSI	1×MIPI CSI	1×MIPI CSI	2×MIPI CSI	1×MIPI CSI	4×MIPI CSI	–	–
Кількість портів введення / виведення загального призначення	40	40	40	40	40	40	–	40
Особливості	н/д	н/д	RTC, 1×PCIe 2.0 x1	RTC	н/д	підтримка NVIDIA JetPack	1×PCIe 2.0 x4	TPM 2.0, модулі 4G та 5G, RTC, вбудований ATMEGA32U4
Операційна система	Linux	Linux	Linux	Linux, Android	Linux, Android	Linux	Windows, Linux, Android	Windows, Linux, Android

Рекомендовані параметри живлення	5B/2A	5B/3A, модуль PoE	5B/5A, USB-C PD, модуль PoE	5B/3A, модуль PoE	5B/2A	5B/2A	USB-C PD 12V/3A	USB-C PD/24W, 12V/2A
Габаритні розміри, мм	65×30×5	88×58×19,5	86×56×16	89×56×16	85,6×54×16	100×80×29	107×80×23	125×78×16
Рекомендована ціна	\$15	від \$35	від \$60	від \$85	\$129	\$269	від \$79	\$239

Додаток Л

Таблиця 29

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу MQTT в IoT за даними Scopus за період з 2012 по 2023 рік

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	2	0	19	42	115	213	271	234	290	287	287	351

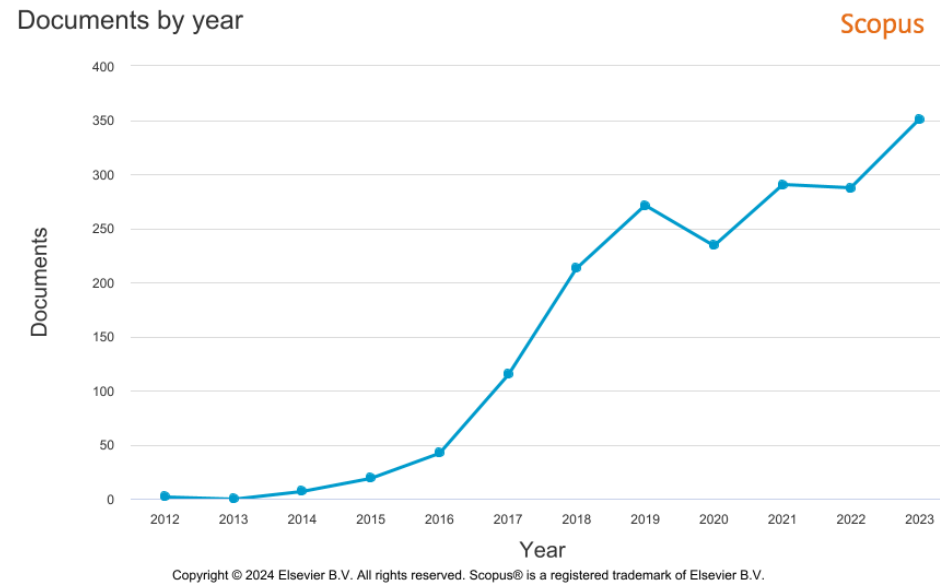


Рис. 23. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу MQTT в IoT за даними Scopus за період з 2012 по 2023 рік

Таблиця 30

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу MQTT-SN в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 рр.

Рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	2	2	2	8	8	9	7	9	7

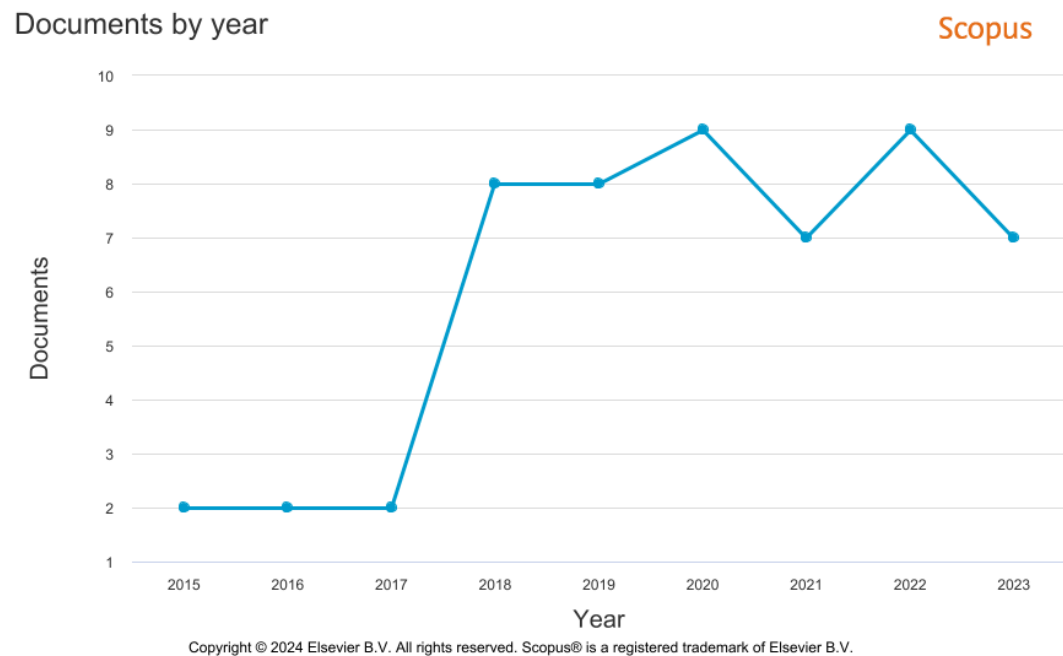


Рис. 24. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу MQTT-SN в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 рр.

Таблиця 31

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу CoAP в IoT за даними Scopus за період 2011-2023 рр.

Рік	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	4	28	27	30	51	83	94	134	127	120	109	104	84

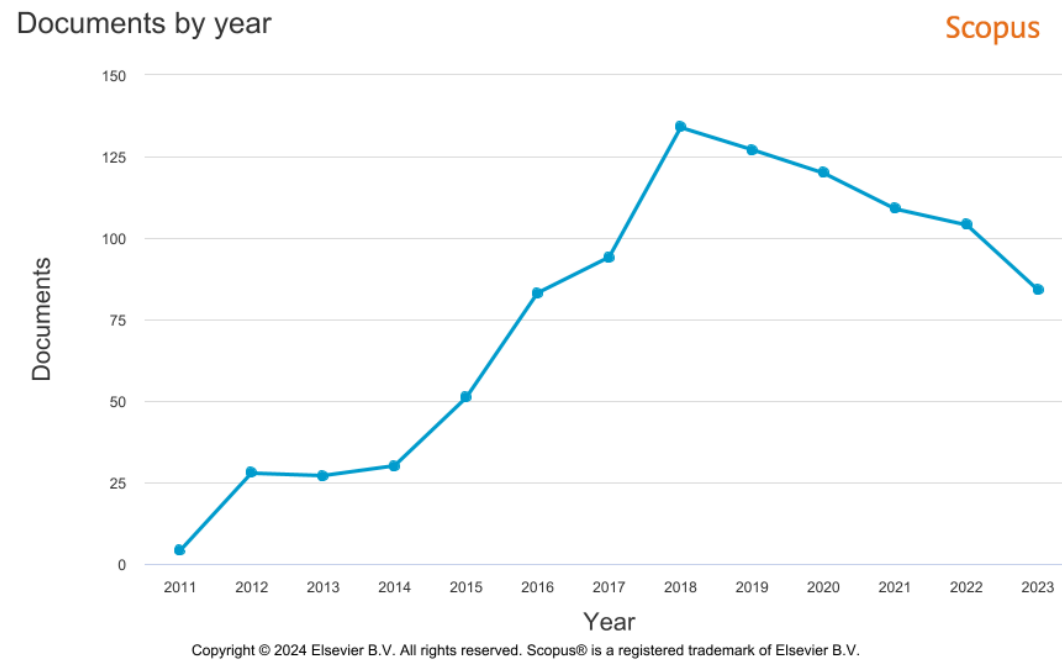


Рис. 25. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу CoAP в IoT за даними Scopus за період 2011-2023 рр.

Таблиця 32

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу AMQP в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 рр.

Рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	2	4	12	19	21	19	25	17	17

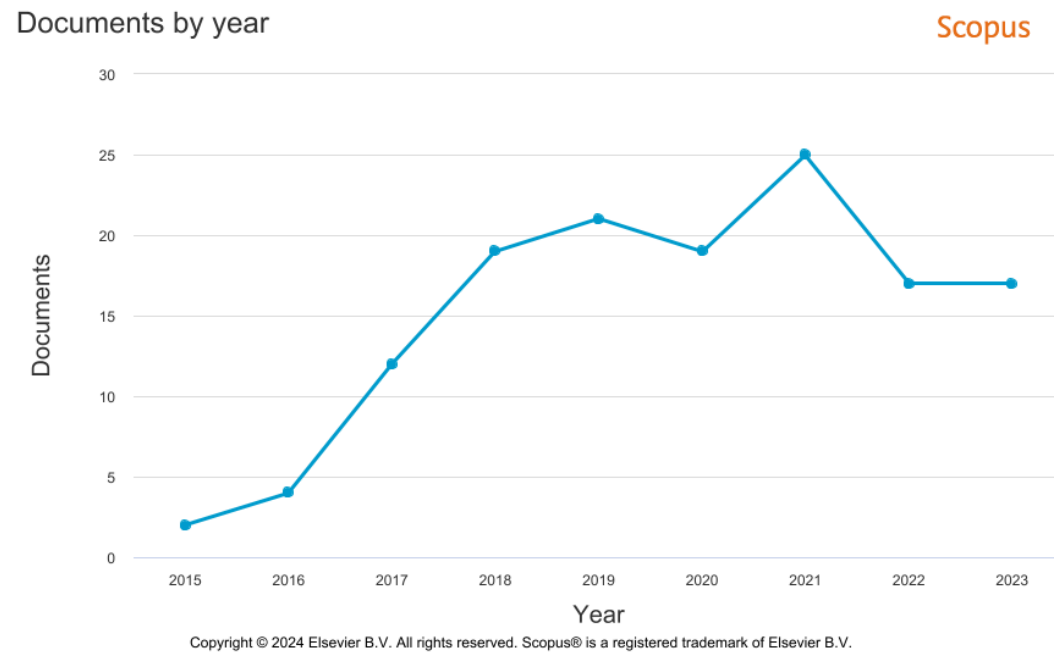


Рис. 26. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу AMQP в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 рр.

Таблиця 33

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу XMPP в IoT за даними Scopus за період 2011-2023 рр.

Рік	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	2	5	3	2	7	6	14	17	13	12	16	9	10

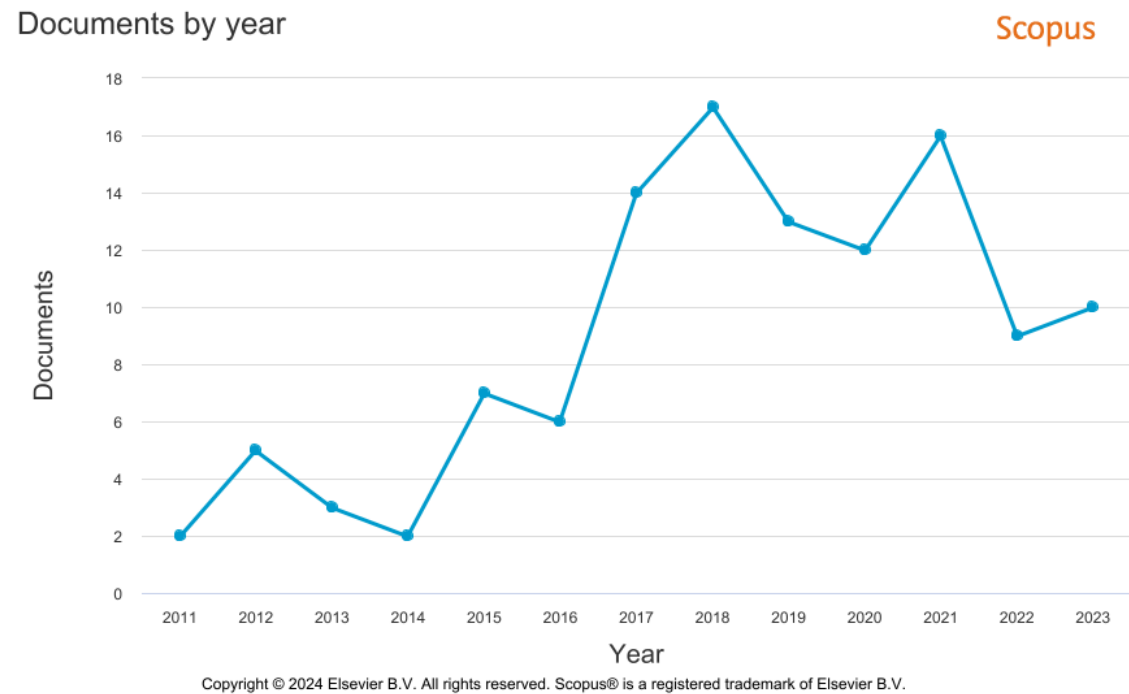


Рис. 27. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу XMPP в IoT за даними Scopus за період з 2011 по 2023 рік

Таблиця 34

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу DDS в IoT за даними Scopus за період з 2013-2023 р.

Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	1	1	5	8	10	10	9	10	7	9	10

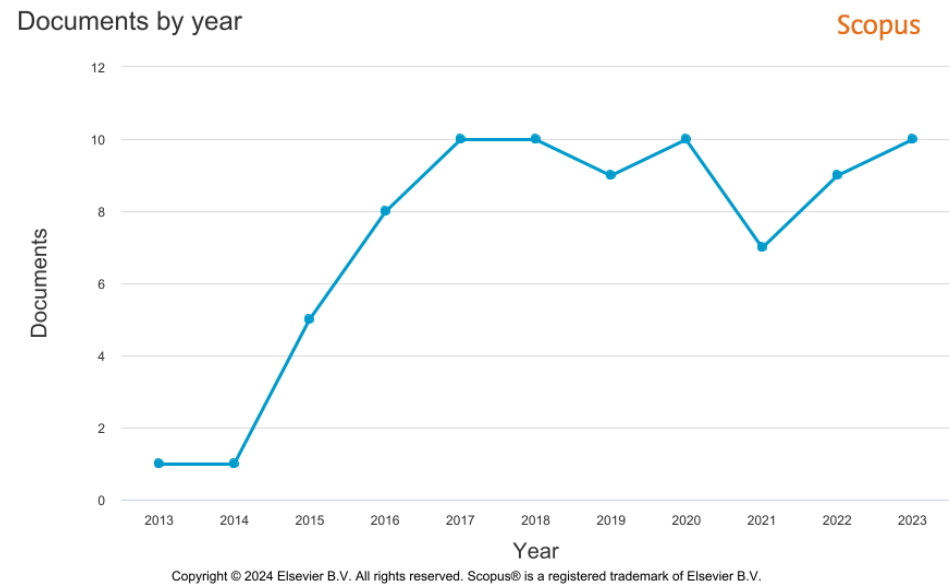


Рис. 28. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу DDS в IoT за даними Scopus за період 2013-2023 рр.

Таблиця 35

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу OPC UA в IoT за даними Scopus за період з 2013-2023 р.

Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	2	0	1	3	5	8	12	14	16	16	8

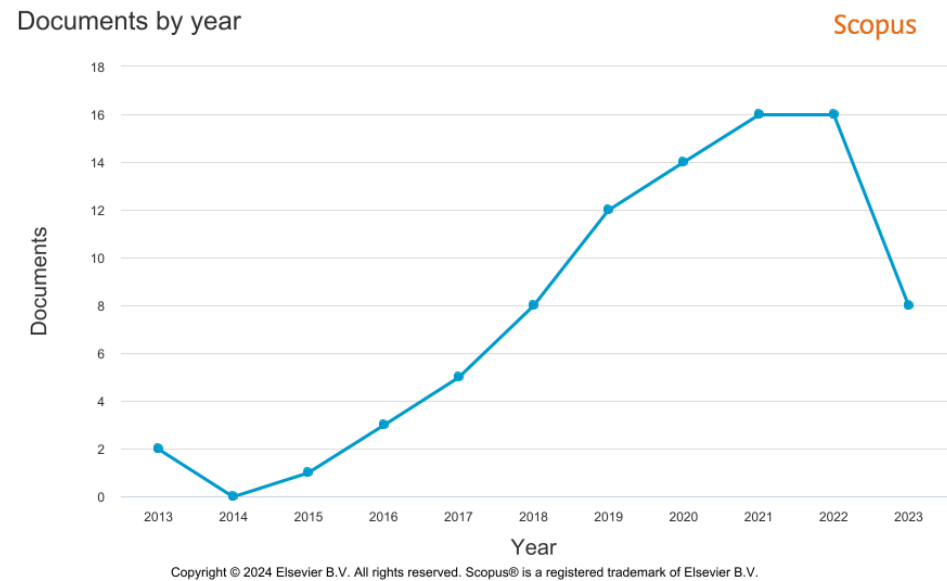


Рис. 29. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу OPC UA в IoT за даними Scopus за період 2013-2023 рр.

Таблиця 36

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу LwM2M в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 р.

Рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	6	3	4	11	7	9	8	5	9

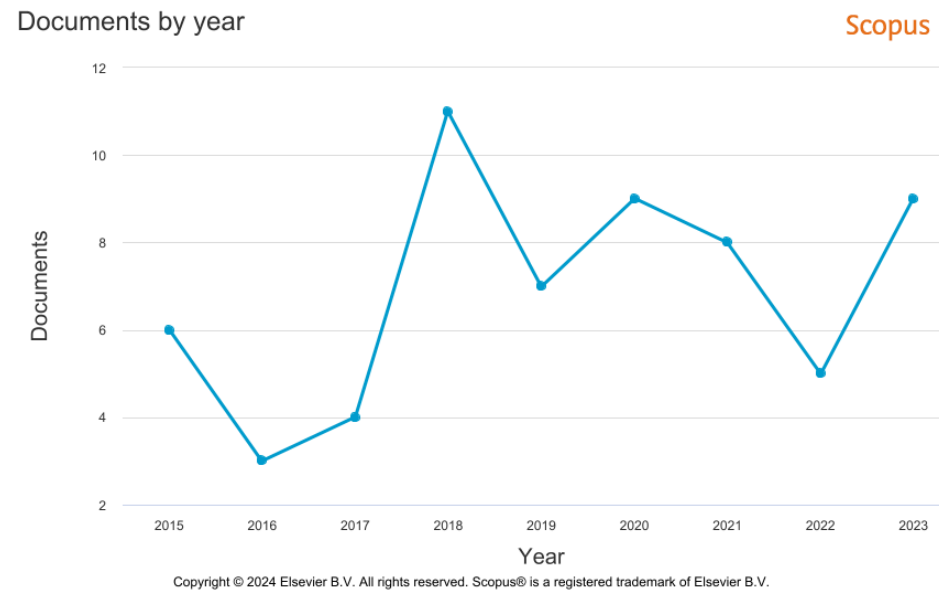


Рис. 30. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу LwM2M в IoT за даними Scopus за період 2015-2023 рр.

Таблиця 37

Динаміка кількості публікацій щодо використання протоколу STOMP в IoT за даними Scopus за період 2018-2023 рр.

Рік	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість публікацій	1	0	0	0	1	2

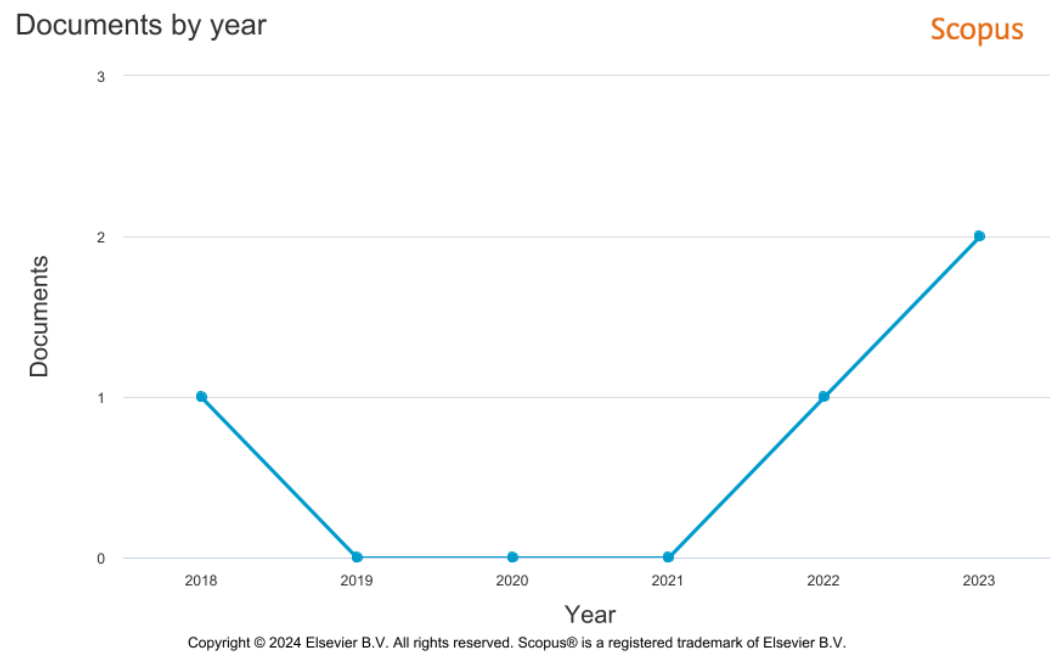


Рис. 31. Графік динаміки кількості публікацій щодо використання протоколу STOMP в IoT за даними Scopus за період 2018-2023 рр.

Додаток М

Таблиця 38

Порівняльна таблиця властивостей комунікаційних протоколів Інтернету речей шару застосунків стеку IoT

Протокол	Призначення	Визначені ролі	Архітектури	Обсяг корисного навантаження	Безпека передачі даних	QoS	Протоколи передачі даних
MQTT	Машино-машинна взаємодія в повільних мережах	видавець, підписник, брокер	клієнт-брокер-клієнт	до 256 МБ	TLS	3 рівня	TCP, WebSocket
MQTT-SN	пристрої з обмеженими ресурсами	видавець, підписник, брокер	клієнт-брокер-клієнт	до 64 КБ		4 рівня	UDP, ZigBee
CoAP	пристрої з обмеженими ресурсами, мережі з втратами	сервер, клієнт, підтримка механізмів публікації/підписки	однорангові з'єднання, клієнт-сервер, ведучий-ведений	до 1 ГБ	DTLS	2 рівня	UDP, TCP, WebSocket
AMQP	корпоративне середовище	видавець, підписник, брокер	клієнт-сервер-клієнт, клієнт-брокер-клієнт	визначається кінцевими точками	TLS, SASL	3 рівня	TCP, UDP, SCTP, WebSocket
XMPP	узагальнена маршрутизація даних XML	клієнт-сервер	клієнт-маршрутизатор-клієнт	до 64 КБ	StartTLS, SASL		TCP, WebSocket

OPC UA	промислові застосунки	клієнт, сервер, видавець, підписник	клієнт-сервер, видавці-підписники, сервери-агрегатори-клієнти, однорангові з'єднання	визначається кінцевими точками	захищений канал, поля безпеки повідомлень		TCP, WebSocket, HTTPS, UDP, AMQP, MQTT
DDS	системи реального часу, пристрої з обмеженими ресурсами	видавець, підписник	однорангові з'єднання	до 4 ГБ	плагіни безпеки	15 політик, 22 параметри	UDP, TCP
LwM2M	Загальний машино-машинний зв'язок	клієнт, сервер	клієнт-сервер	до 16,7 МБ	DTLS, виділені об'єкти		CoAP, MQTT, HTTP
STOMP	обмін простими даними	видавець, підписник, сервер	клієнт-сервер-клієнт	залежить від реалізації			TCP, WebSocket
WAMP	обмін повідомленнями та виклик віддалених процедур (ВВП)	видавець, підписник, брокер, викликаний, викликаючий, диспетчер	клієнт-маршрутизатор-клієнт	до 16 МБ	realms, рівні довіри		WebSocket

Додаток Н

Навчальна серія з 20 технічних уроків

Етап / №	Назва уроку (модуль)	Гуманітарна цінність	Матеріали	Час, хв
Intro-5 – «Побачити дані»				
1	Налаштування ESPHome для DHT22 (M-Air)	Отримання °C/RH у Home Assistant	ESP32, DHT22, USB-кабель, YAML-шаблон ESPHome	45
2	Інтеграція сенсора вологості в Home Assistant	Візуалізація RH% у Lovelace UI	ESPHome, Home Assistant Dashboard	50
3	Підключення CO ₂ -д датчика (MH-Z19B)	Створення CO ₂ -датчика в Home Assistant	ESP32, MH-Z19B, MQTT-конфігурація	60
4	Збереження даних у InfluxDB	Автоматичний запис CSV в базу даних	Home Assistant → InfluxDB	45
5	Візуалізація у Grafana «Комфорт зали»	Створення першого графіка температури/вологості	Grafana + InfluxDB, базовий дашборд	60
Build-10 – «Збираємо телеметрію»				
6	Налаштування Node-RED в Home Assistant	Автоматизація «логіка без коду»	Node-RED Add-on, базовий flow	50

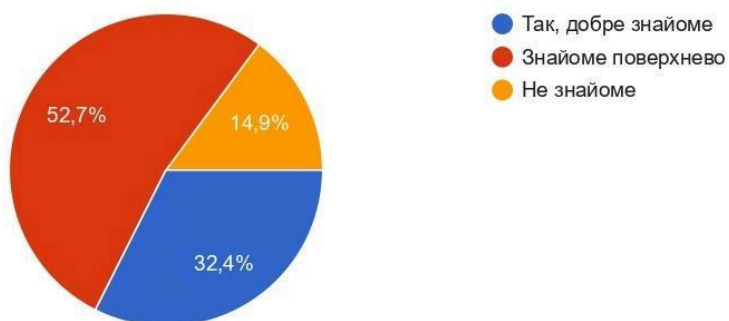
Етап / №	Назва уроку (модуль)	Гуманітарна цінність	Матеріали	Час, хв
7	Створення детального дашборда Grafana	Графіки Lux, Temperature, CO ₂ за добу	Grafana Layout, панель Chart	55
8	Датчик освітленості BH1750 (M-Light)	Вимір Lux; інтеграція в Home Assistant	ESPHome, BH1750	50
9	Сенсор присутності RCWL-0516	Реєстрація факту перебування у залі	ESPHome, RCWL-0516, інтеграція в Node-RED	55
10	Об'єднання даних «Комфорт+Lux»	Збір даних у єдиний CSV для керівництва	Node-RED → Google Sheets API*	45
Grow-15 – «Реагуємо на дані»				
11	Автоматичне керування світлом через диммер	Плавне затемнення/увімкнення залежно від Lux	ESPHome, Триас-диммер, Node-RED	65
12	«Нічна» дія диммера за розкладом	Затримка до 20% потужності після 22:00	Node-RED schedule, ESPHome	50
13	Перший RFID-зчитувач як Node-RED пристрій (M-Gate)	Передача ID тега в Home Assistant	ESPHome RFID-міграція, RC522	60

Етап / №	Назва уроку (модуль)	Гуманітарна цінність	Матеріали	Час, хв
14	Прив'язка RFID-тега до запису в КОНА	Автоматичне оновлення статусу «Повернено»	Home Assistant API → КОНА API	70
15	Масова інвентаризація 50 книг	Об'єднання UHF-даних через ESPHome	ESPHome + UHF-Reader, Node-RED	45
Track-18 – «Візуалізуємо й попереджаємо»				
16	Дашборд «Комфорт+Світло» у Lovelace	Інтегрований Look в Home Assistant	Lovelace YAML, Grid-View	40
17	Push-повідомлення про відкриття шафи	Користувач отримує сповіщення від Node-RED	ESPHome Reed-сенсор, Node-RED, Telegram	55
18	BLE-маяк «Краєзнавство» (M-Nav)	Відвідувач бачить pop-up із контентом	ESPHome iBeacon, PWA-шаблон	55
Pitch-20 – «Комунікуємо результат»				
19	QR-журнал відгуків у Google Sheets	Collect feedback via QR → Sheets	QR-генератор, Google Forms	30
20	Створення PDF-звіту «до/після»	Візуалізація досягнень для гранту	Home Assistant скріни, Canva	50

Результати дослідження ступеня впровадження технологій Інтернету речей (IoT) у бібліотеках України (січень-березень 2025 р.)

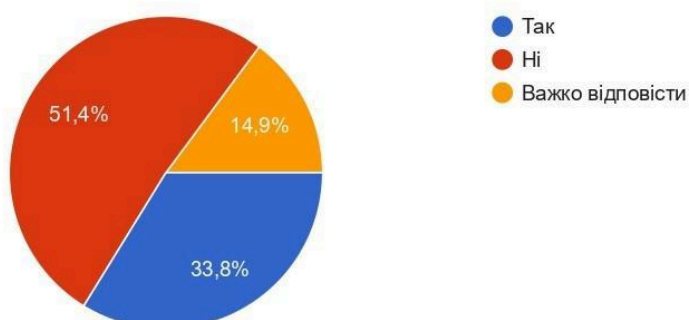
Чи знайоме Вам поняття «Інтернет речей» та його суть?

74 відповіді



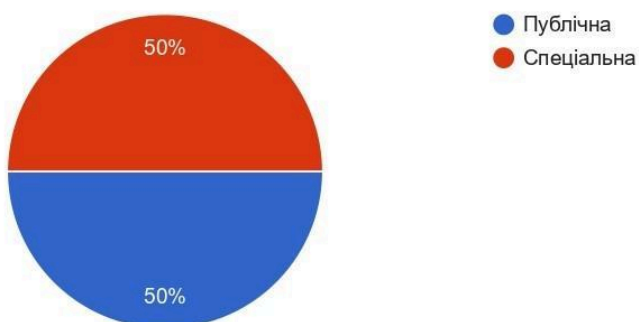
Чи використовуються технології Інтернету речей у Вашій бібліотеці?

74 відповіді



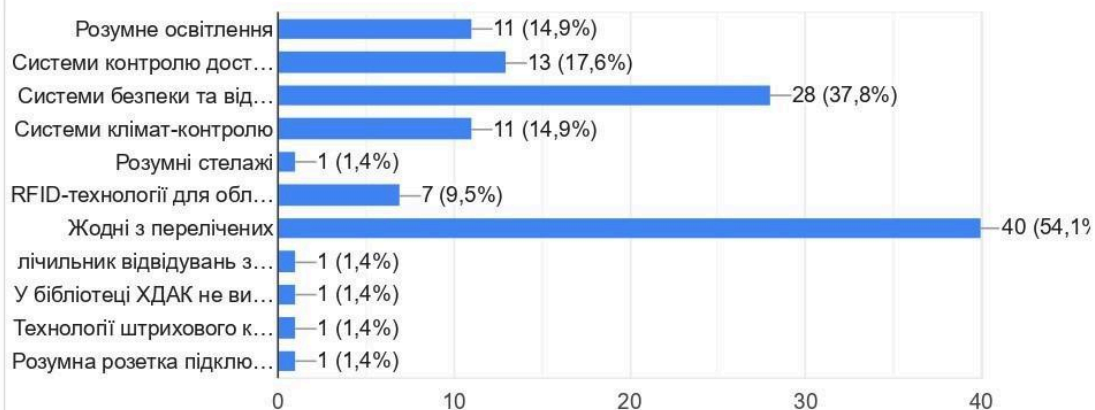
Який вид бібліотеки за призначенням Ви представляєте?

74 відповіді



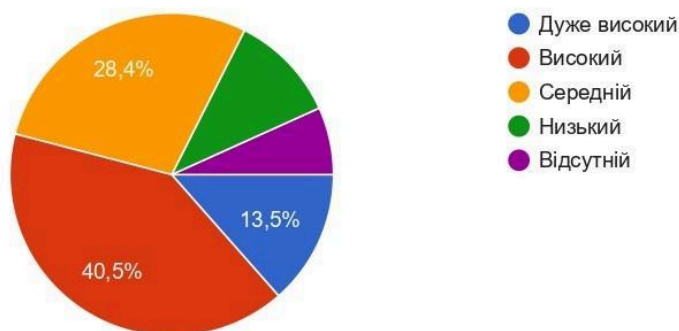
Які саме IoT-технології вже впроваджені у Вашому закладі?
(можна обрати кілька варіантів)

74 відповіді



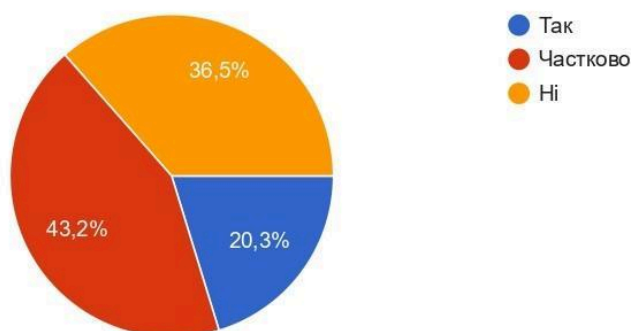
Як би Ви оцінили рівень зацікавленості Вашої бібліотеки у впровадженні технологій Інтернету речей?

74 відповіді



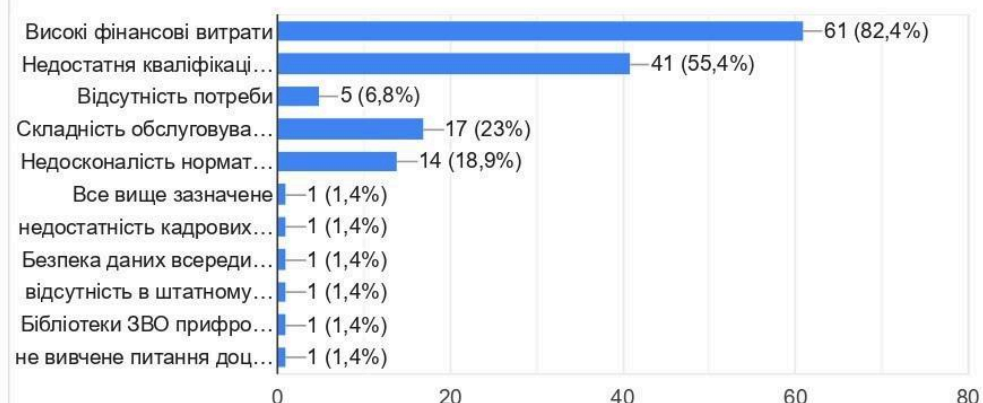
Чи є у Вашому закладі спеціалісти, здатні забезпечити інтеграцію IoT?

74 відповіді



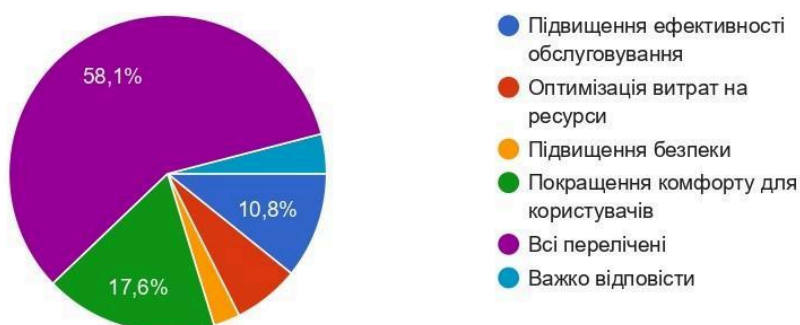
Які перешкоди заважають впровадженню технологій IoT у Вашій бібліотеці? (можна обрати кілька варіантів)

74 відповіді



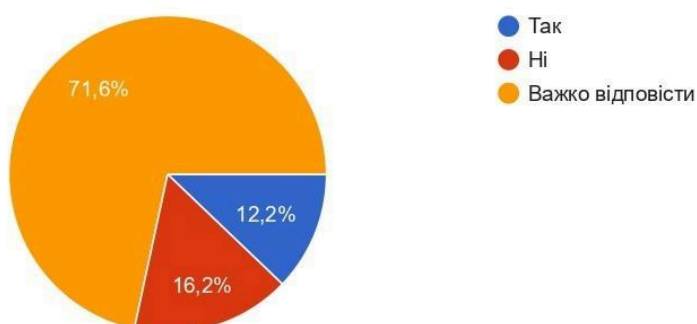
Які переваги від впровадження технологій та засобів Інтернету речей Ви бачите для Вашого закладу?

74 відповіді



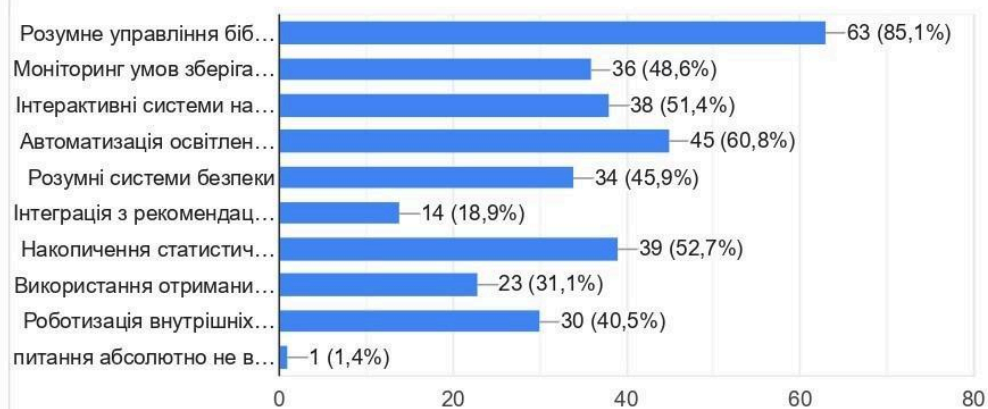
Чи планує Ваша бібліотека впровадження IoT-технологій у найближчі 1-3 роки?

74 відповіді



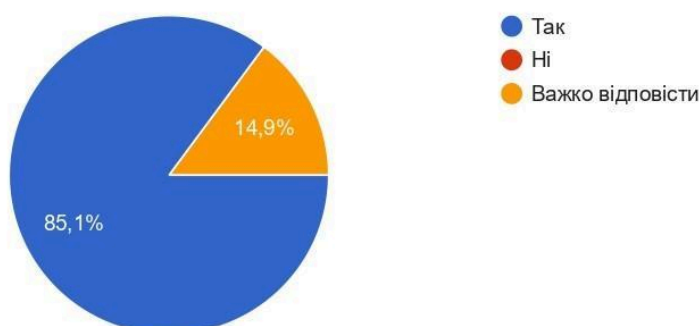
Які напрямки IoT були б найбільш цікавими для Вашої бібліотеки? (можна обрати кілька варіантів)

74 відповіді



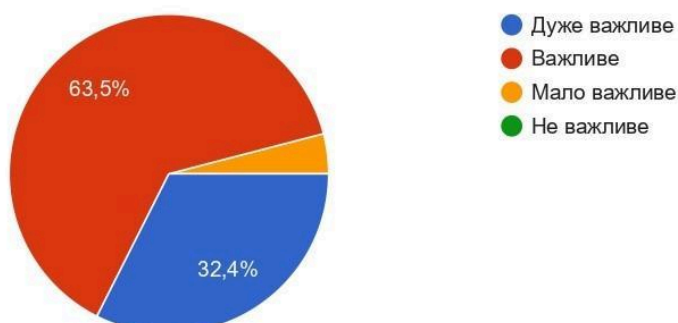
Чи вважаєте Ви, що IoT-технології можуть покращити взаємодію бібліотеки з користувачами?

74 відповіді



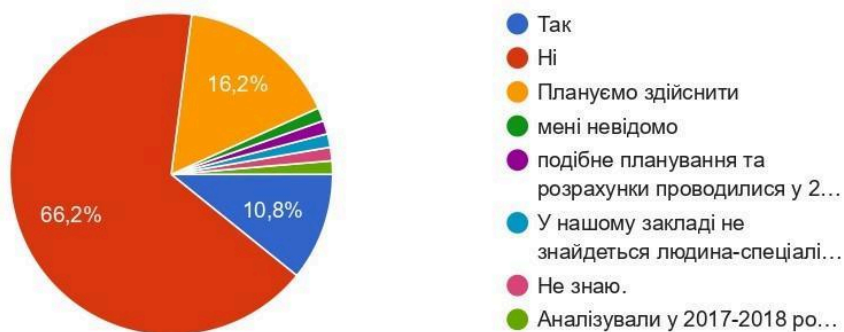
Наскільки важливим є питання енергоефективності для Вашої бібліотеки?

74 відповіді



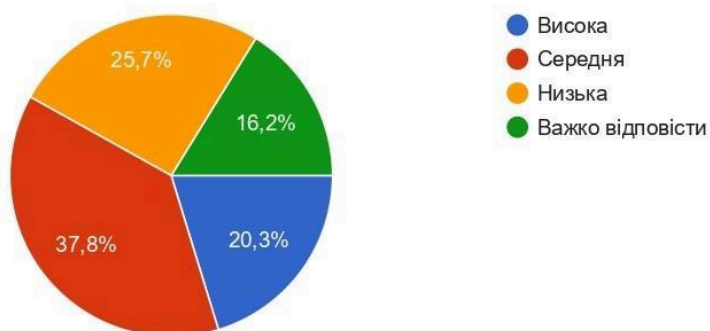
Чи здійснював Ваш заклад аналіз потенційних вигід та витрат (приблизні кошториси) на впровадження IoT-технологій?

74 відповіді



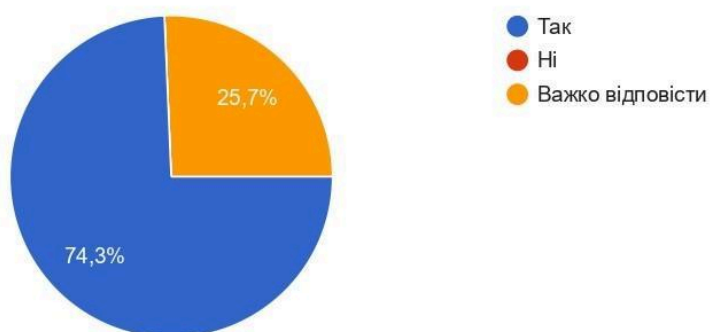
Як Ви оцінюєте готовність Вашої бібліотеки до цифрових трансформацій?

74 відповіді



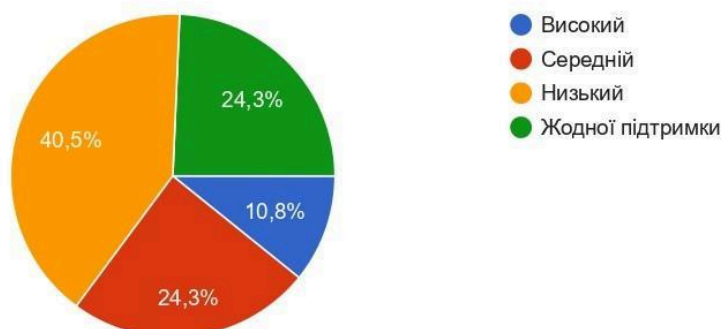
Чи готові представники Вашого закладу брати участь у семінарах або тренінгах з впровадження технологій Інтернету речей?

74 відповіді



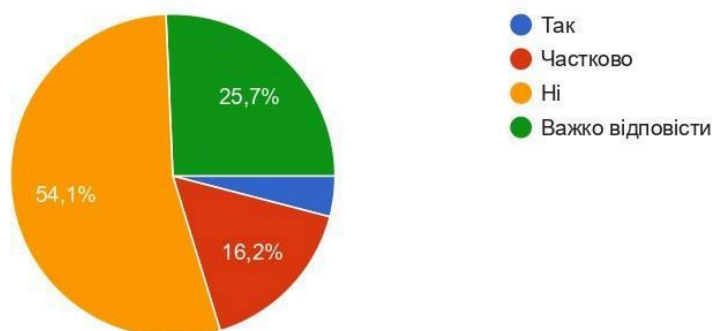
Який рівень підтримки з боку місцевих органів влади Ви очікуєте у разі впровадження IoT?

74 відповіді



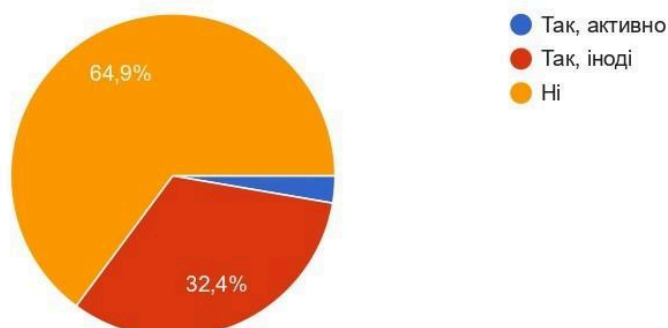
Чи достатнім, на Вашу думку, є бюджет Вашого закладу для впровадження базових IoT-рішень (наприклад, розумне освітлення, керування кліматом, базова безпека)?

74 відповіді



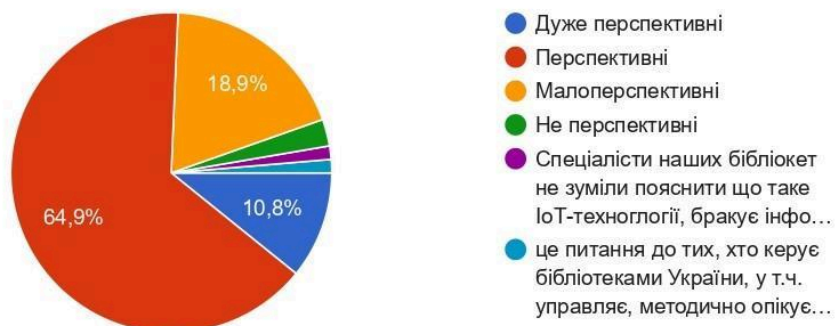
Чи користуєтесь Ви міжнародним досвідом впровадження IoT у бібліотеках?

74 відповіді



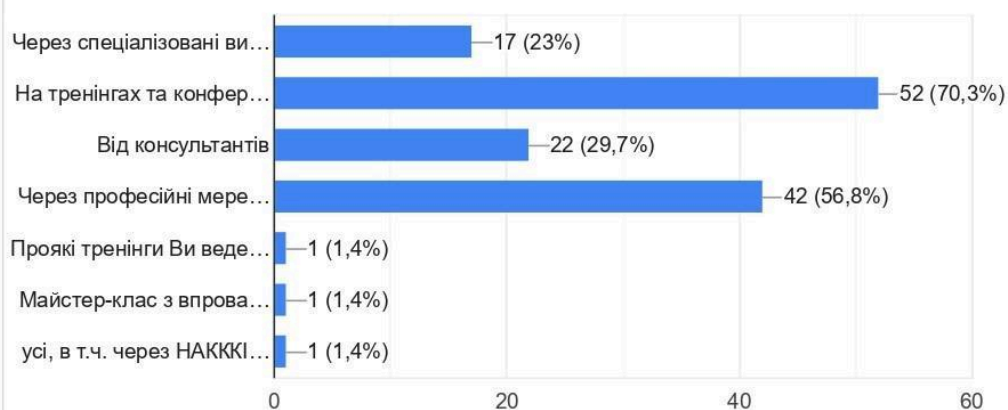
Як Ви оцінюєте перспективи впровадження IoT-технологій у бібліотечній сфері України загалом?

74 відповіді



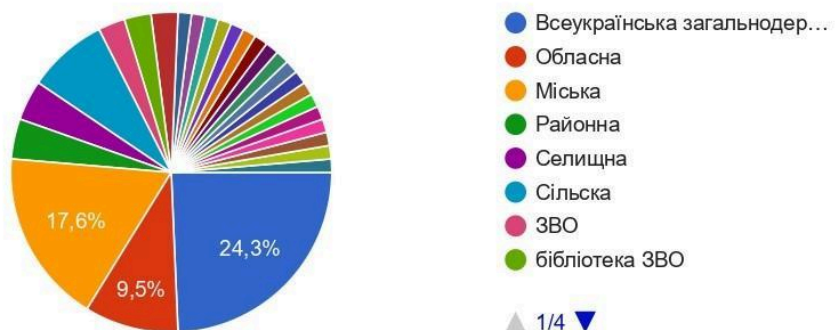
Якими каналами отримання інформації про впровадження IoT-технологій Ви віддаєте перевагу?

74 відповіді



Який вид бібліотеки за значенням Ви представляєте?

74 відповіді



Чи є у Вас додаткові пропозиції або коментарі щодо впровадження IoT у Вашому закладі? (відкрите питання для коментарів)

25 відповідей

Ні

-

.

Не має ні якої інформації про це питання у працівників бібліотек, про яку підтримку місцевою владою ідеться мова, якщо спеціалісти не володіють інформацією.

для впровадження IoT в бібліотеці потрібно відповідне: фінансування, спеціалісти у штаті бібліотеки, навчання персоналу.

ні

Щоб щось впроваджувати у нашому закладі, необхідно спочатку показати ефективність впровадження в інших закладах, визначити терміни, фінансові та матеріальні витрати, людські ресурси, термін окупності, масштаби роботи та перспективи подальшого розширення і розвитку. Питань більше ніж відповідей!

Думаю, що впровадження можливе тільки за грантової підтримки.

Просто потрібно зробити розрахунки і впроваджувати)

Успіху у дослідженні. Дякуємо за нову цікаву інформацію.

Побільше інформації,здійснення задуманого.

Повністю автоматизована книговидача з роботизованою лінією подачі літератури за відповідним запитом користувача. Технології RFID

Фінасування бібліотек згідно їх потреб

Цікавлять грантові проекти для наукових бібліотек університетів. Де можна ознайомитися з пропозиціями та умовами?

Зорієнтувати впровадження IoT на потреби часу, умови воєнного стану.

Питання потребує ґрунтовнішого вивчення

Питанн потребує ґрунтовнішого вивчення

Усі технологічні зміни в бібліотечній сфері області і України останніх років пов'язані із грантовими проектами, як Бібліоміст за підтримки США. Сподіватись на те, що Америка

знову дасть нам на це кошти, не варто. Залишається вивчати теорію і досвід, якщо такий є у бібліотечній сфері. Самотужки питання ніхто не зрушить без серйозних капіталовкладень і державної підтримки. Ми навіть пандуси не можемо зробити у загальнодоступних бібліотеках по країні та області зокрема. Але..дорогу осилить той, хто йде, тож вперед, за Вами слідом і ми підемо...Сподіваємось

Додаток Р

Акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

В. о. ректора Харківської державної
академії культури, доктор
мистецтвознавства, доцент



Наталія РЯБУХА

«26» _____ 2025 р.

АКТ

про впровадження основних наукових висновків, положень і результатів дисертаційного дослідження О. Борисова «Інтеграція технологій інтернету речей у бібліотечно-інформаційне виробництво», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 029 «Інформаційна, бібліотечна та архівна справа» у Харківській державній академії культури

Основні наукові висновки, положення та результати дисертаційного дослідження О. Борисова реалізовано:

- у програмі, методиці та звіті про науково-дослідну роботу Харківської державної академії культури «Документально-комунікаційні структури суспільства: інноваційні стратегії розвитку» (державний реєстраційний номер 0109U000512), а також у межах наукового напрямку кафедри цифрових комунікацій та інформаційних технологій Харківської державної академії культури «Цифрові трансформації документно-інформаційних установ в соціокомунікаційному просторі»;
- у підготовці навчально-методичної документації факультету культурології та соціальних комунікацій Харківської державної академії культури для

удосконалення та оновлення змісту та структури освітніх компонент «Бібліотечно-інформаційне виробництво», «Організація та технологія створення електронних ресурсів», «Технології цифрового суспільства», «КЗВ: Соціокультурна діяльність бібліотек», «КЗВ: Медіабібліотека» та інших освітніх компонентах зі спеціальності 029 Інформаційна, бібліотечна та архівна справа;

- у доповідях на міжнародних наукових конференціях, виголошених дисертантом у Харківській державній академії культури у 2022-2025 рр.;
- у двох одноосібних наукових публікаціях здобувача за темою дослідження, опублікованих у науковому збірнику «Вісник Харківської державної академії культури» у 2023 р. (Вип. 63), 2023 р. (Вип. 64), 2024 р. (Вип. 66).

Завідувач кафедри
цифрових комунікацій
та інформаційних технологій

Олена МАР'ІНА

Декан факультету культурології
та соціальних комунікацій ХДАК

Наталія КОРЖИК

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ*Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації*

1. Борисов О. О. Компаративний аналіз підходів до інтеграції інтернету речей у сучасній бібліотечно-інформаційній діяльності // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 63. С. 131-139. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.063.09>.

2. Borysov O. Implementation of the Internet of Things in the Global Library Environment: Bibliometric Analysis // Вісник Харківської державної академії культури. 2023. № 64. С. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.064.08>.

3. Borysov O. Scientific Publications' Bibliometric Analysis of Application-Level TCP/IP Models' Communication Protocols for The Internet of Things // Вісник Харківської державної академії культури. 2024. № 66. С. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.02>.

Опубліковані праці апробаційного характеру

4. Борисов О. О. Застосування технологій та засобів Інтернету речей у сучасних бібліотеках // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 17-18 листоп. 2022 р. Харків, 2022. С. 158-159.

5. Борисов О. О. Досвід впровадження технологій Інтернету речей у бібліотеках світу: огляд інновацій // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 20-21 квітня 2023 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2023. С. 167-170.

6. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотеках: аналітичний огляд міжнародної наукової кооперації та перспектив // Культурологія та соціальні

комунікації: інноваційні стратегії розвитку: матер. міжнар. наук. конф., 22-23 листоп. 2023 р. У 2 ч. Ч. 1. Харків: ХДАК, 2023. С. 186-188.

7. Борисов О. О. Internet of things network protocols at TCP/IP model 1 ayers: trends and implementation perspectives in libraries // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф., м. Харків, 18-19 квіт. 2024 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2024. С. 141-144.

8. Borysov O. Optimizing IoT Integration in Libraries: Comparative Evaluation of Wired and Wireless Network Solutions // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., 21-22 листоп. 2024 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2024. С. 193-195.

9. Борисов О. О. Цифрова трансформація бібліотек: роль штучного інтелекту та Інтернету речей у створенні інноваційних інформаційних сервісів // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених, 17-18 квіт. 2025 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2025. С. 210-212.

10. Борисов О. О. Інтернет речей у бібліотечно-інформаційному виробництві України: результати емпіричного опитування та соціально-комунікаційні перспективи впровадження // Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку : матер. міжнар. наук. конф., 20–21 листоп. 2025 р. У 2 ч. Ч. 1. Харків : ХДАК, 2025. С. 225-227.

11. Borysov O. Datafication as an instrument of strategic management in libraries under the integration of internet of things technologies // Культура та інформаційне суспільство XXI століття: матер. міжнар. наук. конф. молодих учених, 16-17 квіт. 2026 р. У 2 ч. Ч 2. Харків: ХДАК, 2026. С. 239-241.