

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГОНЧАРЕНКО ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 004.9:004.7/004.8

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМАЛЬНОГО**  
**ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ LPWAN З УРАХУВАННЯМ**  
**ПРОСТОРОВИХ Й ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ**

Спеціальність 126 – «Інформаційні системи та технології»

Галузь знань 12 – «Інформаційні технології»

Подается на здобуття ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ Д. В. Гончаренко

Науковий керівник: Мокін Віталій Борисович,  
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Гончаренко Д.В.* Інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проєктування IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2025.

Метою дисертаційної роботи є підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проєктування інформаційних IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів шляхом розроблення інтелектуальної інформаційної технології.

У вступі даної роботи наведено: актуальність та обґрунтування вибору теми дослідження; описано мету, об'єкт, предмет та завдання даного дослідження; наукову новизну результатів, отриманих під час виконання дослідження; зв'язок дисертаційної роботи з науково-дослідними програмами та темами; практичну цінність результатів дослідження; апробацію отриманих результатів та наукові публікації за тематикою дисертаційного дослідження.

У першому розділі наведено огляд сучасних архітектур IoT-систем і здійснено порівняльний аналіз LPWAN-технологій. Визначено проблеми проєктування, які пов'язані з енергоефективністю, масштабованістю, впливом просторових й техногенних чинників. Окрему увагу приділено відсутності комплексної автоматизації процесу проєктування IoT-систем, яка враховувала б реальні просторові умови та обмеження LPWAN. Визначено подальші задачі дослідження.

У другому розділі розроблено методологію оптимального проєктування IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів. Удосконалено багатокритеріальний підхід до вибору мережевих технологій та IoT-платформ шляхом поєднання методів аналізу ієрархій, теорії корисності та математичного програмування. Запропоновано експертну систему з

використанням нечіткої логіки для визначення оптимального розміщення базових станцій та датчиків. Розроблено ієрархічну структуру бази знань та алгоритми прийняття рішень, що забезпечують формалізацію експертних оцінок. Вдосконалено підхід до інтеграції геоінформаційних систем та супутникових даних у процес проектування IoT-систем, що дозволяє обґрунтовано визначити оптимальні зони доцільного розміщення IoT-інфраструктури.

Третій розділ присвячено автоматизованому проектуванню IoT-систем на основі LPWAN-технологій. Запропоновано метод генерування PFD-діаграм, що поєднує великі мовні моделі з формалізованим алгоритмом оптимізації потоків даних. Удосконалено процес інженерного моделювання шляхом інтеграції двох взаємодоповнюючих LLM, які забезпечують баланс між точністю інтерпретації та синтаксичною коректністю побудови діаграми. Зібрано спеціалізований датасет, який використано для адаптації моделей до професійної термінології LPWAN, що підвищило якість структуризації систем та коректність наданих рекомендацій. Розроблено рекомендаційний чат-бот експертного рівня для автоматизації проектування, що поєднує генеративні можливості донавченої LLM із базою знань про LPWAN та реалізує надання адаптивних рішень у режимі реального часу.

У четвертому розділі продемонстровано прикладне застосування розробленої технології. Розроблено IoT-систему моніторингу водних ресурсів із сенсорними вузлами на базі мережі Sigfox та оптимізованим форматом пакетів даних. Застосовано експертну систему для визначення оптимальних місць розташування датчиків. Наведено приклад застосування рекомендаційного чат-бота для задач проектування IoT-систем. Проведено порівняння розробленої інтелектуальної технології з LLM-моделями та класичними алгоритмами, яке підтвердило переваги запропонованої технології.

У висновках подані основні результати дисертаційного дослідження.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасних підходів до проектування IoT-систем на базі технологій класу LPWAN. Розглянуто архітектурні рішення, структурні та

функціональні схеми взаємодії компонентів, методи конфігурації сенсорних мереж і принципи інтеграції з хмарними сервісами. Визначено ключові обмеження та переваги технологій класу LPWAN у контексті масштабованості, енергоощадності та надійності IoT-систем. Ідентифіковано ключові проблеми, які виникають при проектуванні IoT-систем на базі LPWAN. Встановлено, що наявні підходи лише частково враховують просторові чинники та не забезпечують оптимізації мережевої архітектури за техніко-економічними критеріями. Виявлені недоліки стали підґрунтям для розроблення інтелектуальної технології, спрямованої на підвищення ефективності та швидкодії автоматизованого проектування IoT-систем LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів.

2. Розроблено метод просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій IoT-систем на базі LPWAN, який забезпечує урахування просторових й техногенних факторів. Метод ґрунтується на інтеграції геоінформаційних технологій, супутникових даних, просторового аналізу та нечіткої експертної системи, що дає змогу формувати обґрунтовані багатокритеріальні оцінки придатності території для встановлення елементів мережі. Створена нечітка експертна система підтримує прийняття рішень в умовах просторової невизначеності та враховує вплив рельєфу, забудови й інших перешкод на якість сигналу. Запропонований метод дозволяє визначати оптимальну кількість, конфігурацію та просторове розташування IoT-давачів і базових станцій, що підвищує стабільність зв'язку, зменшує втрати даних і оптимізує витрати на розгортання мережі.

3. Створено метод автоматизованого формування PFD-діаграм, спрямований на підвищення структурно-функціональної ефективності та швидкодії процесу проектування IoT-систем на основі LPWAN. Метод забезпечує перетворення текстових описів компонентів і функціональних зв'язків у формалізовані PFD-діаграми шляхом поєднання генеративних можливостей великих мовних моделей із правилами оптимізації потоків даних, що враховують просторові й техногенні обмеження LPWAN-мереж. Запропонований підхід

підвищує узгодженість архітектурних рішень, зменшує трудомісткість розроблення та покращує структурно-функціональну точність побудови IoT-архітектур.

4. Розроблено рекомендаційного чат-бота, який забезпечує інтелектуальну підтримку процесу проєктування, зокрема формування технічних вимог, вибір архітектурних рішень та автоматизовану побудову PFD-діаграм. Чат-бот використовує донавчену LLM, адаптовану до предметної області LPWAN, що дозволяє коректно інтерпретувати текстові описи, генерувати структурно узгоджені архітектури IoT-систем та оптимізувати параметри мережевих технологій з урахуванням просторових й техногенних факторів. Система формує рекомендації у режимі реального часу, покращує структурну та функціональну цілісність результатів проєктування та забезпечує автоматизоване отримання проєктних матеріалів відповідно до вимог LPWAN.

Результати дисертаційного дослідження опубліковано в 11 роботах, у т.ч. у 4 статтях у наукових фахових періодичних виданнях, та 7 тезах доповідей на науково-практичних конференціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступних положеннях:

1. Вперше запропоновано метод комплексної просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій в інформаційних IoT-системах на базі Sigfox, який відрізняється від існуючих використанням нечіткої експертної системи для прийняття рішень в умовах просторової невизначеності, що дозволяє підвищити обґрунтованість проєктних рішень щодо розташування компонентів мережі з метою забезпечення стабільності зв'язку та оптимального використання її ресурсів.

2. Удосконалено метод багатокритеріального вибору архітектур інформаційних систем на основі LPWAN, який комплексно враховує специфіку функціонування таких мереж та просторові й техногенні обмеження, що дозволяє автоматизувати визначення оптимального рішення за критеріями вартості, енергоефективності, масштабованості та адаптивності IoT-систем до умов реального середовища.

3. Вперше запропоновано інтелектуальну інформаційну технологію автоматизованого проєктування інформаційних систем Інтернету речей на основі LPWAN-мереж, яка забезпечує підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності процесу проєктування з урахуванням просторових й техногенних факторів, завдяки поєднанню удосконаленого методу багатокритеріального вибору архітектури, методу комплексної просторової оптимізації розміщення компонентів, а також інструментів автоматизованого генерування PFD-діаграм і рекомендаційного чат-бота.

На валідаційному датасеті з структурно-функціонально-ефективних еталонних систем розроблена інтелектуальна інформаційна технологія досягла підвищення структурної точності на 22 % у порівнянні з аналогами, побудованими на основі відомих великих мовних моделей ChatGPT, Claude, Llama, Grok, та забезпечила підвищення швидкості проєктування на 56% у порівнянні з традиційними підходами без використання великих мовних моделей.

Практична цінність одержаних результатів полягає в наступному:

1. Створено інтелектуальну інформаційну технологію, орієнтовану на оптимальне проєктування IoT-систем на базі LPWAN-мереж, що дозволяє прискорити розроблення цифрових двійників складних просторових об'єктів та систем. Запропоноване рішення забезпечує автоматизований вибір мережевих технологій і програмно-технічних конфігурацій з урахуванням просторових й техногенних чинників, що дозволяє підвищити енергоефективність систем, адаптивність до різноманітних умов середовища та скоротити часові витрати на їх проєктування і подальше розгортання їх цифрових двійників.

2. Розроблено нечітку експертну систему, яка дає змогу визначити оптимальні місця встановлення давачів та базових станцій на основі комплексного аналізу геоінформаційних та супутникових даних.

Отримані результати є корисними для:

– проєктних та інженерних організацій, що займаються розробленням та впровадженням IoT-рішень, що підтверджено актом впровадження у

виробництво;

– навчального процесу Вінницького національного технічного університету під час викладання дисципліни «Інтернет речей та інтелектуальний аналіз даних» для аспірантів, які навчаються за освітньою програмою «Інформаційні системи та технології» рівня «доктора філософії» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», що засвідчено актом впровадження у навчальний процес.

**Ключові слова:** Інтернет речей, LPWAN, інтелектуальна технологія, інтелектуальний аналіз, оптимізація проєктування, просторова оптимізація, геоінформаційні системи, нечітка логіка, штучний інтелект, машинне навчання, цифрові двійники, архітектурні діаграми, рекомендаційний чат-бот, екологічний моніторинг, багатокритеріальний вибір, автоматизація проєктування, експертна система.

## ABSTRACT

*Honcharenko D.V.* Intellectual information technology for optimal design of IoT systems based on LPWAN, considering spatial and man-made factors.

Dissertation for obtaining the Doctor of Philosophy degree in the 126 «Information Systems and Technologies». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2025.

The aim of this dissertation is to enhance the performance and structural-functional efficiency of automated design of LPWAN-based IoT information systems, taking into account spatial and technogenic factors, through the development of an intelligent information technology.

The introduction of this dissertation presents the relevance and justification of the chosen research topic; defines the aim, object, subject, and objectives of the study; outlines the scientific novelty of the results obtained; describes the alignment of the dissertation with research programmes and projects; demonstrates the practical value of the findings; and provides information on the approbation of the results as well as the scientific publications related to the dissertation topic.

The first chapter provides a review of modern IoT system architectures and presents a comparative analysis of LPWAN technologies. The key design challenges related to energy efficiency, scalability, and the influence of spatial and technogenic factors are identified. Special attention is given to the lack of a comprehensive automation framework for IoT system design that would account for real spatial conditions and LPWAN constraints. The subsequent research tasks are defined accordingly.

The second chapter develops a methodology for the optimal design of LPWAN-based IoT systems, taking into account spatial and technogenic factors. The multicriteria approach to selecting networking technologies and IoT platforms is enhanced by integrating the Analytic Hierarchy Process, utility theory, and mathematical programming. An expert system based on fuzzy logic is proposed for determining the optimal placement of base stations and sensors. A hierarchical knowledge-base structure and decision-making algorithms are developed to formalize expert assessments. The

approach to integrating geographic information systems and satellite data into the IoT system design process is improved, enabling well-grounded identification of optimal zones for deploying the IoT infrastructure.

The third chapter is devoted to the automated design of IoT systems based on LPWAN technologies. A method for generating PFD diagrams is proposed, which integrates large language models with a formalized algorithm for data-flow optimization. The engineering modeling process is improved through the integration of two complementary LLMs, ensuring a balance between accurate interpretation and syntactic correctness of the generated diagrams. A specialized dataset is compiled and used to adapt the models to the professional LPWAN terminology, thereby enhancing the quality of system structuring and the correctness of the provided recommendations. An expert-level recommendation chatbot is developed to automate the design process, combining the generative capabilities of the fine-tuned LLM with an LPWAN knowledge base and providing adaptive solutions in real time.

The fourth chapter demonstrates the practical application of the developed technology. An IoT-based water resource monitoring system is implemented, featuring sensor nodes operating over the Sigfox network and an optimized data packet format. The expert system is applied to determine optimal sensor placement. An example of using the recommendation chatbot for IoT system design tasks is presented. A comparative evaluation of the developed intelligent technology against LLM-based and classical algorithmic approaches is conducted, confirming the advantages of the proposed solution.

The conclusions present the main results of the dissertation research.

The main scientific and practical results are as follows:

1. An analysis of contemporary approaches to the design of IoT systems based on LPWAN-class technologies has been conducted. Architectural solutions, structural and functional interaction schemes of system components, methods for configuring sensor networks, and principles of integration with cloud services have been examined. The key limitations and advantages of LPWAN technologies in the context of scalability, energy efficiency, and reliability of IoT systems have been identified.

Critical challenges that arise during the design of LPWAN-based IoT systems have been outlined. It has been established that existing approaches only partially account for spatial factors and do not ensure the optimization of network architecture according to techno-economic criteria. The identified shortcomings formed the basis for developing an intelligent technology aimed at enhancing the efficiency and performance of automated design processes for LPWAN IoT systems, taking into account spatial and technogenic factors.

2. A method for spatial optimization of the placement of IoT sensors and base stations in LPWAN-based IoT systems has been developed, ensuring the consideration of spatial and technogenic factors. The method is grounded in the integration of geoinformation technologies, satellite data, spatial analysis, and a fuzzy expert system, which enables the generation of justified multicriteria assessments of territorial suitability for installing network elements. The developed fuzzy expert system supports decision-making under conditions of spatial uncertainty and accounts for the influence of terrain, urban development, and other obstacles on signal quality. The proposed method makes it possible to determine the optimal number, configuration, and spatial arrangement of IoT sensors and base stations, thereby enhancing communication stability, reducing data loss, and optimizing network deployment costs.

3. A method for automated generation of PFD diagrams has been developed to enhance the structural-functional efficiency and performance of the design process for LPWAN-based IoT systems. The method enables the transformation of textual descriptions of components and functional interactions into formalized PFD diagrams by combining the generative capabilities of large language models with data-flow optimization rules that account for the spatial and technogenic constraints of LPWAN networks. The proposed approach improves the consistency of architectural solutions, reduces the labor intensity of system development, and increases the structural-functional accuracy of IoT architecture construction.

4. A recommender chatbot has been developed to provide intelligent support for the design process, including the formulation of technical requirements, selection of architectural solutions, and automated construction of PFD diagrams. The chatbot

utilizes a fine-tuned LLM adapted to the LPWAN domain, enabling accurate interpretation of textual descriptions, generation of structurally consistent IoT system architectures, and optimization of network technology parameters with consideration of spatial and technogenic factors. The system delivers real-time recommendations, enhances the structural and functional integrity of design outcomes, and ensures automated generation of project materials in accordance with LPWAN requirements.

The results of the dissertation research have been published in 11 works, including 4 articles in peer-reviewed scientific journals and 7 abstracts of presentations at scientific and practical conferences.

The scientific novelty of the dissertation lies in the following aspects:

1. For the first time, a method for comprehensive spatial optimization of sensor and base station placement in Sigfox-based IoT information systems has been proposed. This method differs from existing approaches by employing a fuzzy expert system for decision-making under spatial uncertainty, which enhances the justification of design decisions regarding the positioning of network components in order to ensure communication stability and optimal resource utilization.

2. The method for multicriteria selection of LPWAN-based information system architectures has been improved to comprehensively account for the operational specifics of such networks, as well as spatial and technogenic constraints. This enhancement enables the automated determination of an optimal solution according to criteria of cost, energy efficiency, scalability, and the adaptability of IoT systems to real-world environmental conditions.

3. For the first time, an intelligent information technology for the automated design of Internet of Things information systems based on LPWAN networks has been proposed. This technology enhances the performance and structural–functional efficiency of the design process by accounting for spatial and technogenic factors. It achieves this through the integration of an improved method for multicriteria architecture selection, a comprehensive method for spatial optimization of component placement, as well as tools for automated PFD diagram generation and a recommender chatbot. On a validation dataset composed of structurally and functionally efficient

reference systems, the developed intelligent information technology achieved a 22% increase in structural accuracy compared to counterparts built on well-known large language models such as ChatGPT, Claude, Llama, and Grok, and demonstrated a 56% improvement in design speed compared to traditional approaches that do not employ large language models.

The practical value of the results obtained is as follows:

1. An intelligent information technology has been developed for the optimal design of IoT systems based on LPWAN networks, enabling the accelerated creation of digital twins of complex spatial objects and systems. The proposed solution provides automated selection of network technologies and hardware–software configurations while accounting for spatial and technogenic factors, thereby enhancing system energy efficiency, adaptability to diverse environmental conditions, and reducing the time required for system design and subsequent deployment of their digital twins.

2. A fuzzy expert system has been developed that enables the determination of optimal locations for sensor nodes and base stations based on a comprehensive analysis of geoinformation and satellite data.

The obtained results are useful for:

- design and engineering organizations engaged in the development and deployment of IoT solutions, as confirmed by an implementation certificate introduced into industrial practice;

- the educational process at Vinnytsia National Technical University during the teaching of the discipline "Internet of Things and Intellectual Data Analysis" for postgraduate students studying under the educational program "Information Systems and Technologies" at the "Doctor of Philosophy" level, specialty 126 "Information Systems and Technologies."

**Keywords:** Internet of Things, LPWAN, Intelligent technology, Intelligent analysis, Design optimization, Spatial optimization, Geographic Information Systems, Fuzzy logic, Artificial Intelligence, Machine learning, Digital twins, Architectural diagrams, Recommendation chatbot, Environmental monitoring, Multi-criteria selection, Design automation, Expert system.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] Д. В. Гончаренко, В. Б. Мокін, і Д. П. Проценко, «Побудова інформаційної системи моніторингу фізичних показників на основі технології "Інтернет речей"», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, вип. 57, вип. 2, с. 99–108, (Верес. 2023). DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-57-2-99-108>. **(Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

*Запропоновано удосконалений метод багатокритеріального вибору архітектур в IoT-системах на базі LPWAN, який комплексно враховує специфіку функціонування таких мереж та просторові й техногенні обмеження.*

[2] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення давачів для IoT-моніторингу лісового господарства», *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 1, с. 155-164, (Бер. 2025). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350119>. **(Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

*Запропоновано метод комплексної просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій в IoT-системах на базі LPWAN, який відрізняється від існуючих використанням нечіткої експертної системи для прийняття рішень в умовах просторової невизначеності.*

[3] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Технологія розроблення рекомендаційного чат-бота на основі великих мовних моделей для проєктування IoT-системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 147-156 (Квіт. 2025). DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-147-156>. **(Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

*Запропоновано інтелектуальну технологію автоматизації проєктування IoT-систем на базі LPWAN за допомогою чат-бота на основі великих мовних моделей, який генерує архітектуру, PFD-діаграми та надає консультації, використовуючи донавчену модель на даних LPWAN для створення структурованих проєктних матеріалів із текстових описів.*

[4] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Метод автоматизованого генерування PFD-діаграм для проєктування IoT-системи на базі мережі Sigfox». *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 3, с. 88-95, (Трав. 2025). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350309>. (**Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126**)

*Запропоновано метод автоматизації проєктування IoT-системи для енергоефективних мереж LPWAN, зокрема Sigfox, який передбачає використання великих мовних моделей для генерування PFD-діаграм на основі текстових описів.*

[5] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Аналіз підходів щодо вибору архітектури інформаційних систем на основі інтернету речей за реальних умов», *матеріали LI Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 31 травня - 1 червня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022-/paper/view/16140>.

*Розглянуто характеристики архітектури інформаційної системи на основі Інтернету речей за реальних умов. Проаналізовано підходи щодо вибору архітектури інформаційної системи.*

[6] Проценко Д. П., Цвігун С. А., Гончаренко Д. В., «Аналіз зони покриття станції інтернету речей Sigfox для визначення місць розташування датчиків», *матеріали LII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/18937>.

*Проведено аналіз зони покриття станції Інтернету речей Sigfox для визначення місць розташування давачів.*

[7] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Сучасні IoT-реалізації інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)»*, Вінниця, 22 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/viewFile/18524>.

*Проведено аналітичний огляд сучасних рішень проектування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для моніторингу фізичних показників на основі IoT.*

[8] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Переваги технологій інтернету речей SIGFOX для створення локальної системи моніторингу атмосферного повітря», *Матеріали LII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/17211>.

*Проведено аналіз IoT-мережі Sigfox щодо можливості розгортання системи моніторингу якості атмосферного повітря.*

[9] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., Горячев Г. В., Варчук І. В., «IoT-система вимірювання параметрів стану вод на базі Sigfox», *матеріали LIII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 20 березня - 22 березня 2024 р. – Електрон. текст. дані. – 2024. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20077>.

*Запропоновано та випробувано IoT-систему для вимірювання параметрів води на основі Sigfox.*

[10] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Застосування нечіткої логіки в IoT-системах на базі Sigfox», *матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 24 березня – 27 березня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23214>.

*Досліджено можливості застосування нечіткої логіки для оптимізації просторового розташування IoT-давачів та базових станцій у мережах LPWAN на основі технології Sigfox.*

[11] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Система моніторингу стану води з

використанням Інтернету речей і технології Sigfox», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)»*, Вінниця, 15 червня – 16 червня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22414/18773>.

*Описано процес проектування системи моніторингу стану води на основі технологій Інтернету речей та мережі Sigfox.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ, МЕТОДІВ І ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ LPWAN.....	29
1.1    Огляд підходів до проєктування ІоТ-систем на основі LPWAN.....	29
1.1.1.    Концепція ІоТ-систем і актуальність їх проєктування .....	30
1.1.2.    Роль LPWAN у побудові енергоефективних ІоТ-систем .....	33
1.1.3.    Аналіз основних підходів до проєктування ІоТ-систем .....	35
1.1.4.    Обмеження сучасних підходів до проєктування ІоТ-систем .....	37
1.2.    Аналіз архітектурних рішень для ІоТ-систем .....	39
1.3.    Аналіз класу технологій LPWAN для побудови ІоТ-рішень .....	46
1.3.1.    Загальні принципи вибору мережевих технологій в ІоТ.....	46
1.3.2.    Класифікація та характеристики LPWAN-технологій.....	50
1.3.3.    Аналіз сучасних ІоТ-рішень на базі LPWAN-технологій.....	56
1.4.    Аналіз факторів середовища та автоматизованих підходів до проєктування ІоТ-систем .....	60
1.5    Висновки до розділу .....	63
РОЗДІЛ 2 ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ LPWAN З УРАХУВАННЯМ ПРОСТОРОВИХ Й ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ.....	65
2.1    Розроблення методу багатокритеріального вибору архітектур інформаційних систем на основі LPWAN .....	65
2.2    Створення методу комплексної просторової оптимізації розміщення ІоТ-давачів і базових станцій ІоТ-системи на базі LPWAN.....	73

2.3	Інтеграція геоінформаційних систем та супутникових даних у процес прийняття рішень .....	92
2.4	Висновки до розділу .....	98
РОЗДІЛ 3 СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ .....		100
3.1	Розроблення методу автоматизованого створення технологічних PFD-діаграм за текстовими описами .....	100
3.2	Створення рекомендаційного чат-бота для проєктування ІоТ-систем на основі LLM .....	116
3.3	Проєктування структури інформаційної технології .....	130
3.4	Висновки до розділу .....	137
РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ .....		139
4.1	ІоТ-система вимірювання параметрів стану вод на базі Sigfox .....	139
4.2	Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення датчиків для ІоТ-моніторингу лісового господарства .....	148
4.3	Застосування рекомендаційного чат-бота для проєктування ІоТ-систем .....	152
4.4	Порівняння розробленої інтелектуальної інформаційної технології з аналогами .....	156
4.5	Висновки до розділу .....	172
ВИСНОВКИ .....		173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....		176
ДОДАТКИ .....		192
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....		192
ДОДАТОК Б БАЗА ЗНАНЬ .....		195

ДОДАТОК В АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ СИГНАЛУ З МІНІМАЛЬНИМ ВПЛИВОМ НА ЯКІСТЬ СИГНАЛУ .....	197
ДОДАТОК Г РОЗШИРЕНА PFD-ДІАГРАМА .....	198
ДОДАТОК Д АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС .....	200
ДОДАТОК Е АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ВНТУ .....	201

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет

ГІС – Геоінформаційна система

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

ІІТ – інтелектуальна інформаційна технологія

ІоТ-система – інформаційна система на основі Інтернету речей

Кафедра САІТ – кафедра системного аналізу та інформаційних технологій

ВНТУ

ІІ – штучний інтелект

AI - Artificial Intelligence (штучний інтелект)

ІоТ – Internet of Things (Інтернет речей)

LLM – Large Language Model (велика мовна модель)

LoRaWAN – Long Range Wide-Area Network (широкозонна бездротова мережа з великим радіусом дії)

LPWAN – Low-Power Wide-Area Network (мережа з низьким енергоспоживанням і великим радіусом дії)

NB-ІоТ – Narrow Band Internet of Things (вузькосмуговий Інтернет речей)

PFD – Process Flow Diagram (діаграма потоків процесу)

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Як відомо, Інтернет речей (IoT) є потужною платформою для вирішення повсякденних задач [1-6]. Концепція Інтернету речей передбачає підключення мільярдів пристроїв, які можуть взаємодіяти між собою та користувачами в режимі реального часу. У багатьох країнах світу вчені активно досліджують проблеми створення та вдосконалення інформаційних систем Інтернету речей. Свій внесок у розвиток IoT зробили такі дослідники, як Андреа Занелла, Рабіндранат Бера, Чжун Фань, Віталій Мокін, В'ячеслав Ковтун, Юрій Калюх та інші [7–12].

У контексті зростання масштабів IoT-систем та кількості підключених пристроїв особливо важливою стає їх здатність працювати тривалий час автономно, що безпосередньо залежить від вибору енергоощадних мережевих технологій. Важливою вимогою до таких пристроїв є здатність працювати без підзарядки протягом тривалого часу. Одним із рішень для досягнення тривалої автономної роботи є використання глобальних мереж зв'язку з низьким енергоспоживанням LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). LPWAN є найпопулярнішою недорогою мережею зв'язку, яка надає зв'язок на великі відстані та забезпечує довготривалий термін експлуатації батареї живлення. Найбільш відомими сучасними технологіями LPWAN є Sigfox, NB-IoT та LoRaWAN.

Клас технологій LPWAN має декілька переваг перед іншими технологіями. Зокрема, він має велику дальність передачі радіосигналу, низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв, високу проникну здатність радіосигналу у міській забудові, високу масштабованість мережі на великих територіях, відсутність необхідності отримання частотного дозволу та плати за радіочастотний спектр. Основні недоліки даного класу технологій пов'язані з відносно низькою пропускну здатністю, затримкою передачі даних, обмеженою кількістю переданих повідомлень та відсутністю єдиного глобального стандарту для бездротових LPWAN-мереж.

Однією з актуальних проблем сучасного етапу розвитку IoT-систем на базі LPWAN є необхідність у розробці інтелектуальних підходів до оптимізації архітектури та програмно-технічних рішень, що є основою для створення високоточних цифрових двійників фізичних об'єктів і процесів. Це пов'язано з ускладненням середовища функціонування, підвищеними вимогами до енергоефективності, а також варіативністю просторових й техногенних факторів. Зокрема, в умовах реального розгортання IoT-мереж виникають труднощі з оптимальним розміщенням датчиків, базових станцій, вибором архітектури, технології зв'язку та протоколів інтеграції з хмарними сервісами. Важливо враховувати вплив таких чинників як рельєф місцевості, густоту та щільність забудови, наявність джерел радіоперешкод, рівень екологічної загрози та вимоги до захисту даних. За таких умов традиційні методи проектування часто не забезпечують належного рівня адаптації системи до змінюваних параметрів середовища. Тому доцільним є використання підходів, заснованих на технологіях штучного інтелекту.

Ефективне проектування IoT-систем на основі LPWAN потребує розроблення інтелектуальних інформаційних технологій, які можуть автоматизувати формування архітектури системи, здатної ефективно забезпечувати даними цифрового двійника, на основі вхідних описів завдання, типових сценаріїв використання, просторових й техногенних факторів впливу на компоненти, а також враховувати техніко-економічні і функціональні вимоги до системи. Застосування такого підходу дозволяє значно скоротити терміни розроблення та впровадження IoT-систем, підвищити точність та відповідність до технічних умов, а також забезпечити масштабованість і адаптивність до реальних умов експлуатації.

Попри активні дослідження у напрямку оптимального проектування IoT-систем, наразі відсутня комплексна інформаційна технологія автоматизації цього процесу, яка здатна враховувати просторові й техногенні чинники. Відповідно виникає потреба у розробці інтелектуальної інформаційної технології, орієнтованої на використання LPWAN і здатної адаптуватися до зазначених умов.

Поєднання методів аналізу даних, геоінформаційних систем, нечіткої логіки та штучного інтелекту дозволить значно прискорити та автоматизувати процес проєктування IoT-систем.

Поєднання методів аналізу даних, геоінформаційних систем, нечіткої логіки та штучного інтелекту дозволить значно прискорити та автоматизувати процес проєктування IoT-систем.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась у межах НДР кафедри САІТ 28-К7 «Інформаційні технології та системи моніторингу, моделювання та системного інтелектуального аналізу й оптимізації даних у складних об'єктах» протягом 2022-2023 рр. на замовлення МОН України та – у межах НДР кафедри САІТ 28-К8 «Системний аналіз та створення інформаційних систем й інтелектуальних технологій процесів у складних об'єктах» у 2024-2025 рр. на замовлення МОН України.

### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою дослідження є підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проєктування інформаційних IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів шляхом розроблення інтелектуальної інформаційної технології.*

Задачами дослідження є такі:

- провести огляд відомих підходів до проєктування IoT-систем на основі LPWAN, проаналізувати ключові виклики, що виникають під час розроблення, конфігурування та впровадження таких систем;
- розробити інтелектуальну інформаційну технологію, що містить нові підходи, методи та алгоритми, які дозволяють оптимізувати проєктування інформаційних систем на основі Інтернету речей та класу технологій LPWAN за техніко-економічними та функціональними критеріями, а також підвищити точність відтворення еталонних проєктних структур таких систем;

- розробити метод просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій, з урахуванням впливу просторових й техногенних факторів, з використанням геоінформаційних технологій та нечітких експертних систем;
- створити алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації запропонованої інтелектуальної інформаційної технології з автоматизованим вибором IoT-архітектури, конфігурацією сенсорної мережі, побудовою технологічних схем та адаптацією під обмеження LPWAN-мереж;
- апробувати та впровадити розроблену інтелектуальну інформаційну технологію на прикладних задачах побудови IoT-систем.

*Об'єктом дослідження* є процес проєктування IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів.

*Предметом дослідження* є інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проєктування IoT-систем на основі LPWAN, що забезпечує врахування просторових, техногенних та енергетичних обмежень у виборі архітектури, мережевих технологій і програмно-технічних рішень.

**Методи дослідження** містять загальнонаукову методологію проведення досліджень і принципи системного підходу: аналіз літературних джерел та відкритих даних, експериментальні дослідження, інтелектуальні методи і технології. Крім того, в дослідженнях використовувались алгоритми аналізу та методи машинного навчання.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано метод комплексної просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій в інформаційних IoT-системах на базі Sigfox, який відрізняється від існуючих використанням нечіткої експертної системи для прийняття рішень в умовах просторової невизначеності, що дозволяє підвищити обґрунтованість проєктних рішень щодо розташування компонентів мережі з метою забезпечення стабільності зв'язку та оптимального використання її ресурсів.

2. Удосконалено метод багатокритеріального вибору архітектур інформаційних систем на основі LPWAN, який комплексно враховує специфіку

функціонування таких мереж та просторові й техногенні обмеження, що дозволяє автоматизувати визначення оптимального рішення за критеріями вартості, енергоефективності, масштабованості та адаптивності IoT-систем до умов реального середовища.

3. Вперше запропоновано інтелектуальну інформаційну технологію автоматизованого проєктування інформаційних систем Інтернету речей на основі LPWAN-мереж, яка забезпечує підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності процесу проєктування з урахуванням просторових й техногенних факторів, завдяки поєднанню удосконаленого методу багатокритеріального вибору архітектури, методу комплексної просторової оптимізації розміщення компонентів, а також методу автоматизованого генерування PFD-діаграм і рекомендаційного чат-бота.

На валідаційному датасеті з структурно-функціонально-ефективних еталонних систем розроблена інтелектуальна інформаційна технологія досягла підвищення структурної точності на 22 % у порівнянні з аналогами, побудованими на основі відомих великих мовних моделей ChatGPT, Claude, Llama, Grok, та забезпечила підвищення швидкості проєктування на 56% у порівнянні з традиційними підходами без використання великих мовних моделей .

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Створено інтелектуальну інформаційну технологію, орієнтовану на оптимальне проєктування IoT-систем на базі LPWAN-мереж. Розроблено нечітку експертну систему, яка на основі інтеграції геоінформаційних та супутникових даних дозволяє визначати оптимальні місця встановлення датчиків і базових станцій. Запропоновано метод автоматизованого формування PFD-діаграм із текстових описів архітектури за допомогою великих мовних моделей. Створено рекомендаційний чат-бот експертного рівня, що поєднує базу знань про LPWAN із можливостями генеративних моделей.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до впровадження у виробничий процес ТОВ «Промавтоматика Вінниця» під час створення та використання IoT-системи моніторингу стану водних ресурсів.

Результати роботи передано та впроваджено у навчально-науковий процес кафедри системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ під час викладання дисципліни «Інтернет речей та інтелектуальний аналіз даних» для аспірантів, які навчаються за освітньою програмою «Інформаційні системи та технології» рівня «доктор філософії» спеціальності 126.

**Особистий внесок здобувача.** Усі теоретичні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто і належать йому. У роботі [13] розроблено удосконалений метод багатокритеріального вибору оптимальних LPWAN-технологій та IoT-платформ для побудови інформаційної системи моніторингу фізичних показників. У [14] запропоновано метод просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій у мережі Sigfox з використанням нечіткої експертної системи для визначення оптимальних місць встановлення давачів IoT-моніторингу лісового господарства з урахуванням екологічних параметрів на базі ГІС та супутникових знімків. У [15] розроблено інтелектуальну технологію автоматизованого проєктування інформаційних систем Інтернету речей на основі LPWAN-мереж з урахуванням просторових й техногенних факторів, оптимальних за техніко-економічними та функціональними критеріями. У [16] запропоновано метод автоматизованого генерування PFD-діаграм для проєктування IoT-систем на базі Sigfox. Застосовано великі мовні моделі (LLM) для контекстного аналізу текстового опису, структурування системи, оптимізації потоків даних під обмеження LPWAN і графічної візуалізації схем. У [17] розглянуто характеристики архітектури інформаційної системи на основі Інтернету речей за реальних умов. Проаналізовано підходи щодо вибору архітектури інформаційної системи. У [18] запропоновано інформаційну систему аналізу зони покриття станції Інтернету речей Sigfox для визначення місць розташування давачів. У [19] здійснено аналітичний огляд сучасних рішень проєктування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для моніторингу фізичних показників на основі IoT.

У [20] здійснено аналіз IoT-мережі Sigfox щодо можливості розгортання системи моніторингу якості атмосферного повітря. Описано зібраний пристрій та за його допомогою проведено експериментальні дослідження на території ВНТУ з використанням базової станції Sigfox університету. У [21] розроблено IoT-систему для вимірювання параметрів води на основі Sigfox. У [22] розглянуто застосування нечіткої логіки для оптимізації просторового розташування IoT-давачів та базових станцій у мережах LPWAN на основі технології Sigfox. Проаналізовано існуючі підходи до використання нечітких експертних систем для покращення ефективності передавання даних та управління енергоспоживанням. У [23] представлено проектування системи моніторингу стану води на базі технологій Інтернету речей та Sigfox.

**Публікації.** Загалом, за тематикою дисертаційного дослідження опубліковано 11 наукових праць. Серед них опубліковано 4 статті у наукових журналах України категорії Б, які є фаховими зі спеціальності 126 - Інформаційні системи та технології, 7 тез доповідей у збірниках науково-практичних конференцій.

**Апробація матеріалів дисертації.** Усі описані наукові результати та здобутки, які є частиною дисертаційної роботи, пройшли апробацію на 6 наукових конференціях, де, загалом, було опубліковано 7 тез у співавторстві:

– ІІ Всеукраїнська науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ), Вінниця, 31 травня - 1 червня 2022 р;

– ІІІ Всеукраїнська науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ), Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р;

– Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», Вінниця, 22 червня 2023 р;

– LIII Всеукраїнська науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ), Вінниця, 20 березня - 22 березня 2024 р;

– LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ), Вінниця, 24 березня – 27 березня 2025 р;

– Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», 15 червня – 16 червня 2025 р;

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає – 201 сторінку, у тому числі: 155 сторінок основного тексту, 58 рисунків, 22 таблиці, список використаних джерел із 113 найменувань, кількість додатків – 6.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ, МЕТОДІВ І ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ LPWAN

### 1.1 Огляд підходів до проєктування IoT-систем на основі LPWAN

Проєктування та розроблення інформаційної системи на основі технології IoT — це процес створення та консолідації програмних і апаратних компонентів, які дозволяють автоматично збирати, обробляти та аналізувати дані про фізичні показники з різних джерел інформації, насамперед із давачів [24].

Процес проєктування інформаційних систем Інтернету речей є складною багаторівневою задачею, яка передбачає поєднання апаратного та програмного забезпечення, технологій бездротового зв'язку, обчислювальних ресурсів і засобів обробки даних [25]. Сучасні IoT-системи мають забезпечувати автономну роботу пристроїв протягом тривалого часу, особливо якщо такі системи впроваджуються у віддалених або важкодоступних місцях. Для забезпечення автономності використовуються енергоефективні мережеві технології, такі як LPWAN, які дозволяють зменшити енергоспоживання системи, забезпечуючи достатню зону покриття зв'язком.

Під час проєктування IoT-систем важливу роль відіграє вибір архітектури, визначення конфігурації сенсорної мережі, вибір розташування базових станцій та давачів, вибір протоколів передавання даних та засобів їх обробки. Оскільки клас технологій LPWAN має обмеження щодо пропускну здатності та кількості повідомлень, проєктування IoT-систем на їх базі потребує спеціальних підходів [26]. Розгортання IoT-систем у реальному середовищі супроводжується впливом різноманітних просторових й техногенних факторів таких як: рельєф місцевості, щільність забудови, джерела завад, обмеження енергоспоживання тощо [27]. Наведені фактори істотно впливають на працездатність IoT-мережі.

Наукові дослідження останніх років розкривають підходи до проєктування IoT-систем, проте більшість з них не забезпечують автоматизацію процесів

проектування та не враховують комплекс обмежень середовища функціонування, що унеможлиблює створення адекватних цифрових двійників для моніторингу та прогнозування [28].

У цьому підрозділі детально розглянуто поточний стан і проблематика проектування IoT-систем, що функціонують на основі класу технологій LPWAN. Наступні пункти підрозділу надають уявлення про ключові концепції, підходи та виклики в цій сфері.

### 1.1.1. Концепція IoT-систем і актуальність їх проектування

«Інтернет речей» (англ.: «Internet of Things», скорочено – IoT) – це концепція, що описує мережу фізичних об'єктів (речей), які з'єднані між собою і з Інтернетом, мають здатність автоматично збирати дані та обмінюватися ними [29]. Ця парадигма забезпечує інтеграцію фізичних пристроїв у цифрові системи, що дозволяє створювати нові можливості для автоматизації, моніторингу та управління в різних галузях. IoT-системи забезпечують безперервне збирання, передавання, оброблення та аналіз даних у режимі реального часу. Використання таких систем у галузях енергетики, сільського господарства, логістики, медицини, екологічного моніторингу тощо дозволяє значно підвищити продуктивність, оптимізувати процеси та підвищити рівень контролю та автоматизації.

Архітектура IoT-системи, зазвичай, складається з трьох функціональних рівнів (рис. 1.1) [30]:

1. рівень сприйняття (англ. «Perception») – пристрої збирання даних;
2. мережевий рівень (англ. «Network») – пристрої для передавання даних;
3. рівень обробки та аналізу (англ. «Application») – сервери, хмарні сервіси, аналітичні платформи).

У деяких випадках використовуються розширені архітектури з проміжними рівнями.

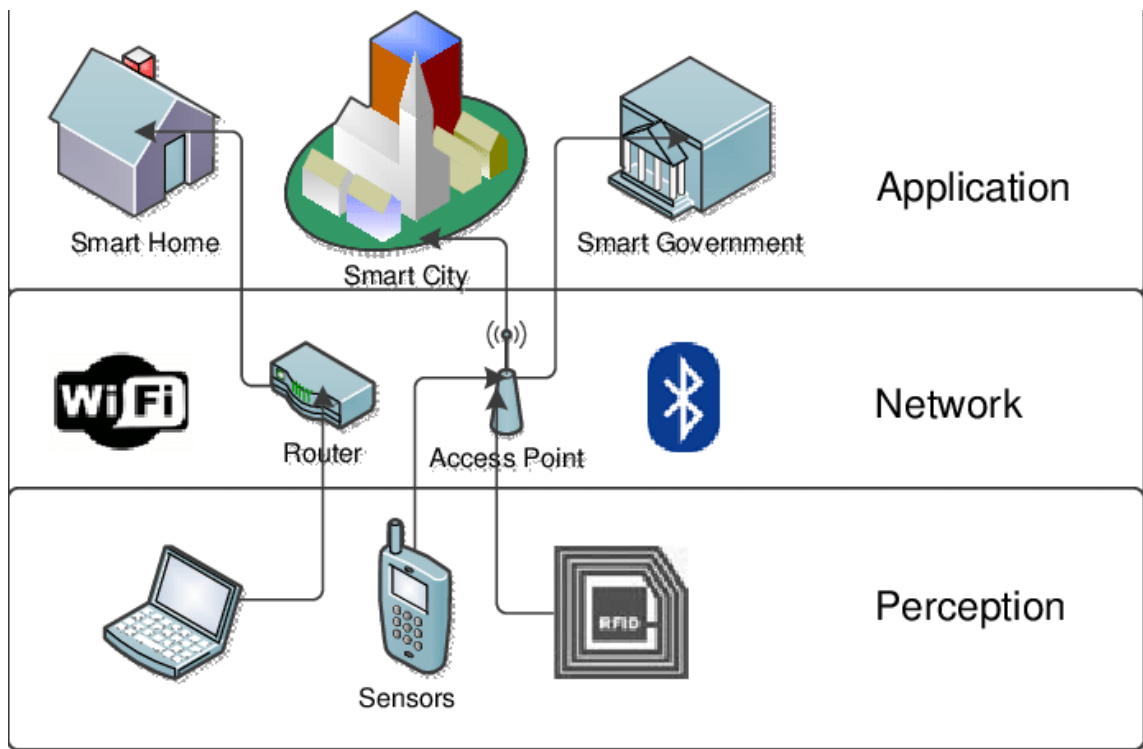


Рисунок 1.1 – Тривірнева архітектура Інтернету речей [31]

З технічної точки зору, критичним аспектом функціонування IoT-систем є забезпечення надійного та енергоефективного зв'язку між пристроями збирання даних (давачами), які можуть розташовуватись у різних середовищах – від міських забудов до віддалених гірських територій. Значна частина IoT-вузлів енергоефективних систем працює, завдяки живленню від акумуляторів та має обмежені обчислювальні ресурси. Це унеможливорює використання високошвидкісних або енергозатратних мережевих технологій. У таких випадках використовують технології класу LPWAN, які забезпечують велику дальність зв'язку та низьке енергоспоживання компонентів системи. В таблиці 1.1 наведено порівняння найпоширеніших бездротових мережевих технологій за ключовими показниками.

Таблиця 1.1 – Порівняння найпоширеніших мережевих технологій за ключовими показниками [32]

<b>Attribute</b>	<b><i>Bluetooth Low Energy</i></b>	<b><i>Wi-Fi</i></b>	<b><i>IEEE 802.15.4</i></b>	<b><i>LPWAN</i></b>
Latency	Low	High	High	LTE-M: Medium, NB-IoT: High
Range	Low – High (Configurable)	Low – Medium	Low – Medium	High
Power Consumption	Low	High	Low	LTE-M: Medium, NB-IoT: Low
Reliability	High	Low	Medium	High

Сучасний стан розвитку IoT-систем характеризується зростанням їх кількості, розширенням сфер застосування та ускладненням умов експлуатації. Дедалі більше проєктів передбачають розгортання систем у складних природніх умовах (гірська місцевість, міська зона із високою щільністю забудови, великі промислові зони і т. д.), де фактори середовища мають безпосередній вплив на якісь зв'язку, точність передавання даних та тривалість автономної роботи пристроїв [33]. Також, зростають вимоги до адаптивності систем, можливості швидкого масштабування та конфігурування мережі з урахуванням різноманітних факторів.

З огляду на сучасні тенденції розвитку IoT-систем, їх проєктування це – не лише інженерна задача, а й – інформаційно-аналітичне завдання, що потребує системного підходу до вибору структури мережі, компонентів і конфігурацій на основі багатьох вхідних критеріїв. До таких критеріїв можна віднести такі: географічне розташування об'єктів моніторингу, джерела потенційних завад, вартість обладнання, вимоги щодо енергоефективності тощо. Кількість критеріїв зростає залежно відповідно до умов конкретної задачі.

Попри значний інтерес та попит до IoT та класу технологій LPWAN, існує низка невирішених проблем, пов'язаних з автоматизацією процесу проєктування IoT-систем. Більшість існуючих підходів є трудомісткими та шаблонними. Часто вони не враховують реальні умови функціонування таких систем, базуються на фіксованих типових сценаріях і не забезпечують адаптацію до мінливого середовища. Крім того, додаткові вимоги до проєктування зумовлені обмеженістю ресурсів LPWAN-систем. Розглянемо роль класу технологій LPWAN у побудові енергоефективних IoT-систем.

### 1.1.2. Роль LPWAN у побудові енергоефективних IoT-систем

Зі зростанням складності проєктування та розгортання IoT-систем значного поширення набувають мережеві технології, які забезпечують тривалу автономну роботу пристроїв у зонах із обмеженим доступом до джерел енергії та нестабільними умовами зв'язку. Потреба в енергоощадності без втрати якості сигналу є ключовим фактором для визначення архітектури IoT-системи, протоколів зв'язку та обладнання [34]. У цьому контексті LPWAN-технології набули популярності, завдяки здатності задовольнити перелічені потреби.

LPWAN-технології призначені для створення мереж із великою кількістю пристроїв, які передають невеликі обсяги даних з мінімальними витратами енергії (рис. 1.2). Вони дозволяють забезпечувати зв'язок між віддаленими об'єктами без використання енерговитратних рішень або складної інфраструктури. Типовим сценарієм їх використання є задачі, де необхідно періодично передавати дані від великої кількості пристроїв. Це можуть бути задачі, пов'язані з екологічним моніторингом, створенням «розумних» міст, моніторингом сільського господарства, моніторингом промисловості тощо.

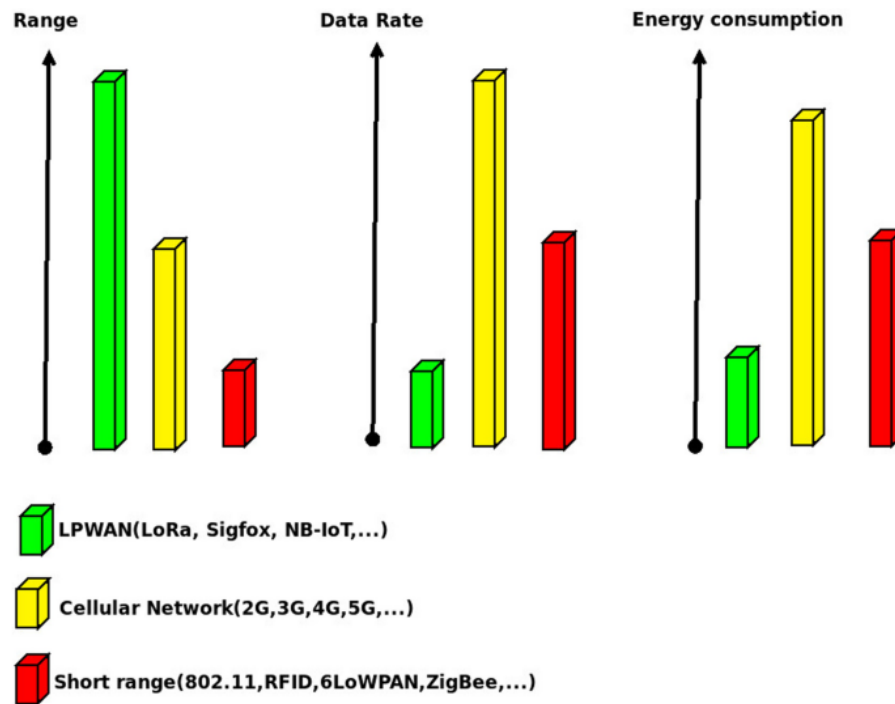


Рисунок 1.2 – Порівняння LPWAN з іншими мережевими технологіями з точки зору дальності (англ. «Range»), швидкості передачі даних (англ. «Data Rate»), та споживання енергії (англ. «Energy consumption») [35]

LPWAN обирають для реалізації масштабованих IoT-систем, які орієнтовані на моніторинг різноманітних процесів, завдяки поєднанню великого радіусу дії та тривалого терміну експлуатації джерела живлення. Найпоширенішими технологіями класу є LoRaWAN, NB-IoT та Sigfox. Кожна з технологій має свої переваги та обмеження, залежно від умов розгортання, вимог надійності та топології мережі.

Незважаючи на ефективне передавання інформації на великі відстані та низьке енергоспоживання LPWAN, їх використання передбачає певні технологічні та організаційні обмеження. Усі системи на базі LPWAN мають невисоку пропускну здатність, обмежену кількість повідомлень за добу, затримку у передаванні даних та обмежений двосторонній зв'язок. Якість сигналу істотно залежить від умов місцевості, де розгортається така IoT-система. Це робить вплив просторових й техногенних чинників ще більш значущим у процесі проектування систем. Проектування систем на базі LPWAN не може здійснюватися за уніфікованими шаблонами, адже кожне середовище потребує адаптації з

урахуванням специфіки технології, топології майбутньої мережі, а також фізичних обмежень.

LPWAN є не лише засобом зв'язку, а й – ключовим технологічним компонентом, який впливає на вибір архітектурних рішень та можливості функціонування IoT-систем. Врахування особливостей цього класу технологій на ранніх етапах проектування дозволяє забезпечити енергоефективність, знизити витрати на обслуговування та підвищити надійність функціонування мережі в умовах просторової неоднорідності. Це створює передумови для застосування інтелектуальних підходів, які здатні автоматизувати процес проектування з урахуванням повного комплексу характеристик середовища та системи.

### 1.1.3. Аналіз основних підходів до проектування IoT-систем

Проектування IoT-систем є складним багаторівневим процесом, який передбачає визначення структури, вибір програмно-технічних рішень, конфігурування мережі для забезпечення відповідності системи вимогам. Метою проектування є створення архітектури, яка одночасно відповідає функціональним вимогам користувачів, технологічним обмеженням обладнання та особливостям середовища розгортання. У світовій науковій літературі та інженерній практиці сформувався кілька основних підходів до проектування, що відрізняються рівнем формалізації, гнучкістю та ступенем автоматизації [36].

На ранніх етапах розвитку IoT використовувались інтуїтивно-евристичні підходи, які ґрунтувались на досвіді інженерів та використанні типових сценаріїв розгортання систем. Рішення про кількість вузлів, вибір місць їхнього розташування та параметри мережі приймалися вручну. Такий підхід дозволяв враховувати специфічні умови експлуатації, проте мав суттєві обмеження: низьку масштабованість, складність адаптації до мінливого середовища та високу залежність від кваліфікації розробників.

З розвитком IoT-технологій з'явилися параметризовані методи проектування, які передбачають формування системної конфігурації на основі

набору критеріїв: технічних (радіус дії, швидкість передавання даних, стійкість завад), економічних (вартість обладнання, витрати на обслуговування), функціональних (частота збору даних, затримки, надійність), а також експлуатаційних (енергоспоживання, час автономної роботи). Ці методи дозволяють створювати більш формалізовані та відтворювані рішення, але часто ґрунтуються на спрощених моделях розповсюдження сигналу та ідеалізованих умовах роботи, що не відповідає складності реальних міських чи промислових зон.

Подальший розвиток отримали підходи, які орієнтовані на врахування просторових факторів. Просторово-орієнтоване проектування передбачає моделювання географічного середовища та визначення оптимального розташування вузлів і базових станцій з урахуванням рельєфу місцевості, щільності забудови, природних перешкод та техногенних завад. Такий підхід дозволяє підвищити точність прогнозування покриття та ефективність використання ресурсів. Для реалізації даного підходу застосовують геоінформаційні системи та програмні засоби радіопланування. Недоліком є висока складність у використанні та вартість, а також потреба в додатковій кваліфікації персоналу.

З появою штучного інтелекту розпочався розвиток інтелектуальних підходів до проектування IoT-систем. Нові підходи передбачають використання алгоритмів машинного навчання, нечіткої логіки та великих мовних моделей для підтримки прийняття рішень. Інтелектуальні підходи до проектування дозволяють автоматизувати аналіз архітектурних рішень, прогнозувати ефективність тієї чи іншої конфігурації мережі, адаптувати систему до нових умов роботи. Проте, такі методи не представлені цілісною системою, відповідно потребують ретельного налаштування, якісного навчального набору даних та адаптації під обмеження LPWAN. Наявні рішення мають фрагментарний характер та не забезпечують врахування можливих обмежень та вимог до IoT-системи на базі LPWAN. У них відсутня інтеграція між етапами проектування, мережеве планування та просторова візуалізація, що призводить до втрати цілісності системи.

#### 1.1.4. Обмеження сучасних підходів до проєктування IoT-систем

Попри значний розвиток IoT-систем, як було зазначено вище, існуючі підходи до їх проєктування мають низку суттєвих обмежень, які перешкоджають ефективному впровадженню таких систем у реальному середовищі. Особливо це стосується випадків, коли об'єкти моніторингу розташовані у просторово неоднорідних або складних техногенних умовах. Традиційні підходи до проєктування не передбачають автоматизованого врахування впливу зовнішнього середовища на параметри передавання сигналу, енергоспоживання або надійності функціонування компонентів системи [37]. Отримані у такий спосіб конфігурації часто не відповідають реальним експлуатаційним умовам, що призводить до втрат даних, зменшення часу автономної роботи або виведення з ладу компонентів системи.

Наявні методи, переважно, не враховують географічної специфіки місцевості. Рішення приймаються на основі ідеалізованих або середньостатистичних моделей без урахування реальних обмежень. Це особливо актуально для LPWAN-систем, для яких зв'язок на великі відстані є одним із ключових показників ефективності. Рівень сигналу істотно залежить від ландшафту, погодних умов, наявності завад. Внаслідок цього відбувається розрив між спроектованою моделлю та її фактичною ефективністю за конкретних умов.

Ще однією проблемою є обмежене використання просторового аналізу території. Попри достатню кількість геоінформаційних даних та ГІС-засобів, більшість методів не передбачають їх інтеграції в процес проєктування IoT-системи. Це суттєво знижує можливість адаптувати систему до складного середовища та підвищує витрати часу на її проєктування. Актуальні підходи не забезпечують повної автоматизації процесу. Вони орієнтовані на проєктування окремих фрагментів системи, які потім може бути складно поєднати в єдину систему. В результаті не забезпечується цілісне мережеве планування, яке враховувало б взаємопов'язані параметри функціонування системи. Якщо ж такі

IoT-системи функціонують в умовах складного середовища, можуть виникати критичні збої або неефективне використання доступних ресурсів.

Більшість сучасних рішень розроблені під фіксований сценарій і не можуть автоматично адаптуватись до зміни топології, зростання кількості пристроїв, появи нових завад або зміни режиму роботи. Всі ці зміни передбачають безпосереднє залучення фахівця, який займався проєктуванням IoT-системи. Невирішеною проблемою є відсутність інтеграції між процесами проєктування, верифікації та візуалізації конфігурації. Ці процеси виконуються окремо, з використанням різних інструментів, що може призводити до неузгодженості між моделлю, реальними умовами та очікуваним результатом. Відсутність єдиного середовища для проєктування ускладнює командну роботу фахівців та інтеграцію з іншими інформаційними системами. Описані проблеми безпосередньо актуальні для IoT-систем на базі LPWAN. LPWAN-технології дозволяють розгорнути ефективні, масштабовані та енергоощадні IoT-системи, проте їх чутливість до умов середовища та просторових чинників потребує адаптації проєктних рішень. Вирішення цих проблем полягає у створенні нових інформаційних технологій, які орієнтовані на автоматизоване, інтелектуальне проєктування IoT-систем.

З метою систематизації основних проблем та перспектив їх вирішення, в табл. 1.2 наведено типові проблеми сучасного проєктування IoT-систем, можливі напрямки їх вирішення та очікувані результати від впровадження.

Таблиця 1.2 – Основні проблеми сучасного проєктування IoT-систем на основі LPWAN та напрями їх вирішення [38]

Проблема	Потенційне вирішення	Очікуваний результат впровадження
Відсутність урахування просторових й техногенних факторів	Інтеграція геоінформаційного аналізу та просторового моделювання	Покращення точності розміщення компонентів, зниження втрат сигналу, підвищення надійності системи

Продовження табл. 1.2

Відсутність адаптивності до змін середовища	Розробка самоадаптивних конфігурацій	Підвищення життєвого циклу системи, стійкість до змін та появи нових обмежень
Низький рівень автоматизації процесу	Використання алгоритмів ШІ, експертних систем для підтримки прийняття рішень	Автоматизація процесу проектування, підвищення гнучкості
Відсутність єдиного середовища для проектування	Побудова інтегрованої платформи для об'єднання процесів проектування	Зниження ризику помилок, покращення командної роботи фахівців, уніфікація процесу
Спрощені або ідеалізовані моделі проектування систем на базі LPWAN	Формалізація характеристик LPWAN у математичних моделях і правилах конфігурації	Підвищення точності моделювання системи, адаптація до реального середовища
Розірваність етапів проектування	Наскрізна інтеграція життєвого циклу системи на основі єдиної концептуальної моделі	Узгодженість конфігурації, стабільність роботи системи

## 1.2. Аналіз архітектурних рішень для IoT-систем

Архітектура інформаційної технології або системи – це сукупність взаємопов'язаних концептуальних, програмних та організаційних рішень, що визначають структуру, принципи функціонування та взаємодії компонентів з урахуванням вимог до функціональності, масштабованості, безпеки та продуктивності [39]. Розроблення архітектури IoT-систем є ключовим етапом, що обумовлює ефективність усіх етапів життєвого циклу системи – від збирання даних до їх оброблення та аналізу.

Особливістю проектування архітектури для систем Інтернету речей є необхідність взаємодії великої кількості фізичних пристроїв, що розташовуються

в різних природних умовах і мають обмежені ресурси живлення. Зважаючи на це, архітектурні рішення мають враховувати не лише логіку обміну інформацією, а й фізичну організацію середовища, способи бездротового передавання даних, здатність до масштабування.

У загальному вигляді архітектура IoT-системи – це структурована модель, яка описує взаємозв'язок фізичних пристроїв, програмних сервісів, засобів зв'язку та інформаційних потоків даних [40]. Модель охоплює опис усіх фізичних пристроїв (давачі, виконавчі пристрої, шлюзи), мережевих технологій (Sigfox, LoRaWan, NB-IoT та інші), програмних інтерфейсів, протоколів обміну та логіки управління. Архітектура системи визначає те, як буде забезпечено стійкість до збоїв, захищеність даних і адаптивність до змін середовища.

Однією з основних задач при розробці технічного рішення розгортання систем Інтернету речей є визначення еталонної архітектури, що підтримує поточні функції та майбутні розширення. З огляду на це, така архітектура має бути: масштабованою, інтероперабельною, дистрибутивною, безпечною [41]. Не існує єдиної еталонної архітектури, оскільки вона охоплює багато технологій. Створення такої архітектури є доволі складним процесом, попри численні умови щодо стандартизації. Незважаючи на відсутність еталонної архітектури, базовою вважається трирівнева архітектура (рис. 1.3). Також, використовують п'ятирівневу архітектуру (рис. 1.4) та архітектури, що побудовані на принципах хмарних (англ. «Cloud computing») (рис. 1.5), туманних (англ. «Fog computing») (рис. 1.6) і граничних обчислень (англ. «Edge computing»). Кожна з них має переваги, обмеження та умови ефективного застосування [42].

Найбільш узагальненим є підхід до моделювання IoT-архітектури у вигляді трирівневої структури, яка містить рівень сприйняття, мережевий рівень та прикладний рівень [43]. Рівень сприйняття – це фізичний рівень об'єктів, які взаємодіють із навколишнім середовищем шляхом збирання та оброблення інформації. До цього рівня відносяться об'єкти, які мають можливість взаємодіяти із зовнішнім світом та володіють обчислювальними потужностями. Це можуть бути граничні пристрої, давачі, приводи. Мережевий рівень відповідає за

з'єднання рівня сприйняття з фізичним рівнем. Він призначений для передачі та обробки даних, які надходять із давачів. Рівень додатків призначений для взаємодії з користувачем.

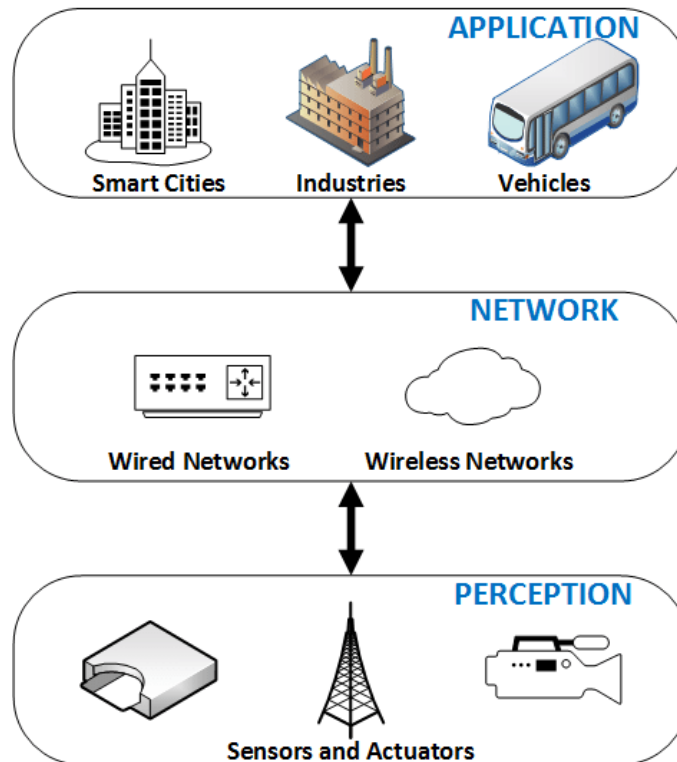


Рисунок 1.3 – Трирівнева архітектура IoT [44]

Такий архітектурний підхід дозволяє логічно відокремити фізичну інфраструктуру від програмних засобів оброблення, проте не враховує складність потоків даних, вимоги до адаптивності та взаємодії з корпоративною інфраструктурою. В умовах великої кількості просторово розділених пристроїв така архітектура не забезпечує необхідного рівня гнучкості.

Трирівнева архітектура отримала подальший розвиток та вдосконалення у вигляді п'ятирівневої архітектури. Вона деталізує функціональну структуру IoT-системи за рахунок додавання рівня проміжного програмного забезпечення та бізнес-рівня [45]. Рівень проміжного програмного забезпечення надає деякі розширені функції, такі як: зберігання, обчислення, обробка, можливості виконання дій. Бізнес-рівень відповідає за стратегічне управління, візуалізацію аналітики, зв'язок із зовнішніми системами.

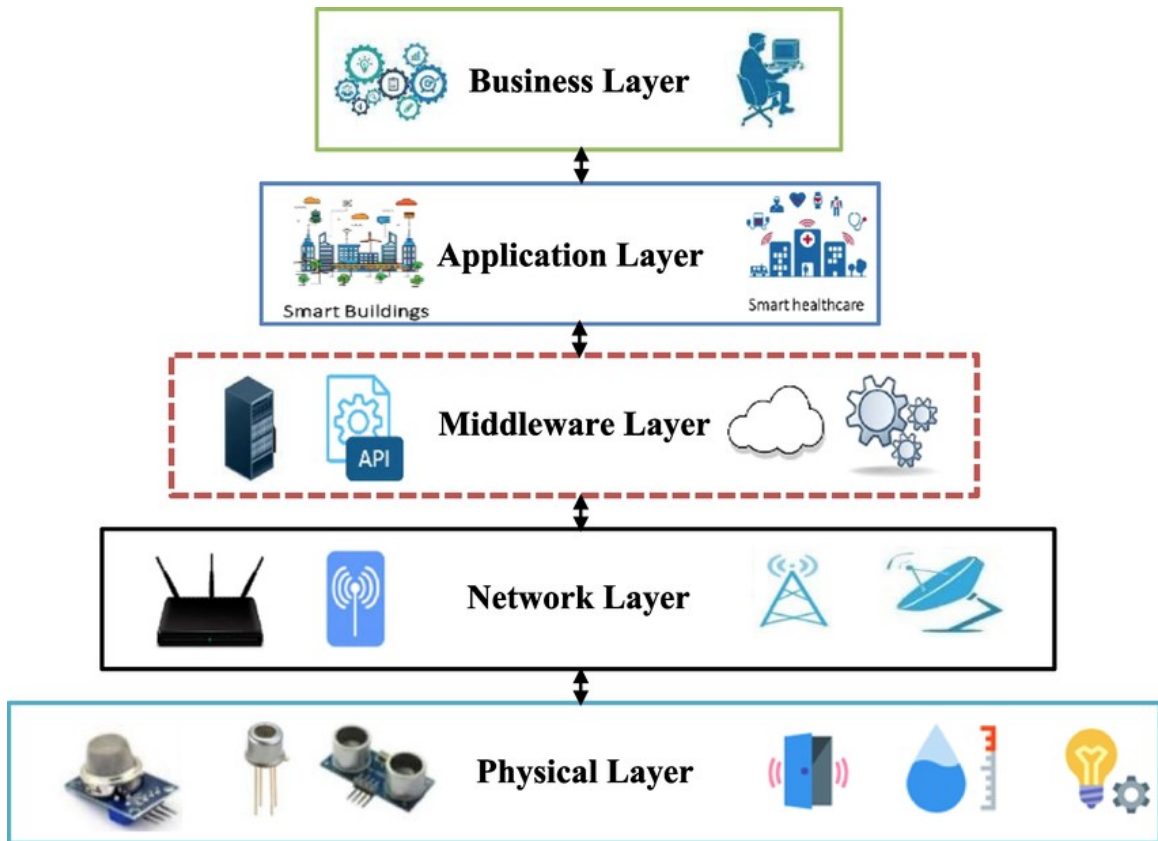


Рисунок 1.4 – П'ятирівнева архітектура IoT [46]

П'ятирівнева архітектура дозволяє досягти кращого розподілу навантаження, реалізувати адаптивні та інтелектуальні механізми оброблення даних, знизити затримку і забезпечити кращу інтеграцію між технологічним рівнем і бізнес-логікою. На проміжному рівні (англ. «Middleware Layer») можна реалізувати механізми локальної агрегації даних, що дозволяє знизити трафік у мережі та навантаження на центральні вузли системи.

В архітектурі, що побудована на принципах хмарних обчислень (рис. 1.5), оброблення, зберігання та аналіз даних виконуються на потужних віддалених серверах. Давачі та інші IoT-пристрої надсилають дані через шлюзи до хмари. Там ці дані оброблюються та стають доступними для користувачів або інших систем [47]. Такий підхід забезпечує високий рівень масштабованості, централізоване управління та високий рівень інтеграції із зовнішніми системами.

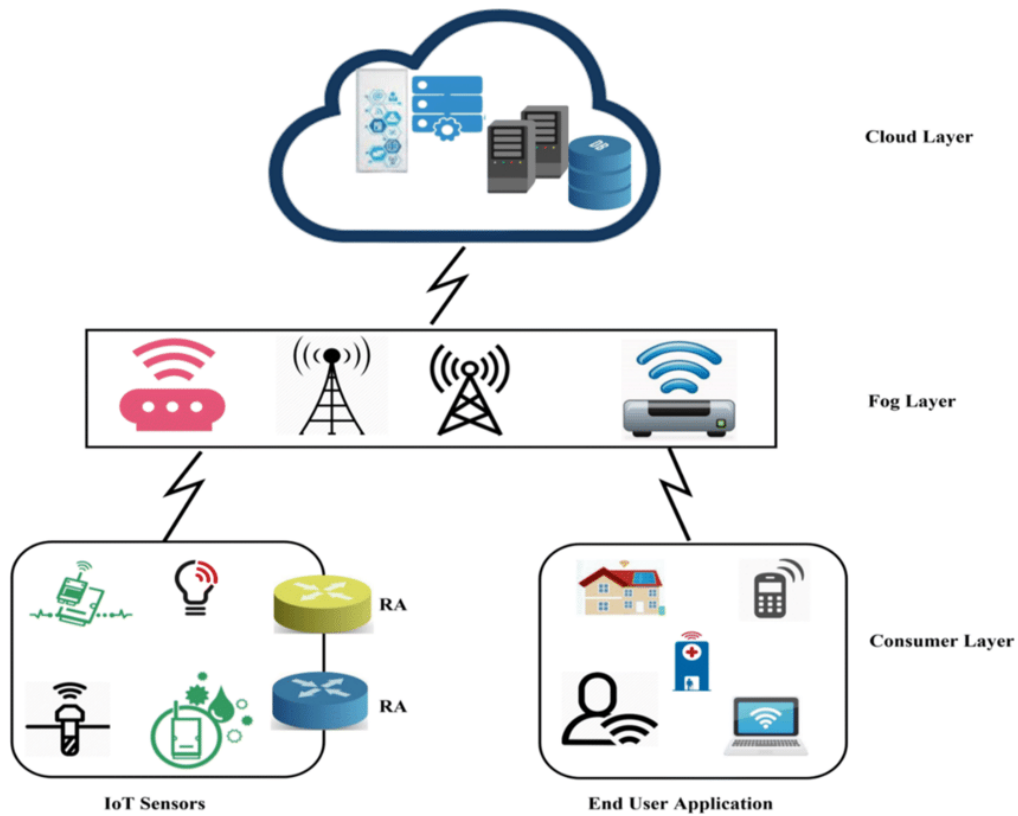


Рисунок 1.5 – IoT-архітектура, побудована на принципах хмарних обчислень [48]

Перевагами даної архітектури є її гнучкість, можливість централізованої аналітики та ефективного зберігання накопичених даних. Використання такої архітектури у реальному середовищі з просторовими обмеженнями супроводжується низкою проблем. Зокрема, високою затримкою під час обміну інформацією, ризиком перенавантаження мережі при підключенні великої кількості пристроїв і підвищеними вимогами до каналів зв'язку.

Архітектура, що побудована на принципах туманних обчислень (рис. 1.6), передбачає розміщення обчислювальних ресурсів між пристроями сприйняття та хмарою. У цій архітектурі дані оброблюються на рівні туманних вузлів (шлюзи, вбудовані контролери, локальні сервери). Такий підхід дозволяє знизити затримки, оптимізувати навантаження на хмарну інфраструктуру та забезпечити часткову автономність системи у випадку нестабільного зв'язку. Архітектура складається з фізичних та логічних елементів у вигляді апаратного та програмного забезпечення для реалізації мереж IoT [49].

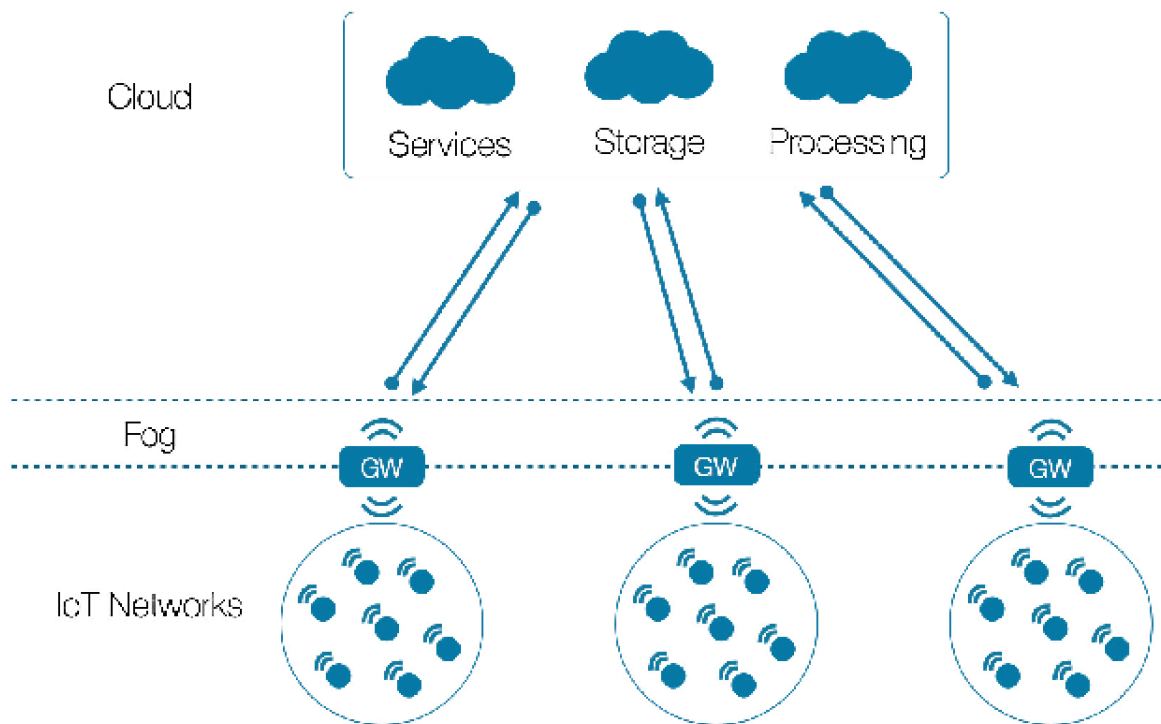


Рисунок 1.6 – IoT-архітектура, побудована на принципах туманних обчислень [50]

Архітектура, побудована на принципах туманних обчислень, добре поєднується з просторово-розподіленими IoT-системами. Вона дає змогу адаптувати логіку оброблення до локальних умов. Наприклад, враховувати щільність забудови, локальні завади, особливості ландшафту тощо.

Архітектура, що побудована на принципах граничних обчислень, передбачає, що ключові обчислення виконуються безпосередньо на пристрої або поблизу нього [51]. Таким чином, більшість даних оброблюється ще на етапі збирання, що дозволяє мінімізувати трафік до серверів оброблення, знизити затримки та досягти кращого рівня автономності. Використання такого типу архітектури є перспективним, коли система має завжди працювати у режимі реального часу, підключення до мережі може бути нестабільним, а географічні або техногенні фактори перешкоджають надійній централізованій комунікації.

Трирівневу архітектуру, зазвичай, розглядають як базову модель організації IoT-систем, оскільки вона визначає фундаментальні принципи взаємодії компонентів. Її головною перевагою є модульність та ізоляція функціонування окремих рівнів. Це дозволяє модернізувати або адаптувати елементи архітектури

без впливу на інші. Такий підхід дозволяє спростити масштабування системи, оптимізувати взаємодію розробників із різною спеціалізацією та забезпечити стабільність базових сервісів. Незважаючи на описані переваги, трирівнева модель часто є недостатньо гнучкою під час побудови складних систем, що потребують високої адаптивності та інтеграції з технологіями граничних і хмарних обчислень.

Розширені архітектурні моделі, такі як п'ятирівнева архітектура, доповнюють класичну структуру двома додатковими рівнями. Така модель дозволяє реалізувати гнучке управління логікою IoT-додатків, виконувати первинну обробку й агрегацію даних ще до їх надсилання у хмару та формувати бізнес-аналітику з урахуванням стратегічних цілей користувача.

Сучасні архітектури, що побудовані на принципах граничних або туманних обчислень, формують новий рівень адаптивності. Технології граничних обчислень демонструють найкращі результати, коли необхідно забезпечити мінімальну затримку, швидку реакцію на події, зменшення обсягу трафіку до хмари та енергоефективність. Архітектура, що побудована на принципах туманних обчислень, натомість, дозволяє розмістити інтелектуальну обробку на рівні між пристроєм і хмарою. Це дозволяє враховувати географічну специфіку місцевості. Рішення, прийняті на туманному рівні, мають доступ до контекстної інформації та можуть бути адаптовані до змін в навколишньому середовищі.

Архітектура IoT-систем часто реалізується як багаторівнева модель із чітко визначеним потоком даних. Першим етапом практичної реалізації побудови такої системи є чітке формулювання задачі, яку вона має вирішити. Далі визначаються умови експлуатації. На основі цих характеристик обирається архітектурна модель, яка має забезпечити ефективну маршрутизацію та обробку інформаційних потоків, адаптацію до змін у середовищі функціонування, безпечну комунікацію та стійкість до збоїв. Також, слід визначити протоколи комунікації, вибір яких залежить від режиму передавання даних. Вибір мережевого стеку та типу комунікації тісно пов'язаний із технологією зв'язку. У випадку із класом

технологій LPWAN критичною потребою є мінімізація кількості переданих повідомлень та оптимізація взаємодії із сервером.

У сучасних дослідженнях також звертається увага на питання надійного передавання масивного трафіку в IoT-системах, зокрема на основі TSP-механізмів, як-от у роботі [52], де запропоновано використання кінцевого IoT-пристрою для агрегації та контролю передачі даних у мережах з інтенсивним трафіком.

Вибір архітектури IoT-системи тісно пов'язаний з умовами її використання, типами пристроїв і сценаріями обробки даних. Однак, сама по собі архітектура не може забезпечити ефективну роботу системи без належного підбору мережових технологій, які відповідають її технічним і функціональним вимогам. Тому важливо розглянути, які саме технології зв'язку сьогодні використовуються в IoT-рішеннях, у чому полягають їхні переваги та обмеження, а також як вони реалізуються на практиці в різних сферах.

### **1.3. Аналіз класу технологій LPWAN для побудови IoT-рішень**

#### **1.3.1. Загальні принципи вибору мережових технологій в IoT**

Проектування IoT-системи передбачає не лише розробку логіки збирання, оброблення та передачі даних, а й ретельний вибір архітектури системи. Ключовим етапом є обґрунтований вибір мережової технології, яка забезпечує ефективний зв'язок між пристроями, шлюзами та серверними платформами. Вибір мережової технології впливає на продуктивність системи, її енергоефективність, масштабованість та надійність.

Для забезпечення ефективної взаємодії IoT-пристроїв використовуються різноманітні мережові технології, що відповідають специфіці конкретних застосувань. Для локальних мереж із високою пропускнуою здатністю та низькою затримкою передавання повідомлень часто застосовують технології Wi-Fi або Bluetooth, які забезпечують швидкий обмін даними на короткі відстані, проте

потребують значних енергоресурсів [7, 53]. Основним їхнім недоліком є високий рівень енергоспоживання, що значно обмежує автономність вузлів у системах, які орієнтовані на довготривале функціонування без втручання фахівців.

У деяких випадках IoT-системи можуть використовувати дротові мережі зв'язку, такі як Ethernet або Powerline Communication (PLC), які здатні забезпечити високу надійність, стабільність з'єднання та більшу пропускну здатність порівняно із бездротовими технологіями. Проте дротові мережі мають недоліки, основним із яких є потреба у фізичній інфраструктурі, що обмежує їх масштабованість та ускладнює розгортання в умовах віддалених або динамічних середовищ [54].

Для систем, що охоплюють значні території, використовують стільникові мережі (4G або 5G), які надають високу швидкість передавання даних та надійне мережеве з'єднання, проте вимагають високого енергоспоживання та наявності вартісної інфраструктури [55]. Для систем, що потребують передачі даних на великі відстані при обмежених потужностях, застосовуються бездротові мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN).

LPWAN — це клас стандартів та рішень для бездротового зв'язку IoT, що характеризуються великими зонами покриття, низькими швидкостями передачі даних з невеликими розмірами пакетів та значною тривалістю роботи від батареї [56]. Бездротова мережа LPWAN використовується для збирання даних від різних IoT-давачів, які можуть бути розташовані далеко від мережевої інфраструктури.

LPWAN може використовувати різні технології зв'язку, зокрема LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT. Ці технології використовують радіочастоти, які дозволяють передавати дані на великі відстані [57]. Ключовою характеристикою пристроїв, що використовують клас технологій LPWAN, є низьке споживання енергії.

Важливим критерієм вибору мережевої технології для IoT-систем є діапазон дії, який визначає максимальну відстань, на якій пристрої можуть надійно обмінюватись даними. Різні технології мають суттєві відмінності, що впливають на їх придатність для конкретних сценаріїв застосування. Локальні технології зв'язку, такі як Bluetooth, Zigbee тощо, обмежені десятками метрів, тоді як LPWAN

та стільникові мережі здатні забезпечувати зв'язок на відстані у десятки кілометрів (рис. 1.7).

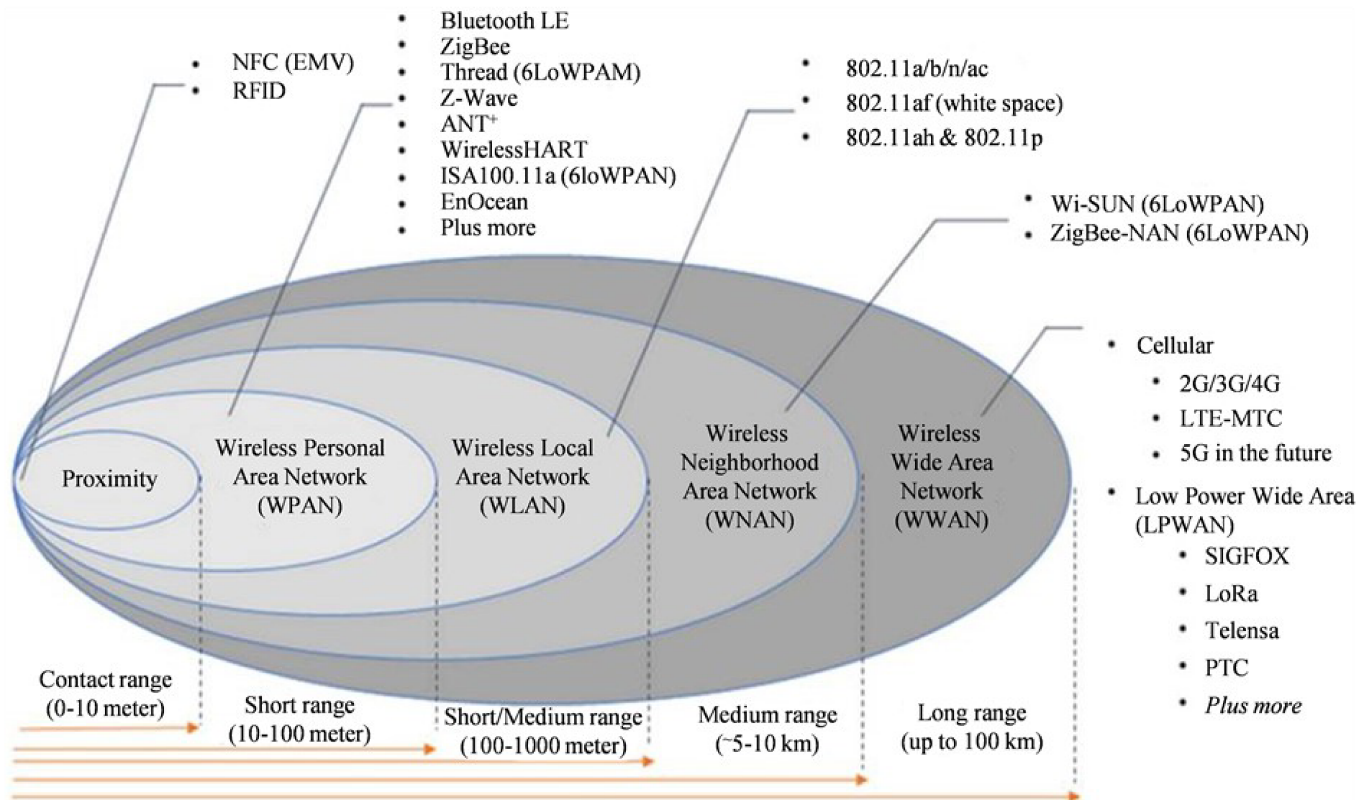


Рисунок 1.7 – Географічне покриття бездротового доступу [58]

Порівняння основних характеристик найпопулярніших мережових технологій для IoT наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння мережових технологій [58]

Технологія	Відстань зв'язку	Максимальне з'єднання	Швидкість передачі даних	Енергоспоживання
WiFi	~100 м	≤ 255	> 10 Мбіт/с	Високе
ZigBee	~10–75 м	≤ 255	Максимум 171,2 кбіт/с	Низьке

Продовження таблиці 1.3

LPWAN	2 – 15 км	$\leq 50\,000$ (NB-IoT), $\leq$ 200 000 (LoRa)	Адаптивна швидкість від 0,1 до 250 кбіт/с	Дуже низьке
Bluetooth	До 10 м	$\sim 8$	До 2 Мбіт/с	Помірне
4G/5G	До 10 – 30 км	$> 1$ млн/км <sup>2</sup>	До 1 Гбіт/с	Високе

Як видно із таблиці 1.3, LPWAN-технології мають найкращий баланс між дальністю дії, масштабованістю та енергоефективністю. Відповідно, використання LPWAN є найкращим рішенням у контексті побудови розподілених автономних систем, які не потребують частого обслуговування.

Технології мережевого зв'язку, зокрема LPWAN, відіграють ключову роль в енергоефективності сучасних IoT-систем, що передають дані на значні відстані. Цей тип мереж вирізняється широким радіусом дії та низькою швидкістю передачі, що дозволяє суттєво економити енергію. Завдяки цьому пристрої можуть працювати на одному заряді батареї до 10 років. Енергоощадність LPWAN забезпечується кількома чинниками. Мережі використовують прості схеми модуляції, такі як вузькосмугова передача, що потребує значно менше енергії, ніж технології на зразок Wi-Fi чи 5G. Ще одна особливість — асинхронна передача даних. Це означає, що пристрої не підтримують постійного зв'язку з мережею, а лише періодично «прокидаються», щоб надіслати інформацію, після чого знову переходять у режим сну. Крім того, LPWAN передбачає використання спеціальних режимів енергозбереження, таких як Power Saving Mode (PSM), який дозволяє пристроям залишатися неактивними більшість часу, активуючись лише за потреби [59]. Також протоколи, що використовуються в цих мережах, оптимізовані для зменшення розміру пакетів даних.

### 1.3.2. Класифікація та характеристики LPWAN-технологій

Найпопулярнішими реалізаціями LPWAN-технологій є LoRaWAN, Sigfox і NB-IoT. Кожна з технологій реалізує власний протокол зв'язку, архітектуру мережі та механізми енергоощадження. Ці протоколи використовують радіочастоти, які дозволяють передавати дані на великі відстані [60]. Потужність пристроїв, що використовують протоколи LPWAN, є одним із ключових факторів їх ефективності.

Розглянемо технічні аспекти технологій LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT [61, 62]. LoRaWAN використовує технологію LoRa на низьких частотах для великої зони покриття без масштабної інфраструктури. Вона використовує метод модуляції CSS для стабільної комунікації з високим SNR і стійкістю до перешкод. У LoRaWAN є шість факторів розповсюдження (SF7-SF12), які впливають на швидкість та дальність передачі даних. LoRaWAN використовує зіркоподібну архітектуру з можливістю масштабування до тисяч пристроїв на один шлюз і підтримує кілька класів енергоспоживання (Class A, Class B, Class C).

Sigfox – малопотужна бездротова мережа, що використовує стандарт ISM. Вона використовує технологію Ultra Narrow Band (UNB) на низькій частоті для великого покриття та енергоефективності. Протокол Sigfox працює в режимі Half Duplex, де кінцевий пристрій відправляє короткі повідомлення до базової станції без підтвердження передачі. Це забезпечує енергоефективну роботу, але обмежує обсяг та частоту передачі.

NB-IoT – це LPWAN-технологія, що працює в ліцензованому діапазоні поряд з LTE та GSM. Вона використовує компоненти фізичного та верхнього рівнів стеку протоколу LTE. Діапазон частот технології має самостійний режим (використовує існуючі GSM-діапазони частот), режим резервного діапазону (не використовується ресурсний блок з резервного діапазону LTE) та режим внутрішнього діапазону (використовуються ресурсні блоки перенесення LTE). Технологія підтримує повноцінний двосторонній обмін даними та характеризується високим рівнем масштабованості [63-65].

У таблиці 1.4 наведено порівняння характеристик технологій LPWAN.

Таблиця 1.4 – Особливості мережевих технологій LPWAN

	Технології		
	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT
Робоча частота	433, 868, 780, 915 МГц	865 – 924 МГц	700 – 900 МГц
Пропускна здатність	7.8 – 500 kHz	100 Hz	180 kHz
Максимальний розмір пакета	До 255 байт	12 байт	до 160 байт
Максимальна швидкість передавання даних	До 50 кбіт/с у режимі пристроїв типу «Class A», до 1 Мбіт/с у режимі «Class C»	До 100 біт/с	до 250 кбіт/с
Зона покриття (відкрита місцевість)	18 км	50 км	100 км
Зона покриття (щільна забудова)	5 км	10 км	10-15 км
Топологія мережі	Mesh-топологія, зірка	Зірка	Зірка
Шифрування	AES-128	AES-128	3GPP 128-256 біт
Потужність передачі	14 дБм, 27 дБм	14 дБм, 27 дБм	20 – 23 дБм
Споживання енергії	Від кількох мкВт до кількох мВт	Від кількох мкВт до кількох мВт	Від кількох мВт до кількох десятків мВт
Радіус дії базової станції/шлюзу	2-10 км	3-40 км	5-10 км

Кожна з технологій має свою унікальну структуру. Мережа LoRaWAN має розподілену архітектуру, що складається з трьох основних рівнів: вузлів, шлюзів та мережевих серверів (рис. 1.8).

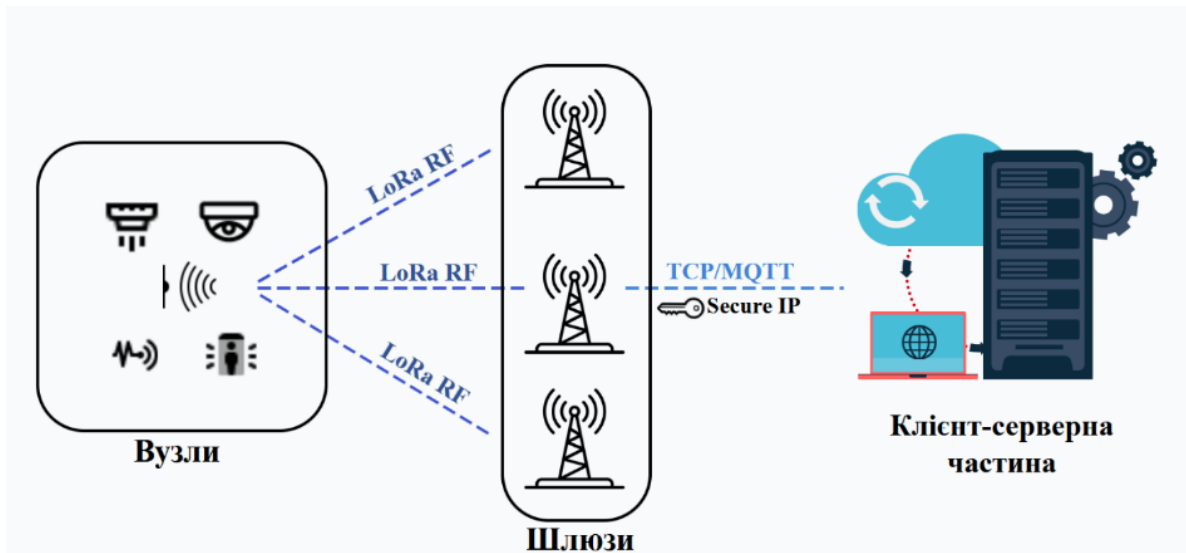


Рисунок 1.8 – Структура мережі LoRaWAN

Мережа Sigfox складається з трьох рівнів: вузлів, базових станцій і облікових серверів (рис 1.9). Взаємодія в мережі Sigfox відбувається лише в одному напрямку: від вузла до базової станції.

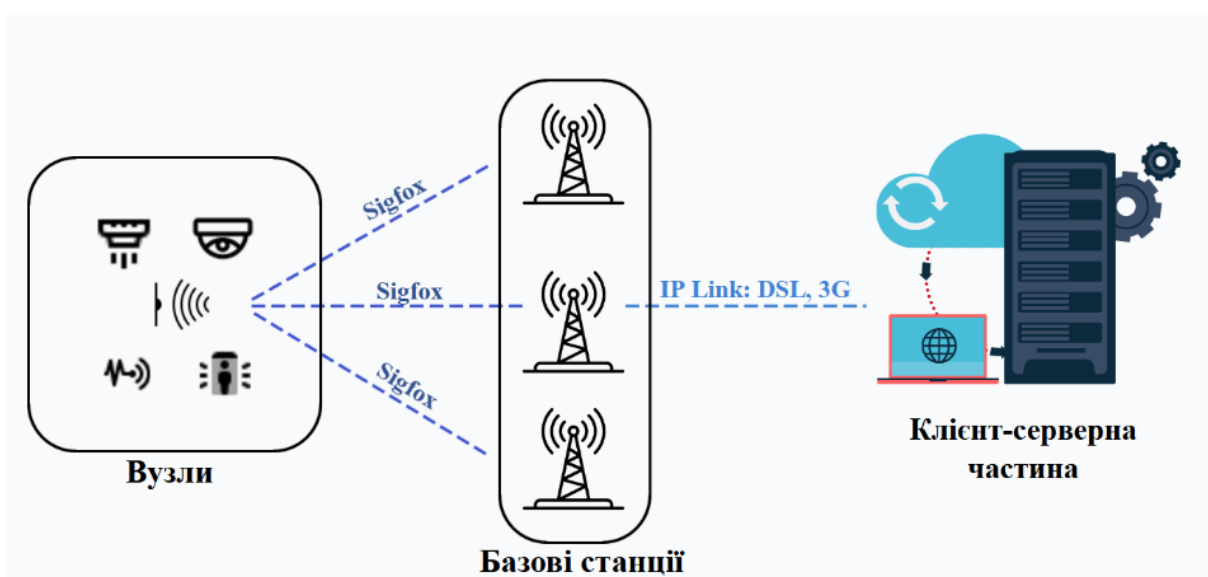


Рисунок 1.9 – Структура мережі Sigfox

Основна структура мережі NB-ІоТ складається з чотирьох рівнів: пристроїв, базових станцій, ядра мережі (Core Network) та серверної частини (рис 1.10).

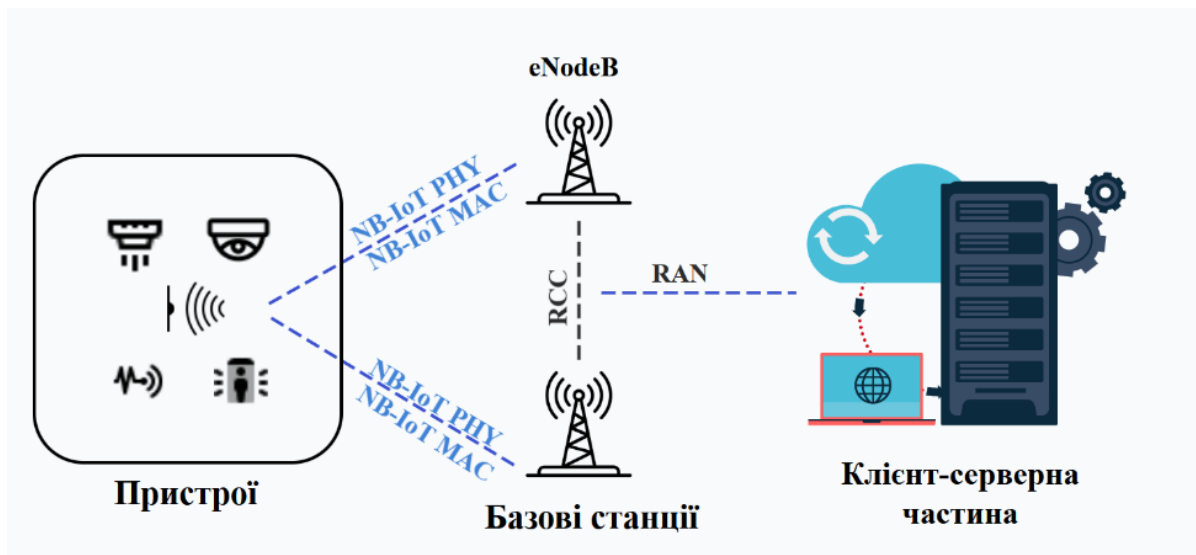


Рисунок 1.10 – Структура мережі NB-IoT

Модуль NB-IoT використовується для передавання даних з датчиків через мережу. Він містить вбудований модем та антену для передавання та отримання інформації [66]. Геолокація в мережах NB-IoT може здійснюватися двома способами: позиціонування за ідентифікатором базової станції та GNSS (глобальна навігаційна система).

Кожна з технологій знаходить своє ефективне застосування залежно від потреб. LoRaWAN підходить для рішень, де потрібно будувати власні IoT-мережі, завдяки своїй гнучкості та незалежності від операторів мобільного зв'язку. Найчастіше технологію застосовують у таких сферах:

1. «Розумне» сільське господарство. Датчики встановлюються у місцях, де зв'язок із мережею слабкий або відсутній. Такі пристрої можуть передавати дані з інтервалом у 15-60 хвилин та досягати відстані у 15 км [67].
2. «Розумні міста». Технологія дозволяє підключати тисячі пристроїв до одного шлюзу, що робить її корисною для застосувань у великих містах [68].
3. Промисловість. Технологію застосовують для моніторингу обладнання на нафтових платформах або вітрових турбінах, де важко забезпечити інший зв'язок [69].

Технологія Sigfox, переважно, застосовується для мереж, де пристрої передають невеликі обсяги даних, але мають працювати великий проміжок часу без підзарядки батарей живлення. Найпопулярніші сценарії використання:

1. Відстеження об'єктів. Логістичні компанії встановлюють Sigfox-трекери на вантажі, щоб періодично передавати координати місцезнаходження [70].
2. Розумні лічильники. Пристрої із технологією Sigfox можуть періодично надсилати показники лічильників [71].
3. Екологічний моніторинг. Давачі Sigfox можуть фіксувати рівень забруднення повітря чи води і надсилати цю інформацію до хмари [21, 23].

Технологія NB-ІоТ працює через мережі мобільних операторів, тому найкраще її застосовувати у місцях де вже є відповідна мобільна інфраструктура. Прикладами її застосування є такі:

1. «Розумний» транспорт. Технологія використовується для підключення громадського транспорту до міських систем управління [72].
2. Медицина. Різноманітні портативні гаджети, які стежать за пульсом або рівнем інших показників життєдіяльності людини [73].
3. Безпека промисловості. Відеокамери, давачі руху та інші пристрої для відстежування стану промисловості [74].

Масштабованість мережі визначається її здатністю підтримувати значну кількість підключених пристроїв без суттєвої втрати якості сигналу. LoRaWAN-система демонструє високу масштабованість, завдяки адаптивному вибору факторів розширення та розподіленій архітектурі, що дозволяє передавати сигнал від 10 000 пристроїв через один шлюз. Проте, із зростанням щільності пристроїв у зоні покриття мережі можуть виникати проблеми із колізіями сигналів у неліцензованому частотному спектрі. Масштабованість Sigfox є обмеженою, через централізовану архітектуру та низьку пропускну здатність каналу, що дозволяє передавати лише до 140 повідомлень на добу для одного пристрою [65]. NB-ІоТ, завдяки використанню інфраструктури стільникових мереж, забезпечує високу масштабованість – до 50 000 пристроїв на одну базову станцію.

Одним із ключових критеріїв вибору технології для побудови систем Інтернету речей є рівень енергоспоживання кінцевих пристроїв. Цей показник безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи датчиків. Технології LPWAN, зокрема LoRaWAN, Sigfox та NB-IoT, демонструють різні підходи до енергоощадження. Це обумовлено як фізичним рівнем реалізації протоколів, так і організацією передавання даних.

LoRaWAN забезпечує баланс між енергоспоживанням, дальністю зв'язку та обсягом даних, що передаються. Передавання даних базується на використанні модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS), що дозволяє змінювати фактор розширення залежно від умов зв'язку. Зі збільшенням фактору розширення зростає тривалість передавання одного пакету даних і споживання енергії. Пристрої LoRaWAN споживають від 30 до 100 мкА на добу, залежно від частоти передавання та конфігурації мережі. LoRaWAN дозволяє застосовувати адаптивне управління потужністю (ADR), що додатково оптимізує енергоспоживання, залежно від якості каналу. Пристрої LoRaWAN класифікуються на три основні класи:

1. Class A – базовий режим роботи. Передавання ініціюється самим пристроєм, після чого відкривається два коротких вікна для приймання.
2. Class B – додає до механізму Class A синхронізацію за допомогою маячків, які передаються шлюзом регулярними інтервалами.
3. Class C характеризується постійно відкритим приймачем, що забезпечує мінімальні затримки downlink-повідомлень.

Sigfox є однією з найбільш енергоефективних технологій серед LPWAN-рішень, завдяки використанню простої структури протоколу, яка передбачає передачу коротких повідомлень (до 12 байт) з використанням ультравузькосмугової модуляції. Таким чином, тривалість активної фази передавання є мінімальною. У типовому режимі пристрій передає дані декілька разів на добу, решту часу перебуває у режимі глибокого сну.

NB-IoT забезпечує кращу якість зв'язку, вищу швидкість передавання даних та надійність, проте має суттєво вищий показник енергоспоживання. NB-IoT

використовує два основні механізми енергоефективності — eDRX (extended Discontinuous Reception) і PSM (Power Saving Mode), які дозволяють зменшити активність радіомодуля в часі між сесіями передачі. Під час фази глибокого сну пристрій може залишатись неактивним протягом десятків хвилин або годин, що значно зменшує споживання енергії. Передавання одного повідомлення в мережі NB-IoT споживає більше енергії, ніж у випадку Sigfox або LoRaWAN, що пов'язано з необхідністю встановлення сигнального з'єднання з мережею.

Sigfox, LoRa та NB-IoT демонструють свої унікальні переваги, в залежності від різних факторів IoT, як зображено на рис. 1.11:

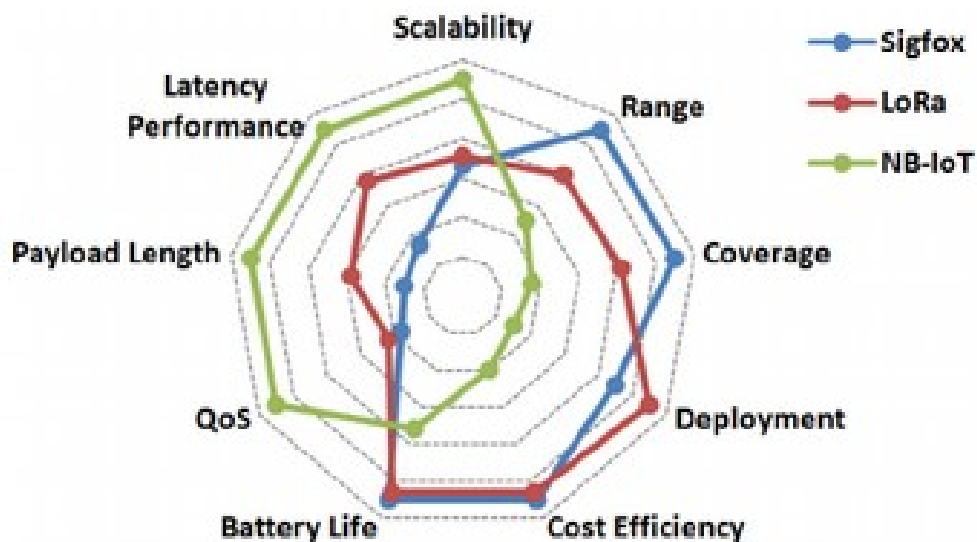


Рисунок 1.11 – Відповідні переваги Sigfox, LoRa та NB-IoT з точки зору факторів IoT [75]

### 1.3.3. Аналіз сучасних IoT-рішень на базі LPWAN-технологій

Технології LPWAN обирають для реалізації великої кількості IoT-рішень. Ці технології є особливо привабливими для галузей, які потребують довготривалої автономної роботи пристроїв. Практичне впровадження LPWAN продемонструвало ефективність у сферах «розумного» міста, сільського господарства, екологічного моніторингу, логістики, енергетики та безпеки.

Одним із найпоширеніших напрямів застосування є інтелектуальні системи моніторингу міського середовища. Наприклад, система моніторингу паркування, реалізована на основі NB-IoT [76]. Встановлені датчики фіксують наявність автомобілів на паркомісцях і передають інформацію до центральної системи управління. Використання системи дозволяє оптимізувати рух транспорту, підвищити ефективність використання простору для паркування. Високий рівень проникності сигналу забезпечує роботу навіть в умовах щільної міської забудови. Архітектуру описаної IoT-системи подано на рисунку 1.12.

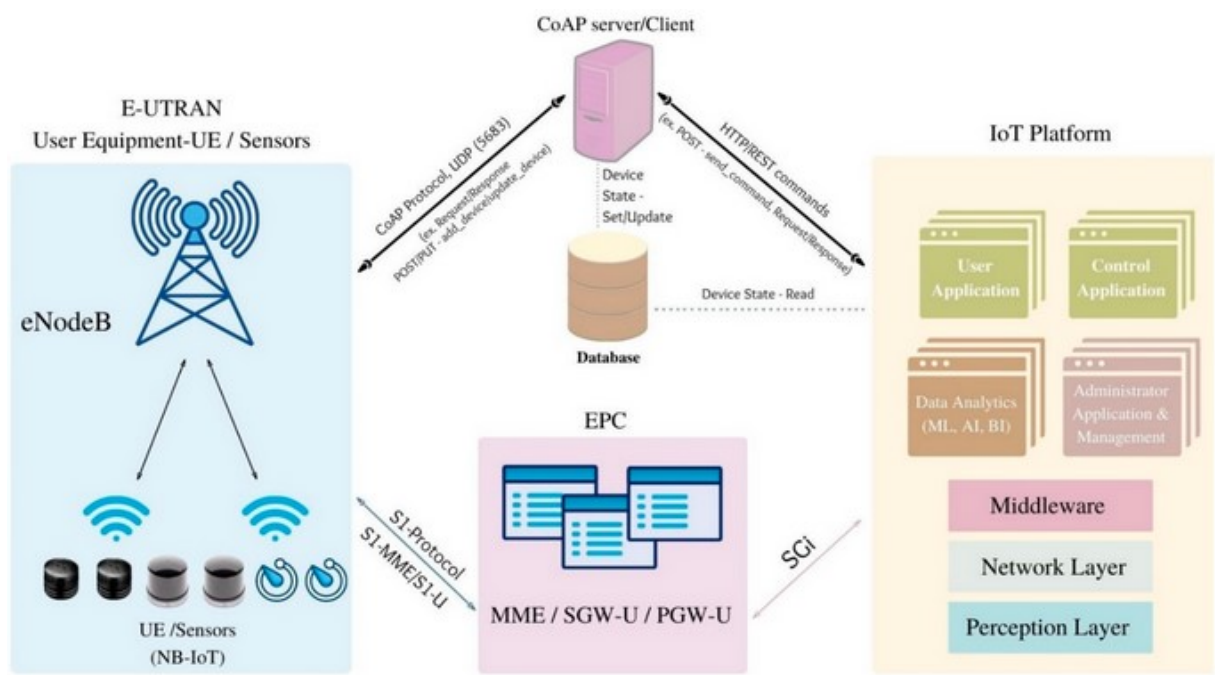


Рисунок 1.12 – Архітектура системи інтелектуального паркування [76]

Іншим прикладом є застосування LPWAN у сфері екологічного моніторингу. Прикладом ефективного впровадження є система біологічного моніторингу поведінки диких тварин, яка реалізована з використанням мережі Sigfox [77]. Запропоноване рішення базується на наборі компактних електронних міток, які спеціально розроблені для тривалого автономного функціонування та оснащені різноманітними датчиками (GPS-модуль, акселерометр та інші). Для передавання

даних використовується мережа Sigfox, яка забезпечує низьке енергоспоживання та великий радіус дії, що є критичними характеристиками для відстеження місцеперебування і поведінки тварин у природних умовах. Для підключення до мережі Sigfox у мітки інтегровані спеціалізовані чіпи різних виробників, що забезпечують надійну передачу GPS-даних та інших показників. Кількість повідомлень, що передаються щоденно, залежить від сонячного світла, оскільки пристрої живляться від сонячних панелей. Використання такої системи дає змогу проводити довгострокове спостереження за тваринами без втручання в їхнє природне середовище. Структуру системи подано на рисунку 1.13.

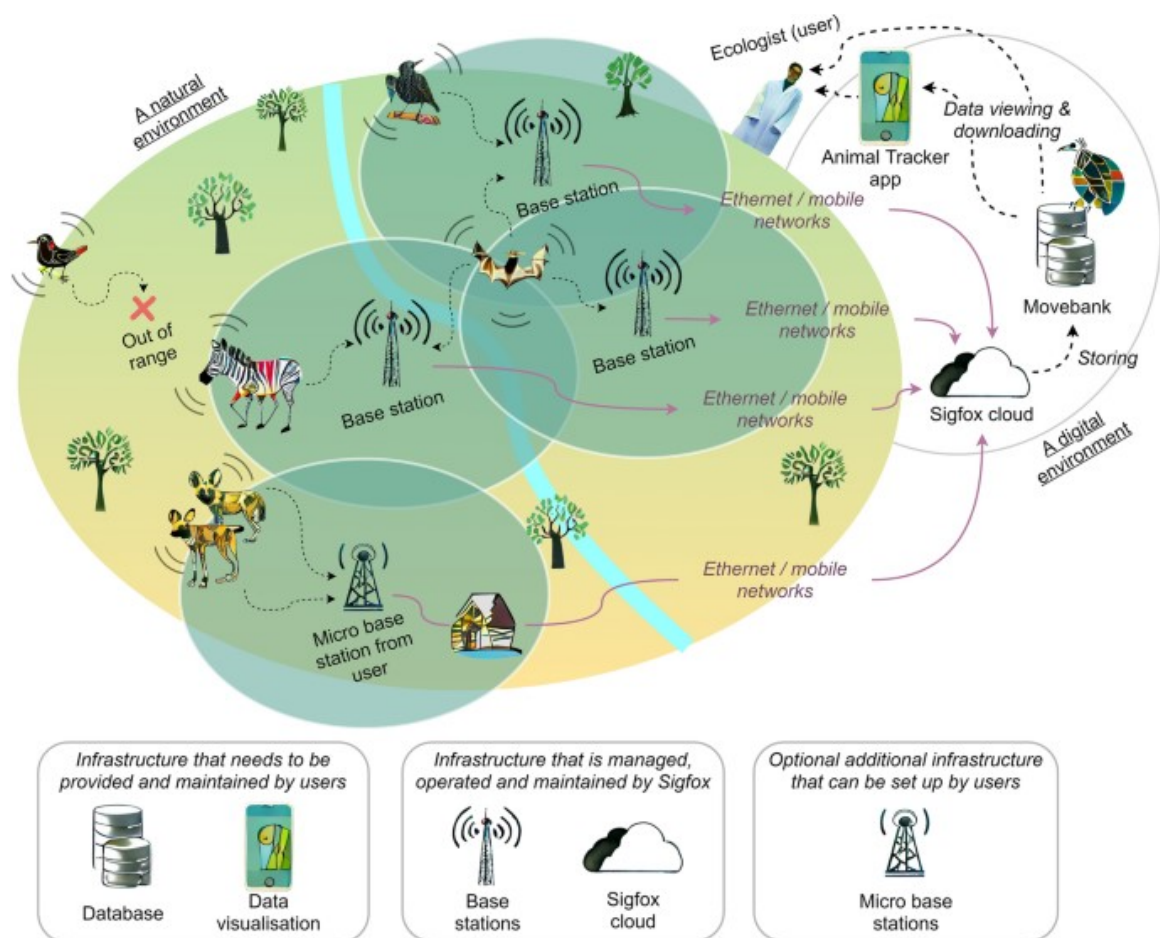


Рисунок 1.13 – Інфраструктура мережі системи моніторингу дикої природи [77]

Ще одним прикладом ефективного застосування технології LoRaWAN у сфері екологічного моніторингу є вузлова система збору даних для моніторингу якості повітря [78] (рис. 1.14). Вона базується на мережі датчиків, що вимірюють концентрації газів, дрібнодисперсних часток, а також температуру і відносну

вологість повітря (рис. 1.14). Передавання даних здійснюється через шлюз до платформи «The Things Network» (TTN), що забезпечує інтеграцію з сервером обробки інформації ThingSpeak. На цій платформі реалізовано алгоритми обробки отриманих даних та їх візуалізації за допомогою графічного інтерфейсу користувача. Така система може функціонувати в автономному режимі у різних умовах, забезпечуючи надійне збирання екологічних даних у режимі реального часу.

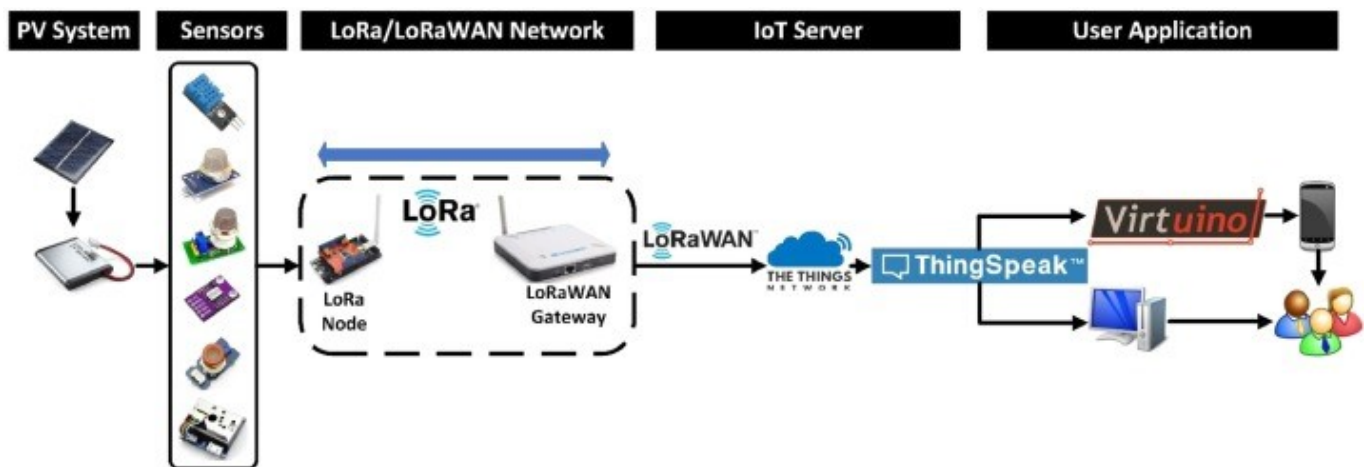


Рисунок 1.14 – Приклад структури мережі системи моніторингу якості повітря

[78]

Практичні приклади впровадження LPWAN-технологій у сучасні IoT-системи демонструють їх здатність вирішувати завдання у різних сферах. Застосування LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT дозволяє створювати масштабовані системи з мінімальними витратами на обслуговування. Вибір конкретної технології визначається як технічними параметрами системи, так і середовищем розгортання.

## 1.4 Аналіз факторів середовища та автоматизованих підходів до проєктування IoT-систем

Проєктування IoT-систем на базі LPWAN тісно пов'язане з просторовим середовищем, у якому функціонуватиме система. Локальні мережі мають більш передбачувані параметри середовища, а розподілені IoT-системи можуть охоплювати великі території з різноманітними умовами. У таких випадках просторові та техногенні фактори потребують особливої уваги, оскільки безпосередньо впливають на надійність зв'язку, енергоспоживання пристроїв, точність передавання даних.

Одним з основних чинників є рельєф місцевості, який визначає характер поширення радіохвиль. У зонах із рівнинним рельєфом, де є пряма видимість між передавачем і приймачем, забезпечується стабільне передавання сигналу, проте в умовах неоднорідного складного рельєфу сигнал може значно послаблюватись або взагалі зникати через ефекти відбиття чи дифракції.

Ще одним суттєвим просторовим фактором є густота та характер забудови. В умовах щільної міської інфраструктури, де є конструкції із залізобетону, металевих поверхонь та інших матеріалів, виникають багаторазові відбиття сигналу, багатопроренева інтерференція, втрати на проникнення сигналу. За подібних умов значно погіршується якість зв'язку.

Окрім природних факторів, критичне значення для працездатності системи можуть мати техногенні впливи. Зокрема, промислові об'єкти з великою кількістю металоконструкцій, електричних машин, радіосигналів та високовольтного обладнання створюють підвищений рівень завад. Також варто враховувати мінливість середовища: появу нових об'єктів забудови, розширення транспортної інфраструктури та інші чинники, що можуть суттєво вплинути на якість сигналу після розгортання системи.

Для ефективного врахування наведених факторів необхідно здійснювати просторовий аналіз території. Для цього доцільно використовувати цифрові моделі рельєфу, карти щільності забудов, супутникові знімки, просторові бази

даних про об'єкти критичної інфраструктури. Інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) у процес проєктування дозволяє автоматизувати аналіз об'єктів, оцінити потенційні завади, допомогти визначити оптимальні місця встановлення базових станцій або шлюзів. Просторове моделювання також дозволяє заздалегідь оцінити зони потенційного перехоплення сигналу або зони, що потребують додаткових базових станцій.

У багатьох випадках вплив просторових й техногенних факторів проявляється не лише у зміні радіотехнічних параметрів, але й у структурній організації мережі. Наприклад, при проєктуванні IoT-системи для агросектору в умовах рівнинного рельєфу можна досягти великої площі покриття сигналу з мінімальною кількістю вузлів або шлюзів, а у гірській місцевості або лісистих районах для забезпечення такої ж якості зв'язку необхідно значно збільшити щільність розташування точок доступу.

Характер розподілу пристроїв у просторі безпосередньо впливає на вибір топології мережі. LPWAN-технології чутливі до віддалених зон і потребують ретельного розрахунку радіуса дії базових станцій. Для топології типу «mesh» ключовим обмеженням виступає енергоспоживання вузлів-ретрансляторів, адже вони беруть участь у передаванні даних інших пристроїв.

Важливим чинником, який потрібно враховувати при проєктуванні IoT-систем, є техногенні джерела завад. До найпоширеніших видів завад можна віднести такі:

- Електромагнітні перешкоди від промислового обладнання та ліній електропередач;
- Радіочастотні накладання з іншими мережами, що працюють на тих же діапазонах;
- Акустичні та вібраційні впливи, які можуть впливати на точність роботи давачів у складних виробничих середовищах.

Для зменшення впливу цих факторів застосовують різні підходи: використовують частотні плани, обирають більш стійкі до завад методи модуляції, корегують потужність передавачів та оптимізують розташування станцій і давачів.

Світовий досвід впровадження масштабних IoT-систем [79] показує, що ігнорування просторового аналізу на етапах проєктування може призвести до проблем під час розгортання мережі. Серед них – значне збільшення енергоспоживання через спроби повторного передавання даних, нестабільний зв'язок, потреба у перебудові мережевої інфраструктури.

Останніми роками у сфері проєктування IoT-систем простежується тенденція до переходу від ручного налаштування та вибору індивідуальної конфігурації компонентів мережі до автоматизованих та інтелектуальних методів. Така тенденція обумовлена як зростанням масштабів систем, так і необхідністю оперативно адаптувати мережу до змін середовища, топології та вимог користувачів.

Одним із поширених напрямків є інтеграція геоінформаційних систем у процес проєктування. Завдяки використанню ГІС, можна враховувати ландшафт, забудову, джерела завад та інші просторові чинники при визначенні оптимального розташування давачів і базових станцій. Використання цифрових моделей рельєфу та супутникових знімків, у поєднанні з радіопланувальними алгоритмами, дає змогу на етапі проєктування оцінити зону покриття та виявити потенційні «мертві» зони.

Важливою перспективною складовою є застосування алгоритмів оптимізації та штучного інтелекту. Генетичні алгоритми, методи рою частинок або машинного навчання використовуються для пошуку конфігурацій мережі [80]. Ці методи дозволяють автоматично підібрати параметри давачів, частотні канали, фактори розширення.

Розробниками все частіше використовуються єдині інтегровані середовища проєктування, що поєднують інструменти розрахунку покриття, вибору апаратного забезпечення, налаштування протоколів та верифікації конфігурацій. Завдяки використанню таких середовищ, зменшується кількість помилок і пришвидшується командна робота. Значну увагу приділяють адаптивним механізмам управління мережею. Сучасні рішення здатні змінювати параметри

роботи вузлів у залежності від якості каналу, рівня завад чи залишкового заряду батареї у режимі реального часу.

Отже, успішне проектування IoT-систем вимагає комплексного підходу. Такий підхід може поєднувати глибокий аналіз просторових й техногенних факторів із впровадженням сучасних автоматизованих рішень. Враховуючи особливості середовища, топологію та потенційні джерела завад, можна уникнути критичних помилок у виборі архітектури та мережевих технологій. Використання автоматизованих інструментів проектування забезпечує гнучкість та надійність системи.

## 1.5 Висновки до розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасних технологій, підходів і архітектурних рішень, що застосовуються при проектуванні IoT-систем на основі LPWAN. Розглянуто ключові концепції архітектур та визначено їхні переваги й обмеження з точки зору на масштабованість, надійність, енергоефективність та безпеку.

Досліджено фактори, що впливають на побудову IoT-інфраструктури, зокрема на особливості просторового розміщення вузлів, умови розповсюдження сигналу, вибір протоколів передавання даних. Детально проаналізовано клас технологій LPWAN для енергоефективної передачі даних на значні відстані. Розглянуто особливості трьох основних сучасних технологій LPWAN – LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT.

На основі аналізу прикладів впровадження LPWAN у «розумному» міському середовищі, екологічному моніторингу та промислових рішеннях встановлено, що ці технології дозволяють суттєво зменшити витрати енергії та забезпечити надійну роботу IoT-систем, навіть у складних умовах розподіленої інфраструктури.

Отже, для досягнення мети дисертаційного дослідження, яка полягає у підвищенні швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проектування інформаційних IoT-систем на основі LPWAN з

урахуванням просторових й техногенних факторів шляхом розроблення інтелектуальної інформаційної технології, необхідно розв'язати такі задачі:

1. Розробити інтелектуальну інформаційну технологію, що містить нові підходи, методи та алгоритми, які дозволяють оптимізувати проєктування інформаційних систем на основі Інтернету речей та класу технологій LPWAN за техніко-економічними та функціональними критеріями, а також підвищити точність відтворення еталонних проєктних структур таких систем.

2. Розробити метод просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій, з урахуванням впливу природних й техногенних факторів, з використанням геоінформаційних технологій та нечіткої експертної системи.

3. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації запропонованої інтелектуальної інформаційної технології з автоматизованим вибором IoT-архітектури, конфігурацією сенсорної мережі, побудовою технологічних схем та адаптацією під обмеження LPWAN-мереж.

4. Апробувати та впровадити розроблену інтелектуальну інформаційну технологію на прикладних задачах побудови IoT-систем.

Розв'язанню цих задач будуть присвячені наступні розділи та підрозділи дисертаційної роботи.

Описаний у розділі матеріал висвітлений в таких роботах: [13, 17].

## РОЗДІЛ 2

### ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ LPWAN З УРАХУВАННЯМ ПРОСТОРОВИХ Й ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ

#### 2.1 Розроблення методу багатокритеріального вибору архітектур інформаційних систем на основі LPWAN

Як було обґрунтовано у розділі 1, під час розроблення сучасних інформаційних систем моніторингу, що базуються на технології Інтернету речей, критично важливим є виважений вибір архітектур інформаційних систем на основі LPWAN, зокрема мережевих технологій та відповідних IoT-платформ. Такий вибір повинен забезпечувати повну відповідність системи функціональним, технічним, економічним та експлуатаційним вимогам. З огляду на це, виникає об'єктивна потреба у застосуванні формалізованих підходів до вибору технологій, які здатні враховувати складну структуру альтернатив, значний обсяг оцінюваних параметрів та наявні обмеження.

Вибір мережевих технологій та IoT-платформ є ключовим етапом у процесі проєктування інформаційної системи. Цей процес має послідовність етапів, які забезпечують структуроване формування системи (рис. 2.1):

1. Визначення функціональних вимог. На першому етапі формуються цілі та завдання системи, такі як оперативний моніторинг температури, вологості, якості повітря або інших показників. Визначаються вимоги до періодичності збирання даних, їх обсягу, енергоефективності системи в цілому. Функціональні вимоги формуються на основі аналізу потреб користувачів і технічних умов.

2. Вибір апаратного IoT-забезпечення та давачів. Визначаються типи давачів та їхні технічні характеристики, такі як діапазон вимірювання, точність та стійкість до умов навколишнього середовища.

3. Вибір протоколів зв'язку. Здійснюється аналіз і вибір мережевих технологій з урахуванням вимог до зони покриття, пропускної здатності мережі, енергоефективності, вартості впровадження та надійності передавання сигналу.

4. Вибір IoT-платформи. Обирається платформа для збирання, оброблення, аналізу та візуалізації даних (наприклад, AWS IoT, Microsoft Azure, Google Cloud IoT, ThingSpeak) [13]. Оцінюються такі аспекти, як підтримка мережевих протоколів, масштабованість, інструменти управління, аналітичні можливості, безпека та зручність інтерфейсу.

5. Створення системи візуалізації. Проєктується інтерфейс для відображення даних у реальному часі, зокрема графіків, дашбордів, теплових карт або геоінформаційних систем, які відповідають потребам кінцевих користувачів.

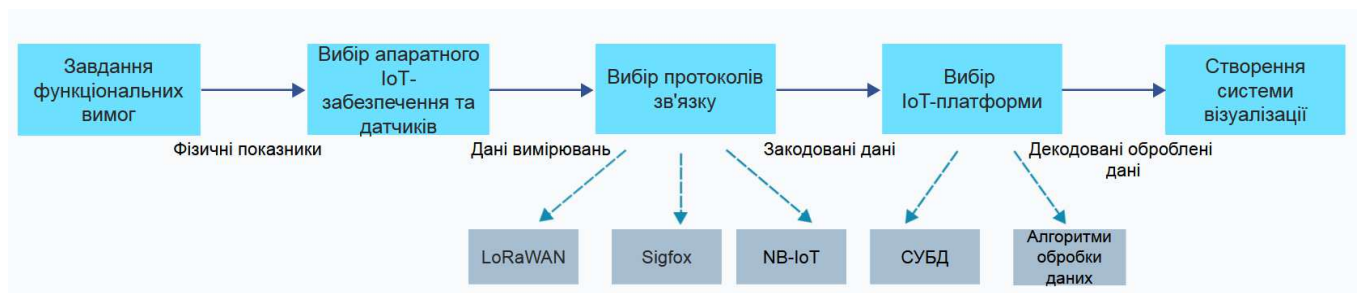


Рисунок 2.1 – Схема розроблення IoT-системи [13]

У процесі розроблення IoT-системи, після визначення функціональних вимог та вибору апаратного забезпечення, важливим етапом є підбір оптимальної мережевої технології та IoT-платформи для конкретного завдання. Враховуючи множинність критеріїв, таких як пропускна здатність, енергоефективність, дальність зв'язку, надійність та інші, самостійний вибір технології та платформи може бути складним. Для автоматизації цього процесу пропонується застосувати та удосконалити під вимоги IoT підхід, описаний у роботі [81], який базується на формалізації задачі з використанням експертної інформації, що дозволяє систематизувати та оптимізувати процес прийняття рішень. Даний підхід є класичною задачею прийняття рішень, що виникає у випадках, коли кожна з альтернатив характеризується кількома критеріями, які можуть бути як узгодженими, так і конфліктними. Основне завдання полягає у знаходженні компромісного рішення або множини оптимальних рішень, які одночасно максимально задовольняють усі вимоги.

Методологічною основою методу є:

1. Методи зважених сум [82].
2. Методи аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНП) для визначення ваг критеріїв.
3. Методи TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE для побудови ранжувальних альтернатив [83].
4. Теорія корисності – при формалізації переваг.
5. Методи математичного програмування – для врахування обмежень і постановки задач оптимізації.

У задачах проектування IoT-систем рішення мають враховувати фізичні особливості середовища (зона покриття, інтерференція, енергоспоживання), особливості архітектури системи (хмара або крайові обчислення), економічні обмеження (вартість обладнання, ліцензування) та технологічну сумісність компонентів (сумісність протоколів, підтримка API тощо).

Кожна з технологій LPWAN має свою специфіку щодо відстані зв'язку, підтримуваних протоколів, надійності, енергоефективності тощо. Для проведення формалізованого аналізу вибору використовується підхід математичного програмування. Нехай  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  – множина альтернатив (LPWAN-технології: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT), а  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – множина критеріїв. Кожна альтернатива описується вектором критеріїв (2.1).

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), \quad i = 1, \dots, m. \quad (2.1)$$

Для забезпечення коректного порівняння різнорідних показників усі критерії було приведено до безрозмірної шкали [0;1] за допомогою мінімакс-нормалізації. Для критеріїв типу «виграш» нормалізація здійснювалась за формулою (2.2).

$$X_{ij}^{norm} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \quad (2.2)$$

Для критеріїв типу «втрати» нормалізація здійснювалась за формулою (2.3).

$$X_{ij}^{norm} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \quad (2.3)$$

Такий підхід забезпечує уніфікацію шкал і дозволяє використовувати однотипну процедуру обчислення інтегрального показника. Інтегральна оцінка кожної альтернативи визначалась за формулою лінійної згортки нормалізованих критеріїв (2.4).

$$J_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot X_{ij}^{norm}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad (2.4)$$

де  $w_j$  – вагові коефіцієнти, отримані методом аналізу ієрархій.

У даному дослідженні ваги критеріїв було визначено методом аналізу ієрархій, який передбачає:

1. Формування групи експертів для оцінювання критеріїв.
2. Побудову матриці парних порівнянь, де визначається відносна важливість кожного критерію.
3. Обчислення вагових коефіцієнтів шляхом знаходження власного вектора та його нормалізації.
4. Перевірку узгодженості суджень за індексом узгодженості.

Отримані вагові коефіцієнти було використано для формування інтегральної оцінки кожної з розглянутих мережевих технологій. На цьому етапі кожен показник було нормалізовано до шкали  $[0;1]$ . Далі для кожної технології обчислено зважену суму за формулою 2.4. На основі нормалізованих значень критеріїв виконано багатокритеріальний аналіз, що дозволило об'єктивно порівняти альтернативи за сукупністю технічних, економічних та експлуатаційних параметрів. Даний підхід забезпечує не лише кількісну оцінку переваг і недоліків кожної технології, а й створює основу для формалізованого вибору оптимального рішення.

Результат багатокритеріального аналізу для трьох найпопулярніших LPWAN-технологій наведено в табл. 2.1. Для кожної альтернативи враховано вісім критеріїв:  $X_1$  – дальність покриття,  $X_2$  – частотний діапазон,  $X_3$  – швидкість передавання,  $X_4$  – вартість впровадження,  $X_5$  – енергоефективність,  $X_6$  – надійність,

$X_7$  – швидкість проєктування,  $X_8$  – конфіденційність і безпека даних. Вагові коефіцієнти визначено методом аналізу ієрархій на основі експертних оцінок.

Таблиця 2.1 – Результат багатокритеріального аналізу мережевих технологій LPWAN

Критерії	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	$J_x$
Ваги	0,2	0,1	0,1	0,15	0,15	0,1	0,15	0,05	
LoRaWAN	1 - від 2 до 15 км	1 - три діапазони (433/868/915 МГц)	0,8 - 1,2 кбіт/с	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,87
Sigfox	0,8 - від 2 до 10 км	0,9 - два діапазони	0,5 - 100 біт/с	1	1	1	1	0,8	0,89
NB-IoT	0,8 - 10 км	0,9 - два діапазони	1 - 250 кбіт/с	0,6	0,6	0,9	0,7	1	0,77

З отриманих результатів найвищі інтегральні оцінки мають Sigfox (0,89) та LoRaWAN (0,87). Це свідчить про збалансованість цих технологій за критеріями ефективності, вартості та простоти впровадження. NB-IoT демонструє значно вищу швидкість передавання даних, проте поступається за іншими показниками, що знижує придатність цієї технології у системах з обмеженими ресурсами.

Для перевірки стійкості результатів ранжування проведено аналіз чутливості, що полягає у варіюванні вагових коефіцієнтів у межах  $\pm 10\%$  від їхніх базових значень із подальшою нормалізацією вектора ваг. На кожному кроці перераховувались інтегральні показники та порівнювались ранжування альтернатив.

Результати аналізу подано в таблиці 2.2. Навіть при зміні ваг на  $\pm 10\%$  порядок пріоритетів між технологіями не змінюється: Sigfox зберігає перше місце, LoRaWAN – друге, а NB-IoT – третє. Зміна інтегральних показників не перевищує

0,03 для жодної альтернативи, що свідчить про високу стійкість отриманих результатів.

Таблиця 2.2 – Результати аналізу чутливості інтегральних оцінок

Альтернатива	$J_i$ (базові ваги)	$J_i$ при -10% ваг	$J_i$ при +10% ваг	$\Delta J$	Позиція у ранжуванні
LoRaWAN	0,87	0,86	0,88	0,02	2
Sigfox	0,89	0,88	0,90	0,02	1
NB-IoT	0,77	0,75	0,78	0,03	3

Для кількісної характеристики стійкості порядку альтернатив використано коефіцієнт рангової кореляції Спірмена, який визначає ступінь подібності між базовим і зміненими ранжуванням. Значення  $\rho$  обчислювалось за формулою (2.5).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2.5)$$

де  $d_i$  – різниця рангів  $i$ -ї альтернативи в базовому та зміненому ранжуванні,  $n$  – кількість альтернатив.

У результаті середній коефіцієнт рангової кореляції Спірмена між базовим і варійованими наборами ваг склав  $\rho = 0,95$ , що підтверджує стійкість моделі до варіацій експертних оцінок. Таким чином, навіть незначні зміни вагових коефіцієнтів не впливають на загальний порядок альтернатив.

Задачу визначення оптимальної мережевої технології формалізовано як задачу лінійного програмування, де цільовою функцією є максимізація інтегрального показника  $J$  за дотримання низки обмежень (2.6).

$$\max J_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot X_{xij}^{norm}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2.6)$$

за умов:

1. Дальність покриття повинна бути не меншою заданого значення  $D_{min}$ ;
2. Частотний діапазон повинен відповідати заданому діапазону  $F_{min}$  –  $F_{max}$ ;

3. Швидкість передачі даних повинна бути не меншою заданого значення  $R_{min}$ ;
4. Вартість впровадження має бути якомога меншою  $C_{min}$ ;
5. Енергоефективність повинна бути не меншою заданого значення  $E_{min}$ ;
6. Надійність повинна бути не меншою заданого значення  $N_{min}$ ;
7. Швидкість проєктування повинна бути не меншою заданого значення  $P_{min}$ ;
8. Конфіденційність та безпека даних повинна бути не меншою заданого значення  $S_{min}$ ;

де  $X_{ij}$  – нормалізоване значення  $j$ -го критерію для  $i$ -ї технології, а  $D_{min}$ ,  $F_{min}$ ,  $F_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $C_{max}$ ,  $E_{min}$ ,  $N_{min}$ ,  $P_{min}$ ,  $S_{min}$  – відповідні порогові обмеження. Таке формулювання дозволяє визначати оптимальну технологію не лише за інтегральною оцінкою, а й з урахуванням конкретних вимог до системи.

Використано аналогічний підхід для визначення IoT-платформи, оптимальної для проєктування інформаційної системи моніторингу різних фізичних показників (табл. 2.3). Проведено порівняння характеристик технологій за такими критеріями:  $X_1$  – підтримка протоколів IoT,  $X_2$  – масштабованість,  $X_3$  – інструменти розгортання та управління,  $X_4$  – можливості аналітики даних,  $X_5$  – рівень безпеки,  $X_6$  – ціна,  $X_7$  – зручність інтерфейсу користувача.

Таблиця 2.3 – Результат багатокритеріального аналізу IoT-платформ

Критерії	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Jx
Ваги	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	
AWS IoT	1	1	1	0,8	1	0,2	0,6	0,66
Microsoft Azure	0,8	1	0,9	1	1	0,5	0,7	0,76
Google Cloud IoT	0,3	1	0,8	0,7	0,8	0,4	0,8	0,64
Thingspeak	0,3	0,5	0,7	0,6	0,6	1	1	0,78

Результати свідчать про те, що Microsoft Azure та ThingSpeak мають найвищі інтегральні значення. Azure має широкі аналітичні можливості та підтримку протоколів, а ThingSpeak забезпечує простоту використання і безкоштовний тарифний план.

На основі дослідження [13] для вирішення задачі вибору оптимальної технології та IoT-платформи для створення IoT-систем з урахуванням наведених вище критеріїв було створено програмне рішення з використанням бібліотеки PuLP для Python (рис 2.2). Розв'язання задачі виконано в середовищі Kaggle, що забезпечило доступ до обчислювальних ресурсів та зручність відтворення результатів [84]. Отримані результати дозволяють зробити обґрунтований вибір технології, що оптимально балансує між енергоефективністю, швидкістю проектування та вартістю.

Out[11]:

	technologies	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	J
1	weights	0.2	0.1	0.1	0.15	0.15	0.1	0.15	0.05	NaN
3	Sigfox	0.8	0.9	0.5	1.00	1.00	1.0	1.00	0.80	0.89
2	NB-IoT	0.8	0.9	1.0	0.60	0.60	0.9	0.70	1.00	0.78
0	LoRaWAN	1.0	1.0	0.8	0.80	0.80	0.9	0.80	0.80	0.87

In [12]:

```
print("Optimal technology:", optimal_technology)
```

Optimal technology: Sigfox

Рисунок 2.2 – Приклад роботи програмного рішення

Таким чином, застосування багатокритеріального аналізу та математичного програмування дозволяє ґрунтовно обирати як мережеві технології зв'язку, так і

IoT-платформи для проектування інформаційних систем. Даний підхід є універсальним і може бути масштабований для систем будь-якої складності.

Після вибору оптимальних мережевих технологій і IoT-платформ постає наступне важливе завдання — визначення оптимальної просторової структури системи. В реальних умовах впровадження IoT-рішень недостатньо лише обрати відповідну технологію зв'язку, необхідно також раціонально розмістити компоненти системи, зокрема давачі та базові станції, з урахуванням природних, техногенних та інфраструктурних факторів.

У наступному підрозділі подано узагальнений метод комплексної просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій у мережах Sigfox, який поєднує кілька підходів до обчислення оптимального рішення – від нечітких експертних оцінок до класичних моделей математичного програмування. Для ілюстрації роботи запропонованої концепції розглянуто спрощений приклад її реалізації у вигляді задачі лінійного програмування. Цей приклад має демонстраційний характер і не обмежує загальної структури методу, який у повному вигляді передбачає врахування реальних витрат на встановлення та просторово-географічної специфіки регіону.

## **2.2 Створення методу комплексної просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій IoT-системи на базі LPWAN**

Технології IoT з низьким енергоспоживанням дозволяють створювати мережі, які забезпечують передачу даних на великі відстані, при цьому споживаючи мінімум енергії. Ці технології є надійними, вигідними та безпечними. Однак, однією з ключових проблем у впровадженні таких технологій є розроблення програмно-технічних рішень для ефективного розміщення давачів та їх взаємодії з базовими станціями для передачі сигналу. В природних умовах сигнал може втрачати свою силу, через рельєф місцевості, особливості геолокації та інші зовнішні перешкоди [85-87].

Щоб зменшити ці негативні впливи, потрібно розробити оптимальні програмно-технічні рішення для збирання, оброблення та використання інформації, яка передається в такій мережі. Це можна здійснити шляхом створення інтелектуальної інформаційної технології (ІІТ), яка буде аналізувати параметри реальних експериментів, порівнювати їх з типовими реалізаціями та вибирати оптимальні рішення на основі певних критеріїв, які також потрібно визначити та формалізувати.

При розгортанні IoT-систем одним із головних критеріїв є досяжність передавання сигналу з усіх давачів до базової станції, вартість розгортання та обслуговування усієї системи. У багатьох випадках більш ефективно та економічно використовувати малопотужну локальну станцію з меншим радіусом дії, ніж встановлювати потужну стаціонарну станцію, або встановлювати одну потужну станцію, замість двох. Хоча часто рекомендується встановлювати принаймні три станції для забезпечення більшої стабільності мережі, проте у деяких випадках краще мати саме три, а не більше, наприклад, чотири чи шість. Це напряму пов'язано з проблемою оптимального вибору місця розташування кожної станції, щоб забезпечити максимально ефективно збирання сигналів з усіх закріплених за нею давачів. Відстань та різні завади послаблюють сигнал, тому важливо, щоб ступінь послаблення не перевищував певний поріг для усіх сигналів з цих давачів.

У реальних умовах радіохвилі зіштовхуються з різноманітними перешкодами. Деякі з цих перешкод пропускають хвилі без втрат, інші відбивають їх, а ще є такі, які поглинають радіохвилі. Властивості цих перешкод залежать від їх матеріалу, форми та товщини. Навіть незначні перешкоди можуть впливати на радіосигнал. Зазвичай, радіосигнал послаблюється та втрачає частину своєї потужності, коли зіштовхується з перешкодою.

Відомо, що на поширення радіохвилі, наприклад з бінарною фазовою модуляцією (Binary Phase Shift Keying, BPSK), впливають різні фактори динамічного та статичного характеру [88 - 90]:

1. Сонячна активність (іоносферна абсорбція);

2. Рельєф та забудова (екранування, розсіювання, відбиття);
3. Температурні та кліматичні умови (атмосферне затухання);
4. Електромагнітна інтерференція (радіочастотні перешкоди);
5. Метеофактори (метеорологічний вплив);
6. Динамічний рух об'єктів (доплерівський зсув);
7. Щільність радіозавад (інтерференція радіосигналів).

Під час проектування системи локального моніторингу в конкретних географічних координатах, де мають місце однакові кліматичні та фізико-географічні умови всіх варіантів розташувань станції, можна не враховувати вплив сонячної активності, температурних та кліматичних умов, метеофакторів. А ось вплив інших факторів може бути значним і потребує обов'язкового оцінювання та врахування. Складність цієї задачі полягає в тому, що вплив форм рельєфу та забудови важко оцінити шляхом вимірювань (потрібні тривалі вимірювання за різних метеоумов та порівняння сигналу перед і позаду перешкоди). Існують складні прилади, які дозволяють вимірювати електромагнітні параметри поля та його зміни за різних умов [91]. А вимірювання впливу електромагнітних завад та динамічних об'єктів (транспортна артерія, об'єкти з сигналізацією, яку то ставлять, то ні) є складним і має стохастичний характер протягом доби, тижня, місяця, року. Для усунення таких проблем можна використати експертну систему, яка буде визначати сили послаблення сигналу від кожного джерела сигналу (ДС) на основі нечітких експертних оцінок.

Розташування давачів, вузлів збору даних та станцій у системах моніторингу є критично важливим для забезпечення точності збору інформації, мінімізації витрат, оптимізації енергоспоживання та забезпечення стабільної передачі сигналів, які є основою для функціонування точного та надійного цифрового двійника об'єкта моніторингу. У сучасних системах використовуються різноманітні підходи до визначення місць встановлення цих компонентів, які можна поділити на три основні категорії: емпіричний підхід, математичне моделювання та оптимізація, інтеграція з геоінформаційними системами [92, 93]. Завдяки IoT-технологіям можливе створення розподілених мереж, де кожен вузол

обладнаний засобами бездротового зв'язку та давачами, що дозволяє адаптивно вибудовувати архітектуру системи, залежно від географічних, технічних або експлуатаційних умов.

Отже, необхідно розробити метод просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій IoT-системи на базі LPWAN.

Для оптимізації вартості та ефективності IoT-систем потрібно виконати наступні кроки:

1. Вибрати, формалізувати та структурувати фактори, які впливають на послаблення сигналу від давачів.
2. Розробити експертну систему на основі нечіткої моделі оцінювання впливу цих факторів на послаблення сигналу.
3. Розробити алгоритм оптимізації експертних оцінок з урахуванням обмежень.

Як було зазначено вище, припустимо, що метеоумови (наприклад, напрям та швидкість вітру) та кліматичні умови є незмінними, а джерела сигналу, що підлягають моніторингу, не змінюють своє місце розташування. Припустимо, що існує  $n$  джерел сигналу.

Аналіз показує, що найбільш вагомими факторами та завадами, які впливають на ступінь послаблення сигналів від давачів до IoT-станції Sigfox, є такі [94, 95]:

1. Географічні чинники та фактори впливу на послаблення сигналу між джерелом сигналу (ДС) і IoT-станцією ( $\nu$  – затухання сигналу з відстанню,  $f$  – затухання у різних об'єктах);
2. Електромагнітні завади ( $s$  – статичні техногенні завади,  $d$  – потенційні динамічні завади).

Схему розташування потенційних джерел радіозавад подано на рисунку 2.3.

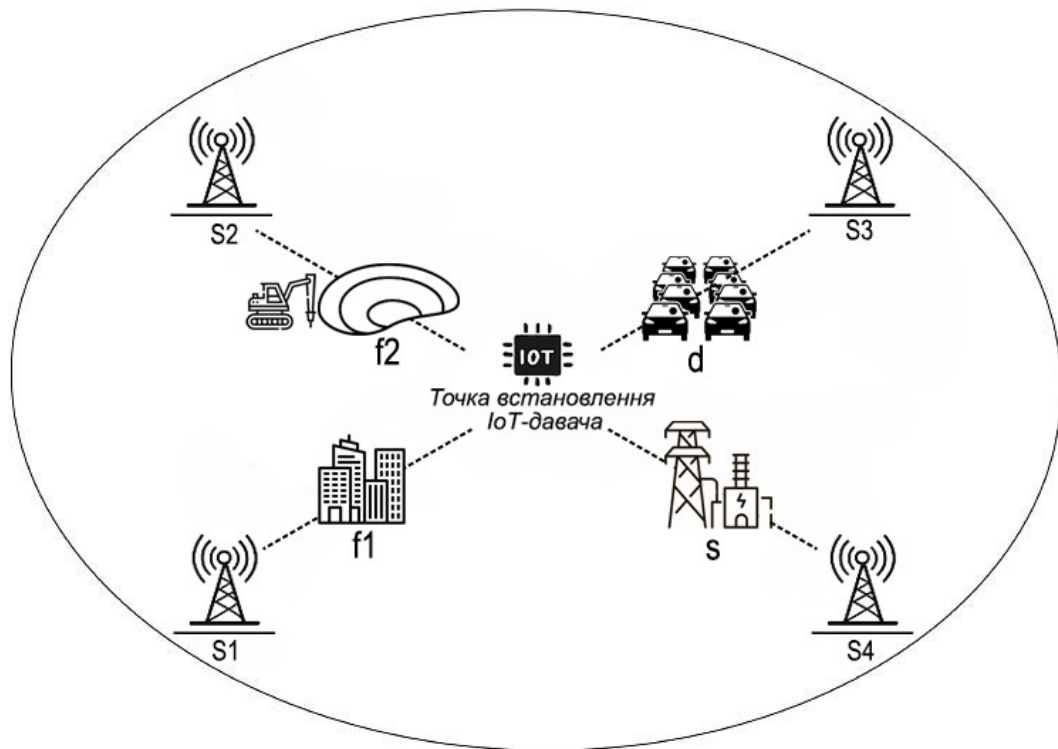


Рисунок 2.3 – Схема розташування потенційних джерел радіозавад

Для формалізації експертних оцінок вибраних факторів використано теорію нечітких множин. Для кожної лінгвістичної змінної пропонується значення на основі універсальної множини (2.7):

$$U = [0, 0,1, 0,2\dots1]. \quad (2.7)$$

Пропонується терм-множина кожної лінгвістичної змінної з 5 елементів (2.8):

$$X = [\langle \text{МН} \rangle, \langle \text{М} \rangle, \langle \text{С} \rangle, \langle \text{В} \rangle, \langle \text{МК} \rangle], \quad (2.8)$$

де «МН» – «Мінімальний», «М» – «Малий», «С» – «Середній», «В» – «Високий», «МК» – «Максимальний» рівні впливу на джерело сигналу.

В табл. 2.4 наведено терм-множини, за допомогою яких буде здійснено оцінювання лінгвістичних змінних факторів.

Таблиця 2.4 – Фактори впливу та відповідні їм терм-множини експертних оцінок

Позначення	Терм-множина	Вага
$v$	«Мінімальний»,	0,3
$f$	«Малий», «Середній»,	0,2
$s$	«Високий»,	0,2
$d$	«Максимальний»	0,3

Класичний підхід до побудови нечітких експертних систем передбачає, що кожна можлива комбінація значень вхідних факторів має бути відображена у вигляді правила виду «Якщо... то...». У даній задачі маємо чотири первинні фактори: відстань до базової станції, характеристику середовища, статичні та динамічні електромагнітні завади. Пряме побудування бази знань призвело б до необхідності описати всі 625 комбінацій правил. Це значно ускладнює процес розроблення та подальшу інтерпретацію системи. Для уникнення надмірності запропоновано ієрархічну структуру бази знань, що складається з трьох підсистем (рис. 2.4):

1.  $g = \alpha(v, f)$  – підсистема аналізу впливу на послаблення сигналу між ДС і IoT-станцією географічних чинників та факторів впливу;
2.  $p = \beta(s, d)$  – підсистема аналізу впливу на послаблення сигналу між ДС і IoT-станцією електромагнітних завад;
3.  $r = \gamma(g, p)$  – підсистема узагальнення впливу на послаблення сигналу між ДС і IoT-станцією географічних чинників та факторів впливу та електромагнітних завад;

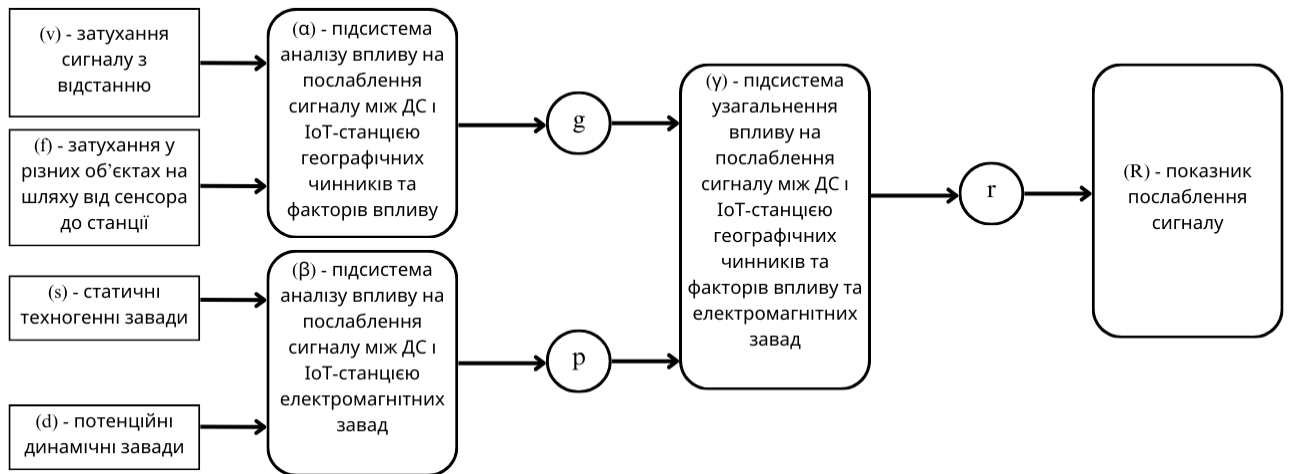


Рисунок 2.4 – Структура моделі оцінювання якості сигналу

Кожному елементу терм-множини (2.8) ставиться у відповідність значення на універсальній множині (2.7) за допомогою функції належності  $\mu_X(u)$ . Ця функція визначена у формі дзвіницевої Гауссової функції [96]:

$$\mu_X(u) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-m_X}{\sigma_X}\right)^2\right], \quad (2.9)$$

де параметр  $m_X$  – це значення універсальної множини;  $\sigma_X$  – параметр, що характеризує розкид значень навколо  $m_X$ .

Функції належності слугують математичним інструментом для перетворення якісних експертних оцінок у кількісні значення, які будуть придатними для подальшої обробки. Вибір форми функцій належності впливає на точність системи та стабільність розрахунків. У науковій літературі [97] найчастіше зустрічаються такі типи функцій належності:

1. Трикутні – є простими у реалізації та зручними для швидких обчислень, але характеризуються ламаними переходами між термами.
2. Трапецевидні – дають ширший інтервал повної належності та застосовуються для опису діапазонів значень, проте також мають кутові переходи.
3. Сигмоїдальні – добре відображають асимптотичні процеси з насиченням і плавними межами, однак менш придатні для симетричних явищ.

4. Дзвіноподібні – забезпечують гладкість, неперервність похідних та близькість до нормального розподілу, що робить їх зручними для моделювання стохастичних процесів.

У даному дослідженні використано саме дзвіноподібні функції належності, з огляду на їхні характеристики:

1. Фізична придатність: процеси поширення та згасання сигналів у бездротових мережах підкорюються стохастичним законом, які наближено описуються нормальним розподілом похибок. Це забезпечує кращу відповідність дзвіноподібних функцій фізичній природі явищ.

2. Гладкість і неперервність: дзвіноподібні функції мають неперервні першу та другу похідні, що забезпечує стабільність моделі та створює передумови для застосування чисельних методів оптимізації.

3. Адаптивність: завдяки аналітичним похідним, параметри функцій можуть бути автоматично підлаштовані під експериментальні дані, що підвищує точність і робить систему більш гнучкою.

В табл. 2.5 представлено нечіткі бази знань експертних оцінок, за допомогою яких визначено параметри  $\nu$ ,  $f$  та  $g$ . Експертна оцінка згасання сигналу Sigfox, залежно від відстані, була приведена за допомогою терм-множини, використовуючи наступну методологію:

1. МН – станція Sigfox знаходиться впритул до давачів.
2. М – станція Sigfox розташована на відстані від декількох метрів до кількох кілометрів від давачів, при цьому відстань вважається достатньою, щоб вплив сигналу на параметри не був мінімальним, але ще не досягнув значного згасання.
3. С – станція Sigfox розташована по середині зони покриття.
4. В – станція Sigfox розташована на відстані від декількох кілометрів і більше від давачів, що призводить до високого рівня згасання сигналу.
5. МК – станція Sigfox розташована на межі зони покриття.

Експертна оцінка затухання сигналу Sigfox у різних об'єктах на шляху від давача до станції була приведена за допомогою терм-множини, використовуючи наступну методологію:

1. МН – давач розташовано у прямій видимості станції Sigfox, без перекриття формами рельєфу та забудовами або наявні поодинокі нещільні малі пагорби чи незаселені будівлі.
2. М – перекриття незначними формами рельєфу, малі пагорби чи малозаселені будівлі.
3. С – різні пагорби, які перекривають сигнал, але мало ущільнені, або заселені цегляні будівлі.
4. В – заселені будівлі із залізобетону та з великою кількістю електроприладів.
5. МК – скелі з металу та граніту з мінімальним проходженням сигналу або щільно заселений негазифікований мікрорайон з багатоповерхівками та електроплитами і підземними парковками.

Логіка побудови правил полягає у тому, що за низьких значень обох факторів рівень затухання сигналу є малим, а за високих значень хоча б одного з факторів – великим. Проміжні комбінації визначаються як «середні».

Таблиця 2.5 – Експертні оцінки для формування нечіткої бази знань підсистеми  $\alpha$

$f \backslash v$	МН	М	С	В	МК
МН	малий	малий	середній	високий	високий
М	малий	малий	середній	високий	високий
С	середній	середній	середній	високий	високий
В	високий	високий	високий	високий	високий
МК	високий	високий	високий	високий	високий

В таблиці 2.6 представлено нечіткі бази знань експертних оцінок, за допомогою яких визначено параметри  $s$ ,  $d$  та  $p$ . Експертна оцінка затухання

сигналу Sigfox від статичних електромагнітних завад була приведена за допомогою терм-множини, використовуючи наступну методологію:

1. МН – відсутні електромагнітні завади або наявні звичайні будівлі людей без спеціального обладнання.
2. М – одна або декілька будівель під сигналізацією.
3. С – низьковольтні розподільчі мережі електропередач до 1 кВ, підстанція.
4. В – середньовольтні розподільчі мережі електропередач до 35 кВ, одна або декілька підстанцій.
5. МК – високовольтні розподільчі мережі електропередач, велика паркувальна зона з різноманітною сигналізацією, будівельний майданчик зі спеціальною технікою.

Експертна оцінка рівня затухання сигналу Sigfox від динамічних електромагнітних завад була приведена за допомогою терм-множини, використовуючи наступну методологію:

1. МН – відсутні техногенні завади або наявна дорога з 1-2 авто/хв.
2. М – дорога з кількома авто (до 20)/хв, поодиноким електричний громадський транспорт.
3. С – автострада з 1 авто/с, проходять маршрути електричного громадського транспорту.
4. В – автострада з інтенсивним рухом авто та великою кількістю електричного громадського транспорту.
5. МК – метро, залізничне полотно, автобан.

Таблиця 2.6 – Експертні оцінки для формування нечіткої бази знань підсистеми  $\beta$

$s \backslash d$	МН	М	С	В	МК
МН	малий	малий	середній	високий	високий
М	малий	малий	середній	високий	високий

Продовження табл. 2.6

С	середній	середній	середній	високий	високий
В	високий	високий	високий	високий	високий
МК	високий	високий	високий	високий	високий

Проміжні фактори впливу ( $g$ ,  $p$ ) та результуючий показник ( $r$ ) оцінювалися терм-множиною щодо рівня цього впливу: «малий», «середній», «високий» (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Експертні оцінки для формування нечіткої бази знань підсистеми  $\gamma$

$g \backslash p$	М	С	В
М	малий	середній	високий
С	середній	середній	високий
В	високий	високий	високий

З метою скорочення кількості правил та підвищення ефективності функціонування системи було проведено оптимізацію за такими принципами:

1. Агрегування термів: п'ятирівневі шкали для вхідних факторів згруповано у три рівні.
2. Врахування ваг: більш вагомих факторам надано підвищений вплив шляхом параметризації дзвіноподібних функцій належності.
3. Видалення дублюючих правил: у випадках, коли результат однаковий, незалежно від значення одного з факторів, правила об'єднано в узагальнені.

Функції належності терм-множини описувалися дзвіноподібною функцією належності. Вони ідентифіковані методом парних порівнянь [98]. Враховуючи результати, отримані внаслідок експертного оцінювання важливості факторів та шкалу порівняння об'єктів за Сааті, сформовано матрицю попарних порівнянь (2.10).

$$\begin{bmatrix} 1 & 1,5 & 2 & 1 \\ \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{2}{3} \\ 0,5 & 1 & 1 & 0,5 \\ 1 & 1,5 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Використано оцінки від 1 до 9: 1 –  $H_i$  та  $H_j$  рівнозначні, 3 –  $H_i$  має невелику перевагу над  $H_j$ , 5 –  $H_i$  має перевагу над  $H_j$ , 7 –  $H_i$  має велику перевагу над  $H_j$ , 9 –  $H_i$  має абсолютну перевагу над  $H_j$ .

Побудова матриці (2.10) ґрунтується на таких міркуваннях: відстань до базової станції та динамічні завади мають найбільший вплив на якість сигналу, тому вважаються рівнозначно важливими. Відстань перевищує за впливом характеристику середовища і статичні завади. Фактори впливу середовища і статичних завад оцінюються як рівнозначні, а динамічні завади мають перевагу над ними, проте – незначну. Зворотні елементи матриці визначались оберненими значеннями, відповідно до вимог методу Сааті.

Після нормалізації стовпців та усереднення оцінок отримано власний вектор вагових коефіцієнтів (2.11).

$$w = (w_v, w_f, w_s, w_d) = (0.30, 0.20, 0.20, 0.30). \quad (2.11)$$

Для перевірки узгодженості суджень експертів обчислено найбільше власне значення матриці:  $\lambda_{\max} = 4,06$ . Дане значення отримано шляхом множення матриці парних порівнянь на вектор вагових коефіцієнтів та усереднення відношень результату відповідних ваг. Індекс узгодженості обраховано за формулою (2.12) [98]:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,06 - 4}{3} = 0,02, \quad (2.12)$$

де  $n = 4$  – кількість порівнюваних факторів. Тоді коефіцієнт узгодженості визначається за формулою (2.13).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,02}{0,90} = 0,022. \quad (2.13)$$

Оскільки  $CR < 0,1$ , узгодженість експертних оцінок є прийнятною, що підтверджує надійність отриманих ваг. Отримані коефіцієнти використовуються для подальшої параметризації дзвоноподібних функцій належності в нечіткій моделі. Метод аналізу ієрархій не застосовується безпосередньо для визначення параметрів функцій належності, а лише забезпечує систему відносних ваг важливості факторів, яка враховується під час їхнього налаштування.

Параметри функцій належності  $\mu_i(x)$  формуються з урахуванням вагових коефіцієнтів за такими співвідношеннями (2.14, 2.15):

$$\mu_i(x) = \exp\left(-\frac{(x - c_i)^3}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2.14)$$

$$c_i = c_0 + k_c \cdot w_i, \quad \sigma_i = \frac{\sigma_0}{1 + k_\sigma w_i}, \quad (2.15)$$

де  $c_0$  і  $\sigma_0$  – базові параметри, а  $k_c$ ,  $k_\sigma$  – коефіцієнти масштабування. Таким чином, вагові коефіцієнти використовуються для адаптивного налаштування форми функцій належності: більш вагомні фактори отримують вузьчі функції, що підвищує чутливість системи до їхніх змін, тоді як менш значущі мають ширші функції.

Побудова нечіткої бази знань відбувалась у середовищі Matlab із використанням інструменту Fuzzy Logic Toolbox (рис. 2.5).

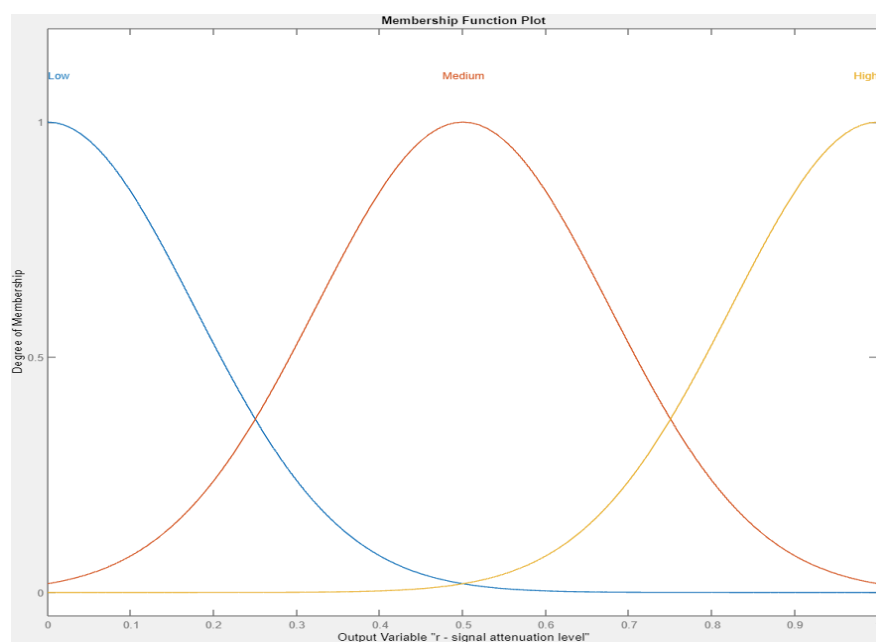


Рисунок 2.5 – Графік функції належності вихідної змінної нечіткої системи

Залежність між затуханням сигналу з відстанню  $v$ , статичними техногенними завадами  $s$  та впливом ДС на силу сигналу зображена на рис 2.6.

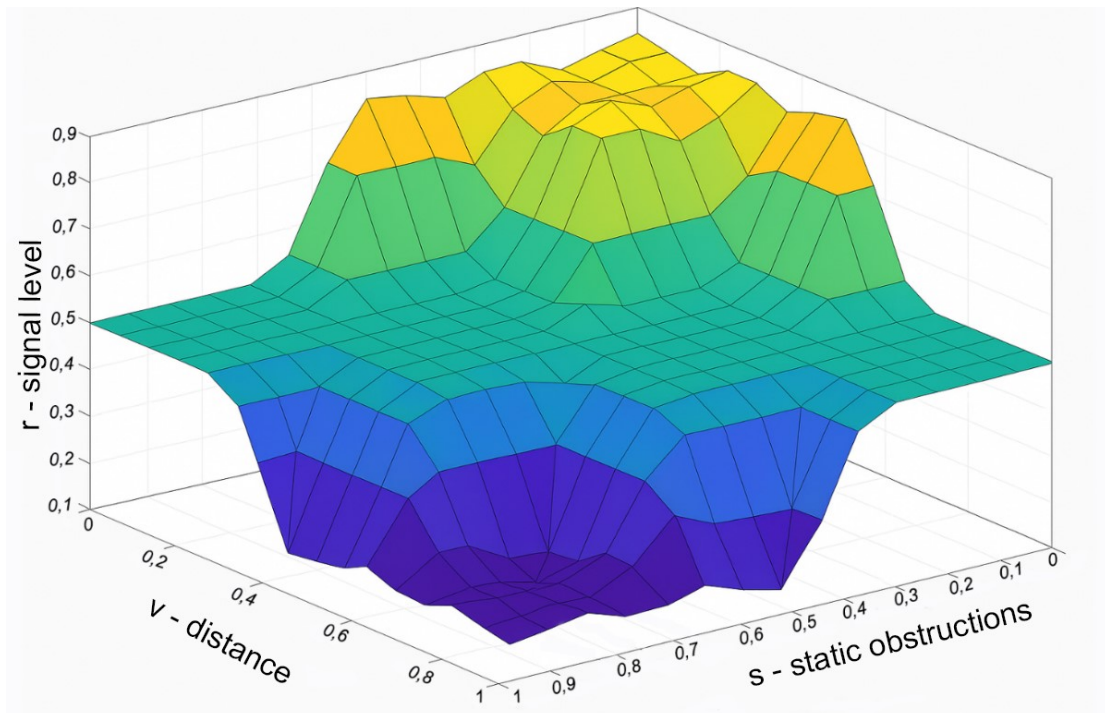


Рисунок 2.6 – Вплив відстані та статичних завад на якість сигналу від ДС

Перелік правил наведено в додатку Б. Для узагальнення правил відбувається агрегування їх нечітких виходів в одну нечітку множину з її подальшим перетворенням на чітке вихідне значення  $y$ . Для переходу від нечіткої множини до конкретного числового значення застосовується процедура дефазифікації.

У розробленій системі використано метод центра ваги, який є найбільш розповсюдженим у нечітких системах керування. Нехай вихідна змінна має універсум (2.7) та функцію належності  $\mu_R(y)$ , отриману в результаті нечіткого виведення. Тоді числове значення змінної  $y^*$  визначається формулою (2.16).

$$y^* = \frac{\int_0^1 y \cdot \mu_R(y) dy}{\int_0^1 \mu_R(y) dy}. \quad (2.16)$$

При використанні дискретизації універсуму з кроком  $\Delta y$  набуває вигляду (2.17):

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \mu_R(y_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_R(y_i)}, \quad (2.17)$$

де  $y_i$  – точка дискретизації універсуму,  $N$  – кількість точок,  $\mu_R(y_i)$  – значення агрегованої функції належності в цих точках.

Вихідна змінна  $r$  описується дзвоноподібними функціями належності. Після нечіткого виведення формується агрегована функція  $\mu_R(y)$ , яка є максимумом усіх часткових функцій, активованих правилами (2.18):

$$\mu_R(y) = \max_k(\min(\alpha_k, \mu_{B_k}(y))), \quad (2.18)$$

де  $\alpha_k$  – ступінь істинності передумови  $k$ -го правила,  $\mu_{B_k}(y)$  – функція належності терму у висновку цього правила.

Отримана агрегована функція підставляється у формулу центроїда і на виході формується числове значення  $r^* \in [0;1]$ , яке відображає інтегральну оцінку якості сигналу з урахуванням усіх факторів (рис 2.7).

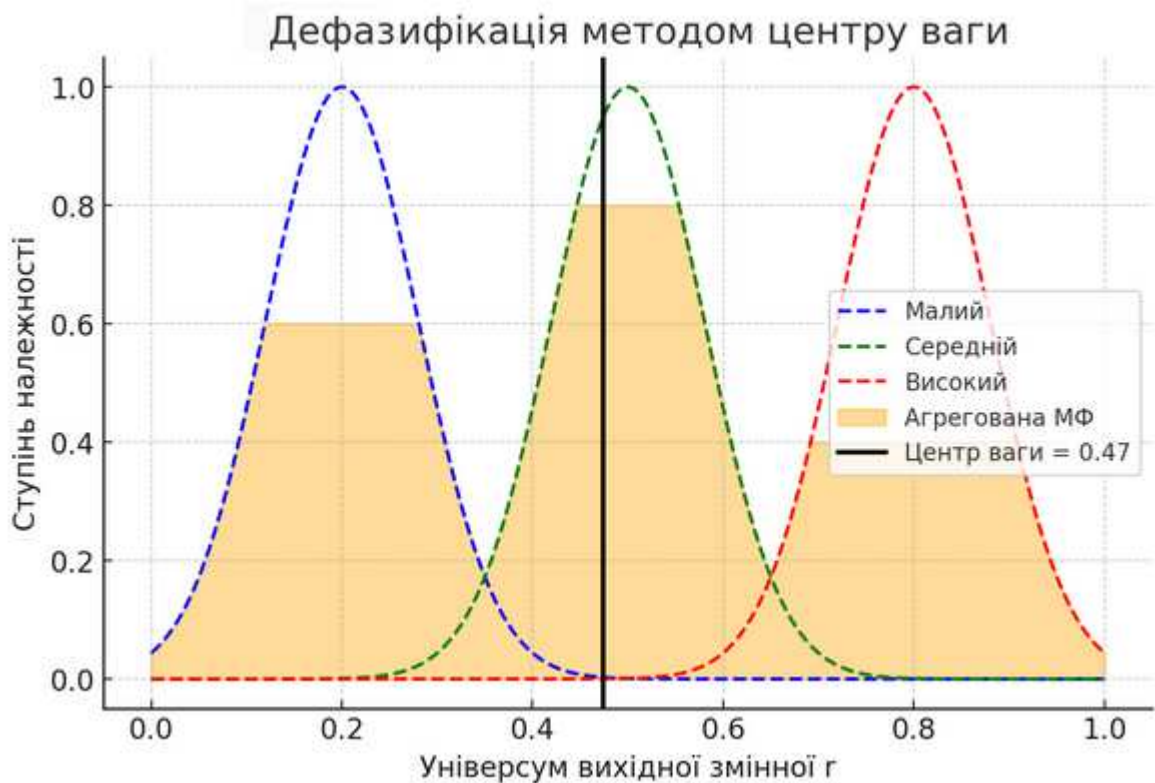


Рисунок 2.7 – Ілюстрація процесу дефазифікації методом центру ваги

Оскільки первинні фактори мають різну вагу, їхній вплив інтегрується ще до фазифікації через модифікацію функцій належності. Вагові коефіцієнти вагові коефіцієнти враховуються під час обчислення цього висновку (2.19).

$$y^* = \frac{\sum_{k=1}^M \alpha_k \cdot z_k}{\sum_{k=1}^M \alpha_k}, \quad (2.19)$$

де  $\alpha_k$  – ступінь істинності  $k$ -го правила,  $z_k$  – числове значення виходу цього правила,  $M$  – кількість активованих правил.

Метод дефазифікації забезпечує отримання єдиного числового показника, що відображає ступінь впливу зовнішніх факторів на якість функціонування системи, з урахуванням усіх нечітких співвідношень та вагових коефіцієнтів. Отримане числове значення може бути використане як вихідна інтегральна оцінка для прийняття подальших рішень щодо проектування системи.

Аналіз можливих місць розташування IoT-станції пропонується проводити за такими кроками (рис. 2.7):

1. Зібрати та обробити інформацію для кожного варіанту розташування IoT-станції ( $N_i$ ).

1.1. Оцінити ступінь можливого послаблення сили сигналу, через вплив електромагнітних завад, використовуючи нечітку базу знань, що наведена у табл. 2.4.

1.2. Оцінити ступінь можливого послаблення сили сигналу, через вплив інших факторів, використовуючи нечітку базу знань, що наведена у табл. 2.5.

1.3. Оцінити результуюче можливе послаблення сили сигналу, через вплив електромагнітних завад та інших факторів ( $r_j$ ).

1.4. Перевірити, чи всі можливі значення послаблення сигналу перевищують або дорівнюють мінімальному допустимому значенню ( $\forall r_j \geq r_{min}$ ).

2. Обчислити статистичні показники  $R_{ij}$ : мінімальне значення, середнє, дисперсію, середньоквадратичне відхилення та ін.

3. Визначити вартість  $C_i$  встановлення станції, підключення до Інтернету, безперебійного живлення та обслуговування, хоча б протягом року, у кожному із варіантів  $N_i$ .

4. Вибрати оптимальне розташування IoT-станції  $N_{opt}$  з використанням методів лінійної оптимізації, де вибрати варіант, який буде мати найбільші значення  $R_{opt j}$ , найменшу вартість  $C_i$  та буде задовольняти ряду обмежень, наприклад, що послаблення сигналу від жодного джерела сигналу не буде нижчим за певне порогове значення  $R_{min}$  послаблення:  $R_{opt j} \geq R_{min}$ .

Після завершення описаних кроків, з урахуванням додаткових даних та зазначеної експертної інформації, можна додати:

1. Автоматичне визначення відстані за GPS-координатами: використання GPS-координат давачів та IoT-станції дозволить точно визначити відстань між ними без потреби у ручному вимірюванні, що спростить процес збирання даних та знизить його вартість.

2. Врахування розміру забудови та форм рельєфу за даними OpenStreetMaps: аналіз даних OpenStreetMaps дозволить отримати інформацію про розмір забудови, форму рельєфу та інші аспекти, які можуть вплинути на поширення сигналу – ці експертні оцінки можуть бути додані для покращення точності оцінки.

3. Оцінювання наявності транспортних маршрутів та інфраструктури: використання даних з OpenStreetMaps дозволить оцінити наявність автострад, ліній електротранспорту, парковок та підприємств на шляху від давача до станції – ці експертні дані можуть допомогти врахувати режими роботи електротранспорту та інші фактори, які впливають на поширення сигналу.

4. Автоматичне визначення ступеня послаблення сигналу: поєднання даних з OpenStreetMaps та бази даних експертної інформації дозволить автоматично визначити ступінь послаблення сигналу для заданих пар GPS-координат давач-станція – це спростить процес аналізу та допоможе знайти оптимальне розташування IoT-станції.

Задачу вибору оптимального розташування IoT-станції можна розв'язати як задачу лінійного програмування, оскільки всі критерії оптимізації є лінійними. Оптимальним місцем розташування є те, для якого критерій прийматиме найменше значення. Алгоритм визначення джерел сигналу з мінімальним впливом подано в додатку В.

У контексті розроблення експертної системи важливим завданням, яке тісно пов'язане із визначенням оптимального місця встановлення базових станцій, є визначення доцільності розташування датчиків у потенційних точках спостереження. При цьому принципи прийняття рішень залишаються аналогічними. Однак, у даному випадку акцент робиться не на географічних координатах самих станцій чи технічних параметрах датчиків – а на характеристиках території, де вони будуть розміщені.

Для підвищення ефективності системи моніторингу враховуються просторові та екологічні чинники, такі як: наявність і концентрація джерел забруднення, близькість промислових об'єктів та транспортних артерій, віддаленість від водойм, особливості рельєфу та ґрунтового покриву. Вибір місць встановлення датчиків має забезпечувати максимальне охоплення зон із підвищеною ймовірністю негативного впливу на довкілля, що дозволяє уникати їх нерационального розміщення.

Робота експертної системи у цьому випадку полягає у перетворенні множини нечітких експертних оцінок територіальних характеристик в єдину інтегральну величину, яка відображає рівень пріоритетності встановлення датчика в конкретній точці. На основі сформованої бази знань будується поверхня залежностей, яка демонструє вплив кількох факторів одночасно і дозволяє отримати обґрунтовану рекомендацію щодо оптимального розташування датчиків (рис. 2.8)

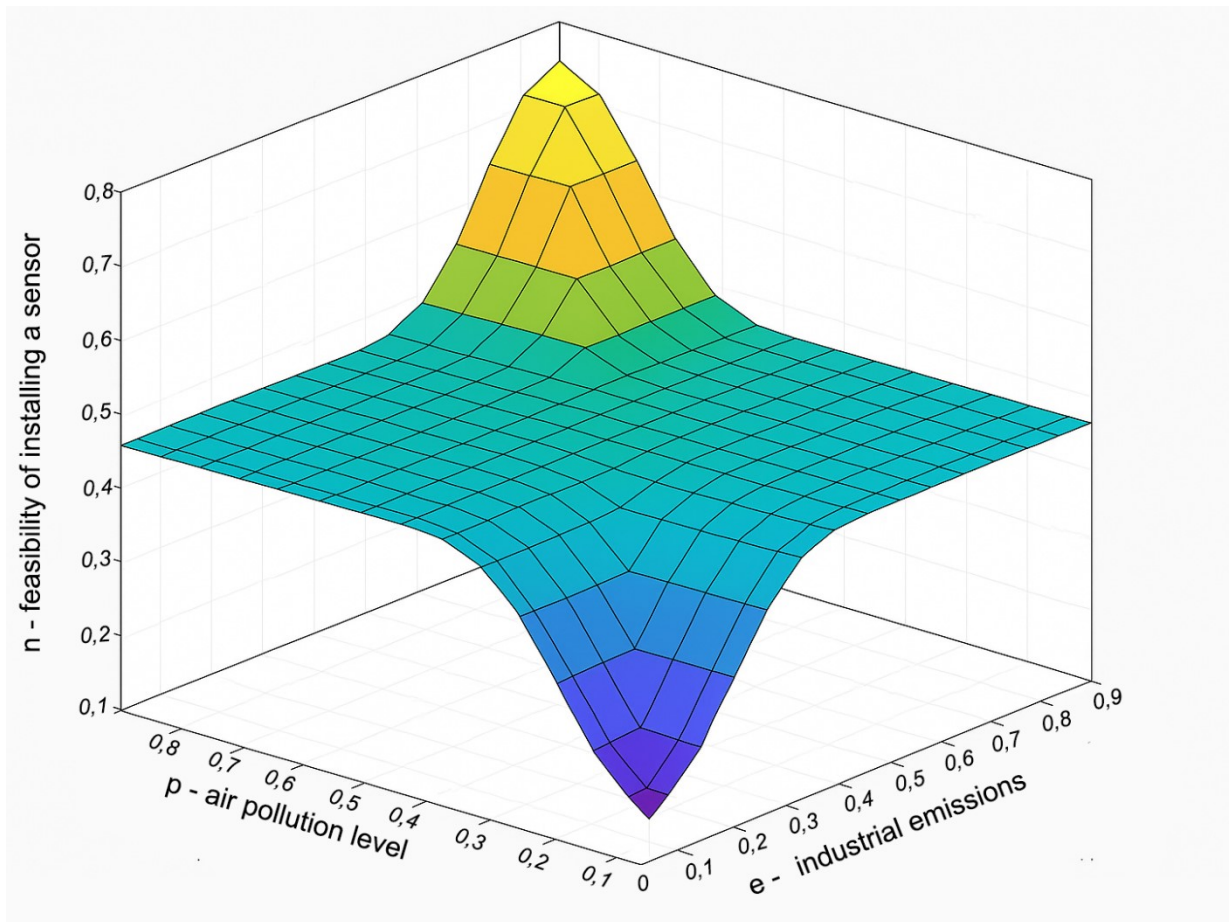


Рисунок 2.8 – Вплив рівня забруднення повітря та кількості промислових викидів на точку розміщення датчика

Плато на поверхні залежностей пояснюється нормативними підходами до організації мереж моніторингу повітря. У більшості європейських рекомендацій та практик визначено орієнтовну кількість постів спостереження, яку доцільно встановлювати в регіоні залежно від кількості промислових викидів та рівня забруднення атмосфери. За низьких значень викидів і забруднення потреба у постах мінімальна. У діапазоні середніх значень формується фіксована кількість постів, тому зміна факторів майже не впливає на рекомендацію. При надмірно високих значеннях виникає потреба у посиленому моніторингу.

Таким чином, підхід до вибору датчиків є логічним продовженням методології, що застосовується для визначення місць їх встановлення. Це дає змогу сформувати повноцінну експертну систему підтримки прийняття рішень, яка охоплює як рівень стратегічного планування (просторова оптимізація), так і

рівень тактичного налаштування (вибір конкретних типів давачів під задані умови). Впровадження такого підходу забезпечує адаптивність IoT-системи до змін у зовнішньому середовищі та дає змогу мінімізувати кількість давачів без втрати якості моніторингу.

Розроблена нечітка експертна система є одним із ключових елементів методу просторової оптимізації, проте не вичерпує всі аспекти цього підходу. У повній формі метод може інтегрувати економічні показники вартості розгортання, експлуатаційні витрати, показники стабільності зв'язку та географічні параметри місцевості. Наведена лінійна модель оптимізації є прикладом спрощеної реалізації, яка використовується для демонстрації алгоритмічної частини розробленої методології.

### **2.3 Інтеграція геоінформаційних систем та супутникових даних у процес прийняття рішень**

Сучасні інформаційні системи, побудовані на основі Інтернету речей, потребують урахування багатьох чинників під час створення їхньої архітектури — від просторових і екологічних до техногенних та інфраструктурних, особливо коли йдеться про вибір місць для розміщення давачів. Через це, виникає потреба у використанні геоінформаційних систем і супутникових даних, які стають важливими інструментами для прийняття зважених рішень у складних умовах із багатьма змінними.

ГІС-технології дають змогу об'єднати в одному середовищі різноманітну інформацію, прив'язану до конкретних географічних координат: цифрові карти, шари з об'єктами, супутникові знімки, статистику, результати моделювання чи спостережень. Завдяки цьому, ГІС стає не просто інструментом для візуалізації, а — повноцінною платформою для аналізу й прийняття рішень.

До основних інформаційних шарів та даних, що можуть використовуватись у процесі прийняття рішень, належать такі:

1. Картографічні дані (рельєф, гідрографія, дорожня мережа).

2. Супутникові знімки Sentinel-2, Landsat 8/9, MODIS.
3. Індекси вегетації, що характеризують стан рослинного покриву.
4. Показники теплового балансу.
5. Дані про забруднення атмосферного повітря.
6. Інфраструктурні об'єкти (промислові зони, транспортні вузли, житлова забудова).

У системах Інтернету речей, особливо для екологічного чи інфраструктурного моніторингу, просторовий аналіз допомагає:

1. Виявити географічні зони з підвищеним ризиком техногенного або природного навантаження.
2. Визначити щільність і пріоритети покриття сенсорної мережі.
3. Врахувати відстань до джерел забруднення, об'єктів інфраструктури, транспортних вузлів тощо.
4. Ідентифікувати зони з особливим мікрокліматом або зміненими ландшафтними характеристиками.
5. Супутникові знімки та дані дистанційного зондування Землі розширюють можливості ГІС, додаючи динаміку, масштабованість і актуальність. Завдяки супутниковим даним і засобам їх оброблення та аналізу, можна регулярно отримувати інформацію про:

- NDVI (Індекс нормалізованої різниці рослинності) – стан рослинного покриву;
- LST (Температура земної поверхні) – температурні відхилення;
- AQI (Індекс якості повітря) – рівень забруднення повітря;
- вологість ґрунту, опади, атмосферні умови;
- класи землекористування (наприклад, ліси, водойми, сільгоспугіддя, міські зони).

Ці дані мають ключове значення для систем, які визначають оптимальні місця для встановлення давачів у таких сферах, як охорона довкілля, сільське господарство, гідрологія, енергетика, міське планування тощо.

Для ефективного використання ГІС і супутникових даних в IoT-системах для прийняття рішень найкраще застосовувати модульну архітектуру, яка містить такі ключові компоненти:

1. Модуль просторових даних – об'єднує та обробляє інформацію з відкритих ГІС-сервісів, таких як OpenStreetMap, Copernicus, Sentinel чи Google Earth Engine.
2. Модуль аналізу супутникових знімків – витягує числові показники зі спектральних каналів і автоматично визначає зони за рівнем ризику.
3. База знань експертної системи – містить правила нечіткої логіки або евристичні зв'язки між факторами та рішеннями про розміщення давачів.
4. Інтерфейс прийняття рішень – забезпечує візуалізацію карт ризику, зон покриття, точок для давачів і прогнозованих сценаріїв.

Для інтеграції супутникових даних у процес прийняття рішень необхідно здійснити їх нормалізацію та переведення у безрозмірну шкалу. Це дозволяє поєднувати різнорідні дані в єдину систему оцінки.

Нормалізоване значення критерію  $\hat{X}_k(x, y)$  у точці  $(x, y)$  обчислюється за формулою (2.20).

$$\hat{X}_k(x, y) = \frac{X_k(x, y) - X_k^{\min}}{X_k^{\max} - X_k^{\min}}, \quad 0 \leq \hat{X}_k(x, y) \leq 1, \quad (2.20)$$

де:

- $X_k(x, y)$  – вихідне значення  $k$ -го параметра у точці  $(x, y)$ ;
- $X_k^{\min}, X_k^{\max}$  – мінімальне та максимальне значення параметра в досліджуваній області.

Далі формується інтегральний індекс  $S(x, y)$  придатності території для розміщення давачів (2.21)

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^M \gamma_k \hat{X}_k(x, y), \quad (2.21)$$

де:  $M$  – кількість критеріїв,  $\gamma_k$  – ваговий коефіцієнт  $k$ -го критерію, визначений експертним шляхом.

Інтеграція здійснюється як на рівні даних, так і на рівні знань. Наприклад, супутникові дані перетворюються на зрозумілі категорії ("високе забруднення", "низька рослинність" тощо), які формалізуються у вигляді множин у системі нечіткої логіки. Це допомагає адаптуватися до мінливих і неоднозначних умов навколишнього середовища. Приклад структури інформаційної системи на базі даних ГІС зображено на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Приклад структури інформаційної системи на базі даних ГІС

Використання геоінформаційних систем та супутникових даних для проектування IoT-систем доцільно організувати у вигляді чіткої послідовності кроків. Узагальнений алгоритм наведено на рис. 2.10.



Рисунок 2.10 – Алгоритм інтеграції ГІС та супутникових даних

Інтеграція геоінформаційних систем і супутникових даних в IoT-системи приносить значні переваги, які роблять процеси ефективнішими та адаптованішими. По-перше, автоматизація рішень дозволяє системам самостійно визначати пріоритетні зони для розміщення IoT-інфраструктури, наприклад, давачів для моніторингу. Це значно спрощує планування, адже система сама аналізує дані й пропонує оптимальні місця. По-друге, завдяки попередньому аналізу критичних точок можна скоротити кількість необхідних давачів, що знижує витрати без втрати якості моніторингу. Наприклад, замість встановлення десятків давачів у менш важливих зонах, система визначає ключові точки, де контроль буде найефективнішим. Крім того, оперативність забезпечується, завдяки регулярному оновленню супутникових даних, що дозволяє відстежувати

зміни в довкіллі у реальному часі — від погодних умов до техногенних впливів. Масштабованість дає змогу адаптувати систему до різних типів територій, чи то густі ліси, міські квартали, сільськогосподарські поля чи річкові басейни, що робить її універсальною для різних сценаріїв.

Проте, інтеграція таких технологій має й свої виклики. Гетерогенність даних ускладнює роботу, адже інформація надходить у різних форматах, з різною точністю і частотою оновлення. Наприклад, супутникові знімки можуть мати інший масштаб, ніж дані з локальних давачів, що вимагає складної обробки. Просторові викривлення також створюють проблеми: супутникові індекси, як-от NDVI чи LST, не завжди точно відображають локальні особливості, наприклад, через хмарність чи особливості ландшафту. Обчислювальна складність — ще один виклик, оскільки аналіз великих обсягів супутникових зображень потребує значних ресурсів, що може уповільнити обробку даних. Інтерпретованість результатів залишається важливим аспектом: навіть найточніші дані потребують чіткого пояснення, щоб їх могли використовувати для прийняття зважених рішень, особливо в умовах, коли залучені фахівці з різних галузей.

Інтеграція геоінформаційних систем і супутникових даних відкриває можливості для використання в багатьох сферах. В екологічному моніторингу вона допомагає стежити за станом лісів, водойм чи зон відпочинку, виявляючи зміни в екосистемах. У сільському господарстві ці технології підтримують точне землеробство, дозволяючи оптимізувати посіви чи прогнозувати врожайність на основі даних про ґрунт і рослинність. У концепції «розумного» міста ГІС і супутникові дані сприяють аналізу транспортних потоків, якості атмосферного повітря, виявленню теплових островів у міських районах тощо. В енергетиці вони допомагають визначати найкращі місця для встановлення сонячних панелей чи вітрових електростанцій, враховуючи природні умови. У гідрології такі системи незамінні для моніторингу рівня води, прогнозування паводків чи оцінки стану дренажних систем, що допомагає запобігати стихійним лихам.

Запропонований метод комплексної просторової оптимізації дозволяє враховувати як географічну специфіку території, так і економічну доцільність

встановлення елементів IoT-інфраструктури. Просторова компонента моделі базується на використанні геоінформаційних шарів, таких, як цифрові моделі рельєфу, супутникові знімки, карти забудови та дані про зони радіоперешкод. Це забезпечує визначення не лише координат оптимального розташування базових станцій, а й зон з підвищеним ризиком втрати сигналу або перевитрати енергії. Економічна складова враховується у вагових коефіцієнтах вартості монтажу, прокладання енергетичних ліній, оренди об'єктів інфраструктури та обслуговування мережі. Об'єднання цих двох груп критеріїв у межах одного методу дає можливість досягти компромісу між стабільністю зв'язку та мінімізацією сумарних витрат.

## **2.4 Висновки до розділу**

У другому розділі розв'язано комплекс науково-прикладних завдань, спрямованих на підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проектування IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів. Отримані результати забезпечили формування методу оптимального проектування та підтвердили доцільність застосування інтелектуальних підходів для побудови сучасних енергоефективних IoT-систем.

Розроблено метод багатокритеріального вибору архітектур інформаційних систем на основі LPWAN, який враховує технічні, експлуатаційні та економічні критерії. Використання нормалізації параметрів, методу аналізу ієрархій та методів математичного програмування дозволило забезпечити стійке ранжування альтернатив і сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо вибору мережевої технології та IoT-платформи. Це створило підґрунтя для підвищення структурної узгодженості архітектури IoT-систем і скорочення часу проектування.

Створено метод комплексної просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій LPWAN, що поєднує просторовий аналіз, нечітку логіку та лінійні моделі оптимізації. Запропонована ієрархічна нечітка база знань забезпечує

комплексне урахування рельєфу, забудови, статичних і динамічних радіозавад, а також дозволяє отримувати інтегральні оцінки якості сигналу в умовах просторової невизначеності. Метод забезпечує визначення оптимальної конфігурації мережі, зменшує втрати сигналу та підвищує технологічну стійкість системи у реальних умовах експлуатації.

Інтегровано геоінформаційні системи та супутникові дані у процес прийняття проєктувальних рішень. Розроблено підхід до нормалізації та об'єднання різнорідних просторових і спектральних даних (NDVI, LST, AQI, дані OSM та ін.) у єдині критерії придатності території. Запропонований інтегральний індекс просторової придатності дає змогу автоматично визначати пріоритетні зони розміщення давачів, враховувати екологічні та техногенні фактори та формувати оптимізовану структуру моніторингової мережі.

Таким чином, у межах розділу створено наукові передумови та прикладні рішення, які забезпечують реалізацію поставленої мети дисертаційної роботи — підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проєктування IoT-систем на основі LPWAN із урахуванням просторових й техногенних факторів.

Наведені в розділі результати були висвітлені у роботах [14, 22].

## РОЗДІЛ 3

# СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМ

### 3.1 Розроблення методу автоматизованого створення технологічних PFD-діаграм за текстовими описами

Як було зазначено у підрозділі 1.3, технології малопотужних мереж LPWAN відіграють ключову роль у розвитку масштабованих IoT-систем, забезпечуючи низьке енергоспоживання та передачу даних на великі відстані. Проте, проєктування таких систем є ускладненим, через необхідність розроблення технологічних схем, таких як Process Flow Diagrams (PFD), які відображають потоки даних між компонентами. Ручне моделювання PFD є трудомістким процесом, що вимагає значних часових затрат. Воно також схильне до помилок, таких як неправильне визначення потоків даних чи неврахування обмежень мережі, що призводить до зниження ефективності системи.

У процесі проєктування IoT-систем зазвичай використовують різні типи структурно-функціональних діаграм, оскільки вони дають змогу формалізувати архітектуру, відобразити взаємодію компонентів і впорядкувати потоки даних. Data Flow Diagrams (DFD) ефективні для аналізу потоків даних у програмному забезпеченні, але не враховують апаратних особливостей мереж LPWAN, таких як обмеження на розмір повідомлень. Діаграми Unified Modeling Language (UML) дають можливість детально моделювати поведінку системи, однак їхня складність ускладнює швидке розроблення схем у реальних проєктах із жорсткими ресурсними обмеженнями. Block Flow Diagrams (BFD) є простішими, але не забезпечують достатньої деталізації для відображення потоків даних, критичних для енергоефективних мереж. На відміну від них, PFD оптимально поєднують технологічну точність і здатність візуалізувати зв'язки між фізичними та логічними компонентами, враховуючи параметри, такі як обсяг даних і енергоспоживання. Це робить PFD ідеальним вибором для IoT-систем на базі

класу технологій LPWAN, однак їхнє розроблення вручну залишається неефективним.

Сучасні тенденції в IoT-проектуванні вказують на зростання попиту на автоматизовані інструменти, які скорочують тривалість розроблення та підвищують точність технологічних схем. Наявні графічні редактори, такі як Microsoft Visio чи Lucidchart, обмежуються функціями візуалізації та не адаптовані до технічних вимог LPWAN, що призводить до необхідності ручного коригування схем. Наприклад, ці інструменти не дають можливість автоматично оптимізувати потоки даних для дотримання лімітів мережі. Водночас, великі мовні моделі (англ. Large Language Model), які ефективно обробляють текстові описи та генерують структуровані дані, відкривають нові можливості для автоматизації. Їхня здатність інтерпретувати технічні специфікації та синтезувати код, підтверджена в задачах генерування програмного забезпечення, створює передумови для інтеграції в процеси проектування IoT. Зокрема, моделі LLM можуть трансформувати текстові запити користувача у PFD-діаграми, враховуючи інженерні аспекти. Цей потенціал, поєднаний із потребою в енергоефективних рішеннях, обґрунтовує розробку нових методів автоматизації для LPWAN-систем.

Проектування IoT-систем вимагає розроблення Process Flow Diagrams, які відображають потоки даних між компонентами з урахуванням обмежень мережі. Пропонується концепція, спрямована на автоматизацію цього процесу шляхом інтеграції LLM з формалізованим алгоритмом оптимізації потоків даних і енергоощадності. На відміну від традиційних підходів, що покладаються на ручне моделювання чи графічні редактори, розроблено метод, який трансформує текстові описи IoT-систем, надані користувачем, у структуровані технологічні схеми. Наприклад, опис «Система моніторингу температури з датчиками, що передають дані через мережу Sigfox до хмари» автоматично перетворюється на PFD із компонентами, потоками та анотаціями щодо обсягу даних. Цей підхід усуває потребу в спеціалізованих вміннях моделювання, скорочуючи тривалість проектування та підвищуючи точність створених діаграм.

LLM моделі виступають як посередник між неструктурованим текстовим описом і структурованим поданням системи. Попередньо натренована на технічних даних про LPWAN-технології модель аналізує текст, ідентифікуючи ключові компоненти та їхні взаємозв'язки. Наприклад, у запиті «давач рН передає 4 байти кожні 30 хвилин» модель розпізнає компоненти (давач), потік даних (4 байти) і частоту (раз на 30 хвилин), формуючи орієнтований граф. Цей граф містить вершини (компоненти) та ребра (потoki) з атрибутами, такими як обсяг даних чи тип передачі. На відміну від універсальних моделей, LLM, адаптована до контексту мереж LPWAN, дає змогу враховувати її технічні особливості, такі як обмеження на розмір повідомлень, уже на етапі аналізу.

Запропонована концепція автоматизованого проєктування IoT-систем вирізняється кількома перевагами у порівнянні з традиційними методами. По-перше, автоматизація усуває потребу в ручному коригуванні, що скорочує тривалість проєктування системи. По-друге, інтеграція моделі LLM і алгоритму оптимізації потоків даних забезпечує технічну точність схем, адаптованих до мереж LPWAN, навіть для користувачів без глибоких знань про мережу. По-третє, вихідний код діаграм генерується у форматі Mermaid.js, що дає змогу легко інтегрувати PFD у робочі процеси через чат-боти чи інженерні платформи.

Архітектуру методу генерування PFD для IoT-систем з використанням моделі LLM для IoT-систем подано на рис. 3.1.

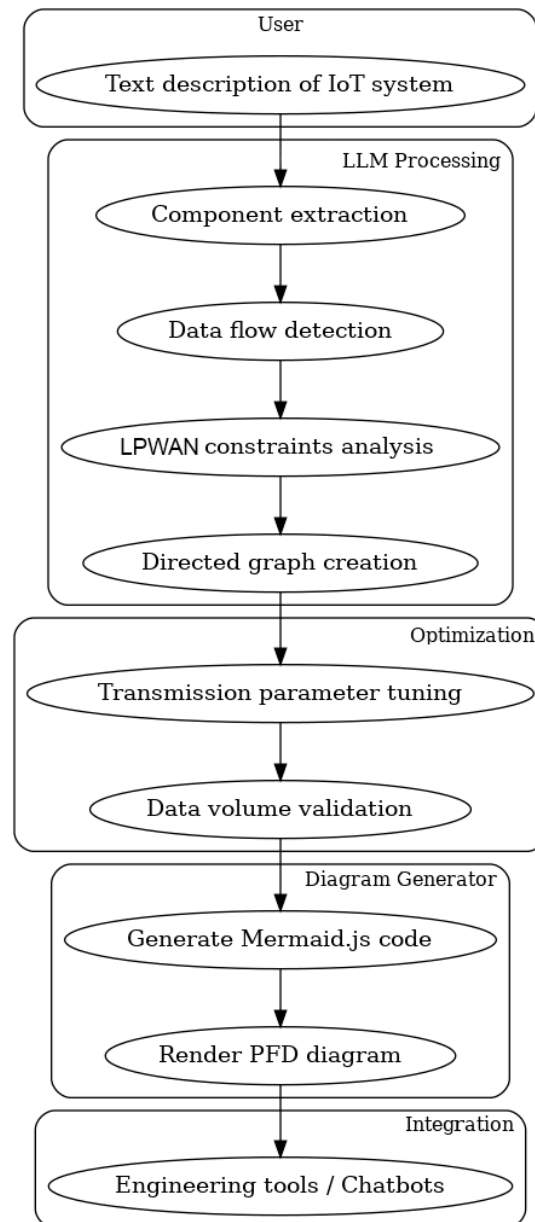


Рисунок 3.1 – Архітектура методу автоматизованого генерування PFD-діаграми

Запропонований метод автоматизує розроблення PFD для IoT-систем на базі мереж LPWAN, інтегруючи великі мовні моделі та алгоритм оптимізації потоків даних. Даний метод розроблено для інженерів, які прагнуть швидко створювати технологічні схеми без ручного моделювання, забезпечуючи відповідність обмеженням мереж LPWAN і підвищуючи енергоефективність систем. Метод містить три етапи:

1. Аналіз тексту. На першому етапі модель, наприклад Llama 3 8B обробляє текстовий опис IoT-системи, наданий користувачем. Застосовуючи

методи оброблення природної мови, зокрема розпізнавання іменованих сутностей (NER) і аналіз синтаксичних залежностей, модель ідентифікує компоненти та їхні взаємозв'язки [24, 99]. Граф анотується атрибутами, такими як розмір даних і періодичність передачі, що забезпечує основу для його подальшої оптимізації.

2. Оптимізація потоків даних. Другий етап передбачає аналіз графа для адаптації потоків даних до обмежень мереж LPWAN за допомогою формалізованого алгоритму. Цей етап містить перевірку обсягу даних для кожного потоку, а також застосування стратегій оптимізації потоків даних, таких як агрегація даних чи локальна буферизація, для зменшення енергоспоживання і частоти передачі. У результаті граф оновлюється, додаючи вершини для агрегаторів чи буферів, що відображаються у PFD як додаткові компоненти.

3. Генерування та візуалізація діаграми. На фінальному етапі оптимізований граф передається до моделі, наприклад, Gemini 1.5-Flash, яка генерує код у форматі Mermaid.js – текстовому поданні PFD. Код містить вершини, ребра та анотації. Код рендериться за допомогою бібліотеки Python-Mermaid у графічний формат. Автоматична перевірка синтаксису коду забезпечує відсутність помилок.

Архітектуру методу побудови PFD-діаграм для IoT-систем подано на рис. 3.2. Метод може бути технологічно реалізований із використанням інших LLM.

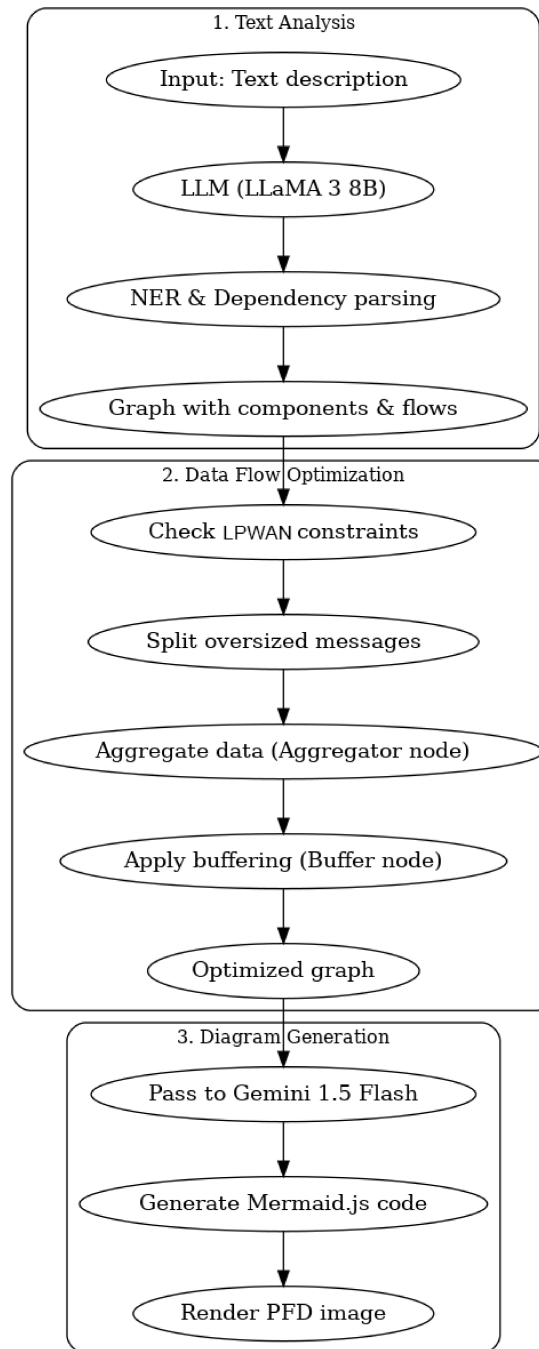


Рисунок 3.2 – Архітектура методу побудови PFD

Для забезпечення високої точності розпізнавання структурних елементів IoT-систем було зібрано тематично орієнтований корпус із понад 300 наукових статей, що охоплюють як загальні характеристики LPWAN-мереж, так і приклади їх застосування в реальних інженерних рішеннях. На основі цього корпусу сформовано спеціалізований датасет, який містить типові шаблони описів компонентів та їхніх функціональних взаємозв'язків. Модель Llama 3 8B була

адаптована до цього домену шляхом донавчання, що дало змогу значно підвищити релевантність виявлених об'єктів у тексті та їх точне позиціонування у структурі майбутньої PFD-діаграми.

Для оцінки результатів роботи LLM застосовано такі метрики як: precision, recall та F1-score:

1. Розпізнавання компонентів (3.1):

$$Precision_{NER} = \frac{|V \cap V|}{V}, \quad Recall_{NER} = \frac{|V \cap V|}{V}, \quad F1_{NER} = \frac{2 \cdot Precision_{NER} \cdot Recall_{NER}}{Precision_{NER} + Recall_{NER}}, \quad (3.1)$$

де  $V$  – множина істинних компонентів системи,  $V$  – множина компонентів, розпізнаних LLM.

2. Розпізнавання зв'язків (3.2):

$$Precision_E = \frac{|E \cap E|}{E}, \quad Recall_E = \frac{|E \cap E|}{E}, \quad F1_E = \frac{2 \cdot Precision_E \cdot Recall_E}{Precision_E + Recall_E}, \quad (3.2)$$

де  $E$  – множина істинних потоків даних між компонентами,  $E$  – множина, побудована моделлю.

Оскільки для IoT-систем важливим є як правильне виявлення вузлів, так і їхніх взаємозв'язків, введено зведену метрику як середньозважене F1 (3.3):

$$F1_{Graph} = \alpha \cdot F1_{NER} + (1 - \alpha) \cdot F1_E, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (3.3)$$

Параметр  $\alpha$  відображає відносну вагу компонентів та зв'язків у задачі. У випадку, коли LLM ідентифікує кілька можливих відповідників для одного вузла, використовується правило вибору за максимальною семантичною подібністю до контексту (3.4):

$$v^* = \arg \max_{v_i \in C} \cos(\text{emb}(v_i), \text{emb}(\text{context})), \quad i \in \{1, 2, \dots, |C|\}, \quad (3.4)$$

де  $C$  – множина кандидатів,  $\text{emb}$  – векторне представлення сутності або контексту,  $\cos$  – косинусна подібність. Таким чином система автоматично усуває семантичні неоднозначності, розрізняючи, наприклад, загальну сутність «хмарний сервер» і конкретний вузол «AWS IoT Core».

Ключову роль у методі автоматизованого генерування PFD-діаграм відіграє оптимізація потоків даних, що забезпечує відповідність обмеженням LPWAN і підвищує енергоефективність IoT-систем. Вона реалізується через формалізований алгоритм, який працює незалежно від LLM і базується на математичній моделі згаданого вище орієнтованого графа  $G=(V, E)$ , де:

- 1)  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множина вершин, що є компонентами системи;
- 2)  $E=\{e_{ij}|v_i \rightarrow v_j \in V\}$  – множина ребер, що позначають потоки між компонентами ( $i=1 \dots |V|$ ,  $j=1 \dots |V|$ , де  $|V|$  - кількість вершин графа).
- 3) атрибути ребер:  $w_{ij}$  – обсяг даних,  $f_{ij}$  – частота передачі,  $c_{ij}$  – коефіцієнт енергоспоживання, що залежить від типу компонента.

PFD-діаграма визначається як підмножина графа (3.5).

$$PFD \subseteq G, \quad PFD = (V, E, D), \quad (3.5)$$

де  $D$  – множина характеристик потоків, що містить  $w_{ij}$  і  $f_{ij}$ .

Для прикладу розрахунків обмежень обрано мережу Sigfox. Обмеження мережі Sigfox формалізовано як:

- 1)  $w_{ij} \leq 12$  байт для кожного повідомлення (uplink);
- 2)  $\sum_j f_{ij} \leq 140$  повідомлень на день для всіх потоків (uplink);
- 3) для downlink-повідомлень:  $w_{ij} \leq 8$  байт,  $\sum_j f_{ij} \leq 4$  повідомлення на день;
- 4) цільова функція для мінімізації енергоспоживання:

$$E = \min_i \sum_j c_{ij} \cdot f_{ij}. \quad (3.6)$$

Алгоритм оптимізації потоків даних складається з таких кроків:

#### 1. Перевірка обмежень.

- для uplink: якщо  $w_{ij} > 12$ , потік поділяють на кілька повідомлень:

$$w_{ij} = k \cdot 12 + r, \quad k = \lceil w_{ij} / 12 \rceil, \quad r = w_{ij}, \quad (3.7)$$

- для downlink: якщо  $w_{ij} > 8$ , потік поділяють аналогічно:

$$w_{ij} = m \cdot 8 + s, \quad m = \lceil w_{ij} / 8 \rceil, \quad s = w_{ij}, \quad (3.8)$$

де:  $k$  – кількість повних 12-байтних повідомлень,  $r$  – залишок у байтах;  $m$  – кількість повних 8-байтних повідомлень,  $s$  – залишок у байтах. Частота перевіряється на  $\sum_j f_{ij} \leq 4$ , якщо  $\sum_j f_{ij} > 140$  для uplink, переходимо до оптимізації потоків даних.

## 2. Агрегація даних:

– якщо кілька компонент передають дані через один LPWAN-модуль, додається вершина  $v_a$  (агрегатор), для якої сумарний обсяг даних  $w_a$  обчислюється за формулою (3.9).

$$w_a = \sum_i \sum_j w_{ij}, \quad f_a = \max_i \left( \sum_j f_{ij} \right). \quad (3.9)$$

– якщо  $w_a > 12$ , потоки розподіляються між кількома повідомленнями, а частота коригується.

## 3. Буферизація даних:

– якщо  $\sum_j f_{ij} > 140$ , додається вершина  $v_b$  (буфер), для якої ефективна частота передавання  $f_b$  визначається за формулою (3.10).

$$f_b = \frac{1}{k} \sum_i \sum_j f_{ij}. \quad (3.10)$$

Введення вершин агрегаторів  $v_a$  та буферів  $v_b$  у структурі графа мережі забезпечує баланс між оперативністю передавання даних та енергоефективністю. Для агрегаторів застосовано правило (3.11).

$$f_a = \max_i f_{ia}, \quad (3.11)$$

де  $f_{ia}$  – частота передавання від давача  $i$  до агрегатора  $a$ , що відповідає режиму негайної ретрансляції та гарантує збереження всіх подій без додаткової буферизації. У мережах LPWAN, зокрема Sigfox, є обмеження на кількість добових повідомлень. Якщо розглядати всі вхідні потоки як такі, що формують сумарний трафік, загальна кількість передаваних повідомлень може перевищити встановлений ліміт. Саме тому для агрегатора використано операцію *max*. Цей підхід визначає частоту передавання даних, відповідно до вимог найбільш

активного давача, забезпечуючи мінімально необхідний обмін даними без порушень обмежень мережі.

Для вершин буферів частота передавання визначається співвідношенням (3.12).

$$f_b = \frac{f_a}{k}, \quad (3.12)$$

де  $k$  – коефіцієнт агрегування, що задає у скільки разів рідше здійснюється передавання після накопичення даних у буфері. Значення параметра  $k$  визначається з умови мінімізації сумарних енергетичних витрат (3.13).

$$E = \sum c_{ij} f_{ij}. \quad (3.13)$$

Тобто, обирається таке  $k$ , при якому  $E$  мінімальне, за збереження працездатності системи та прийнятної затримки.

Метод вирізняється адаптивністю до обмежень мереж LPWAN, зокрема завдяки алгоритму оптимізації потоків даних, який зменшує частоту передачі даних на 20-30 % у сценаріях із їх високою інтенсивністю. Інтеграція двох моделей LLM (Llama для аналізу, Gemini для генерування) забезпечує баланс між контекстною точністю та синтаксичною надійністю. Отримані діаграми легко інтегруються в інженерні процеси, а автоматизоване генерування PFD-діаграм скорочує тривалість проєктування, порівняно з ручним моделюванням. Метод, також, підтримує двосторонній зв'язок (downlink), відображаючи зворотні потоки з анотаціями, що відповідають обмеженням.

Практична реалізація методу спрямована на розроблення технологічних схем для IoT-систем на прикладі мережі Sigfox, які відповідають обмеженням мережі. Метод генерує PFD на шести рівнях системного підходу – архітектурному, взаємодії, оброблення, життєвого циклу, протоколів та інтеграції. Для прикладу обрано мережу Sigfox, проте метод аналогічним чином працює із іншими технологіями LPWAN. Кожен рівень фокусується на специфічних аспектах системи, дозволяючи інженерам комплексно оцінити її структуру, виявити потенційні вразливі місця та оптимізувати розподіл ресурсів. Реалізація методу автоматизує процес моделювання, скорочуючи тривалість проєктування та

забезпечуючи високу точність схем, що полегшує розгортання IoT-систем у реальних умовах.

Метод структурує PFD-діаграми за шістьма рівнями, кожен з яких виконує відповідну роль у процесі проектування:

1. Архітектурний рівень – відображає загальну структуру системи, враховуючи основні компоненти, такі як кінцеві пристрої, Sigfox-модулі, мережа Sigfox і хмарні сервіси. Потoki даних подані як узагальнені зв'язки без деталізації параметрів.

2. Рівень взаємодії – деталізує сеанси передачі між компонентами, враховуючи періодичність і напрямок потоків. Для мережі Sigfox відображаються uplink-потoki і downlink-потoki з анотаціями про частоту.

3. Рівень оброблення – фокусується на трансформації даних, таких як збирання, агрегація чи фільтрація перед передачею. Для дотримання ліміту 12 байт для uplink діаграма може містити проміжні компоненти.

4. Рівень життєвого циклу – відображає етапи роботи пристрою, такі як активація, передача, очікування та деактивація. Потoki даних пов'язані з циклами активності.

5. Рівень протоколів – деталізує використання протоколу мережі Sigfox, враховуючи ініціалізацію з'єднання, передачу повідомлень і підтвердження. Потoki анотуються параметрами, такими як розмір пакета і тривалість сеансу, відображаючи низькорівневу взаємодію з мережею.

6. Рівень інтеграції – охоплює взаємодію системи із зовнішніми платформами. Діаграма показує потoki від мережі Sigfox Cloud до серверів оброблення чи інтерфейсів користувача з анотаціями про декодування даних.

Описані рівні дають можливість створювати багат шарові PFD, які забезпечують як загальну структуру, так і деталізоване подання системи.

На рисунку 3.3 подано приклад узагальнених PFD-діаграм архітектурного рівня та рівня оброблення.

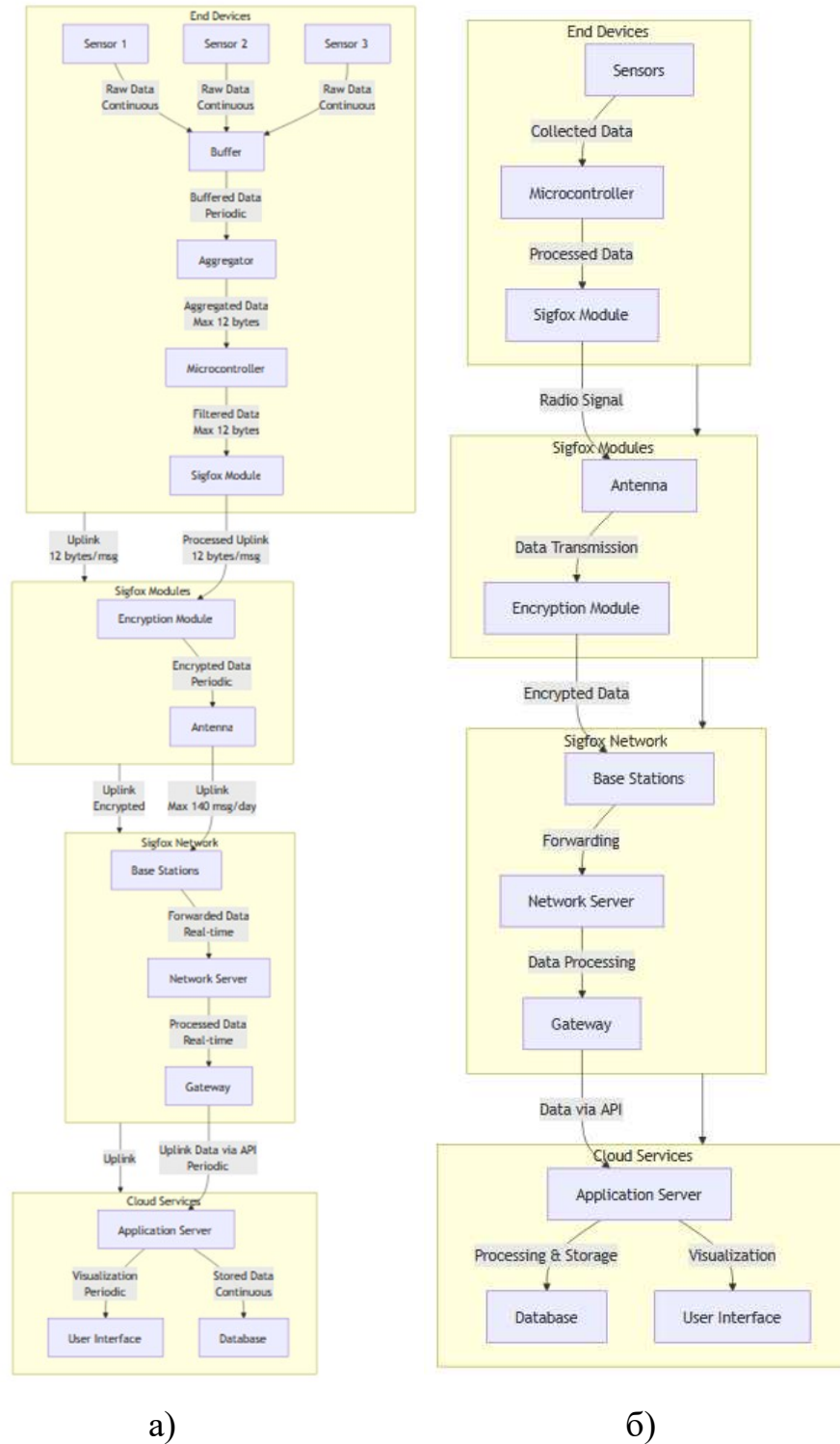


Рисунок 3.3 – Узагальнені PFD-діаграми: а) архітектурного рівня; б) рівня оброблення

Генерування PFD-діаграм на цих та інших рівнях дає змогу інженерам не тільки візуалізувати систему, але й приймати обґрунтовані оптимізаційні інженерні рішення, адаптовані до специфіки мереж LPWAN та Sigfox зокрема,

скорочуючи тривалість проектування та зменшуючи ризик помилок, порівняно з ручним моделюванням.

Для оцінки практичної доцільності запропонованого методу проаналізовано типові способи створення технологічних схем за допомогою відкритих інтерфейсів великих мовних моделей. У таких сценаріях користувач формує текстовий запит (так званий «промпт»), а модель генерує графічне подання. Проте, часто отримані результати мають переважно описовий характер. Моделі не враховують обмежень мереж LPWAN і не забезпечують структурної узгодженості між вузлами.

Для перевірки надійності алгоритму сформовано тестову вибірку із 50 текстових описів IoT-систем різної структури. Кожен опис містить у середньому 100-150 слів та описує компоненти системи, тип зв'язків і частоту обміну даними. Для оцінки стійкості половину описів модифіковано шляхом додавання лексичних синонімів, граматичних варіацій, випадкових пунктуаційних помилок та пропуском другорядних фраз. Таким чином, отримано формалізовану та зашумлену підвбірку, що моделюють типові умови роботи з описами, сформульованими інженерами у довільній формі.

Кожен опис оброблявся системою, яка формувала структурований граф  $G(V,E)$ , де вершини  $V$  відповідають компонентам IoT-системи, а ребра  $E$  – потокам даних. Для обчислення кількісних метрик результати порівнювались з еталонними діаграмами, створеними вручну експертами.

Під час обчислення автоматично враховувалась семантична подібність назв компонентів. Результати оцінки подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати оцінки точності для формалізованих і зашумлених описів

Тип опису	Precision	Recall	F1-score
Формалізовані	0,91	0,88	0,89
Зашумлені	0,85	0,82	0,84

Отримане зниження метрики F1 на 0,05 при переході до зашумлених описів виявилось статистично незначущим. Це підтверджує, що запропонований метод демонструє високу стійкість до неоднозначностей та синтаксичного «шуму», що характерно для реальних текстових описів користувачів.

Для об'єктивної перевірки проведено порівняння з трьома сучасними LLM загального призначення, які здатні генерувати PFD-діаграми: Grok 3, ChatGPT (GPT-4), Claude 3. Усі моделі отримали ті самі 50 описів без додаткових підказок. Результати порівняння відображено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння з іншими моделями

Модель	Precision	Recall	F1-score
Grok 3 (xAI)	0,71	0,73	0,74
ChatGPT-4 (OpenAI)	0,73	0,78	0,77
Claude 3 (Anthropic)	0,70	0,71	0,72
Запропонований метод на основі донавченої моделі Llama 3 (Meta AI) та Gemini 1.5-Flash (Google)	0,89	0,87	0,88

Порівняння результатів (табл. 3.2) показує, що запропонований метод демонструє вищі значення ключових метрик порівняно з іншими LLM. Зокрема, значення точності (Precision) є на 22% вищим за найкращий показник серед універсальних моделей, повнота (Recall) – на 12%, а узагальнений показник F1-score – на 14%. Підвищення цих характеристик пов'язане з донавчанням моделі Llama 3 на спеціалізованому корпусі знань з IoT та LPWAN, що сприяє точнішому відтворенню структур компонентів та потоків даних з урахуванням обмежень малопотужних мереж, зокрема Sigfox.

Порівняння швидкості генерування діаграм подано на рисунку 3.4.

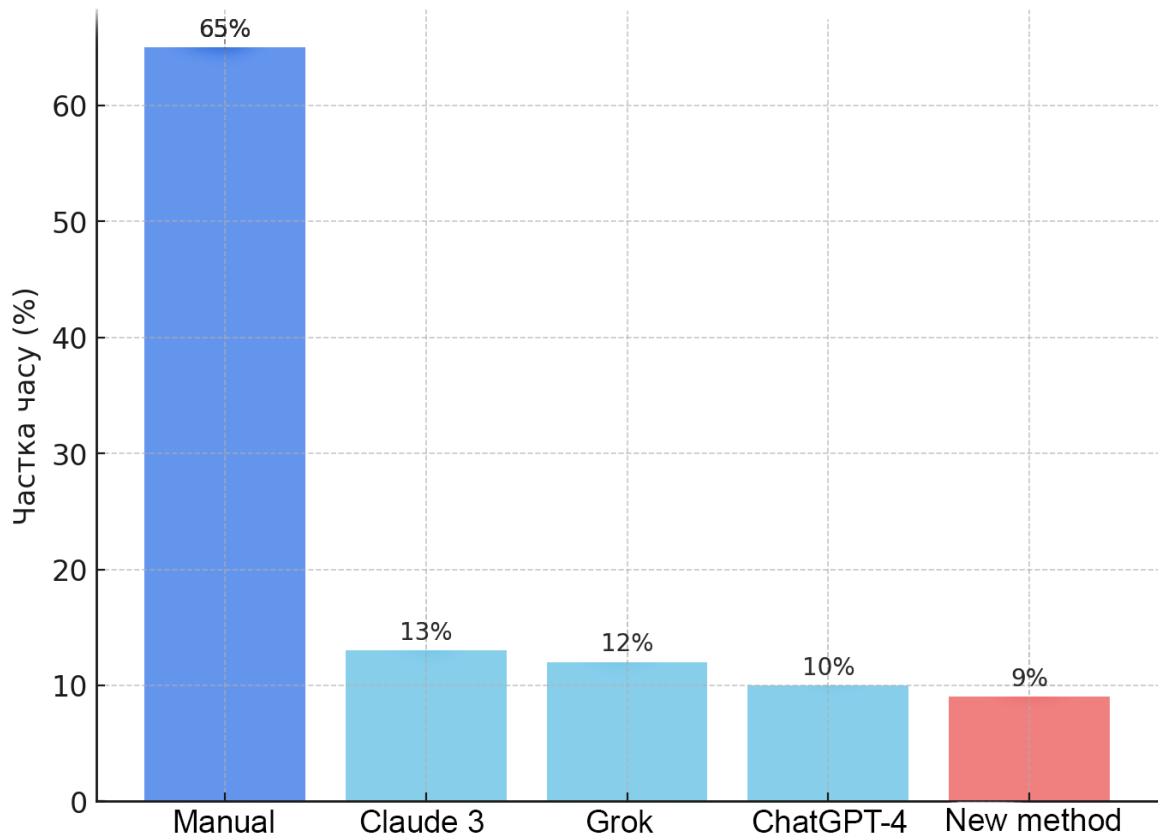


Рисунок 3.4 – Порівняння швидкості створення PFD-діаграм різними методами

Отримані результати демонструють, що запропонований метод перевершує універсальні підходи не лише за точністю, а й за стабільністю роботи, у разі оброблення неструктурованих описів.

Для демонстрації роботи методу розглянемо запит користувача: «Система моніторингу стану води з трьома давачами (температури, рН, провідності), кожен із яких передає 4 байти даних раз на 30 хвилин через мережу Sigfox до хмарного сервера». На архітектурному рівні PFD-діаграма відображає давачі, Sigfox-модуль і хмарний сервер з узагальненими потоками. На рівні оброблення алгоритм пропонує агрегацію: дані від трьох давачів об'єднуються в одне повідомлення, зменшуючи частоту до 48 передач на день. На рівні життєвого циклу діаграма показує цикли «пробудження–передача–очікування» з анотацією про 30-хвилинний інтервал. Рівень інтеграції ілюструє потік від мережі Sigfox Cloud до сервера, де дані декодуються для відображення в інтерфейсі.

На рис. 3.5 показано приклад автоматичного генерування PFD-діаграми на архітектурному рівні за запитом користувача. В результаті виконання користувач отримує візуалізовану версію PFD-діаграми та короткий текстовий опис функціонування інформаційної системи. Також, користувач може згенерувати деталізовану діаграму з кожним наступним рівнем для проєктування системи.

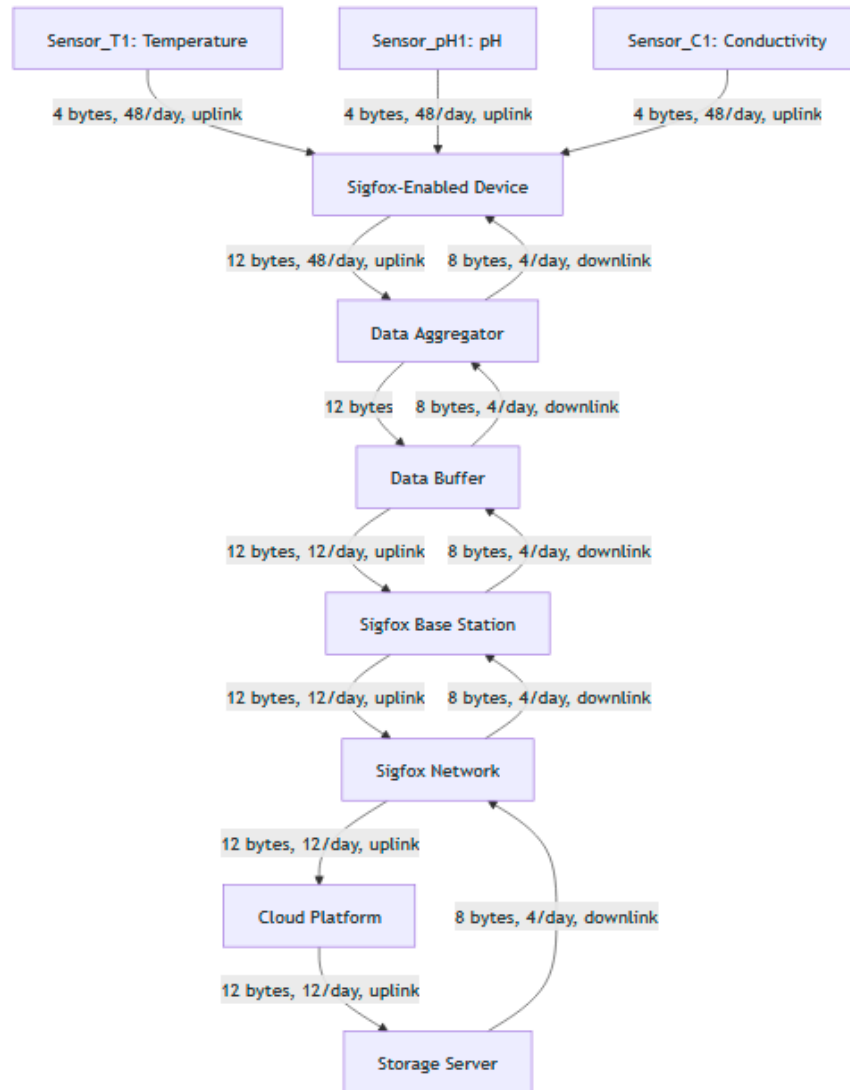


Рисунок 3.5 – Приклад автоматичного генерування PFD-діаграми на архітектурному рівні за запитом користувача

Вказана на рис. 3.5 система починається з датчиків, що вимірюють температуру, рН та провідність, і надсилають ці дані до блоку збирання даних. Потім ці дані передаються через мережу Sigfox на хмарний сервер для зберігання. Збережені дані аналізуються, що запускає сповіщення або повідомлення на підставі попередньо визначених граничних значень. Одночасно дані

візуалізуються для моніторингу. Хмарний сервер, також, надає API, що дає змогу зовнішнім системам отримувати доступ до зібраних даних та інтегруватися з ними, що забезпечує ширше застосування та сумісність. Загальний потік містить отримання даних давачів через бездротову передачу, хмарне сховище, аналіз і, нарешті, поширення через сповіщення, візуалізацію та зовнішні API.

Запропонований метод автоматичного генерування PFD-діаграм на підставі текстових описів демонструє високу ефективність під час проєктування IoT-систем на базі мереж LPWAN, забезпечуючи швидке розроблення точних технологічних схем з урахуванням обмежень цих мереж. Реалізація шестирівневого підходу та інтеграція великих мовних моделей дає змогу не тільки автоматизувати трудомісткі процеси моделювання, але й оптимізувати потоки даних, зменшуючи енергоспоживання та підвищуючи надійність проєктованої системи.

### **3.2 Створення рекомендаційного чат-бота для проєктування IoT-систем на основі LLM**

У підрозділі 3.1 сформовано метод автоматизованого генерування PFD-діаграм. Сучасні інноваційні підходи до впровадження інформаційних технологій передбачають використання рекомендаційних чат-ботів, які забезпечують зручну інтерактивну взаємодію з користувачем та полегшують застосування складних інструментів проєктування в реальних умовах. Тому доцільним є створення інтелектуального інструмента, який забезпечить практичне використання розробленого методу.

Основна ідея полягає у розробленні рекомендаційного чат-бота для підтримки прийняття рішень під час проєктування IoT-систем, робота якого ґрунтується на узгодженій логіці взаємодії модулів (рис. 3.6). Вона поєднує аналіз текстового опису задачі, автоматизоване генерування технологічних схем та просторову аналітику, що забезпечує комплексну підтримку інженерних рішень у межах єдиного інтелектуального інструменту.

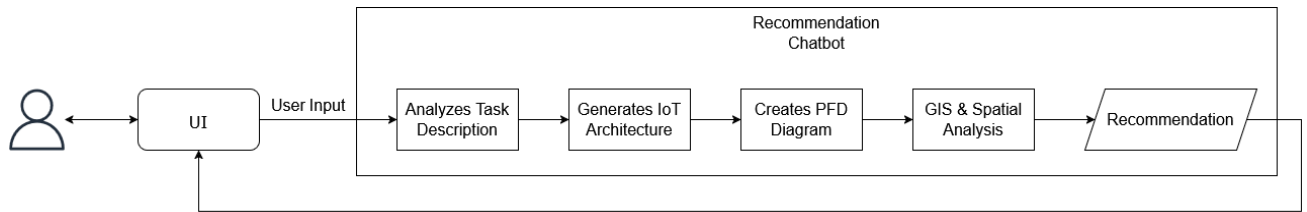


Рисунок 3.6 – Функціональна логіка роботи рекомендаційного чат-бота

Робота чат-бота починається з оброблення природомовного текстового опису задачі, наданого користувачем, за допомогою донавченої великої мовної моделі. Вхідні дані від користувача («User Input») аналізуються модулем інтерпретації («Analyzes Task Description»), який забезпечує визначення ключових характеристик IoT-системи. На основі отриманої інформації формується структуроване подання архітектури («Generates IoT Architecture»): визначається склад функціональних компонентів, встановлюються логічні зв'язки між ними та виконується попереднє структурування системи.

На основі сформованого архітектурного подання запускається модуль автоматизованого створення PFD-діаграм («Creates PFD Diagram»). Він генерує формалізовану технологічну схему відповідно до підходу, описаного в підрозділі 3.1.

Наступним елементом логіки є модуль просторової та геоінформаційної аналітики («GIS & Spatial Analysis»). Він здійснює оцінювання доцільності та ефективності розміщення давачів і базових станцій у конкретних географічних точках.

Рекомендаційний чат-бот («Recommendation Chatbot») інтегрує усі зазначені модулі в єдину інтелектуальну систему та за результатами їх роботи надає користувачеві рекомендації щодо проєктування IoT-систем («Recommendations»). Він працює в режимі Retrieval Augmented Generation (RAG), що забезпечує доступ до спеціалізованої бази знань про LPWAN та дає змогу надавати користувачу контекстно зумовлені рекомендації, технічні пояснення та проєктні поради у режимі реального часу.

Для забезпечення теоретичної обґрунтованості та можливості відтворення технології створення рекомендаційного чат-бота на основі великих мовних моделей (LLM) для проектування IoT-систем з використанням LPWAN-технологій доцільно формалізувати відповідний метод за допомогою математичного апарату. Запропонована модель описує як текстові описи задач трансформуються у структуровані проєктні матеріали, які надалі використовуються для інтерактивної підтримки фахівців.

Визначимо, що  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  – множина текстових елементів, що представляють опис IoT-системи: давачі, шлюзи, виконавчі пристрої та їх взаємозв'язки. LLM формалізуємо як функцію  $f_{LLM}$ , яка відображає  $T$  у вигляді структурованого графа  $G_2 = (V_2, E_2)$ , де  $V$  – множина вершин (компоненти системи), а  $E$  – множина ребер (логічні та фізичні зв'язки). Формалізоване представлення  $G$  наведено у формулі (3.14).

$$G_2 = f_{LLM}(T, \theta, D_{LPWAN}), \quad (3.14)$$

де  $\theta$  – параметри моделі, адаптовані під технологію LPWAN, а  $D_{LPWAN}$  – датасет наукових знань про LPWAN.

Граф  $G_2$  оптимізовано з урахуванням обмежень та наведено у формулі (3.15).

$$L_{G_2} = \sum_{e \in E} w_e c_e + \lambda p_e, \quad (3.15)$$

де  $w_e$  – вага ребра,  $c_e$  – коефіцієнт енергоспоживання,  $p_e$  – коефіцієнт перевищення пропускної здатності, а  $\lambda$  – регуляризаційний параметр.

PFD-діаграму описано як підмножину  $G_2$  (3.16).

$$PFD = \{(v_i, v_j, d_{ij}) \mid v_i, v_j \in V_2, d_{ij} \in D\}, \quad PFD \in G_2, \quad (3.16)$$

де  $v_i, v_j$  – вершини графа  $G_2$ ,  $V_2$  – множина всіх вершин графа  $G_2$ ,  $d_{ij}$  – характеристика потоку даних між вершинами графа, а  $D$  – характеристик усіх потоків даних. Функціонал чат-бота формалізовано як систему «запит – відповідь» у вигляді функції  $g$ , яка на основі запиту («prompt») користувача  $Q$ , графа  $G_2$  і бази знань  $D_{LPWAN}$  генерує відповідь  $R$  (3.17).

$$R = g(Q, G, D_{LPWAN}, \theta). \quad (3.17)$$

Процес генерації  $R$  містить аналіз контексту  $Q$  відносно  $G_2$  і синтез технічно-обґрунтованої відповіді з урахуванням специфіки LPWAN. Задачу адаптації LLM до LPWAN формалізовано як задачу оптимізації параметрів  $\theta$  з досягненням максимуму функції  $L(\theta)$  (3.18):

$$L(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M l(f_{LLM}(x_i, \theta), y_i), \quad (3.18)$$

де  $M$  – кількість прикладів у  $D_{LPWAN}$ ,  $l$  – метрика відповідності (функціонал). Це забезпечує експертність моделі в технічній термінології та особливостях LPWAN.

Навчання проводилось методом контрольованого тонкого налаштування (supervised fine-tuning), де модель оптимізувала свої параметри  $\theta$  для мінімізації функції втрат між прогнозованими відповідями та цільовими відповідями із датасету (3.19) [100, 101].

$$L(\theta) = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \log P(y_i | x_i, \theta), \quad (3.19)$$

де  $x_i$  – вхідний запит, а  $y_i$  – очікувана відповідь. Оптимізація здійснювалась за допомогою алгоритму AdamW із початковою швидкістю навчання  $2 \cdot 10^{-5}$ , що є типовим значенням для тонкого налаштування LLM із поступовим зменшенням для стабілізації процесу.

Одним із ключових етапів розроблення рекомендаційного чат-бота для проєктування IoT-систем на базі LPWAN є створення спеціалізованого датасету  $D_{LPWAN}$  для донавчання LLM. Для автоматизованого формування датасету на основі зібраних матеріалів застосовано програмний код із репозиторію Augmentoolkit [102]. Цей інструмент призначений для генерування структурованих навчальних даних із неструктурованих текстових джерел з використанням LLM. Augmentoolkit використано для оброблення корпусу текстів із наукових статей і офіційних документів із метою створення пар "запит-відповідь", на тематику IoT LPWAN. Для більшої адаптації аугментованих даних предметної області використовуються спеціальні шаблони запитів (Modular Prompts), зміна параметрів конфігурації (Configurable Settings) та інші додаткові прийоми (Extensible Pipelines), що дозволяє забезпечити гнучкість, контроль та

масштабованість процесу створення навчальних даних. Принцип роботи інструменту показано на рис. 3.7.

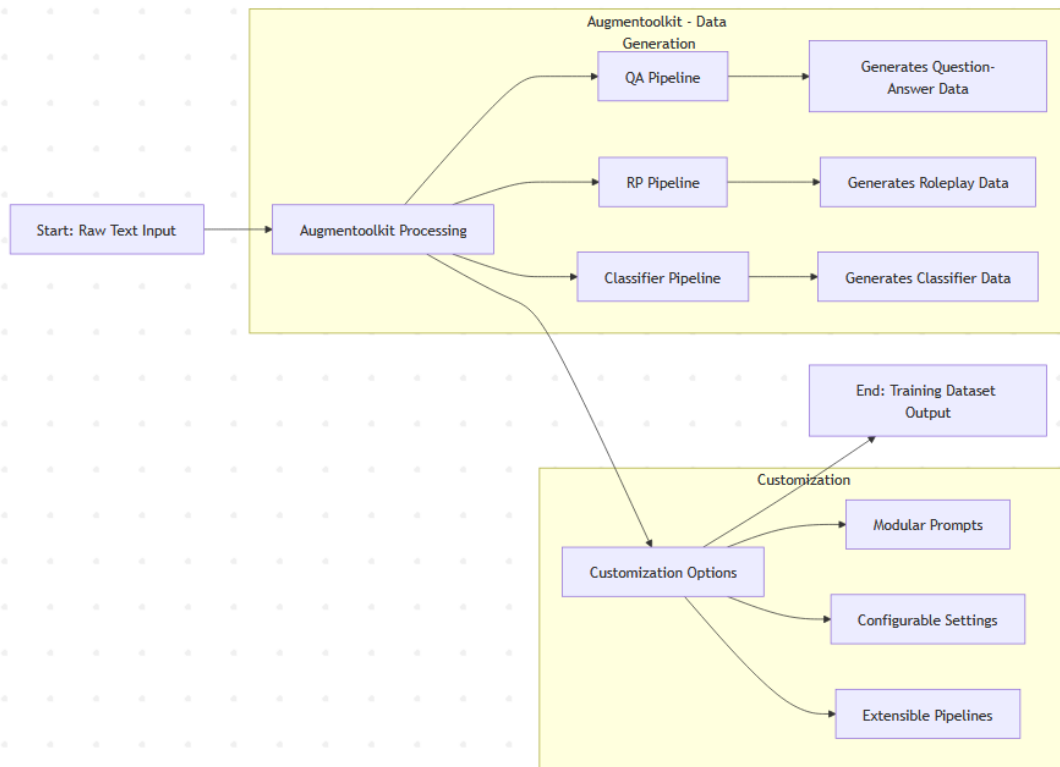


Рисунок 3.7 – Принципи роботи інструменту для генерування структурованих навчальних даних

Зібрані тексти сегментовано на логічні блоки, після чого застосовано LLM для генерування релевантних запитань та відповідей. Це дозволило автоматизувати процес анотації даних, скоротивши тривалість підготовки датасету та забезпечивши високу якість технічної інформації. Додатково Augmentoolkit використано для аугментації даних шляхом перефразування та розширення відповідей для підвищення різноманітності корпусу.

Формування датасету з використанням Augmentoolkit здійснювалося у віртуальному середовищі Conda Environment. Основною великою мовною моделлю для оброблення текстів та генерування даних було обрано LLaMA 3 8B – модель із сімейства LLaMA (Large Language Model Meta AI). LLaMA 3 8B має архітектуру з 8 мільярдами параметрів, що забезпечує оптимальний баланс між

обчислювальною ефективністю та якістю генерації тексту. Порівняно з більшими моделями (наприклад Llama 3 70B або GPT-4) дана модель потребує значно менших обчислювальних ресурсів, що робить її доступною для експериментальної роботи та впровадження у прикладні системи. На відміну від менших моделей (наприклад, Llama 3 3B), вона має достатню кількість параметрів для якісного узагальнення та адекватного відображення семантичних залежностей у спеціалізованих текстових описах IoT-компонентів. Для підвищення продуктивності та зменшення вимог до обчислювальних ресурсів під час роботи в Conda Environment використовувалася квантизована модель. Такий підхід дозволив ефективно виконувати оброблення великих обсягів текстових даних на доступному апаратному забезпеченні, зберігаючи, при цьому, достатню точність генерації. Результатом роботи стало отримання датасету у форматі «запитання – відповідь» (рис. 3.8):

	Question	Answer
0	How does IoT improve quality of life and prote...	IoT improves quality of life by connecting eve...
1	Why are low-power narrow-band (LP-NB) protocol...	LP-NB protocols, like SigFox, are prone to col...
2	What role does IP connectivity play in IoT sys...	IP connectivity is fundamental to IoT, allowin...
3	How can IoT sensors achieve low cost and long ...	IoT sensors achieve low cost and long battery ...
4	Why is long-range communication essential for ...	Long-range communication is essential in urban...

Рисунок 3.8 – Датасет у форматі «запитання – відповідь»

Наступним етапом підготовки датасету є тонке налаштування (fine-tuning) LLM для забезпечення її компетентності в специфіці LPWAN. «Тонке налаштування» є одним з найпростіших та найефективніших методів донавчання ШІ, завдяки можливості швидко адаптуватися до нових задач та використовувати спеціалізовані набори даних [103]. При розробці чат-бота, що використовує великі мовні моделі, доцільно враховувати сучасні підходи до тонкого налаштування ШІ, зокрема методи “Крок за кроком” і “Все одразу”, які продемонстрували високу

ефективність у задачах адаптації моделей до специфічного контексту. Для цього процесу використано ту ж модель LLaMA 3 8B, яка застосовувалась на етапі підготовки датасету. Вибір цієї моделі для тонкого налаштування обґрунтований її продуктивністю під час попередньої генерації датасету, а також можливістю подальшої оптимізації для технічних задач.

Навчання моделі проводилось у середовищі Google Colab з використанням графічного процесора NVIDIA Tesla T4. Процес fine-tuning базувався на підготовленому датасеті  $D_{LPWAN}$ , який містить пари «запитання – відповідь», сформовані на попередньому етапі розроблення. Тривало навчання протягом 6 епох із періодичним збереженням контрольних точок для оцінювання прогресу та запобігання перенавчанню. Результатом навчання моделі стала натренована модель, яка здатна демонструвати високу компетентність у питаннях IoT та LPWAN. На рис. 3.9 зображено відповідь оригінальної мовної моделі Llama 3 8B на запит щодо технологій LPWAN, а на рис. 3.10 — відповідь тієї ж моделі, натренованої на даних про LPWAN. Для порівняння використано запитання з тематики проектування IoT-систем на базі Sigfox.

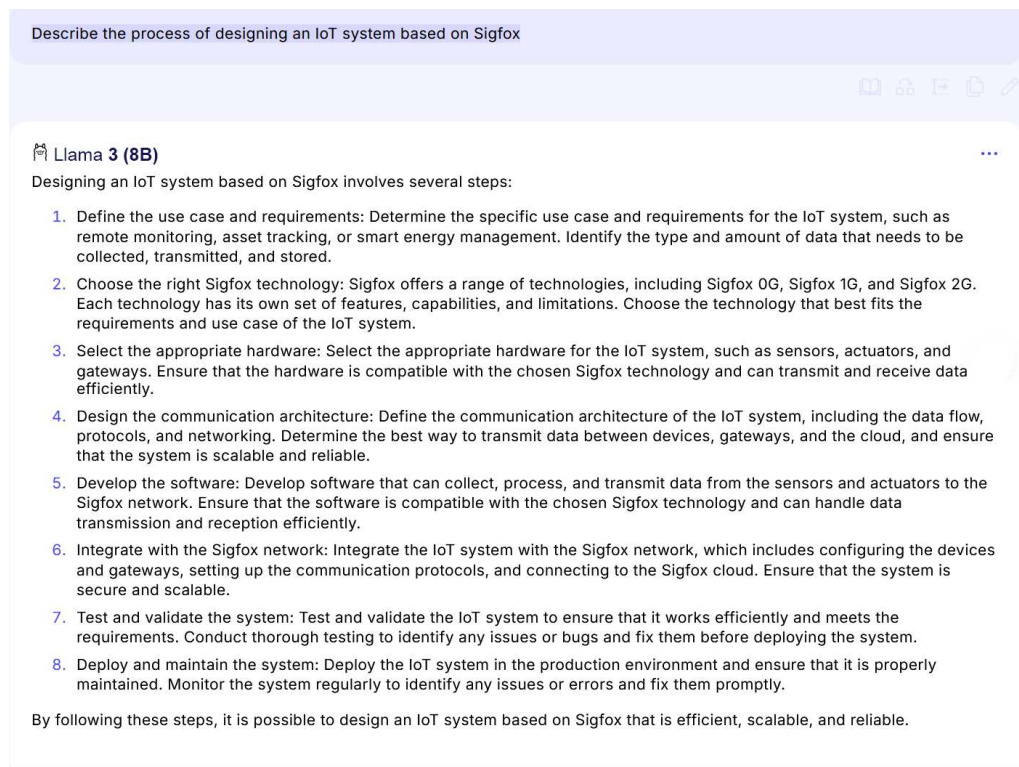


Рисунок 3.9 – Відповідь оригінальної LLM на поставлене користувачем запитання



Рисунок 3.10 – Відповідь донавченої LLM на поставлене користувачем запитання

Отримані відповіді описують процес проектування IoT-системи на основі Sigfox, але мають різний рівень деталізації та технічної глибини. Відповідь оригінальної моделі Llama (рис. 3.10) є більш загальним, структурованим описом процесу проектування IoT-системи. Описана у відповіді інформація передбачена для широкої аудиторії, у тому числі для користувачів без глибоких технічних знань. Відповідь є надто загальною і могла б стосуватись будь-якої LPWAN-технології з мінімальними змінами у формулюваннях. Відповідь натренованої моделі (рис. 3.11) є більш технічною і деталізованою. Вона враховує специфіку Sigfox, зокрема обмеження, особливості підключення та технічні вимоги до апаратного та програмного забезпечення. Інформація у цій відповіді орієнтована на фахівців та може бути складною для сприйняття у людей без належної технічної підготовки.

Для оцінювання ефективності донавченої моделі на корпусі  $D_{LPWAN}$  було використано метрики точності (Accuracy), повноти (Recall) та F1-score. У табл. 3.3

наведено результати експериментальної перевірки на текстовому наборі описів IoT-систем.

Таблиця 3.3 – Результати застосування донавченої LLM Llama 3 на корпусі IoT-описів  $D_{LPWAN}$

Категорія компонентів	Accuracy	Recall	F1-score
Давачі	0,92	0,90	0,91
Базові станції	0,89	0,87	0,88
Канали зв'язку	0,91	0,89	0,90
Хмарні сервіси	0,93	0,92	0,92
Протоколи інтеграції	0,88	0,85	0,86
Шлюзи	0,90	0,88	0,89
Середнє значення	0,91	0,89	0,89

Як видно із таблиці 3.3, донавчена модель демонструє високу точність класифікації компонентів IoT-систем. На рисунку 3.11 подано матрицю плутанини класифікації компонентів. Вона ілюструє характер помилок моделі. Помилки, переважно виникають між спорідненими категоріями, проте більшість випадків віднесено до правильних класів. Це підтверджує високу якість донавчання та здатність моделі забезпечувати правильне формування PFD-діаграм.

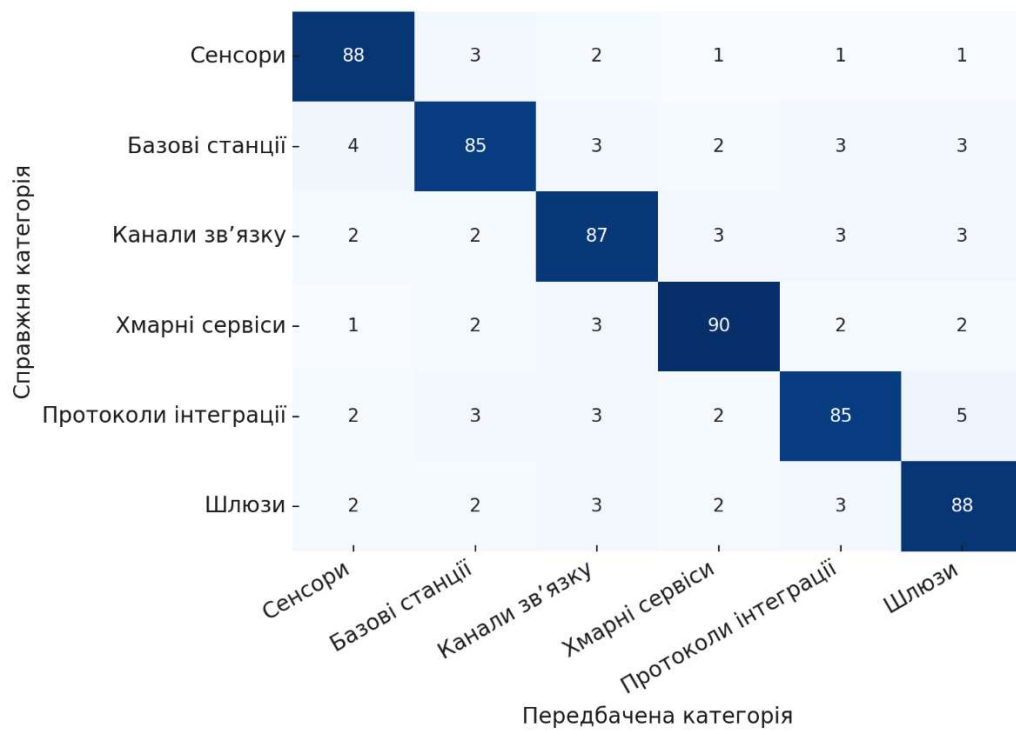


Рисунок 3.11 – Матриця плутанини класифікації компонентів IoT («Confuse matrix»)

Важливим компонентом запропонованої технології є автоматизоване формування PFD-діаграм для представлення потоків даних в IoT-системах на базі LPWAN. Завдяки цьому підходу забезпечується візуалізація архітектури та процесів, що проєктуються, на основі введених користувачем описів завдання. Для реалізації діаграм використано бібліотеку Mermaid.js – відкритий JavaScript-інструмент, який дозволяє створювати діаграми на основі текстового синтаксису, подібного до Markdown [104]. Mermaid.js обрано через його простоту, гнучкість і широку підтримку в технічних спільнотах для генерації схем, таких як блок-схеми, без необхідності ручного графічного редагування. Інтеграція Mermaid.js у робочий процес на Python здійснена шляхом створення HTML-сторінки з вбудованим кодом Mermaid, який рендериться у headless Chrome за допомогою Selenium. Згенерований код Mermaid, отриманий від моделі Gemini 1.5-Flash, передається в HTML-файл, після чого діаграма автоматично візуалізується та зберігається як зображення у форматі PNG за допомогою Python-бібліотек PIL і Matplotlib.

Процес формування PFD-діаграм відбувається наступним чином: користувач вводить короткий текстовий опис системи, яку він бажає спроектувати. Наприклад, «IoT Air Quality Monitoring System». Розроблена ІТ аналізує цей опис і синтезує код Mermaid.js, який відображає компоненти системи та потоки даних між ними. На основі згенерованої діаграми додатково синтезується короткий текстовий опис процесу, що пояснює ключові аспекти функціонування системи. У результаті користувач отримує як PFD-діаграму, так і супровідний текст, що полегшує розуміння проектного рішення. На рис. 3.12 наведено приклад коду Mermaid.js, згенерованого для IoT-системи на базі Sigfox.

```

1 graph TD
2   A[Start: IoT Air Quality Monitoring System] --> B[Air Quality Sensors]
3
4   subgraph Sensor Data Collection
5     B --> B1[PM2.5/PM10 Sensor]
6     B --> B2[CO2 Sensor]
7     B --> B3[NO2 Sensor]
8     B --> B4[Temperature Sensor]
9     B --> B5[Humidity Sensor]
10  end
11
12  B --> C[Microcontroller Unit]
13
14  subgraph Data Processing
15    C --> C1[Analog-to-Digital Conversion]
16    C --> C2[Data Validation]
17    C --> C3[Data Packaging]
18  end
19
20  C --> D[Sigfox Module]

```

Рисунок 3.12 – Фрагмент коду Mermaid.js для формування PDF-діаграми

У візуалізованій формі діаграма відображає потік даних у системі моніторингу якості повітря (рис 3.13): датчик вимірює параметри повітря і передає їх через модуль Sigfox до мережі Sigfox Network. Дані надходять до базової станції, яка пересилає їх на хмарну платформу. На платформі дані декодуються і зберігаються. Оброблені дані стають доступними на сервері додатків, який відображає їх у реальному часі через інтерфейс користувача, зокрема й сповіщення.

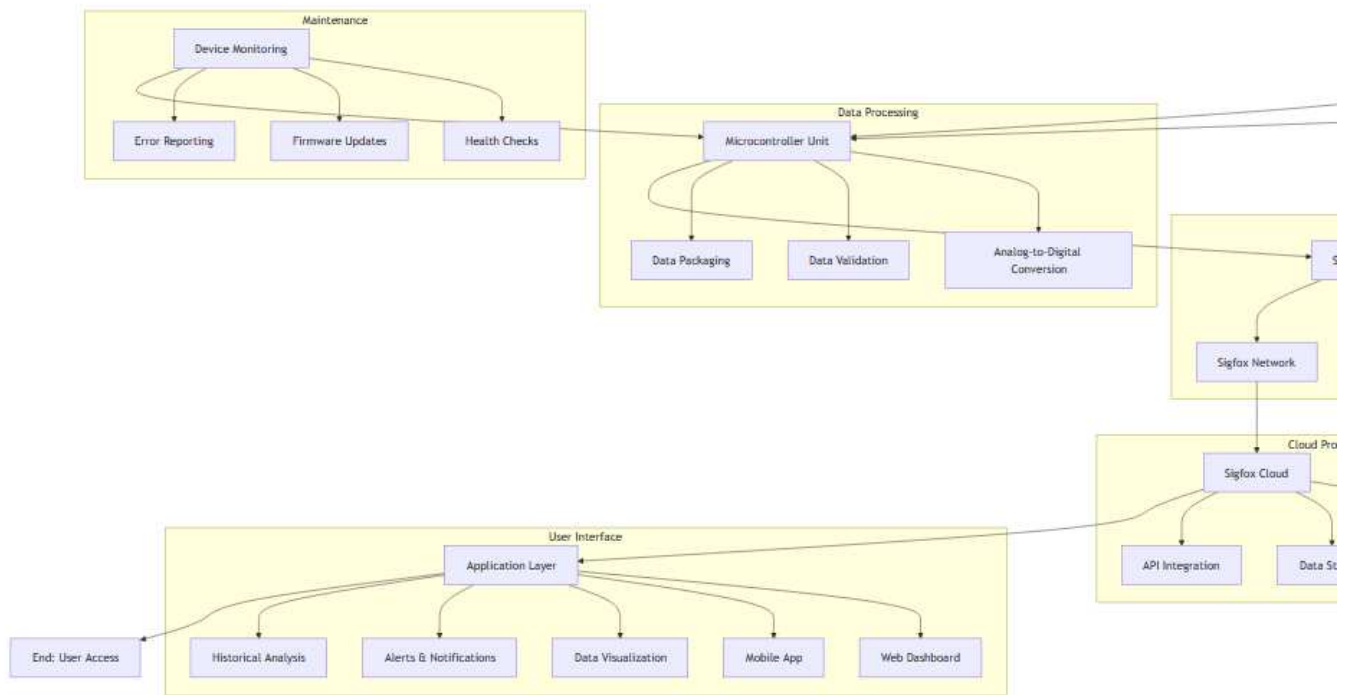


Рисунок 3.13 – Приклад візуалізації фрагменту PFD-діаграми

Розширену PFD-діаграму, згенеровану описаним методом, подано в додатку Г. Такий підхід забезпечує швидке й автоматизоване створення PFD-діаграм, інтегруючи генеративні моделі та інструменти візуалізації, що є основою для подальшої інтерактивної роботи чат-бота з користувачем.

Запропонований метод автоматизованого формування технологічних схем орієнтований не лише на структурування інженерної інформації, але й на оптимізацію проєктних рішень за техніко-економічними та функціональними критеріями. Під оптимізацією у цьому контексті розуміється здатність системи автоматично зменшувати надлишковість потоків даних, мінімізувати кількість операційних елементів, раціонально організувати послідовність оброблення даних та забезпечувати відповідність конфігурації IoT-системи обмеженням LPWAN-мереж. Це дозволяє формувати проєктні рішення, які одночасно задовольняють вимоги до швидкодії, енергоефективності та надійності функціонування.

Кінцевим етапом розробленої інтелектуальної інформаційної технології є створення рекомендаційного чат-бота, який інтегрує усі результати попередніх

етапів у єдину систему для інтерактивної підтримки проектування IoT-систем на базі LPWAN. Чат-бот виконує роль інтелектуального інтерфейсу між іншими складовими інформаційної технології та її користувачами. Інтерфейс забезпечує доступ до згенерованих проєктних матеріалів та накопиченої бази знань про LPWAN.

Запропонований чат-бот, на відміну від універсальних великих мовних моделей, таких як ChatGPT, Grok, Claude та DeepSeek, забезпечує автоматизовану генерацію PFD-діаграм для IoT-систем на базі LPWAN на основі короткого текстового опису (наприклад: «Система моніторингу температури з LoRaWAN»). Ця функціональність не вимагає від користувача знань синтаксису діаграм чи формулювання деталізованих запитів, що суттєво скорочує тривалість проєктування порівняно з аналогами. Завдяки тонкому донавчанню моделі LLaMA 3 8B на спеціалізованому датасеті який містить технічну документацію та наукові статті про LPWAN, чат-бот демонструє високу компетентність у врахуванні специфічних обмежень технологій. Натомість, універсальні LLM, що спираються на загальні знання, часто генерують узагальнені рекомендації, які не відповідають технічним вимогам LPWAN.

Важливою характеристикою запропонованої технології є підвищена точність відтворення еталонних проєктних структур порівняно з відомими підходами. Точність оцінюється на основі кількісних метрик відповідності компонентів, їх взаємозв'язків та послідовностей оброблення даних у сформованій PFD-діаграмі. Це забезпечує формалізовану перевірку правильності побудови технологічних схем та підтверджує здатність методу точно відтворювати структуру стандартних або рекомендованих архітектур.

Для об'єктивної перевірки здатності чат-бота генерувати технічно коректні відповіді було розроблено автоматизований протокол оцінювання для порівняння розробленого чат-бота з загальними LLM. Його ключовою особливістю є відмова від суб'єктивного експертного судження та використання формалізованих метрик.

Для кожного запиту створено «еталонну» відповідь на основі корпусу наукових статей з тематики LPWAN. Для кожної відповіді обчислювались такі показники:

- Exact Match (EM) – повний збіг з еталонною моделлю;
- Token-F1 (F1) – часткова відповідність на рівні ключових термінів;
- Semantic Similarity (SS) – косинусна схожість sentence-embedding відповіді з еталоном;
- Entailment Score (ES) – імовірність логічного слідування тверджень із еталону;
- Retrieval Support (RS) – підтвердження фактів у корпусі LPWAN.

Відповідь вважалась правильною, якщо виконувалась хоча б одна з умов:

- $EM = 1$  або ( $SS \geq 0,85$  і  $ES \geq 0,8$ );
- $RS \geq 0,75$ .

Для узагальнення введено інтегральний показник «Automatic Accuracy» – частка відповідей, що задовольняють вище наведений критерій коректності.

Усі моделі тестувались на однаковому наборі запитів з використанням уніфікованого промт-шаблону та однакових параметрів генерації. Результати автоматизованого підрахунку метрик подано у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати автоматизованого оцінювання точності відповідей моделей

Модель	Exact Match	Token-F1	Semantic Similarity	Automatic Accuracy
Розроблений рекомендаційний чат-бот на основі Llama 3	0,88	0,89	0,91	0,93
ChatGPT-4	0,72	0,82	0,87	0,84
Claude 3	0,58	0,80	0,85	0,82
Grok 4	0,69	0,77	0,82	0,79

Таблиця 3.4 побудована на основі усереднених значень метрик по всьому тестовому набору. Спочатку для кожної відповіді обчислювались усі метрики. Далі визначалось чи задовольняє відповідь критерію коректності. Частка таких випадків формувала показник «Automatic Accuracy». Як видно з таблиці 3.4, розроблений рекомендаційний чат-бот демонструє вищу якість генерування відповідей за всіма досліджуваними метриками. Зокрема, значення «Exact Match» перевищує найкращий з результатів універсальних моделей на 22%, показник «Token-F1» – на 9%, «Semantic Similarity» – на 5%, а «Automatic Accuracy» – на 11%.

### **3.3 Проектування структури інформаційної технології**

Розроблена інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проектування IoT-систем на основі LPWAN реалізована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість інтеграції компонентів, адаптивність до просторових й техногенних факторів, а також масштабованість для різних сценаріїв застосування. Структура технології орієнтована на потоки даних – від вхідних джерел інформації через інтелектуальне ядро до аналітико-оптимізаційних процесів та формування рекомендацій (рис. 3.14).



1. Датасет для донавчання моделі з тематики LPWAN – містить термінологію та технічні параметри для адаптації великих мовних моделей.
2. Геоінформаційні дані – забезпечують просторовий аналіз території, рельєфу, інфраструктури.
3. Експертні знання – формалізовані у вигляді ієрархічної бази правил нечіткої логіки.
4. Експертні оцінки – представлені матрицями парних порівнянь для багатокритеріального вибору.

Ці джерела утворюють інформаційне підґрунтя технології, забезпечують формалізацію невизначеності та підготовку даних для подальшої обробки. Отримані потоки інформації надходять до інтелектуального ядра, де здійснюється їх первинна трансформація.

Інтелектуальне ядро виконує когнітивні функції на основі методів штучного інтелекту та складається з таких основних модулів:

1. Модуль донавчання адаптує базову LLM до предметної області LPWAN за допомогою датасету, забезпечуючи точність інтерпретації технічних понять і структур даних.
2. Доновчена LLM виконує аналіз текстових описів і генерує структурні елементи проєктованої системи.
3. LLM для генерування коду, яка формалізує результати аналітичної обробки у вигляді алгоритмів оптимізації потоків даних.

Система функціональних модулів забезпечує опрацювання даних, отриманих із блоків вхідних даних та інтелектуального ядра, і формує похідні аналітичні результати, необхідні для підтримки процесу проєктування IoT-систем. До її складу входять такі функціональні модулі:

1. Модуль багатокритеріального вибору, який здійснює оцінювання доступних технологій LPWAN за техніко-економічними критеріями та формує рекомендацію щодо вибору найбільш придатної технології для заданих умов застосування.

2. Модуль просторової оптимізації, що інтегрує результати роботи нечіткої експертної системи та геоінформаційного аналізу для визначення оптимальних зон розміщення датчиків і базових станцій з урахуванням техногенних обмежень, просторових факторів і характеристик місцевості.

3. Модуль генерування PFD-діаграм, який здійснює автоматичну побудову функціональних діаграм на основі структури компонентів IoT-системи, встановлених логічних зв'язків і синтезованого коду, отриманого від генеративних моделей.

Результатом роботи кожного з модулів є структуровані рекомендації, що передаються до інтерфейсу чат-бота та інтегруються у фінальний набір порад щодо проєктування IoT-систем.

Завершальним елементом структури є чат-бот, що агрегує результати усіх модулів і забезпечує взаємодію з користувачем у режимі реального часу. На основі донавченої LLM та ієрархічної бази знань чат-бот реалізує механізм адаптивного надання рекомендацій, відображення результатів оптимізації та повторного уточнення запитів. Система підтримує циклічний режим взаємодії, в якому результати аналітико-оптимізаційних процесів можуть бути уточнені через повторну обробку даних у ядрі.

На основі наведеної інформації розроблено UML-діаграму послідовності роботи модулів інформаційної технології (рис. 3.15), яка ілюструє типовий сценарій процесу проєктування IoT-системи на основі LPWAN.

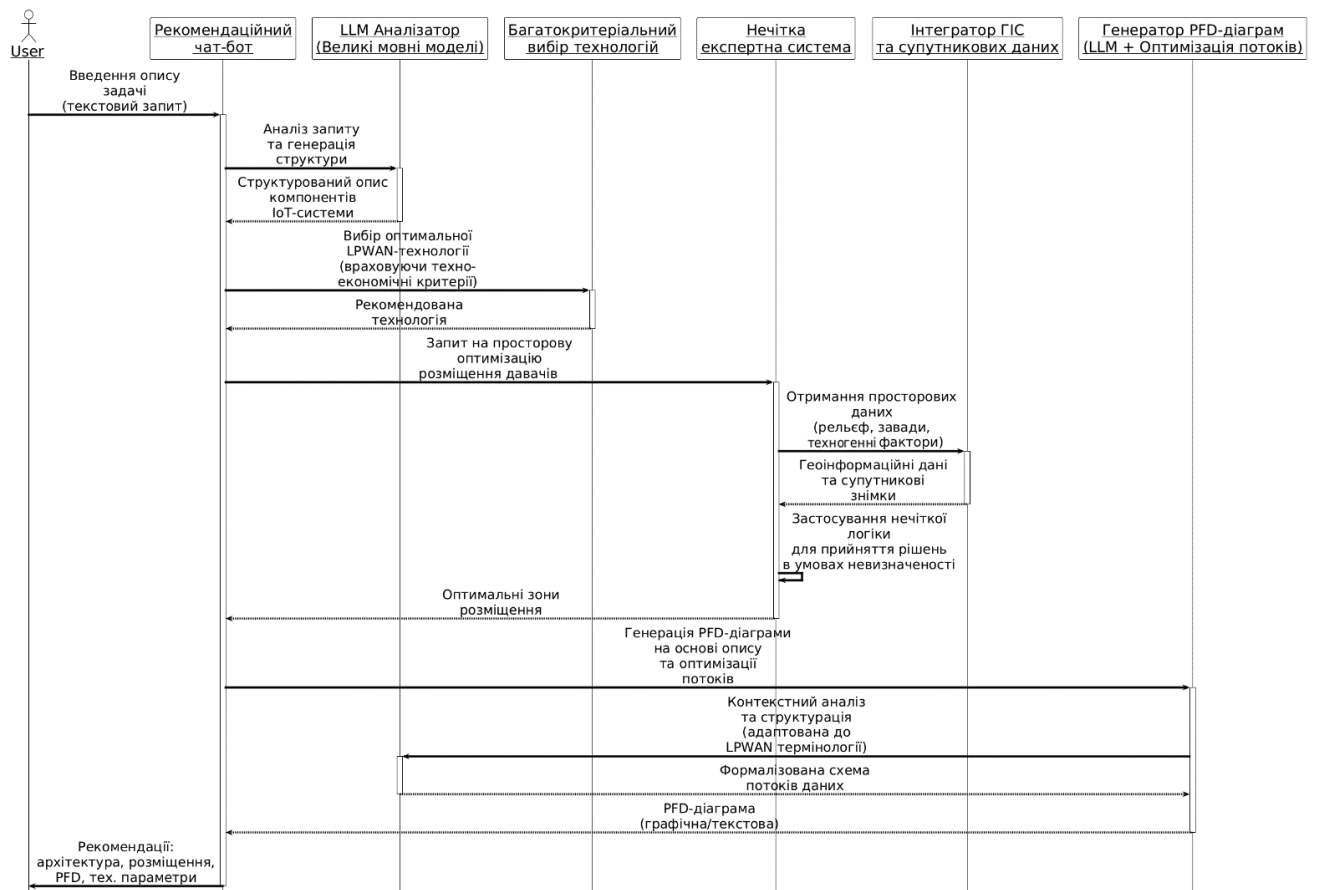


Рисунок 3.15 – UML-діаграма послідовності роботи модулів інформаційної технології

Діаграма 3.15 відображає логіку обміну повідомленнями між основними учасниками процесу: користувачем (актором), рекомендаційним чат-ботом, LLM-аналізатором (генеративним модулем структуризації запитів), модулем багатокритеріального вибору технологій, нечіткою експертною системою, інтегратором геоінформаційних і супутникових даних та генератором PFD-діаграм.

Процес взаємодії починається з введення користувачем текстового опису задачі через чат-бот, який ініціює роботу LLM-аналізатора для синтаксичного та семантичного розбору запиту з метою формування формалізованої структури компонентів майбутньої IoT-системи. Після цього чат-бот паралельно активує модуль багатокритеріального вибору, що здійснює аналіз і формує рекомендації щодо оптимальної LPWAN-технології з урахуванням технічних, енергетичних та економічних показників, а також – нечітку експертну систему, яка,

використовуючи геоінформаційні та супутникові дані, визначає оптимальні зони розміщення давачів і базових станцій. Отримані результати узагальнюються чат-ботом і передаються до модуля генерування PFD-діаграм, де адаптована LLM виконує контекстний аналіз і автоматично формує оптимізовану діаграму. На завершальному етапі результати інтегруються в єдиний інформаційний звіт, що містить рекомендовану архітектуру системи, координати розміщення компонентів, PFD-діаграму та параметри проектування, які надаються користувачеві у режимі реального часу.

Для деталізації процесу генерування PFD-діаграм розроблено модель процесу у вигляді UML-діаграми активності, що відображає взаємодію двох великих мовних моделей (рис. 3.16). Перша LLM (донавчена) аналізує текстовий опис, розпізнає компоненти IoT-системи та визначає їхні взаємозв'язки. Друга LLM на основі цих даних автоматично формує структуровану PFD-діаграму. Після валідації діаграма або уточнюється, або використовується як фінальний результат.

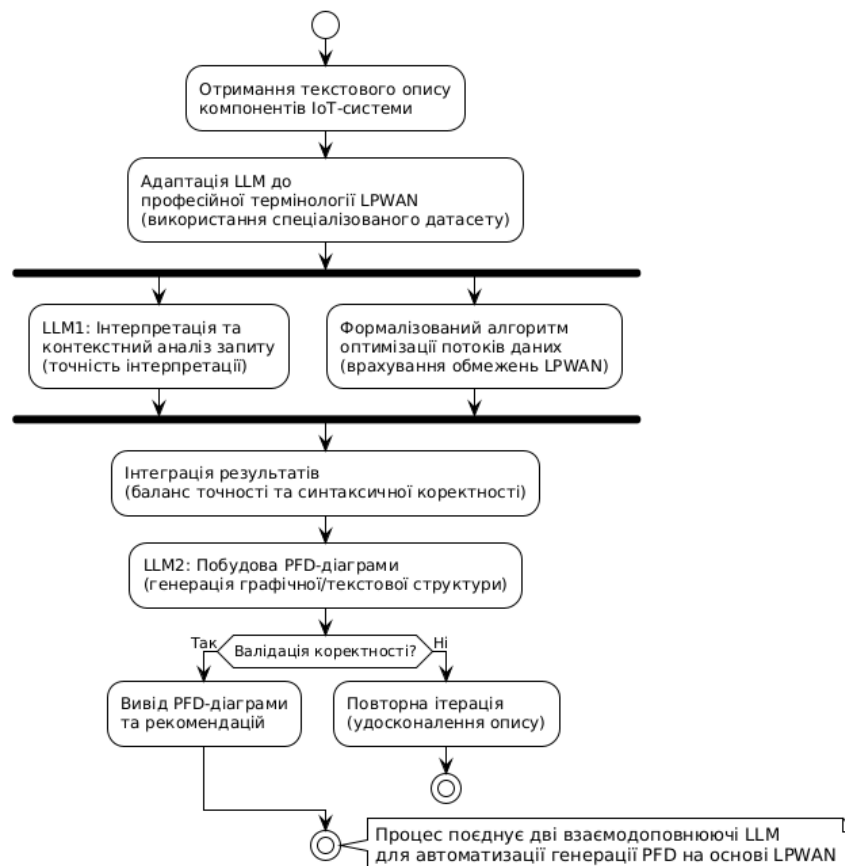


Рисунок 3.16 – UML-діаграма процесу генерування PFD-діаграми

Для деталізації роботи модуля просторої оптимізації розроблено UML-діаграму активності, яка відображає послідовність етапів алгоритму визначення оптимальних зон розміщення давачів і базових станцій із використанням геоінформаційних систем, супутникових даних та нечіткої експертної системи (рис 3.17). Алгоритм передбачає отримання та нормалізацію вхідних факторів, ініціалізацію ієрархічної бази знань, паралельний аналіз географічних та електромагнітних параметрів, подальше узагальнення ризику із корекцією зон підвищеної небезпеки. На завершальному етапі результати формалізуються у вигляді карти рекомендацій щодо розміщення сенсорних вузлів та базових станцій.

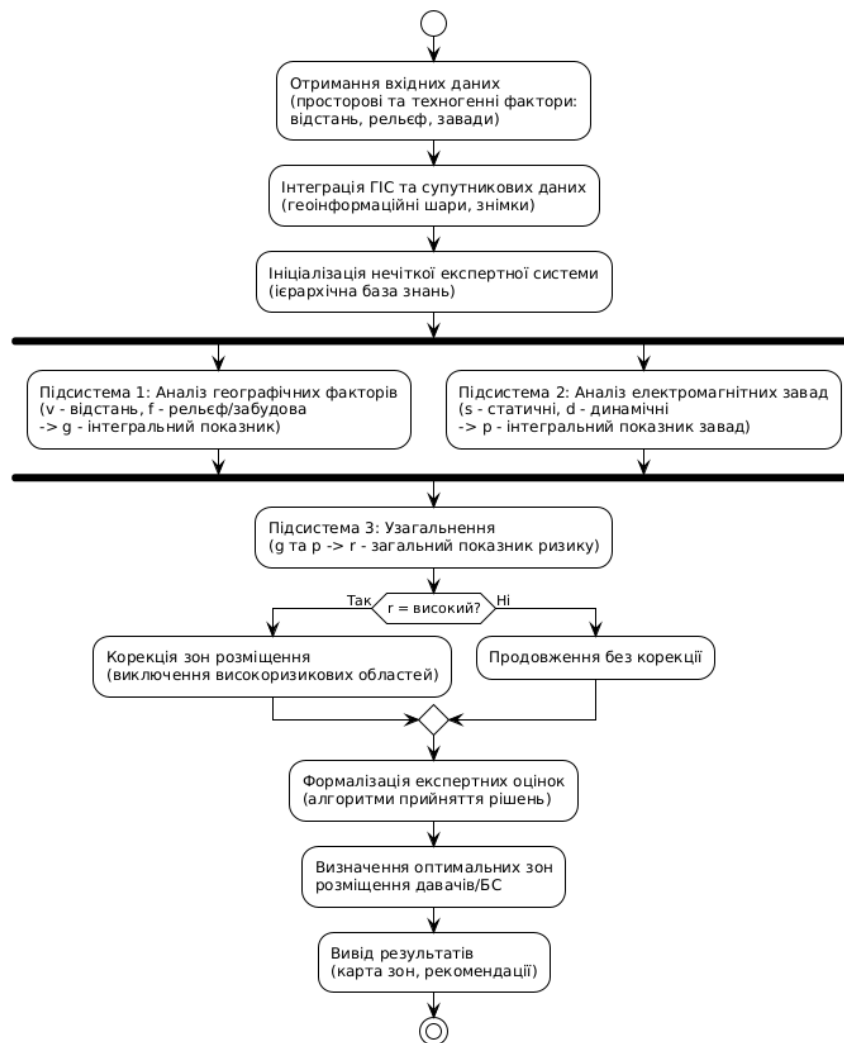


Рисунок 3.17 – UML-діаграма процесу просторої оптимізації

### 3.4 Висновки до розділу

У третьому розділі дисертації запропоновано метод автоматичного генерування PFD-діаграм для IoT-систем на основі LPWAN-технологій, що ґрунтується на інтеграції великих мовних моделей із формалізованим алгоритмом оптимізації потоків даних. Метод дозволяє трансформувати текстові описи інженерних задач у структуровані технологічні схеми з урахуванням обмежень мереж LPWAN. Наведено приклади застосування підходу, які продемонстрували можливість зменшення частоти передавання даних на 20-30%, завдяки агрегації та буферизації потоків.

Удосконалено процес інженерного моделювання шляхом використання двох взаємодоповнюючих LLM: Llama 3 8B для аналізу текстових описів і побудови орієнтованого графа системи та Gemini 1.5-Flash для генерування коду PFD у форматі Mermaid.js. Поєднання цих мовних моделей забезпечує баланс між точністю інтерпретації контексту й синтаксичною коректністю кінцевих діаграм. Для підвищення розпізнавання якості структурних елементів та можливості надання кваліфікованих відповідей щодо проєктування IoT-систем на базі LPWAN сформовано спеціалізований датасет, який використано для донавчання LLM, що дозволило адаптувати модель до професійної термінології LPWAN та підвищити точність побудови діаграм та надання відповідей.

Запропоновано шестирівневу архітектуру PFD-діаграм, яка забезпечує багатошаровий аналіз IoT-системи. Це дозволяє одночасно отримувати узагальнене уявлення про архітектуру та детальне відображення її функціонування на різних рівнях, що підвищує ефективність прийняття інженерних рішень.

Розроблено рекомендаційний чат-бот для автоматизації проєктування IoT-систем, який інтегрує генеративні можливості LLM із базою знань про LPWAN та реалізує надання експертних рекомендацій у режимі реального часу. Використання спеціалізованого датасету та процедур донавчання дозволило

сформувати модель експертного рівня, здатну відповідати на технічні запити професійною мовою та надавати проєктні рішення.

Запропонована технологія забезпечує підвищення структурно-функціональної ефективності автоматизованого проєктування завдяки формалізованому структурному аналізу, а також зростання точності відтворення еталонних проєктних структур у порівнянні з відомими підходами, що підтверджено результатами тестування на спеціалізованому датасеті.

Запропонована технологія продемонструвала високу ефективність у порівнянні з традиційними методами ручного моделювання, забезпечуючи суттєве скорочення тривалості проєктування, зменшення ризику інженерних помилок та підвищення відповідності схем технічним обмеженням LPWAN-мереж.

Наведені в розділі результати були висвітлені у роботах [15, 16].

## РОЗДІЛ 4

### ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

У цьому розділі наведено приклади використання описаної у розділах 2 і 3 розробленої інтелектуальної інформаційної технології у двох варіантах:

1. Локальне застосування окремих модулів для демонстрації роботи технології на прикладі конкретних задач проектування IoT-систем.
2. Комплексне використання технології, що показує переваги інтегрованого підходу до проектування IoT-систем на базі LPWAN.

#### 4.1 IoT-система вимірювання параметрів стану вод на базі Sigfox

З використанням запропонованої інтелектуальної інформаційної технології, розроблено IoT-систему для вимірювання параметрів стану водних ресурсів, побудовану на основі технології Sigfox. Вона є прикладом локального застосування модулів інтелектуальної інформаційної технології для оптимального проектування IoT-систем з урахуванням просторових й техногенних факторів. У даному випадку було використано модулі, відповідальні за вибір архітектури системи, вибір мережевої технології, оптимізацію формату передавання даних та інтеграцію з платформами віддаленого аналізу. Це дозволило створити енергоефективну систему для збирання та оброблення даних у режимі реального часу.

Метою створення системи є побудова динамічного цифрового двійника для оперативного моніторингу параметрів стану води у природних водоймах з можливістю виявлення аномальних змін. Система забезпечує вимірювання таких показників як: температура, рН, каламутність, а також може бути доповнена додатковими давачами для вимірювання розчиненого кисню, електропровідності тощо. Виявлення різких коливань або небезпечних відхилень у значеннях показників дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та своєчасно реагувати на можливі екологічні загрози.

Архітектура системи базується на багаторівневій структурі (рис. 4.1) і містить такі компоненти:

1. Давачі: на початковому рівні системи розміщуються датчики, призначені для вимірювання різноманітних параметрів води, таких як температура, рН, рівень забруднення, вміст кисню та інші критично важливі показники.
2. Пристрої збирання даних: датчики, підключені до мікроконтролерів, які здійснюють обробку даних, отриманих від них.
3. Мережа Sigfox: після обробки дані передаються через мережу Sigfox.
4. Сервер оброблення даних: централізоване оброблення отриманих даних відбувається на сервері, де дані аналізуються, зберігаються та обробляються для подальшої візуалізації.
5. Веб-додаток або мобільний додаток: користувачі отримують доступ до інформації про стан води через веб-додаток або мобільний додаток.
6. Система сповіщення: Система забезпечує сповіщення користувачів про зміни в стані води. Це може бути реалізовано через SMS, електронну пошту або push-повідомлення.

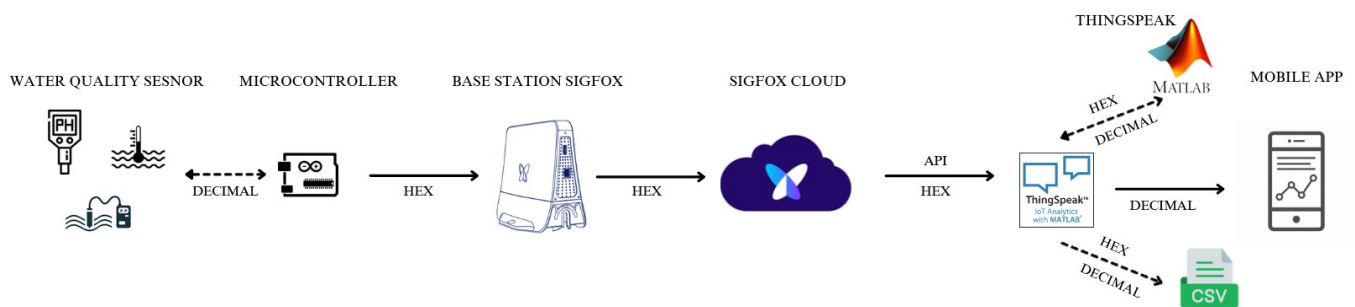


Рисунок 4.1 – Структура IoT-системи вимірювання параметрів вод

Для експериментального дослідження було сконструйовано пристрій (рис. 4.2), що виконує безперервне збирання показників температури, рН та каламутності. Пристрій має герметичний корпус, що дозволяє розмістити його у водоймі на тривалий період часу, та працює від автономного джерела живлення.

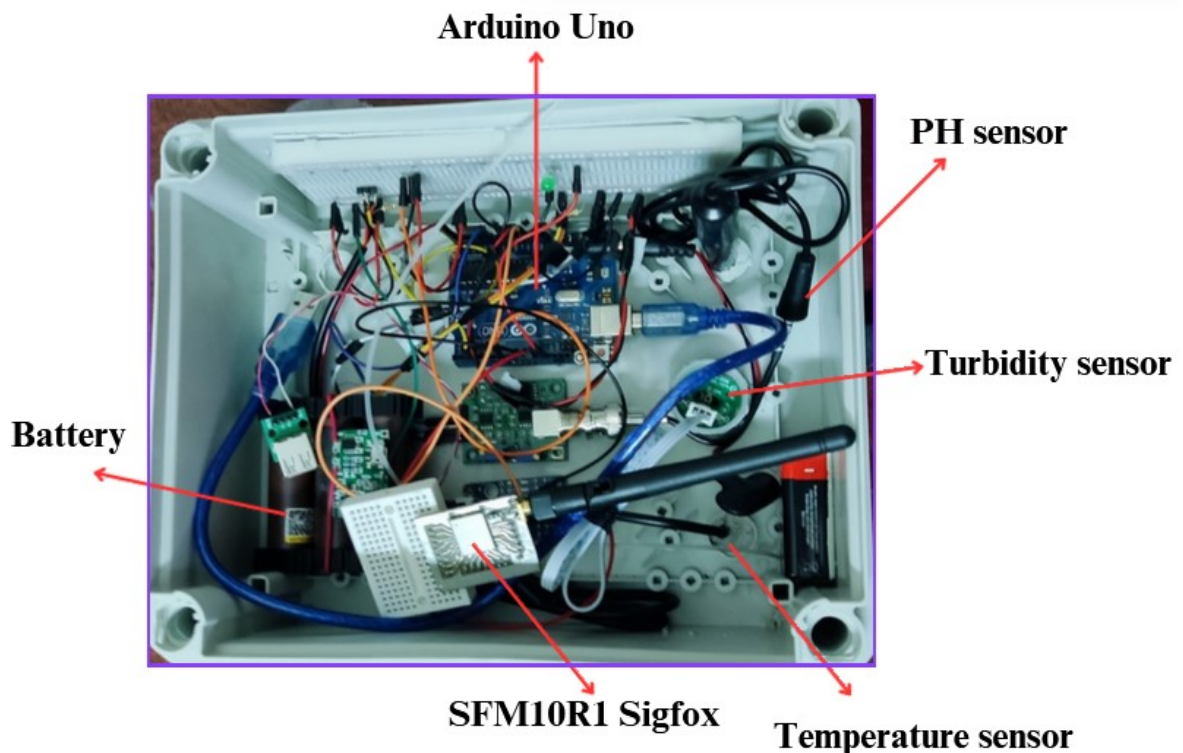


Рисунок 4.2 – Конструкція IoT-пристрою вимірювання показників води

Дані, зібрані датчиками, спочатку обробляються мікроконтролером, після чого відбувається їх компактне пакування у формат, сумісний з обмеженнями протоколу Sigfox. Оскільки максимальний обсяг корисного навантаження становить 12 байтів, було застосовано метод стислого представлення параметрів (рис 4.3):

- 2 байти – показники температури;
- 2 байти – показники рН;
- 2 байти – показники рівня каламутності;
- 1 байт – службові дані.

Таким чином, загальний розмір пакета становить 7 байтів, що залишає резерв для розширення або додаткових контрольних бітів.

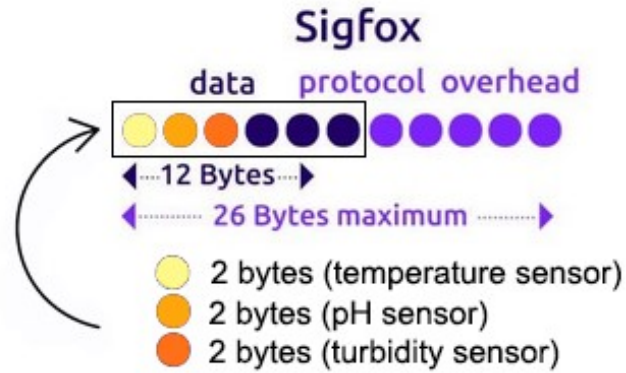


Рисунок 4.3 – Метод пакування даних для передавання на сервер Sigfox

Усі зібрані дані передаються на IoT-платформу ThingSpeak, де вони автоматично візуалізуються у вигляді числових графіків (рис. 4.4). Це дозволяє спостерігати за змінами параметрів у режимі реального часу та здійснювати попередній аналіз.

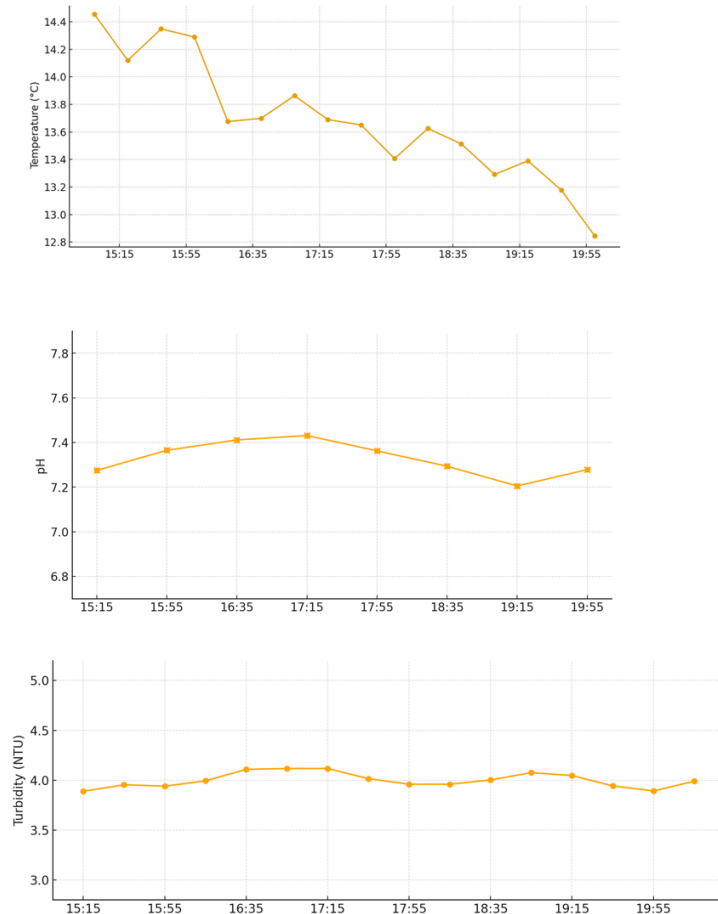


Рисунок 4.4 – Візуалізація декодованих даних на платформі ThingSpeak

Випробування IoT-пристрою проводилось у природних умовах (рис 4.5). Пристрій було розміщено у водоймі, підключено до джерела живлення та протестовано протягом кількох годин.



а)



б)



в)

Рисунок 4.5 – Випробування пристрою моніторингу стану вод: а) підготовка та налаштування пристрою; б) локація проведення експериментальних

випробувань; в) тестовий запуск пристрою у природних умовах на поверхні  
водойми

У процесі випробувань було встановлено, що для забезпечення стабільного радіозв'язку та підвищення якості передавання сигналу до базової станції антена Sigfox-модуля має розміщуватися над корпусом пристрою, оскільки занурення або часткове екранування корпусом призводить до погіршення рівня сигналу.

Усі вимірювання успішно передавались мережею Sigfox та відображались у ThingSpeak. Таким чином, підтверджено працездатність системи і можливість її масштабування для довготривалого моніторингу.

Для створеного пристрою проведено аналіз точності вимірювання, впливу обмежень мережі Sigfox на ефективність передавання даних, а також розраховано енергетичний бюджет вузлів системи. Основні технічні характеристики давачів наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики давачів

Параметр	Діапазон вимірювань	Типова похибка	Максимальна похибка
Температура	-10...+80 °C	±0.1 °C	±0.3 °C
pH	0-14	±0.05	±0.1
Каламутність (NTU)	0-1000	±3%	±5%

Для визначення фактичної похибки кожного давача виконано серію з 10 повторних вимірювань у лабораторних умовах. Середнє відхилення розраховано за формулою (4.1).

$$\delta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|, \quad (4.1)$$

де  $x_i$  – поточне значення вимірювання,  $\bar{x}$  - середнє арифметичне,  $n$  – кількість вимірів. Отримана середня похибка не перевищала 0,12 °C для давача

температури, 0,06 рН для рН-давача та 4% для давача каламутності, що є прийнятним для завдань екологічного моніторингу та для дослідного пристрою.

Передавання даних у системі здійснюється з використанням мережі Sigfox, яка має обмеження 12 байт на одне повідомлення та до 140 uplink-повідомлень на добу. З огляду на формат передавання, максимальна кількість вимірювань, що можуть бути передані за добу, становить:  $140 \text{ повідомлень} * 3 \text{ параметри} = 420 \text{ вимірювань} / \text{добу}$ . Середня затримка передавання даних у мережі не перевищує 30-60 секунд, що є прийнятним показником для задач моніторингу стану природних об'єктів, де критичним є не миттєве реагування, а – виявлення тенденцій зміни параметрів.

Автономна робота пристрою забезпечується батареєю ємністю 4000 мАг при напрузі 3,7 В. Для оцінки тривалості роботи пристрою проведено розрахунок середнього споживання  $I_{avg}$  за формулою (4.2).

$$I_{avg} = \frac{I_m t_m + I_t t_t}{T_{cycle}} + I_{sleep}, \quad (4.2)$$

де  $I_m$  – споживання під час вимірювання,  $I_t$  – споживання під час передавання,  $t_m$ ,  $t_t$  – тривалість цих режимів,  $T_{cycle}$  – період між вимірюванням,  $I_{sleep}$  – споживання в режимі очікування. Для розрахунків прийнято такі типові (експериментально підтвержені) значення споживання і тривалості режимів:

- Режим вимірювання:  $I_m = 10 \text{ мА}$ ,  $t_m = 2 \text{ с}$ ;
- Режим передавання:  $I_t = 45 \text{ мА}$ ,  $t_t = 6 \text{ с}$ ;
- Режим сну:  $I_{sleep} = 0,02 \text{ мА}$

Для кількісної оцінки автономності розробленого IoT-пристрою використано середнє значення струму споживання  $I_{avg}$  (4.2) з урахуванням режимів вимірювання, передавання та сну. Відоме значення ємності джерела  $C$  дає змогу обчислити орієнтовну тривалість роботи пристрою без заміни батареї, оскільки саме співвідношення між запасом електричного заряду та середнім струмом споживання визначає час автономного функціонування. Для визначення орієнтовної тривалості автономної роботи IoT-пристрою використано формулу (4.3).

$$T_{life(h)} = \frac{C}{I_{avg}}, \quad T_{life(days)} = \frac{T_{life(h)}}{24}. \quad (4.3)$$

У таблиці 4.2 наведено розрахунок тривалості роботи IoT-пристрою з урахуванням частоти передавання даних.

Таблиця 4.2 – Розрахунок тривалості роботи пристрою

Сценарій	Повідомлень на добу	Інтервал між повідомленнями	Середнє споживання енергії пристроєм	Орієнтовна тривалість роботи
Максимальна частота з урахуванням ліміту	140	≈ 10,29 хв	0.490 мА	≈ 340 діб (≈ 11.3 міс)
Помірна частота	70	≈ 20.57 хв	0.255 мА	≈ 654 діб (≈ 21.8 міс)
Погодинне передавання	24	60 хв	0.101 мА	≈ 1657 діб (≈ 55.2 міс)
Раз на 2 години	12	120 хв	0.0603 мА	≈ 2765 діб (≈ 9 2.2 міс)
1 раз на добу	1	1440 хв	0.0234 мА	≈ 7136 діб (≈ 238 міс)

Важливим етапом є розширення системи до рівня раннього сповіщення на забруднення. Основною метою цієї системи є забезпечення оперативного виявлення небезпечних змін у стані води шляхом аналізу даних, що надходять до її цифрового двійника та вжиття термінових заходів для запобігання екологічним катастрофам.

Давачі, розташовані у різних точках річки, здійснюють моніторинг аномальних показників, таких як різкі зміни рН, підвищення рівня забруднюючих речовин або інших небезпечних параметрів. У разі виявлення таких аномалій,

вузли автоматично передають цю інформацію через мережу Sigfox до централізованої системи збирання даних, яка обробляє дані в реальному часі, аналізуючи їх на наявність потенційних загроз. Схему роботи системи раннього сповіщення подано на рисунку 4.6.

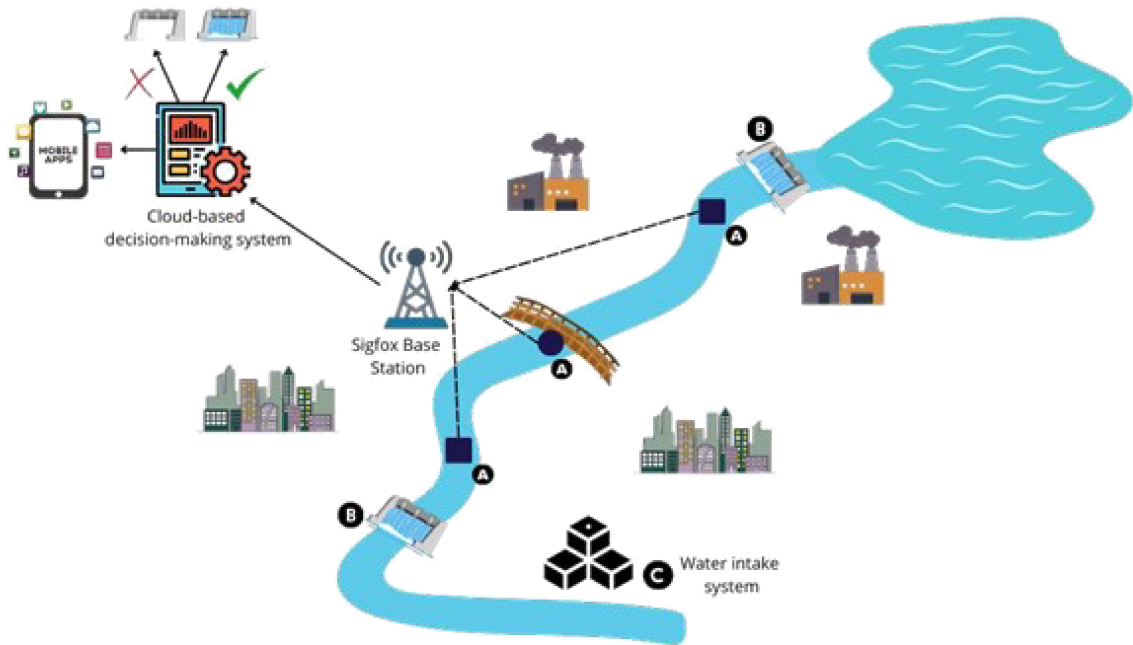


Рисунок 4.6 – Схема роботи IoT-системи раннього сповіщення на забруднення природних вод

У разі перевищення критичних значень рівня води або виявлення забруднюючих речовин пристроями моніторингу (A) система ініціює механізм сповіщення. Автоматично формуються повідомлення, які надсилаються відповідним органам, таким як місцеві екологічні служби, водоканали або рятувальні служби. Ці повідомлення містять важливу інформацію про тип і рівень забруднення або рівень води, а також – геолокацію місця виявлення аномалії, що дозволяє службам оперативно оцінити ситуацію та визначити маршрут виїзду на місце події.

У разі серйозних забруднень система здатна ініціювати автоматичне перекриття шлюзів (B), щоб запобігти потраплянню забрудненої води до системи водопостачання (C). Цей процес реалізується через спеціально розроблені

механізми, які можуть бути дистанційно активовані, у відповідь на сигнали від системи моніторингу. Такі заходи забезпечують захист водопостачання та зменшують ризик потрапляння небезпечних речовин до питної води.

#### **4.2 Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення давачів для IoT-моніторингу лісового господарства**

У структурі розробленої інтелектуальної інформаційної технології оптимального проектування IoT-систем на основі LPWAN значну роль має модуль нечіткої експертної системи, який призначений для вирішення задач просторової оптимізації.

Особливість цього модуля полягає у можливості врахування невизначених, нечітких та якісних критеріїв, що суттєво ускладнює використання традиційних методів оптимізації. Нечітка логіка дозволяє інтегрувати експертні оцінки у процес прийняття рішень, створюючи адаптивний механізм підбору оптимальних місць розташування давачів. Водночас, ГІС-інтеграція забезпечує просторову візуалізацію і дозволяє враховувати як природні умови, так і наявність потенційних техногенних джерел забруднення.

Експертну систему застосовано для визначення оптимальних місць розташування давачів у лісовому господарстві на прикладі системі моніторингу стану лісових масивів на базі Інтернету речей і технології Sigfox. Інформаційна система моніторингу стану лісових масивів необхідна для своєчасного виявлення небезпек, пов'язаних зі змінами клімату та деградацією екосистем. Її завданням є забезпечення збирання, передавання та аналіз даних про ключові параметри довкілля, що дає змогу оперативно реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення щодо охорони лісових масивів.

Для прикладу, обрано частину лісового масиву неподалік одного з європейських міст, для якого потрібно встановити давачі та розгорнути систему моніторингу. За допомогою ГІС визначено об'єкти, які можуть забруднювати лісову екосистему. Для ілюстрації впливу потенційних джерел забруднення

природнього середовища на вибір точок розташування давачів введено відповідні графічні позначення: синім кольором видалено зону охоплення системи ГІС-аналізу, червоними колами позначено потенційні можливі джерела впливу, а рожевим – можливі точки встановлення давачів за результатами аналізу місцевості (рис. 4.7).

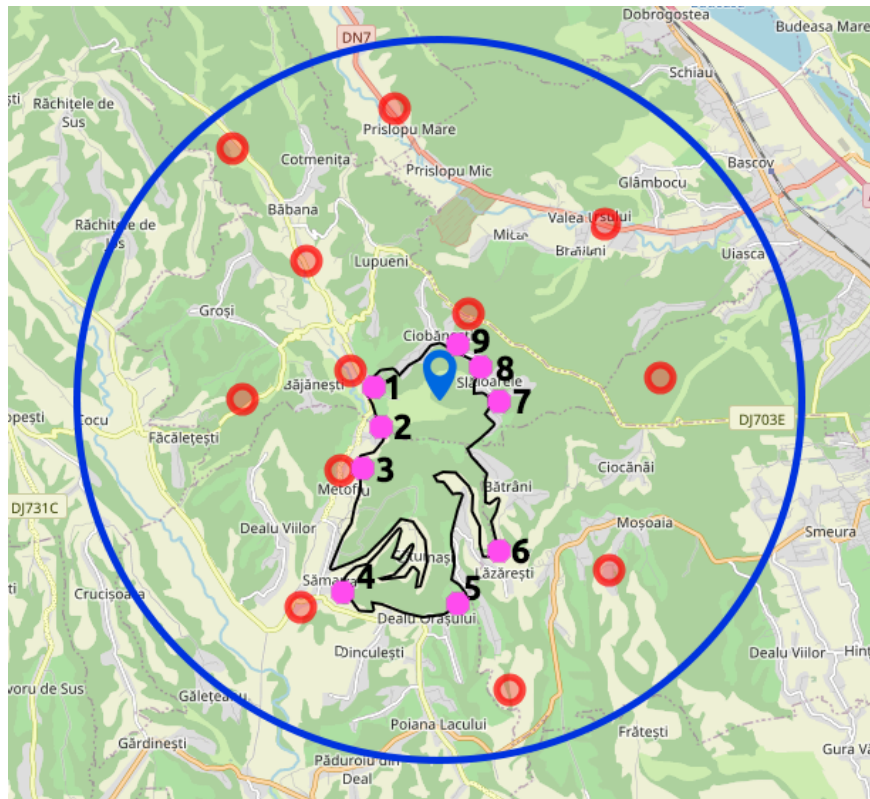


Рисунок 4.7 – Просторове відображення потенційних джерел впливу та можливих точок встановлення давачів

Відповідно до визначених напрямів потенційних загроз, обрано 9 точок навколо лісового масиву для можливого встановлення давачів. Для визначення доцільності встановлення давачів у кожній з цих точок використано систему нечітких баз знань, сформовану на основі експертних оцінок ступеня впливу відповідних факторів (табл. 4.3), де  $U_1 \dots U_9$  – можливі точки розташування давачів,  $d$  – оцінка відстані до техногенних завод,  $e$  – оцінка впливу техногенних підприємств,  $p$  – оцінка рівня забруднення повітря,  $v$  – оцінка індексу рослинності,

$t$  – оцінка температурних аномалій,  $Q$  – зведений інтегральний показник доцільності встановлення давача у точці.

Таблиця 4.3 – Експертні оцінки для формування нечіткої бази знань

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9$
$d$	8	4	9	6	5	5	3	6	8
$e$	8	2	6	3	6	7	7	2	2
$p$	6	2	7	3	7	7	7	3	3
$v$	4	3	5	3	4	5	5	2	2
$t$	3	1	2	1	3	3	2	1	1
$Q$	0,65	0,26	0,67	0,36	0,55	0,58	0,56	0,34	0,4

Враховуючи частку співвідношення результатів (показник доцільності  $E$  переважає 50 %), на практиці потрібно розглядати як ефективні для розміщення давачів варіанти 1, 3, 5, 6, 7. Проте експертна система не враховує зону покриття базовими станціями мережі Sigfox (у разі, якщо розгортання системи відбувається на наявних базових станціях) та економічні особливості встановлення давачів.

Формалізуємо завдання на підставі експертної інформації. Місця розташування, які експертна система визначила недоцільними, надалі не враховуються. Порівняння характеристик давача здійснюється, за такими критеріями:  $X_1$  – доцільність встановлення,  $X_2$  – ступінь інтенсивності сигналу Sigfox,  $X_3$  – вартість встановлення.

Визначення оптимальних місць розташування давача можна трактувати як задачу оптимізації, метою якої є оцінювання доцільності встановлення давача у точці, залежно від ключових критеріїв. Формулювання завдання полягає в наступному: необхідно мінімізувати витрати на встановлення давача у місці зі стабільним покриттям станцій мережі Sigfox, за задоволенні таких обмежень:

- показник доцільності встановлення давача повинен бути не менше заданого значення  $D_{min}$ ;

- показник покриття базовими станціями мережі Sigfox повинен відповідати заданому діапазону  $S_{min} - S_{max}$ ;
- вартість встановлення має бути якомога меншою  $C_{min}$ .

Для визначення оптимальних місць розташування станції мережі Sigfox застосовано бібліотеку PuLP у Python, яка дає змогу формалізувати моделі та знаходити оптимальні рішення за допомогою різних методів, таких як симплекс-метод або метод внутрішніх точок. В результаті розв'язання задачі лінійного програмування засобами бібліотеки PuLP у Python отримано результати, подані у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результат багатокритеріального аналізу

Критерій	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$J_X$
Ваги	0,4	0,3	0,2	
$U_1$	0,65	0,3	0,5	0,45
$U_3$	0,67	0,3	0,5	0,46
$U_5$	0,55	0,2	0,4	0,36
$U_6$	0,58	0,1	0,3	0,32
$U_7$	0,56	0,1	0,3	0,31

Отримані результати свідчать про те, що за обмеженого фінансування можна знехтувати розташуванням давачів у точках 6 та 7, проте, це погіршить кількісні показники моніторингу. Отже, на рисунку 4.7 оптимальними точками розміщення давачів є варіанти 1, 3, 5, як показано на рис. 4.8:

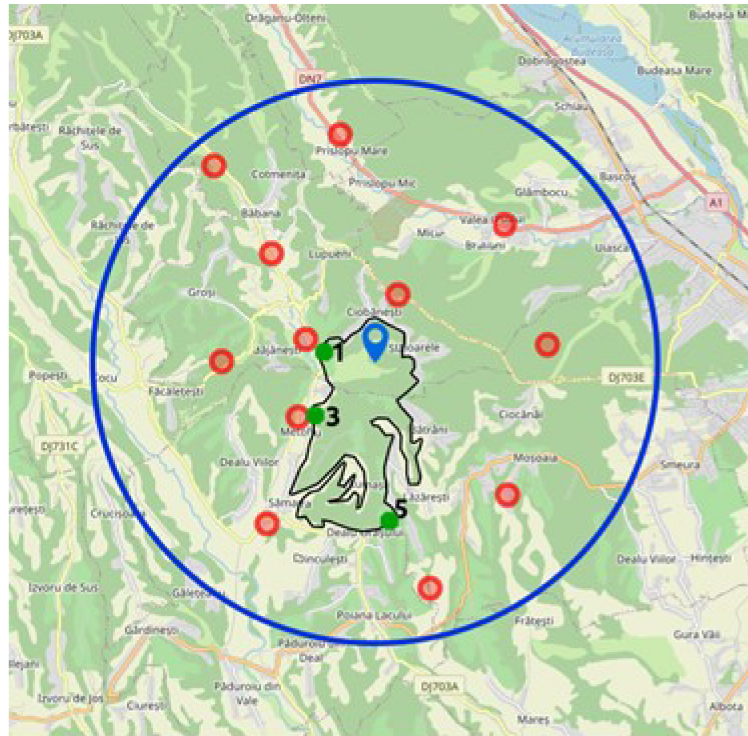


Рисунок 4.8 – Точки оптимального розміщення датчиків

Отримані результати дослідження підтверджують ефективність розробленого підходу до вибору оптимальних місць встановлення датчиків у мережах IoT на прикладі технології Sigfox. Запропонована нечітка експертна система, інтегрована з геоінформаційними технологіями, дає змогу автоматизувати процес ухвалення рішень, що знижує експлуатаційні витрати, мінімізує кількість датчиків без втрати точності моніторингу та підвищує адаптивність системи до змін у просторових й техногенних умовах.

#### 4.3 Застосування рекомендаційного чат-бота для проєктування IoT-систем

Рекомендаційний чат-бот, побудований на основі великих мовних моделей, є дієвим інструментом для автоматизації процесів проєктування IoT-системи. Його ключова перевага полягає у здатності поєднувати технічну оцінку з інтерактивним діалогом, що значно скорочує тривалість проєктування архітектури, підбору обладнання та розроблення стратегії оптимізації. У межах

дослідження розглянуто приклад застосування чат-бота для створення системи IoT-моніторингу якості повітря на основі технології LPWAN.

Користувач формує запит до чат-бота, наприклад: «*I want to create an IoT air quality monitoring system based on LoRaWAN*» (рис. 4.9). У відповідь на запит чат-бот описує архітектуру системи, яка містить варіанти топології мережі, технічних компонентів, оцінку витрат на розгортання та генерує PFD-діаграму. Діаграма генерується автоматично на основі текстового опису системи і відображає ключові процеси – від збирання даних датчиками до їх оброблення на хмарних платформах. Користувач отримує візуалізовану схему структури IoT-системи, що значно спрощує її аналіз і подальше вдосконалення.

Основною перевагою чат-бота є наявність функції проектування IoT-системи з урахуванням просторових факторів. Для цього користувачеві достатньо вказати координати географічної точки на карті. Опіраючись на інтегровані ГІС-технології, дані супутникового зондування та власну експертну систему, чат-бот запропонує оптимальні місця для розташування сенсорних вузлів і базових станцій. Такий підхід урахує рельєф місцевості, щільність забудови, потенційні джерела завад і дозволяє досягнути максимальної енергоефективності та якості зв'язку. У результаті користувач отримує не лише логічну архітектуру, а й – просторово-обґрунтований план розгортання системи.

Як видно із рисунка 4.9 чат-бот пропонує використовувати такі елементи системи:

1. Вузли збирання даних.

Запропоновано використати 20 сенсорних вузлів, щоб покрити територію у 10 км<sup>2</sup>. Як обчислювальну платформу чат-бот рекомендує ESP32 із модулем LoRa (SX1276). До складу кожного вузла входять датчики SDS011 (PM2.5/PM10), CCS811 (CO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>), а також DHT22.

2. Шлюзи.

Для збирання даних та їхнього перенаправлення у хмарну інфраструктуру чат-бот радить встановити два шлюзи RAKWireless LoRaWAN. Їх розміщення на

дах будівель з відстанню 2 – 3 км один від одного забезпечить покриття всієї необхідної території.

### 3. Топологія та архітектура.

Архітектура системи ґрунтується на класичній LoRaWAN-топології «зірка зірок». Сенсорні вузли передають дані до шлюзів, які забезпечують подальший зв'язок із хмарною платформою.

### 4. Передавання та оброблення даних.

Дані пропонується передавати у форматі JSON кожні 15 хвилин.

### 5. Вартісне оцінювання.

Чат-бот пропонує орієнтовну вартість розгортання системи, що складає 1600-2400 доларів, враховуючи як основні компоненти системи, так і допоміжну інфраструктуру.

### 6. Рекомендації з розгортання.

Для досягнення високої просторової роздільності даних пропонується розташувати датчики на відстані 500 м один від одного, зокрема в місцях скупчення людей. Шлюзи пропонується встановити на дахах висотних будинків для мінімізації втрат сигналу та покращення якості зв'язку.

Таким чином, чат-бот виконує роль інтелектуального асистента, який інтегрує знання про апаратні рішення, мережеві протоколи та хмарні сервіси у цілісну архітектуру IoT-системи. Завдяки інтерактивності користувач може уточнювати параметри (наприклад, змінювати інтервали збирання даних, обмежувати кількість пристроїв тощо). Важливою особливістю є автоматичне генерування PFD-діаграм та підтримка просторового моделювання на основі координат і ГІС-технологій. Завдяки такому підходу тривалість проектування зменшується щонайменше на 50%, у порівнянні з традиційними методами, а якість рішень підвищується, завдяки комплексному урахуванню просторових й техногенних факторів.

**USER:** I want to create an air quality monitoring system based on the Internet of Things and LPWAN

**CHATBOT:** I propose the design of your air quality monitoring system based on the Internet of Things using LPWAN:

LPWAN Choice: LoRaWAN (long range: 2-5 km urban, low power, cost-effective, open standard).

Sensor Nodes (20 units for a 5-10 km<sup>2</sup> area):

Microcontroller: ESP32 with LoRa module (SX1276, ~\$15).

Sensors: SDS011 (PM2.5/PM10, ~\$20), CCS811 (CO2/NO2, ~\$10), DHT22 (temp/humidity, ~\$5).

Power: 18650 battery + solar panel (1-2 year life at 15-min intervals).

Enclosure: IP65 weatherproof (~\$10).

Cost per node: ~\$60-80.

Gateways (2 units): RAKWireless LoRaWAN gateway (~\$200 each, 5 km range). Place on rooftops for coverage.

Topology: Star-of-stars (nodes to gateways, gateways to cloud via Wi-Fi/4G).

Protocol: LoRaWAN Class A, AES-128 encryption, Adaptive Data Rate.

Data: JSON payload (e.g., {"pm25": 15.2, "co2": 450, "temp": 25}), sent every 15 min.

Backend: The Things Network (free) for data routing, AWS IoT Core for storage, Grafana for visualization.

Total Cost: ~\$1,600-2,400 (20 nodes + 2 gateways).

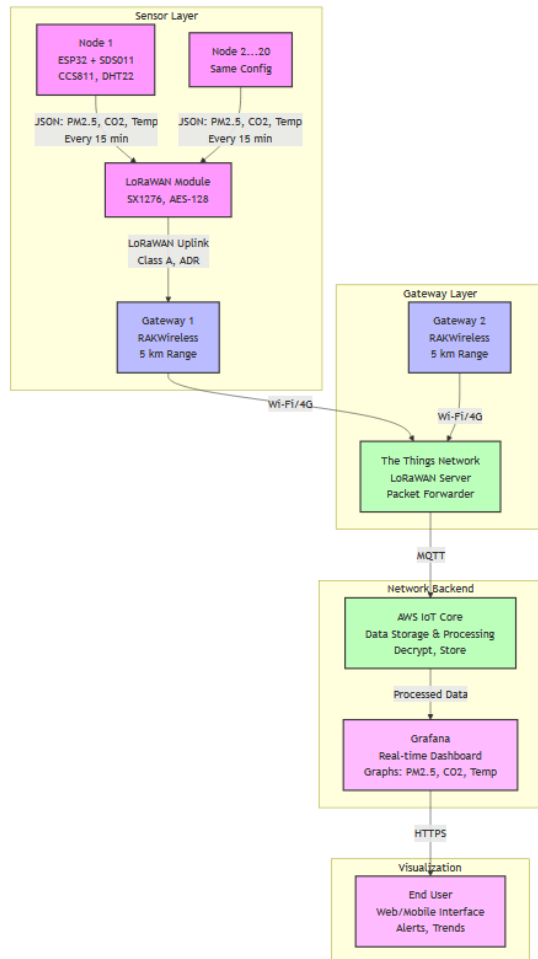
Sensors: Place at key points (parks, intersections, schools) ~500 m apart to ensure coverage and data granularity.

Gateways: 2 units, centrally located, elevated (e.g., rooftops), ~2-3 km apart to cover the area with overlap for redundancy.

Result: Uses LoRaWAN for low-power, long-range data transmission. 20 sensor nodes (ESP32, PM2.5/CO2/temp sensors, battery/solar-powered) monitor air quality across a 5-10 km<sup>2</sup> urban area, sending data every 15 minutes. Two gateways on rooftops relay data to The Things Network and AWS for visualization. Cost: ~\$1,600-2,400. Sensors spaced ~500 m; gateways centrally placed for coverage.

**USER:** Create an architectural scheme

**CHATBOT:** Architectural PFD diagram of the IoT system:



Ask a chatbot

Рисунок 4.9 – Приклад застосування рекомендаційного чат-боту

#### **4.4 Порівняння розробленої інтелектуальної інформаційної технології з аналогами**

Розроблена інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проектування IoT-систем на базі LPWAN, демонструє низку переваг у порівнянні з наявними підходами, що засвідчено аналізом літературних джерел і практичних розробок.

На відміну від класичних експертних систем, які використовуються для прийняття рішень у фіксованих умовах, запропонована технологія поєднує можливості нечіткої логіки, геоінформаційного аналізу та супутникових знімків, що забезпечує просторову адаптацію при визначенні оптимальних місць розташування давачів та базових станцій. Аналогічні дослідження [105, 106] здебільшого обмежуються застосуванням окремих алгоритмів оптимізації або використовують лише фізичні характеристики середовища, без урахування семантичної неоднозначності чи нечітких критеріїв прийняття рішень. У той час, як запропонована система дозволяє інтегрувати різноманітні фактори (топографію, екологічні ризики, енергетичні обмеження, типи давачів) в єдину модель прийняття рішень, адаптовану до умов роботи у мережах LPWAN.

Інша конкурентна перевага полягає в автоматичному створенні PFD-діаграм із текстових описів. На відміну від наявних рішень, таких як моделі для P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) чи DFD (Data Flow Diagram), запропонований підхід зосереджений саме на специфіці IoT-систем та обмеженнях LPWAN-мереж. Модель LLM, донавчена на тематичному корпусі, створює передумови для формування орієнтованих графів з урахуванням типових сценаріїв використання та енергетичних обмежень. У той час, як наявні інструменти, переважно, орієнтовані на програмне моделювання або автоматизацію внутрішніх логік, запропонована система враховує фізичні характеристики мережевих технологій і адаптується до конкретних обмежень.

Проведене порівняння, також, показало, що в сучасних підходах до розміщення давачів часто відсутній механізм адаптації до змінних умов

середовища або вони реалізуються за допомогою статичних алгоритмів. Наприклад, у [107] використовується Wi-Fi для передавання екологічних показників, що підвищує енергоспоживання і вимагає щільної системи датчиків, тоді як запропонована технологія використовує енергоефективну мережу LPWAN та адаптивні методи обробки даних, що знижують вимоги до щільності покриття та дозволяють працювати в умовах обмеженого доступу до енергоресурсів.

Крім того, у дослідженнях [108, 109] пропонуються підходи до автоматизації проектування на основі LLM, однак вони не зосереджені на оптимізації потоків даних та не містять генерацію структурованих схем. Запропонована в даній роботі система об'єднує генерацію PFD-діаграм, оптимізацію потоків і можливість інтерактивної взаємодії через чат-бота, що дозволяє інженерам отримувати проєктні рішення в напівавтоматичному режимі.

Окрему увагу заслуговує реалізований у межах дослідження чат-бот на основі великої мовної моделі, який виконує функції рекомендаційного інструменту для проектування IoT-систем. Аналіз наявних аналогів [110, 111] показав, що більшість сучасних чат-ботів або спеціалізуються на вузькоспецифічних задачах (генерація коду, діагностика помилок, створення сценаріїв), або не орієнтовані на інженерні проблеми в контексті LPWAN-мереж. Вони не містять модулі для автоматичного формування PFD-діаграм, не враховують апаратні обмеження IoT-технологій та не забезпечують інтеграцію з LPWAN-технологіями.

Також, слід зазначити, що порівняно з аналогічними за розміром найпоширенішими моделями ШІ, донаведена модель показує кращі результати. Такі моделі, як Mistral 7B, Gemini 1.5-Flash, GPT-4, демонструють високу ефективність у генеруванні текстів, створенні програмного коду та описах архітектур, проте вони не мають механізмів автоматизованого проектування IoT-систем на базі LPWAN, не мають інтеграції з геоінформаційними системами, не враховують просторові й техногенні фактори та не можуть безпосередньо визначати оптимальні місця для встановлення датчиків чи базових станцій. Автоматизовані платформи на зразок Google AutoML або H2O.ai забезпечують

підбір моделей машинного навчання, але не орієнтовані на задачі IoT-інженерії. Класичні оптимізаційні алгоритми (генетичні алгоритми, колективний інтелект, навчання з підкріпленням) є потужними для пошуку оптимуму, але вимагають великих навчальних вибірок та значних обчислювальних ресурсів. Порівняння сучасних AI-підходів та розробленої технології подано у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Порівняння сучасних IT-підходів і розробленої технології

Підхід	Можливості	Обмеження	Ключові особливості
Універсальні LLM	Генерування тексту, коду	Не враховують специфічні тематичні критерії та показники	Висока універсальність, здатність працювати з широким спектром задач
AutoML	Автоматизований підбір моделей і параметрів	Орієнтовані на класичні дані, не просторові	Спрощення побудови ML-моделей без глибоких знань у галузі
Розроблена технологія	Генерування архітектур, PFD-діаграм, просторово-орієнтована оптимізація	Орієнтована тільки на LPWAN	Дозволяє задавати координати і отримувати просторово оптимізоване рішення з урахуванням експертних знань

Важливим аспектом є також відмінність у якості рекомендаційного компонента. Універсальні LLM-моделі дають корисні, але більш узагальнені відповіді на інженерні запити. Вони не так глибоко спеціалізуються на проблематиці LPWAN та обмеженнях цього класу технологій. Натомість запропонований чат-бот ґрунтується на донавченій мовній моделі з тематики

LPWAN-технологій (рис. 4.10). Це забезпечує вищу технічну точність та професійну спрямованість відповідей, а також дозволяє системі не лише формувати рекомендації щодо проєктування, а й робити їх практично застосованими з урахуванням реальних інженерних обмежень.

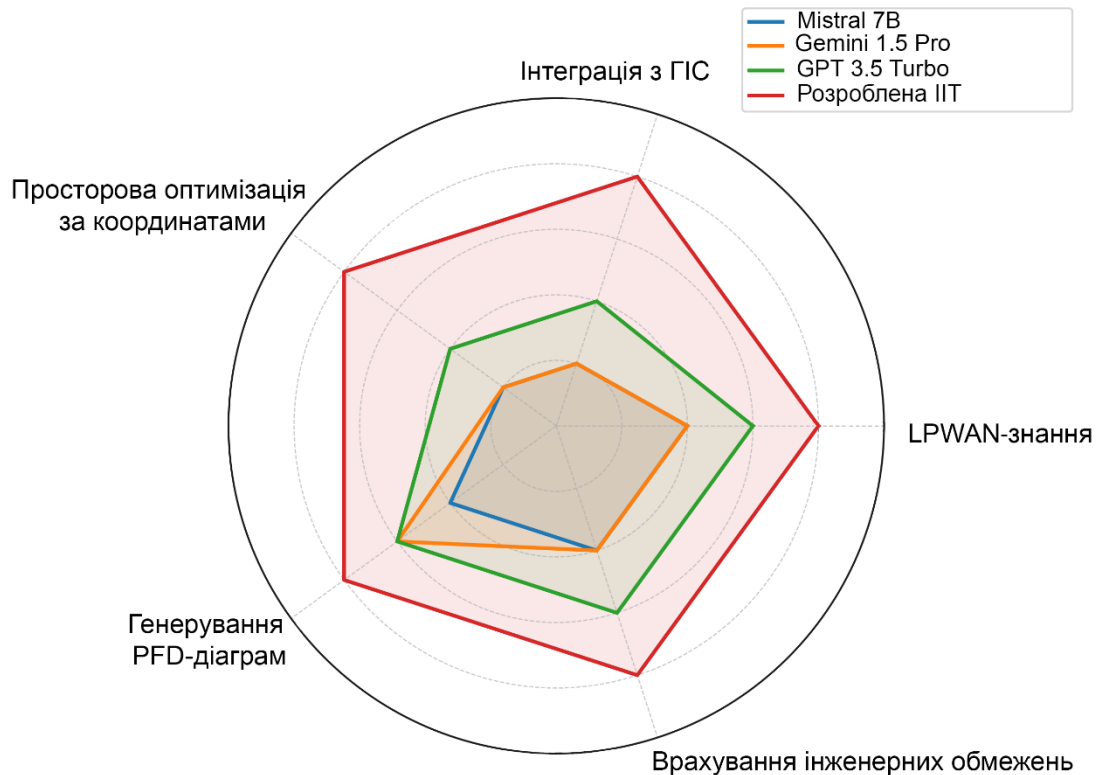


Рисунок 4.10 – Профіль можливостей ШІ-моделей для проєктування IoT-систем на базі LPWAN

Оскільки розроблена інтелектуальна інформаційна технологія базується на великій мовній моделі, доцільним є її порівняння з провідними інтелектуальними системами загального призначення, які активно використовуються у різних галузях: ChatGPT (OpenAI), Gemini (Google) та Claude (Anthropic). Ці моделі зарекомендували себе як потужні інструменти для генерування тексту, програмного коду та структурованих описів, однак їхня здатність до практичного проєктування IoT-систем у специфічних умовах LPWAN залишається недостатньо дослідженою.

Для проведення об'єктивного аналізу усім моделям було поставлено однакове завдання у вигляді запиту:

«I want to design an IoT system for monitoring atmospheric air quality based on Sigfox. I plan to use one base station and 3 modules with air quality sensors. For placement, I am considering an area in one of the cities with coordinates on the map: 52.41038, 16.93577. The task is to place the base station and 3 modules with sensors to cover as large an area as possible for monitoring.»

Кожна із зазначених вище моделей мала продемонструвати не лише здатність інтерпретувати інженерне завдання, але й можливість інтегрувати просторові дані, врахувати обмеження мережі LPWAN на прикладі Sigfox та запропонувати оптимізовану схему розташування елементів системи. Це дозволяє оцінити їхню ефективність у контексті просторово-орієнтованого проектування IoT-систем, а також виявити відмінності між універсальними LLM і спеціалізованою донавченою моделлю, яка була використана для створення чат-бота.

У відповідь на поставлену задачу ChatGPT-4 запропонувала розташувати базову станцію безпосередньо у точці, яка була задана для аналізу. Три датчики якості повітря модель порадила розташувати рівновіддалено один від одного по колу, на межі радіуса дії базової станції (рис. 4.11).

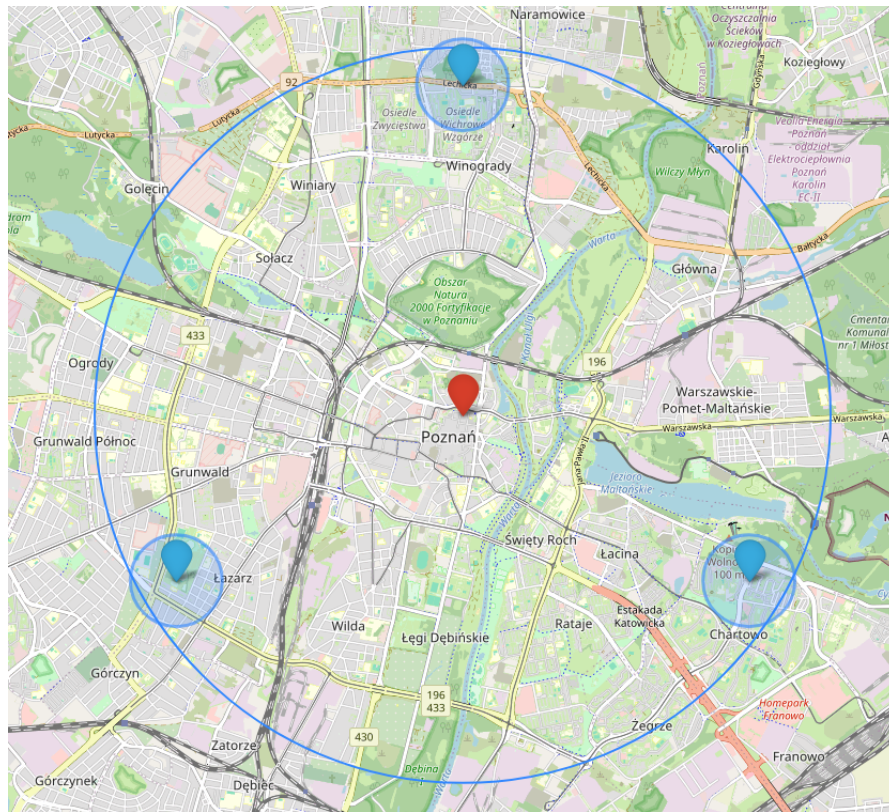


Рисунок 4.11 – Схема розташування компонентів IoT-системи, яку запропонувала модель ChatGPT-4

Для з'ясування логіки такого рішення було поставлено уточнююче запитання. У відповіді модель пояснила свій підхід таким чином (рис 4.12): позиції давачів було визначено за геометричним принципом – рівномірне розташування по колу на відстані, що відповідає типовому радіусу дії мережі Sigfox в міських умовах.

Briefly describe how you determined the scores, what were you guided by?

I determined the points by taking the given central coordinate for the base station and then distributing the three sensor modules evenly around it. I was guided by two factors: the expected Sigfox communication range in urban conditions (so sensors remain connected) and the principle of covering the largest possible area with minimal overlap, which is why they were placed at equal angular distances (120°) from the base.



#### Рисунок 4.12 – Відповідь ChatGPT на уточнююче запитання щодо запропонованого розташування компонентів IoT-системи

Такий підхід дозволяє досягти рівномірного покриття площі з мінімальними зонами перекривання сигналів, проте він має суттєве обмеження. У цьому рішенні не враховані геоінформаційні дані про рельєф місцевості, щільність забудови чи можливі перешкоди для поширення сигналу. Відсутня також просторово-орієнтована оптимізація, що є критично важливим для коректного розгортання IoT-систем у реальних умовах.

Модель Gemini 1.5-Flash продемонструвала схожий підхід до розв'язання завдання. Точку встановлення базової станції, порівняно з ChatGPT-4, модель змістила, проте за допомогою уточнюючих запитань не вдалось з'ясувати логіку такого розташування. Сенсорні модулі, також, розташовано рівновіддалено від базової станції (рис. 4.13). Водночас суттєвою відмінністю стало те, що Gemini визначила точки розташування давачів значно ближче до базової станції, залишивши між ними менший радіус покриття.

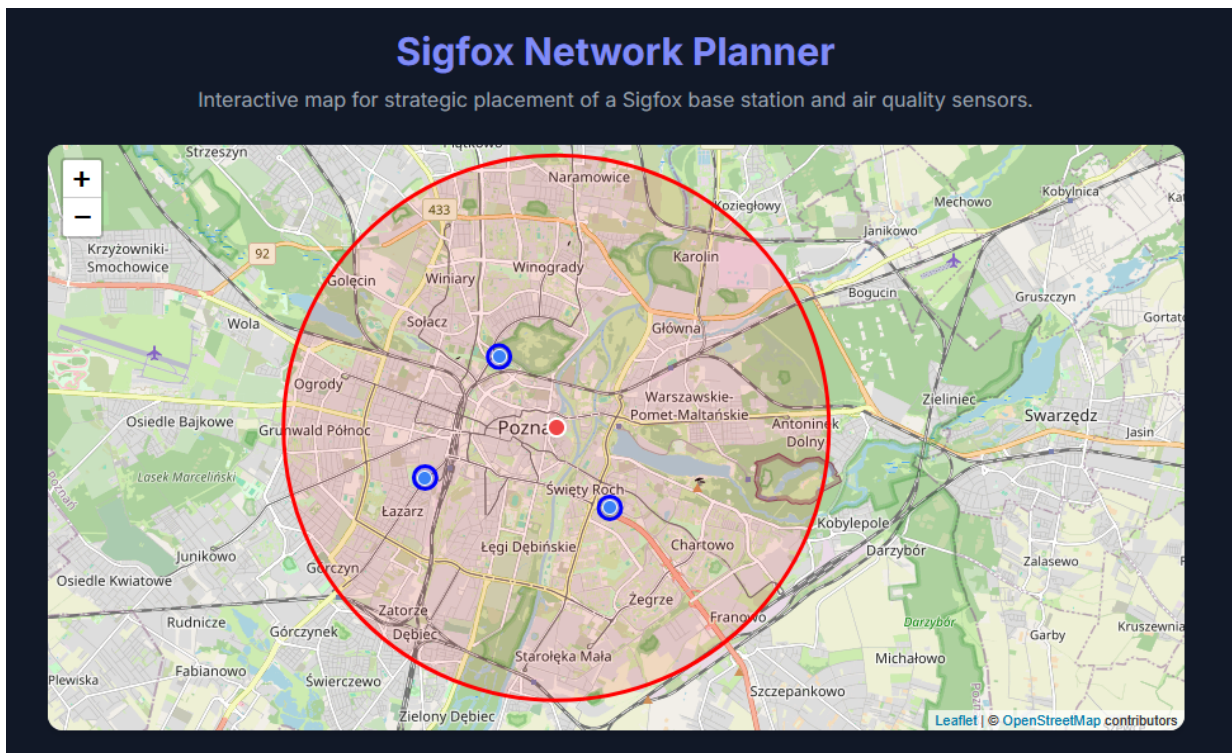


Рисунок 4.13 – Схема розташування компонентів IoT-системи, яку запропонувала модель Gemini 1.5-Flash

Попри відмінність у відстанях, загальний принцип залишився незмінним – рівномірний розподіл давачів на певному колі з базовою станцією у центрі, орієнтований на геометричне покриття території.

Найменш ефективною у вирішенні поставленого завдання виявилась модель Claude 3 Opus. На відміну від ChatGPT та Gemini, які здійснили розподіл давачів відносно заданої точки координат, Claude обмежився наданням загальних порад і представленням схематичного рисунка зі стандартизованим розташуванням базової станції та давачів (рис. 4.14). При цьому модель зовсім не врахувала задані географічні координати, а отже, не здійснила прив'язки системи до конкретної локації. Такий підхід можна розглядати лише як демонстрацію принципового сценарію побудови мережі, проте він не має практичної цінності для реального проектування.

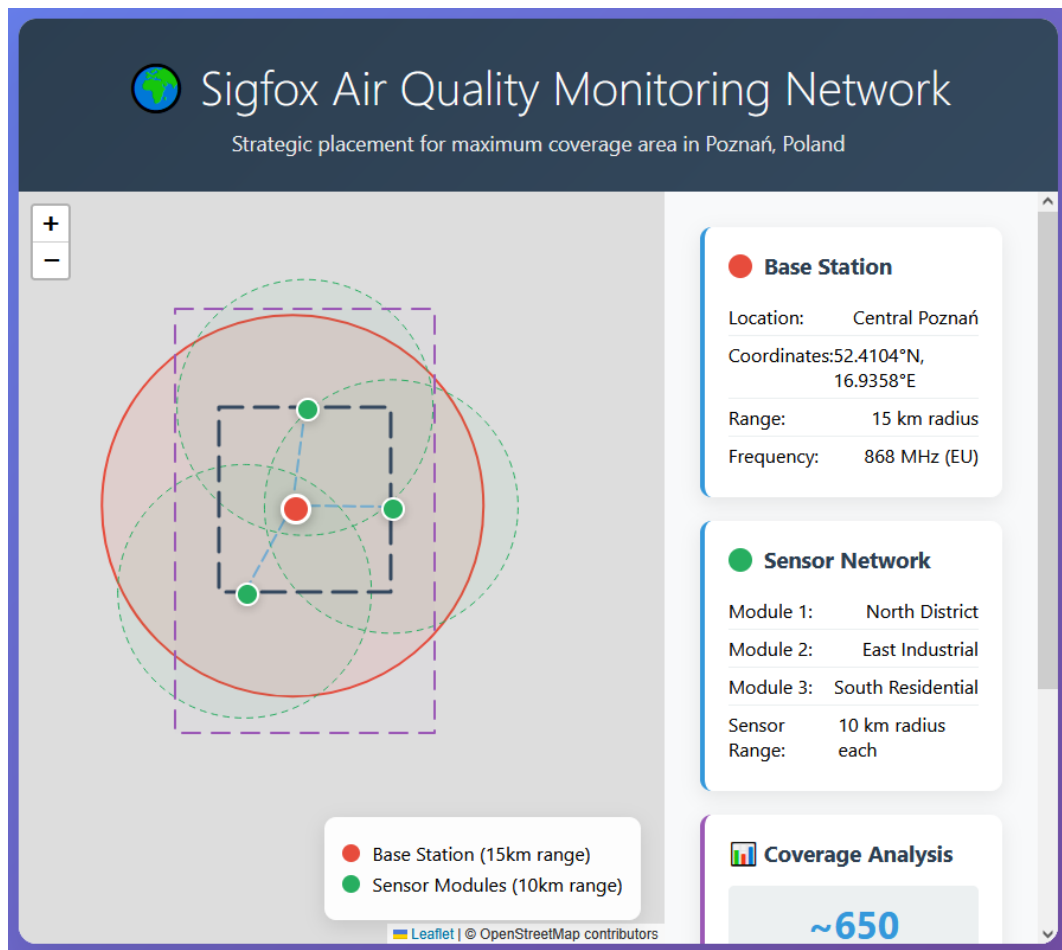


Рисунок 4.14 – Схема розташування компонентів IoT-системи, яку запропонувала модель Claude 3

Разом із тестуванням універсальних LLM-моделей було проведено перевірку роботи розробленої інтелектуальної інформаційної технології. На той же запит вона не лише сформуvala текстові рекомендації, а й автоматично побудувала мапу з оптимальними, на її думку, точками розташування вузлів та базової станції (рис. 4.15).

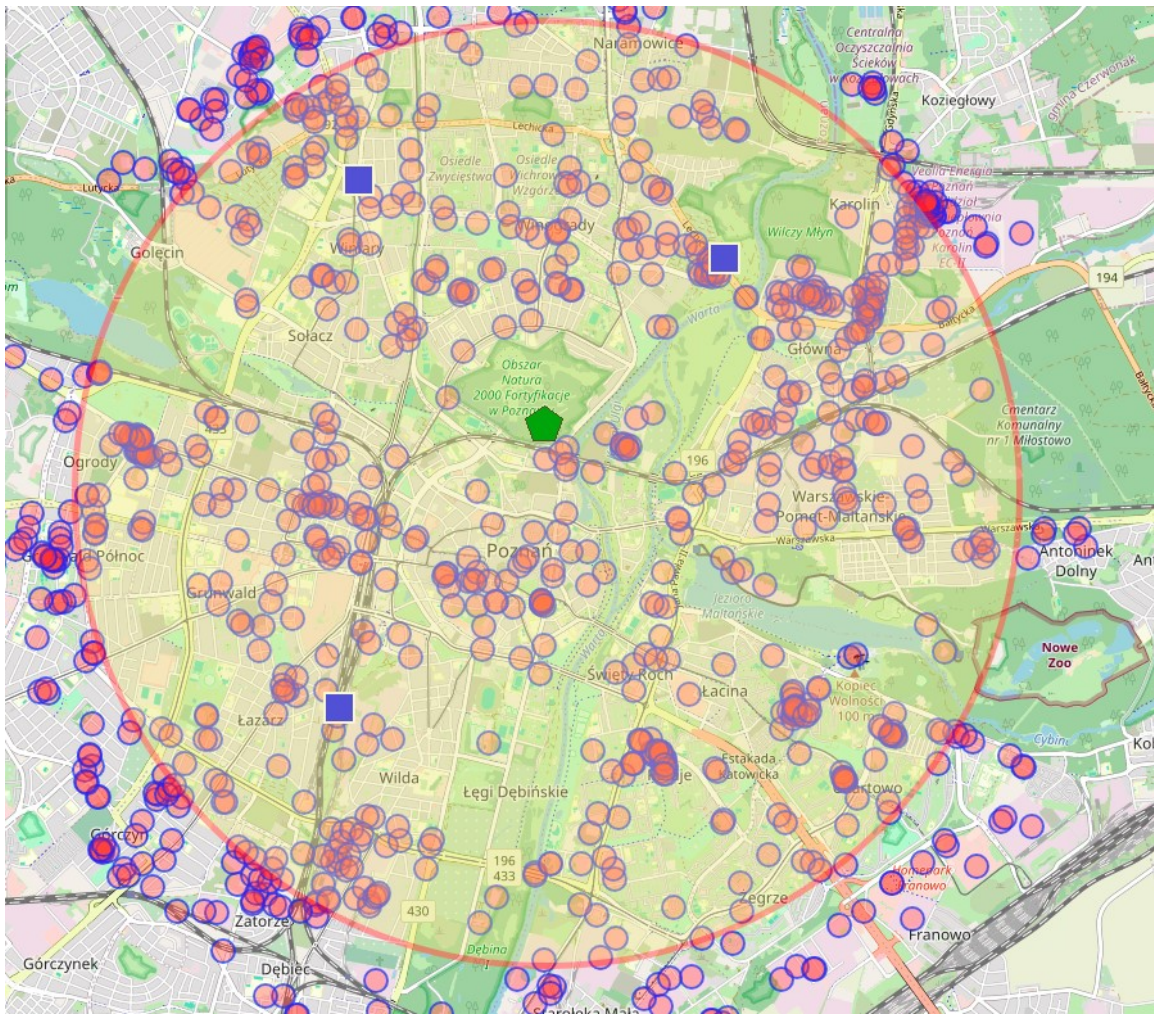


Рисунок 4.15 – Схема розташування компонентів IoT-системи, яку запропонував чат-бот

Зеленим кольором позначено запропоноване місце встановлення базової станції, синім – оптимальні точки розміщення сенсорних вузлів. Додатково жовтим колом відображено прогнозовану зону досяжності радіосигналу без суттєвих втрат у якості зв'язку. Решту позначень на карті відображають потенційні джерела забруднення повітря та перешкод для радіосигналу.

Для перевірки логіки отриманого просторового рішення було поставлено уточнююче завдання у вигляді запиту: «Briefly describe the logic of the location of the base station and sensors» (рис. 4.16). У своїй відповіді чат-бот пояснив, що розташування базової станції вибране з урахуванням максимального охоплення території та мінімізації зон втрати сигналу. Сенсорні вузли було розміщено у напрямках, де, за аналізом просторових факторів, можливі локальні екологічні

відхилення. При цьому враховано як геометричний принцип рівномірного розподілу у межах прогнозованої зони досяжності сигналу, так і техногенні ризики, виявлені на основі ГІС-аналізу.

**USER:** Briefly describe the logic of the location of the base station and sensors

**CHATBOT:** The base station was placed to maximize reliable coverage of the study area. Sensor nodes were distributed within this range to achieve both spatial balance and targeted monitoring. Their placement considered not only geometric coverage but also potential sources of pollution and environmental risk factors identified through prior analysis. In addition, possible obstacles to radio propagation were taken into account to reduce signal degradation. The candidate points for installation were pre-defined based on expert knowledge, and the system selected the optimal subset to ensure robust communication and meaningful data collection.

Ask a chatbot

#### Рисунок 4.16 – Відповідь чат-бота на уточнююче запитання щодо запропонованого розташування компонентів IoT-системи

Для кількісного оцінювання отриманих результатів порівняння застосовано такі просторові метрики:

- Coverage Ratio (CR) – частка території, що покривається мережею;
- Overlap Ratio (OR) – відсоток зон із надмірним дублюванням сигналів;
- Average Distance to Base Station (AD) – середня відстань від датчиків до базової станції, м;
- Signal Loss Risk (LR) – ймовірність втрати сигналу з урахуванням просторових перешкод;
- Optimization Time (OT) – тривалість періоду, необхідного для формування рішення, с.

Результати порівняння подано в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняння LLM та чат-бота

Модель	CR (%)	OR (%)	AD (м)	LR (%)	OT (с)
ChatGPT-4	68	24	740	34	4,1
Gemini 1.5-Flash	63	29	695	36	5,3
Claude 3	55	38	-	-	4,5
Розроблена ІІТ	87	12	510	14	4,1

Як видно з таблиці, універсальні LLM-моделі орієнтувались переважно на геометричне розташування давачів відносно заданої точки. Це забезпечило базове покриття території, але, при цьому, не було враховано геоінформаційні дані (рельєф, потенційні джерела перешкод). Модель Claude взагалі не інтегрувала просторові координати. Натомість розроблена інтелектуальна інформаційна технологія продемонструвала значну перевагу над іншими моделями.

Отже, розроблена ІТ поєднує в собі сильні сторони класичних експертних систем, LLM та оптимізаційних методів. Її ключова унікальність полягає у комбінуванні експертних правил, ГС-аналізу та донавченої великої мовної моделі, що дозволяє отримати просторово оптимізовані рішення з високим рівнем технічної релевантності. Це робить її більш професійним інструментом для інженерів у сфері IoT-проектування, ніж універсальні ШІ-системи загального призначення.

Таким чином, проведене порівняння підтверджує, що розроблена технологія є унікальним інструментом у галузі інтелектуального проектування IoT-систем, оскільки забезпечує інтеграцію методів штучного інтелекту, просторової аналітики та інженерних знань у єдиній платформі.

Для оцінки ефективності розробленої технології було проведено порівняння процесу проектування IoT-системи традиційним підходом та із застосуванням запропонованої технології. Для забезпечення об'єктивності оцінки дослідження пришвидшення тривалості проектування проводилось з урахуванням виключно технічного часу виконання завдань, виключивши від впливу суб'єктивні фактори, такі як індивідуальні навички, професійний досвід та інтуїція фахівця, які можуть спричиняти значні відхилення у тривалості виконання завдань. У традиційному підході створення PFD-діаграм здійснювалось через спеціалізовані програмні додатки, що передбачають ручне введення даних, налаштування елементів та їх взаємозв'язків. Просторова оптимізація залежить від ручного аналізу географічних даних за допомогою Google Maps та OpenStreetMaps. У запропонованій інтелектуальній технології, яка реалізована у вигляді чат-боту, PFD-діаграми створюються автоматично шляхом генерування на основі вхідних

даних, що усуває потребу в ручному моделюванні. Просторова оптимізація виконується шляхом обробки географічних даних та застосуванню вбудованих алгоритмів для визначення оптимальних рішень.

Для оцінки пришвидшення проєктування проведено емпіричний аналіз тривалості проєктування. Для цього визначено такі змінні:

- $PFD$  – кількість елементів PFD-діаграми (ціле число від 3 до 20);
- $Spatial$  – кількість просторових факторів (ціле число від 0 до 10);

Важливим є врахування фіксованого часу, який витрачається фахівцем під час проєктування IoT-системи:  $a = 0,66$  хв – на створення одного елемента PFD-діаграми,  $b = 1,7$  хв – на аналіз одного просторового фактору,  $N_c = 1,5$  хв – базовий час на початкову підготовку інструментів для проєктування.

Для визначення констант було проведено аналіз досліджень взаємодії користувача з комп'ютерними системами. Зокрема, у дослідженні [112] авторами встановлено середні значення тривалості виконання базових дій користувача: натискання клавіші – 0,28 с, наведення миші на об'єкт – 1,10 с, клік мишею – 0,10 с, переміщення руки між мишею та клавіатурою – 0,40 с, розумова підготовка до дії – 1,20 с. На основі цих даних і врахуванні послідовності дій, необхідних для оброблення одного елемента PFD-діаграми було розраховано сумарну середню тривалість, що становить 40 с (0,66 хв). Хоча універсального показника «середньої тривалості пошуку на карті» не існує, у дослідженні [113], присвяченому Google Maps, наводились такі середні показники тривалості пошуку конкретного місця розташування на карті – 102 секунди на комп'ютері.

Для автоматичного підходу визначено такі константи фіксованого часу, який витрачає технологія для автоматизації проєктування:  $a' = 0,04$  хв – тривалість автоматичної генерації одного елемента PFD-діаграми,  $b' = 0,06$  хв – тривалість аналізу одного просторового фактору,  $t = 0,5$  хв – тривалість введення промт-запиту,  $N_b = 0,2$  хв – тривалість запуску та підключення до чат-бота,  $S_{small} = 3,89$  хв – фіксована тривалість верифікації фахівцем для малих проєктів,  $S_{medium} = 6,00$  хв – фіксована тривалість верифікації фахівцем для середніх проєктів,  $S_{large} = 12,75$  хв – фіксована тривалість верифікації фахівцем для великих проєктів. Ці значення

ґрунтуються на емпіричних даних, зібраних під час тестування технології. На відміну від традиційного ручного підходу до проєктування IoT-систем, де фахівець володіє певним обсягом інформації про свою майбутню систему і виконує візуалізацію у формі діаграми та обирає оптимальні точки розташування компонентів, у автоматичному методі на основі чат-бота фахівець формулює запити щодо характеристик системи. Після отриманих результатів необхідна їх ретельна перевірка на точність, відповідність вимогам та можливі неточності, з подальшим уточненням запиту у разі виявлення розбіжностей чи необхідності врахування додаткових аспектів. Відповідно, для адекватної оцінки ефективності технології важливо враховувати час, який фахівець витратить на верифікацію результатів від чат-бота.

Тривалість для традиційного методу розраховується за формулою (4.4).

$$T_{classic}(PFD, Spatial) = N_c + a \cdot PFD + b \cdot Spatial. \quad (4.4)$$

Тривалість для автоматичного методу розраховується за формулою (4.5).

$$T_{bot}(PFD, Spatial) = N_b + a' \cdot PFD + b' \cdot Spatial + t + S_{class}. \quad (4.5)$$

Пришвидшення проєктування обчислюється за формулою (4.6).

$$\Delta T(PFD, Spatial) = \frac{T_{classic}(PFD, Spatial) - T_{bot}(PFD, Spatial)}{T_{classic}(PFD, Spatial)} \times 100\%. \quad (4.6)$$

Для тестування було обрано 25 різних сценаріїв проєктування IoT-систем. Вони передбачають різні комбінації складності генерування PFD-діаграм та аналізу просторового розташування. Результати тестування представлено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати тестування сценаріїв проєктування IoT-систем

PFD	Spatial	$T_{classic}$	$T_{bot}$	$\Delta T$ (%)
9	8	21,04	7,5	64,16
19	2	17,44	14,33	17,83
15	5	19,9	14,35	27,89
13	6	20,28	14,33	29,34

Продовження табл. 4.7

5	0	4,8	4,79	0,21
5	6	15	5,15	65,67
3	2	6,88	4,83	29,8
17	1	14,42	14,19	1,6
13	9	25,38	14,51	42,83
15	10	28,4	14,65	48,42
3	8	17,08	5,19	69,61
19	3	19,14	14,39	24,82
12	5	17,92	7,48	58,26
6	7	17,36	7,36	57,6
6	4	12,26	7,18	41,44
6	1	7,16	7	2,23
8	5	15,28	7,32	52,09
11	0	8,76	7,14	18,49
10	9	23,4	7,64	67,35
7	3	11,22	7,16	36,19
13	7	21,98	14,39	34,53
5	3	9,9	4,9	49,8
7	5	14,62	7,28	50,21
9	6	17,64	7,42	57,94
10	2	11,5	7,22	37,22

Для візуальної інтерпретації результатів побудовано тривимірний графік (рис. 4.17), де поверхня зеленого кольору відображає тривалість проектування традиційним методом, а поверхня червоного кольору – за допомогою чат-бота.

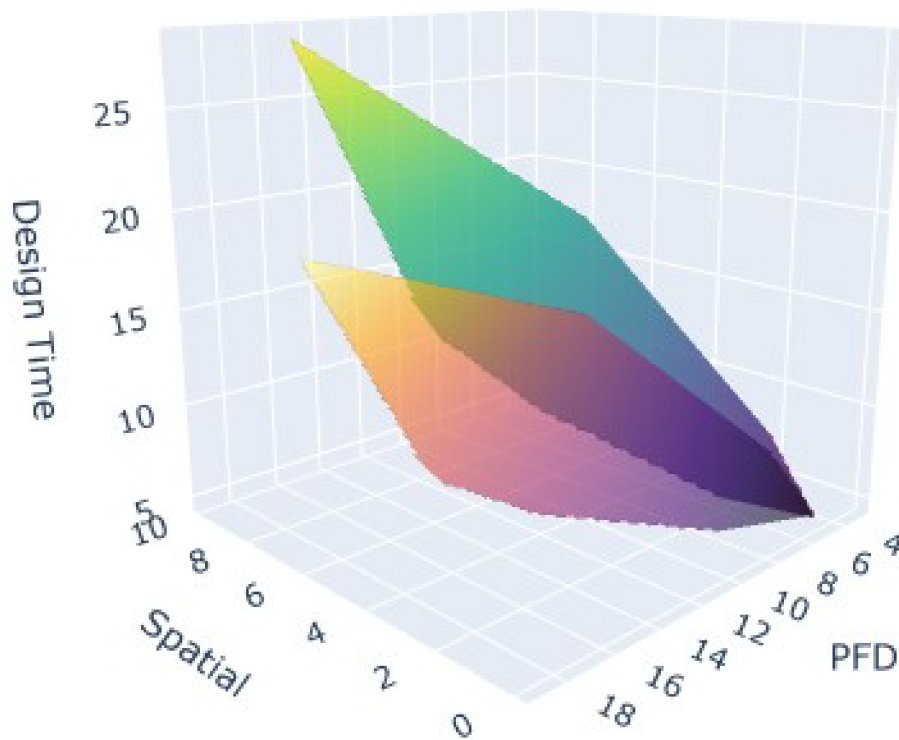


Рисунок 4.17 – Тривимірний графік порівняння тривалості проєктування IoT-систем

Показник середнього пришвидшення  $\overline{\Delta T}$  визначено за формулою (4.7).

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \Delta T_i \approx 37.0\%. \quad (4.7)$$

Результати тестування запропонованої інтелектуальної інформаційної технології показують, що в усіх досліджених випадках автоматичний підхід забезпечує швидше формування рішень порівняно з традиційним підходом, середнє значення пришвидшення процесу проєктування становить від 18% до 37%. Однак, при обробці простих систем, що характеризуються невеликою кількістю елементів PFD-діаграми та обмеженою кількістю просторових факторів, показник пришвидшення є відносно невеликим. Зі зростанням складності IoT-системи, зокрема при збільшенні кількості компонентів PFD-діаграми та просторових факторів, ефективність автоматичного підходу значно зростає.

#### 4.5. Висновки до розділу

У розділі наведено результати практичного застосування розробленої інтелектуальної інформаційної технології оптимального проектування IoT-систем на базі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів.

Продемонстровано побудову IoT-системи моніторингу стану водних ресурсів на основі мережі Sigfox, що має апаратну реалізацію сенсорного вузла з автономним живленням, оптимізований формат пакета даних і інтеграцію з платформою ThingSpeak для візуалізації результатів.

Розглянуто застосування нечіткої експертної системи у поєднанні з геоінформаційними технологіями для вибору оптимальних місць встановлення датчиків у завданнях моніторингу стану лісових масивів. Продемонстровано можливість урахування потенційних джерел техногенного впливу, зон перешкод для поширення сигналу та економічних обмежень, що забезпечує просторово зважені рішення.

Проведено порівняння розробленої технології з наявними аналогами, у тому числі з сучасними LLM-моделями та класичними оптимізаційними алгоритмами. Показано, що на відміну від універсальних ШІ-рішень, запропонована система інтегрує методи нечіткої логіки, GIS-аналізу та генерування PFD-діаграм, що дозволяє отримувати технічно релевантні та практично застосовні результати.

Доведено ефективність використання чат-бота на базі донавченої мовної моделі, який здатний не лише формувати архітектурні рішення IoT-систем, але й пояснювати логіку розташування базових станцій та сенсорних вузлів із урахуванням просторових факторів і потенційних джерел забруднення.

Отримані результати підтверджують, що розроблена технологія є універсальним і водночас практично орієнтованим інструментом для інженерів, який може застосовуватись як для проектування окремих IoT-підсистем, так і для комплексної оптимізації архітектури рішень для забезпечення моніторингу на основі LPWAN.

Наведені в розділі результати були висвітлені у роботах [18, 21, 23].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності автоматизованого проєктування інформаційних IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів, що є фундаментом для створення повноцінних цифрових двійників складних об'єктів і середовищ. Запропонована інтелектуальна інформаційна технологія забезпечує оптимізацію проєктних рішень за техніко-економічними та функціональними критеріями, враховує просторові й техногенні фактори та підвищує точність відтворення еталонних архітектурних структур порівняно з відомими підходами. Завдання поставлені в ході дослідження було виконано. Мету дисертаційного дослідження досягнуто шляхом проведення наступних досліджень та розв'язаних задач:

1. Проведено аналіз відомих підходів до проєктування IoT-систем, що функціонують на базі технологій класу LPWAN. Проаналізовано сучасні архітектурні рішення, структурні та функціональні схеми взаємодії компонентів, методи конфігурації сенсорних мереж та принципи інтеграції з хмарними платформами. Встановлено ключові технологічні обмеження та переваги основних LPWAN-рішень, зокрема Sigfox, LoRaWAN та NB-IoT, у контексті їх придатності для реалізації масштабованих, енергоощадних і надійних IoT-систем. Здійснено аналіз викликів, що виникають під час розроблення, конфігурування та впровадження IoT-систем на базі LPWAN, серед яких: забезпечення стабільності передавання даних у неоднорідних радіочастотних умовах, вплив просторових й техногенних факторів на якість зв'язку, обмеження пропускної здатності та вимоги до енергоефективності пристроїв. Встановлено, що наявні методи проєктування лише частково враховують просторові умови і не забезпечують оптимізації мережевої архітектури з урахуванням техніко-економічних критеріїв. Виявлені обмеження наявних підходів зумовили створення інтелектуальної інформаційної технології, спрямованої на підвищення швидкодії та структурно-

функціональної ефективності автоматизованого проектування IoT-систем на базі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів.

2. Розроблено метод просторової оптимізації розміщення IoT-давачів і базових станцій IoT-системи на базі LPWAN, який забезпечує врахування просторових й техногенних факторів. Метод ґрунтується на інтеграції геоінформаційних технологій, супутникових даних, просторовому аналізу та нечіткій експертній системі, що дає змогу формувати обґрунтовані багатокритеріальні оцінки придатності території для встановлення елементів мережі. Створена нечітка експертна система забезпечує прийняття рішень в умовах просторової невизначеності та дозволяє враховувати вплив рельєфу, забудови та інших перешкод на якість сигналу. Запропонований метод дозволяє визначати оптимальну кількість, конфігурацію та просторове розташування IoT-давачів і базових станцій, що підвищує стабільність зв'язку, зменшує втрати даних і оптимізує витрати на розгортання мережі.

3. Розроблено інтелектуальну інформаційну технологію автоматизованого проектування IoT-систем на базі LPWAN, яка забезпечує підвищення швидкодії та структурно-функціональної ефективності процесу проектування з урахуванням просторових й техногенних факторів. Технологія базується на поєднанні методу багатокритеріального вибору мережевих технологій, методу просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій, а також методу автоматизованого генерування PFD-діаграм. Розроблено рекомендаційного чат-бот, який забезпечує інтелектуальну підтримку процесу проектування, зокрема формування технічних вимог, вибір архітектурних рішень та автоматизовану побудову PFD-діаграм. Проведене тестування на валідаційному наборі структурно-функціональних еталонних IoT-систем підтвердило, що запропонована інтелектуальна інформаційна технологія забезпечує підвищення структурної точності проектування на 22% порівняно з аналогами, побудованими на основі сучасних великих мовних моделей, та збільшення швидкості проектування на 56% порівняно з традиційними підходами, що не використовують мовних моделей. Отримані результати свідчать про ефективність і практичну

придатність розробленої технології для створення високоточних, оптимізованих і техніко-економічно обґрунтованих IoT-систем на основі LPWAN.

4. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації запропонованої інтелектуальної інформаційної технології автоматизованого проектування IoT-систем на базі LPWAN. Розроблені програмні модулі забезпечують автоматизований вибір оптимальної IoT-архітектури, конфігурацію сенсорної мережі, побудову технологічних PFD-діаграм, а також адаптацію проектних рішень до обмежень пропускної здатності, енергоспоживання та покриття мереж LPWAN. Реалізоване програмне забезпечення поєднує математичні моделі, алгоритми багатокритеріального вибору, методи комплексної просторової оптимізації та інструменти рекомендаційного чат-бота, що забезпечує практичну придатність, масштабованість і відтворюваність запропонованої технології у реальних проектних сценаріях.

5. Апробовано та впроваджено розроблену інтелектуальну інформаційну технологію на прикладних задачах побудови IoT-систем на основі LPWAN. Запропоновані підходи застосовано під час проектування систем моніторингу стану води, стану довкілля та визначення оптимальних місць встановлення IoT-станцій та давачів, що забезпечило перевірку працездатності та практичної придатності методів багатокритеріального вибору та оптимізації. Експериментальні дослідження, виконані на валідаційному датасеті, підтвердили результативність технології. Результати роботи впроваджено у виробництво, що підтверджується відповідним актом, а також використано у навчальному процесі.

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 11 роботах, у т.ч. у 4 статтях у наукових фахових періодичних виданнях, та 7 тезах доповідей на науково-практичних конференціях.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Zennaro and B. S. Chaudhari, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier Sci. Technol. Books, 2020.
2. G. Blokdys, *Sigfox A Complete Guide - 2020 Edition*. 5STARCOOKS, 2021.
3. P. Seneviratne, *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. Apress, 2019.
4. A. A. González and J. R. Dopico, “LPWAN in Civil Engineering”, in *Advances in Wireless Technologies and Telecommunication*. IGI Glob., 2021, pp. 223–244. Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4775-5.ch010>.
5. M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, “Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km<sup>2</sup> Area”, in *2017 IEEE 85th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Sydney, NSW, Jun. 4–7, 2017. IEEE, 2017. Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2017.8108182>.
6. A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, “SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT?”, in *2019 Int. Conf. Sens. Instrum. IoT Era (ISSI)*, Lisbon, Portugal, Aug. 29–30, 2019. IEEE, 2019. Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/issii47111.2019.9043727>.
7. В. Б. Мокін, Б. Ю. Собко, М. В. Драгований, Є. М. Крижановський, і Г. В. Горячев, «Створення інформаційної системи моніторингу забруднення атмосферного повітря міста на основі технології “Інтернет речей”», *Вісник ВПІ*, вип. 3, с. 49–58, Верес. 2017.
8. V. Kovtun, K. Grochla, W. Kempa, and K. Połys, “Reliably Controlling Massive Traffic between a Sensor Network End Internet of Things Device Environment and a Hub Using Transmission Control Protocol Mechanisms,” *Electronics*, vol. 12, no. 24, p. 4920, Dec. 2023. Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics12244920>.

9. I. Kaliukh, O. Voloshkina, V. Efimenko, R. Sipakov, O. Zhukova, and T. Kaliukh, “Modern Technologies of Internet of Things in the Restrained Urban Development for Complicated Ground Conditions,” in *16th Int. Conf. Monit. Geolog. Processes Ecol. Condition Environ.*, Kyiv, Ukraine, Eur. Assoc. Geoscientists Engineers, 2022. Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580086>.
10. A. Zanella, S. Zubezu, M. Bennis, M. Capuzzo, and P. Tarolli, “Internet of Things for Hydrology: Potential and Challenges”, in *2023 18th Wireless On-Demand Netw. Syst. Services Conf. (WONS)*, Madonna di Campiglio, Italy, Jan. 30–Feb. 1, 2023. IEEE, 2023. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/wons57325.2023.10062193>.
11. L. Chettri and R. Bera, “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems”, *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, Jan. 2020. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/jiot.2019.2948888>.
12. F. Yu, Z. Zhu, and Z. Fan, “Study on the feasibility of LoRaWAN for smart city applications”, in *2017 IEEE 13th Int. Conf. Wireless Mobile Comput., Netw. Commun. (WiMob)*, Rome, Oct. 9–11, 2017. IEEE, 2017. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/wimob.2017.8115748>.
13. Д. В. Гончаренко, В. Б. Мокін, і Д. П. Проценко, «Побудова інформаційної системи моніторингу фізичних показників на основі технології "Інтернет речей"», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, вип. 57, вип. 2, с. 99–108, (Верес. 2023). [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-57-2-99-108>.
14. Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення давачів для IoT-моніторингу лісового господарства», *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 1, с. 155-164, (Бер. 2025). [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.36930/40350119>.
15. Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Технологія розроблення рекомендаційного чат-бота на основі великих мовних моделей для проектування

IoT-системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 147-156 (Квіт. 2025). [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-147-156>.

16. Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Метод автоматизованого генерування PFD-діаграм для проєктування IoT-системи на базі мережі Sigfox». *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 3, с. 88-95, (Трав. 2025). [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.36930/40350309>.

17. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Аналіз підходів щодо вибору архітектури інформаційних систем на основі інтернету речей за реальних умов», *матеріали LI Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 31 травня - 1 червня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022-/paper/view/16140>.

18. Проценко Д. П., Цвігун С. А., Гончаренко Д. В., «Аналіз зони покриття станції інтернету речей Sigfox для визначення місць розташування датчиків», *матеріали LII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/18937>.

19. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Сучасні IoT-реалізації інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)»*, Вінниця, 22 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/viewFile/18524>.

20. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Переваги технологій інтернету речей SIGFOX для створення локальної системи моніторингу атмосферного повітря», *Матеріали LII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. –

2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/17211>.

21. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., Горячев Г. В., Варчук І. В., «ІоТ-система вимірювання параметрів стану вод на базі Sigfox», *матеріали LIII Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 20 березня - 22 березня 2024 р. – Електрон. текст. дані. – 2024. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20077>.

22. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Застосування нечіткої логіки в ІоТ-системах на базі Sigfox», *матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 24 березня – 27 березня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23214>.

23. Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Система моніторингу стану води з використанням Інтернету речей і технології Sigfox», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)»*, Вінниця, 15 червня – 16 червня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22414/18773>.

24. V. B. Mokin, M. G. Pradivliannyi. Machine Learning, Intelligent Data Analysis and Artificial Intelligence of Things : electronic textbook. Vinnytsia : VNTU, 2024. - 230 p. URI <https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/9462.pdf>

25. S. Adeoye, “Internet of Thing (IoT): A Vision, Architectural Elements and Future Directions,” *Cognizance J. Multidisciplinary Stud.*, vol. 5, no. 1, pp. 316–338, Jan. 2025. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47760/cognizance.2025.v05i01.027>.

26. M. Islam, H. Jamil, S. Pranto, R. Das, A. Amin, and A. Khan, “Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols,” *Sensors*, vol. 24, no.

8, p. 2509, Apr. 2024. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s24082509>.

27. B. Foubert and N. Mitton, “Long-Range Wireless Radio Technologies: A Survey,” *Internet*, vol. 12, no. 1, p. 13, Jan. 2020. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi12010013>.

28. A. A. Adegbenjo et al., “Design and Analysis of an Automated IoT System for Data Flow Optimization in Higher Education Institutions,” *J. Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 56, no. 5, pp. 889–897, Oct. 2023. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18280/jesa.560520>.

29. A. Koohang, C. S. Sargent, J. H. Nord, and J. Paliszkievicz, “Internet of Things (IoT): From awareness to continued use”, *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 62, p. 102442, Feb. 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102442>.

30. P. P. Ray, “A Survey on Internet of Things Architectures,” *EAI Endorsed Trans. Internet Things*, vol. 2, no. 5, p. 151714, Dec. 2016. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4108/eai.1-12-2016.151714>.

31. T. Yousuf, R. Mahmoud, F. Aloul, and I. Zualkernan, “Internet of Things (IoT) Security: Current Status, Challenges and Countermeasures,” *Int. J. Inf. Secur. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 608–616, Dec. 2015. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20533/ijisr.2042.4639.2015.0070>.

32. F. Muteba, K. Djouani, and T. Olwal, “A comparative Survey Study on LPWA IoT Technologies: Design, considerations, challenges and solutions,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, pp. 636–641, 2019. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.090>.

33. G. Stanco, A. Navarro, F. Frattini, G. Ventre, and A. Botta, “A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things,” *ICT Exp.*, Mar. 2024. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2024.03.003>.

34. H. Rajab, H. Al-Amaireh, T. Bouguera, and T. Cinkler, “Evaluation of energy consumption of LPWAN technologies,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*,

vol. 2023, no. 1, Dec. 2023. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02322-8>.

35. A. Diane, O. Diallo, and E. H. M. Ndoye, “A systematic and comprehensive review on low power wide area network: characteristics, architecture, applications and research challenges,” *Discov. Internet Things*, vol. 5, no. 1, Jan. 2025. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00097-6>.

36. H. Amirian, K. Dalvand, and A. Ghiasvand, “Seamless integration of Internet of Things, miniaturization, and environmental chemical surveillance,” *Environmental Monit. Assessment*, vol. 196, no. 6, May 2024. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12698-9>.

37. G. Kecskemeti, G. Casale, D. N. Jha, J. Lyon, and R. Ranjan, “Modelling and Simulation Challenges in Internet of Things,” *IEEE Cloud Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 62–69, Jan. 2017. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/mcc.2017.18>.

38. K. M. Abdelmagid, M. F. Mohd Yakub, and M. Ghazali, “Integrating IoT Sensors and Machine Learning Algorithms for Early Flash Flood Detection System,” *Int. J. Comput. Thinking Data Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 60–71, Mar. 2025. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37934/ctds.5.1.6071>.

39. T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, “An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects,” *Internet Things*, p. 100626, Oct. 2022. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100626>.

40. B. Tekinerdogan, Ö. Köksal, and T. Çelik, “System Architecture Design of IoT-Based Smart Cities,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, p. 4173, Mar. 2023. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13074173>.

41. M. R. Abdmeziem, D. Tandjaoui, and I. Romdhani, “Architecting the Internet of Things: State of the Art”, in *Robots and Sensor Clouds*. Cham: Springer Int. Publishing, 2015, pp. 55–75. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22168-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22168-7_3).

42. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”,

*IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>.

43. S. A. Al-Qaseemi, H. A. Almulhim, M. F. Almulhim, and S. R. Chaudhry, “IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization”, in *2016 Future Technol. Conf. (FTC)*, San Francisco, CA, USA, Dec. 6–7, 2016. IEEE, 2016. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ftc.2016.7821686>.

44. M. A. Husnoo, A. Anwar, R. K. Chakraborty, R. Doss, and M. J. Ryan, “Differential Privacy for IoT-Enabled Critical Infrastructure: A Comprehensive Survey”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 153276–153304, 2021. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3124309>.

45. C.-L. Zhong, Z. Zhu, and R.-G. Huang, “Study on the IOT Architecture and Gateway Technology”, in *2015 14th Int. Symp. Distrib. Comput. Appl. Bus. Eng. Sci. (DCABES)*, Guiyang, China, Aug. 18–24, 2015. IEEE, 2015. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/dcabes.2015.56>.

46. K. A. Alaghbari, M. H. M. Saad, A. Hussain, and M. R. Alam, “Complex event processing for physical and cyber security in datacentres - recent progress, challenges and recommendations”, *J. Cloud Comput.*, vol. 11, no. 1, Oct. 2022. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00338-x>.

47. A. Botta, W. de Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey”, *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 56, pp. 684–700, Mar. 2016. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021>.

48. O. Alfarraj, “A machine learning-assisted data aggregation and offloading system for cloud–IoT communication”, *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, Oct. 2020. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12083-020-01014-0>.

49. S. H. and N. V., “A Review on Fog Computing: Architecture, Fog with IoT, Algorithms and Research Challenges”, *ICT Exp.*, vol. 7, no. 2, pp. 162–176, Jun. 2021. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.05.004>.

50. L. Belli, “Big Stream Cloud Architecture for the Internet of Things”, in *MobiSys'15: 13th Annu. Int. Conf. Mobile Syst., Appl., Services*, Florence Italy. New York, NY, USA: ACM, 2015. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2752746.2752789>.
51. M. Junaid, M. A. Shah, and I. A. Satti, “A survey of internet of things, enabling technologies and protocols”, in *2017 23rd Int. Conf. Automat. Comput. (ICAC)*, Huddersfield, United Kingdom, Sep. 7–8, 2017. IEEE, 2017. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/iconac.2017.8082058>.
52. Kovtun, V.; Grochla, K.; Kempa, W.; Polys, K. “Reliably Controlling Massive Traffic between a Sensor Network End Internet of Things Device Environment and a Hub Using Transmission Control Protocol Mechanisms”. *Electronics*, vol. 12, no. 24, p. 4920. <https://doi.org/10.3390/electronics12244920>.
53. T. Abderrahmane, A. Nourredine, and T. Mohammed, “Experimental analysis for comparison of wireless transmission technologies: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and LoRa for mobile multi-robot in hostile sites”, *Int. J. Elect. Comput. Eng. (IJECE)*, vol. 14, no. 3, p. 2753, Jun. 2024. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i3.pp2753-2761>.
54. Rafaqat Alam Khan and Arslan tariq, “A Survey on Wired and Wireless Network”, *Lahore Garrison Univ. Res. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 19–28, Sep. 2018. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54692/lgurjcsit.2018.020350>.
55. Y. Hao, “Investigation and Technological Comparison of 4G and 5G Networks”, *J. Comput. Commun.*, vol. 09, no. 01, pp. 36–43, 2021. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/jcc.2021.91004>.
56. B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations”, *Internet*, vol. 12, no. 3, p. 46, Mar. 2020. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi12030046>.
57. M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and

Future Directions”, *Electronics*, vol. 11, no. 1, p. 164, Jan. 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>.

58. M. S. Mahmoud and A. A. H. Mohamad, “A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications,” *Adv. Internet Things*, vol. 06, no. 02, pp. 19–29, 2016. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/ait.2016.62002>.

59. A. Saleem and D. Jazani, “Presence Aware Power Saving Mode (PA-PSM) Development for IoT Devices for Energy Conservation”, *Open J. Energy Efficiency*, vol. 10, no. 03, pp. 81–96, 2021. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/ojee.2021.103006>.

60. M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”, *Electronics*, vol. 11, no. 1, p. 164, Jan. 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>.

61. E. Sisinni *et al.*, “LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 16, no. 8, pp. 5607–5616, Aug. 2020. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2958620>.

62. K. F. Muteba, K. Djouani, and T. Olwal, “5G NB-IoT: Design, Considerations, Solutions and Challenges”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 198, pp. 86–93, 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.214>.

63. C. Milarokostas, D. Tsolkas, N. Passas, and L. Merakos, “A Comprehensive Study on LPWANs With a Focus on the Potential of LoRa/LoRaWAN Systems”, *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, p. 1, 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3229846>.

64. M. Jouhari, N. Saeed, M.-S. Alouini, and E. M. Amhoud, “A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges”, *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, p. 1, 2023. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/comst.2023.3274934>.

65. H. Alqurashi, F. Bouabdallah, and E. Khairullah, "SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks", *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3732, Apr. 2023. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23073732>.
66. C. Han, W. Zhang, M. Li, and Y. Tian, "Design of Smart Home System Based on Nb-Iot", *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2254, no. 1, p. 012039, Apr. 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2254/1/012039>.
67. J. Arshad et al., "Implementation of a LoRaWAN Based Smart Agriculture Decision Support System for Optimum Crop Yield", *Sustainability*, vol. 14, no. 2, p. 827, Jan. 2022. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14020827>.
68. M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, and B. Musznicki, "LoRaWAN Metering Infrastructure Planning in Smart Cities", *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 14, p. 8431, Jul. 2023. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13148431>.
69. P. Manikandan, R. Patel, S. Gopalakrishnan, and K. Palaniswamy, "Revolutionizing Industrial IoT with LoRaWAN for Smarter and Greener Industries", in *2024 IEEE East-West Des. & Test Symp. (EWDTS)*, Yerevan, Armenia, Nov. 13–17, 2024. *IEEE*, 2024, pp. 1–5. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ewdts63723.2024.10873645>.
70. D. Crnjac Milić, I. Dujmenović, and M. Peko, "An Approach to the Application of the Internet of Things in Logistics", *Teh. Glas.*, vol. 17, no. 1, pp. 134–140, Feb. 2023. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31803/tg-20220609190233>.
71. E. Saavedra, L. Mascaraque, G. Calderon, G. del Campo, and A. Santamaria, "The Smart Meter Challenge: Feasibility of Autonomous Indoor IoT Devices Depending on Its Energy Harvesting Source and IoT Wireless Technology", *Sensors*, vol. 21, no. 22, p. 7433, Nov. 2021. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21227433>.

72. D. Cheng, C. Li, and N. Qiu, “The application prospects of NB-IoT in intelligent transportation”, in *2021 4th Int. Conf. Adv. Electron. Mater., Comput. Softw. Eng. (AEMCSE)*, Changsha, China, Mar. 26–28, 2021. *IEEE*, 2021. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/aemcse51986.2021.00240>.
73. Y. Cheng et al., “Research on the Smart Medical System Based on NB-IoT Technology”, *Mobile Inf. Syst.*, vol. 2021, pp. 1–10, Jun. 2021. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2021/7801365>.
74. M. Dangana, S. Ansari, Q. H. Abbasi, S. Hussain, and M. A. Imran, “Suitability of NB-IoT for Indoor Industrial Environment: A Survey and Insights”, *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5284, Aug. 2021. Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21165284>.
75. S. M. Mousavi, A. Khademzadeh, and A. M. Rahmani, “Toward a Versatile IoT Communication Infrastructure,” *Int. J. Inf. Communication Technol. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 25–37, Mar. 2022. Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.52547/itrc.14.1.25>.
76. E. Kadusic, N. Zivic, C. Ruland, and N. Hadzajlic, “A Smart Parking Solution by Integrating NB-IoT Radio Communication Technology into the Core IoT Platform”, *Future Internet*, vol. 14, no. 8, p. 219, Jul. 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi14080219>.
77. T. A. Wild *et al.*, “A multi-species evaluation of digital wildlife monitoring using the Sigfox IoT network”, *Anim. Biotelemetry*, vol. 11, no. 1, Mar. 2023. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40317-023-00326-1>.
78. W. A. Jabbar, T. Subramaniam, A. E. Ong, M. I. Shu'Ib, W. Wu, and M. A. de Oliveira, “LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring”, *Internet Things*, p. 100540, May 2022. Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>.
79. D. I. Hussain, D. A. Elomri, D. L. Kerbache, and D. A. E. Omri, “Smart City Solutions: Comparative Analysis of Waste Management Models in IoT-Enabled Environments Using Multiagent Simulation,” *Sustain. Cities Soc.*, p. 105247, Feb. 2024.

Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105247>.

80. Z. U. Haq, H. Ullah, M. N. A. Khan, S. R. Naqvi, A. Ahad, and N. A. Saidina Amin, "Comparative Study of Machine Learning Methods Integrated with Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Bio-Char Yield Prediction," *SSRN Electron. J.*, 2022. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4191311>.

81. V. B. Mokin, L. M. Skorina, Ye. M. Kryzhanovskiy, and M. A. Gorash, "Construction of a GIS-integrated data and model system based on XML formalization for modeling processes in rivers," *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, vol. 2, Jun. 2018. [Online]. Available: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/23413>.

82. S. Kaddani, D. Vanderpooten, J.-M. Vanpeperstraete, and H. Aissi, "Weighted sum model with partial preference information: Application to multi-objective optimization", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 260, no. 2, pp. 665–679, Jul. 2017. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.003>.

83. A. Mardani, A. Jusoh, K. MD Nor, Z. Khalifah, N. Zakwan, and A. Valipour, "Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014", *Econ. Research-Ekonomska Istraživanja*, vol. 28, no. 1, pp. 516–571, Jan. 2015. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/1331677x.2015.1075139>.

84. Гончаренко Д. "Selection of IoT Technology." *Kaggle*. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/code/honcharenkodmytro/selection-of-iot-technology> (2023).

85. E. Alozie et al., "A Review on Rain Signal Attenuation Modeling, Analysis and Validation Techniques: Advances, Challenges and Future Direction", *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11744, Sep. 2022. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su141811744>.

86. L. Fernando da Silva and W. Joao Mansur, “A review of seismic wave attenuation”, in *Int. Congr. Brazilian Geophysical Soc. & Expogef*. Brazilian Geophysical Soc., 2021. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22564/17cisbgf2021.022>.
87. Barrios-Ulloa, A.; Ariza-Colpas, P.P.; Sánchez-Moreno, H.; Quintero-Linero, A.P.; De la Hoz-Franco, E. Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review. *Sensors* 2022, 22, 5285. <https://doi.org/10.3390/s22145285>.
88. H. Alqurashi, F. Bouabdallah, and E. Khairullah, “SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks”, *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3732, Apr. 2023. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23073732>.
89. A. Mehina and I. Čavlina, “SIGNAL PROPAGATION”, *Nauka I Tehnol.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–54, Jun. 2023. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.58952/nit20231101047>.
90. A. Kliuchka, R. Hart’anský, and J. Halgoš, “Methods of computer modeling of electromagnetic field propagation in urban scenarios for Internet of Things”, *J. Elect. Eng.*, vol. 74, no. 5, pp. 422–433, Oct. 2023. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/jee-2023-0050>.
91. J. Peng, S. Jia, J. Bian, S. Zhang, J. Liu, and X. Zhou, “Recent Progress on Electromagnetic Field Measurement Based on Optical Sensors”, *Sensors*, vol. 19, no. 13, p. 2860, Jun. 2019. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19132860>.
92. E. Q. Shahra and W. Wu, “Water contaminants detection using sensor placement approach in smart water networks”, *J. Ambient Intell. Humanized Comput.*, Jun. 2020. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02262-x>.
93. X. Dai, M. Xia, L. Weng, K. Hu, H. Lin, and M. Qian, “Multi-Scale Location Attention Network for Building and Water Segmentation of Remote Sensing

Image”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, p. 1, 2023. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2023.3276703>.

94. H. Singh, K. Saxena, V. Kumar, B. Bonev, and R. Prasad, “An Empirical Model for Prediction of Environmental Attenuation of Millimeter Waves”, *Wireless Pers. Commun.*, vol. 115, no. 1, pp. 809–826, Jun. 2020. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07599-2>.

95. M. E. Diago-Mosquera, A. Aragon-Zavala, and G. Castanon, “Bringing It Indoors: A Review of Narrowband Radio Propagation Modeling for Enclosed Spaces”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 103875–103899, 2020. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2999848>.

96. L.-T. Luh, “The shape parameter in the Gaussian function,” *Comput. & Math. with Appl.*, vol. 63, no. 3, pp. 687–694, Feb. 2012. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.11.032>.

97. S. Gupta, P. K. Biswas, B. Aljafari, S. B. Thanikanti, and S. K. Das, “Modelling, simulation and performance comparison of different membership functions based fuzzy logic control for an active magnetic bearing system,” *J. Eng.*, vol. 2023, no. 2, Jan. 2023. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/tje2.12229>.

98. J. E. Farrell, “Efficient method for paired comparison,” *J. Electron. Imag.*, vol. 10, no. 2, p. 394, Apr. 2001. Accessed: Aug. 30, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.1344187>.

99. S. Mohamed Ali El-Morsy, M. Hussein, and H. M. Mousa, “Arabic open information extraction system using dependency parsing”, *Int. J. Elect. Comput. Eng. (IJECE)*, vol. 12, no. 1, p. 541, Feb. 2022. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp541-551>.

100. T. Kang, “Training data and fine-tuning process for developing LLM-based BIM domain knowledge model”, *J. Korea Academia-Ind. cooperation Soc.*, vol. 25, no. 11, pp. 177–185, Nov. 2024. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5762/kais.2024.25.11.177>.

101. X. Wang та L. Aitchison, “How to set AdamW's weight decay as you scale model and dataset size”, *arXiv preprint*, arXiv:2405.136982, 2025.
102. “GitHub - e-p-armstrong/augmentoolkit: Convert Compute And Books Into Instruct-Tuning Datasets! Makes: QA, RP, Classifiers.” GitHub. Available: <https://github.com/e-p-armstrong/augmentoolkit> (2024).
103. О. В. Кудрик, О. В. Бісікало, Є. С. Здітовецький, «Методи тонкого налаштування штучного інтелекту», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, т. 175, № 4, с. 139–146, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-139-146>.
104. “GitHub - mermaid-js/mermaid: Generation of diagrams like flowcharts or sequence diagrams from text in a similar manner as markdown”. GitHub. Access: <https://github.com/mermaid-js/mermaid> (2025).
105. R. P. Sharma, D. Ramesh, P. Pal, S. Tripathi, and C. Kumar, “IoT enabled IEEE 802.15.4 WSN monitoring infrastructure driven Fuzzy-logic based Crop pest prediction”, *IEEE Internet Things J.*, p. 1, 2021. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3094198>.
106. S. Hassani and U. Dackermann, “A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement”, *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3293, Mar. 2023. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23063293>.
107. R. J. Robinson, “IoT Solutions for Smart Parking- Sigfox Technology”, *Comput. Sci. & Eng.: Int. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 01–13, Apr. 2024. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5121/cseij.2024.14201>.
108. M. R. Tabassum, M. J. Ritchie, S. Mustafiz, and J. Kienzle, “Using LLMs for Use Case Modelling of IoT Systems: An Experience Report”, in *MODELS Companion '24: ACM/IEEE 27th Int. Conf. Model Driven Eng. Lang. Syst.*, Linz Austria. New York, NY, USA: ACM, 2024, pp. 611–619. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3652620.3687810>.
109. Y. Cheng, M. Xu, Y. Zhang, K. Li, R. Wang, and L. Yang, “AutoIoT: Automated IoT Platform Using Large Language Models”, *IEEE Internet Things J.*, p. 1,

2025. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/jiot.2024.3523907>.

110. “A Fuzzy-Based Chat-bot Messenger for Home Intelligent System with Multiple Sensors”, *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 1026–1038, Apr. 2021. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/771022021>.

111. J. Ekanayake and S. Luckshitha, “E-AGRO: Intelligent Chat-Bot. IoT and Artificial Intelligence to Enhance Farming Industry”, *Agris on-line Papers Econ. Inform.*, vol. 12, no. 1, pp. 15–21, Mar. 2020. Accessed: Jun. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7160/aol.2020.1200102>.

112. J. P. Staff, *Human-Computer Interaction*. Pearson Educ., Limited, 2015.

113. Y. Yang, W. Xia, F. Lekschas, C. Nobre, R. Krüger ta H. Pfister, “The Pattern is in the Details: An Evaluation of Interaction Techniques for Locating, Searching, and Contextualizing Details in Multivariate Matrix Visualizations”, in *CHI '22: CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, New Orleans LA USA. New York, NY, USA: ACM, 2022. Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3491102.3517673>.

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] Д. В. Гончаренко, В. Б. Мокін, і Д. П. Проценко, «Побудова інформаційної системи моніторингу фізичних показників на основі технології "Інтернет речей"», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, вип. 57, вип. 2, с. 99–108, (Верес. 2023). DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-57-2-99-108>. **(Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

[2] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення давачів для IoT-моніторингу лісового господарства», *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 1, с. 155-164, (Бер. 2025). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350119>. **(Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

[3] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Технологія розроблення рекомендаційного чат-бота на основі великих мовних моделей для проектування IoT-системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 147-156 (Квіт. 2025). DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-147-156>. **(Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

[4] Д. В. Гончаренко і В. Б. Мокін, «Метод автоматизованого генерування PFD-діаграм для проектування IoT-системи на базі мережі Sigfox». *Науковий вісник НЛТУ України*, вип.35, № 3, с. 88-95, (Трав. 2025). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350309>. **(Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія «Б» зі спеціальності 126)**

[5] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Аналіз підходів щодо вибору архітектури інформаційних систем на основі інтернету речей за реальних умов», *матеріали LI Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 31 травня - 1 червня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022-/paper/view/16140>.

[6] Проценко Д. П., Цвігун С. А., Гончаренко Д. В., «Аналіз зони покриття станції інтернету речей Sigfox для визначення місць розташування датчиків», *матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/18937>.

[7] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Сучасні IoT-реалізації інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)»*, Вінниця, 22 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/viewFile/18524>.

[8] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., «Переваги технологій інтернету речей SIGFOX для створення локальної системи моніторингу атмосферного повітря», *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 21 червня - 23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2023/paper/view/17211>.

[9] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., Проценко Д. П., Горячев Г. В., Варчук І. В., «IoT-система вимірювання параметрів стану вод на базі Sigfox», *матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 20 березня - 22 березня 2024 р. – Електрон. текст. дані. – 2024. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20077>.

[10] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Застосування нечіткої логіки в IoT-системах на базі Sigfox», *матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)*, Вінниця, 24 березня – 27 березня 2025 р. – Електрон. текст. дані. –

2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23214>.

[11] Гончаренко Д. В., Мокін В. Б., «Система моніторингу стану води з використанням Інтернету речей і технології Sigfox», *матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)»*, Вінниця, 15 червня – 16 червня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22414/18773>.

## ДОДАТОК Б

### БАЗА ЗНАНЬ

Підсистема 1. Вплив географічних факторів

Входи: відстань до базової станції ( $v$ ) та рельєф/забудова ( $f$ ). Вихід: інтегральний показник географічних факторів ( $g$ ).

1. *IF  $v=MH$  AND  $f=MH$  THEN  $g=малий$*
2. *IF  $v=MH$  AND  $f=M$  THEN  $g=малий$*
3. *IF  $v=MH$  AND  $f=C$  THEN  $g=середній$*
4. *IF  $v=MH$  AND  $f=B$  THEN  $g=високий$*
5. *IF  $v=MH$  AND  $f=MK$  THEN  $g=високий$*
6. *IF  $v=M$  AND  $f=MH$  THEN  $g=малий$*
7. *IF  $v=M$  AND  $f=M$  THEN  $g=малий$*
8. *IF  $v=M$  AND  $f=C$  THEN  $g=середній$*
9. *IF  $v=M$  AND  $f=B$  THEN  $g=високий$*
10. *IF  $v=M$  AND  $f=MK$  THEN  $g=високий$*
11. *IF  $v=C$  AND  $f=MH$  THEN  $g=середній$*
12. *IF  $v=C$  AND  $f=M$  THEN  $g=середній$*
13. *IF  $v=C$  AND  $f=C$  THEN  $g=середній$*
14. *IF  $v=C$  AND  $f=B$  THEN  $g=високий$*
15. *IF  $v=C$  AND  $f=MK$  THEN  $g=високий$*
16. *IF  $v=B$  AND  $f=MH$  THEN  $g=високий$*
17. *IF  $v=B$  AND  $f=M$  THEN  $g=високий$*
18. *IF  $v=B$  AND  $f=C$  THEN  $g=високий$*
19. *IF  $v=B$  AND  $f=B$  THEN  $g=високий$*
20. *IF  $v=B$  AND  $f=MK$  THEN  $g=високий$*
21. *IF  $v=MK$  AND  $f=MH$  THEN  $g=високий$*
22. *IF  $v=MK$  AND  $f=M$  THEN  $g=високий$*
23. *IF  $v=MK$  AND  $f=C$  THEN  $g=високий$*
24. *IF  $v=MK$  AND  $f=B$  THEN  $g=високий$*
25. *IF  $v=MK$  AND  $f=MK$  THEN  $g=високий$*

Підсистема 2. Вплив електромагнітних завад

Входи: статичні ( $s$ ) та динамічні ( $d$ ) завади. Вихід: інтегральний показник завад ( $p$ ).

1. *IF  $s=MH$  AND  $d=MH$  THEN  $p=малий$*
2. *IF  $s=MH$  AND  $d=M$  THEN  $p=малий$*
3. *IF  $s=MH$  AND  $d=C$  THEN  $p=середній$*

4. *IF s=MH AND d=B THEN p=високий*
5. *IF s=MH AND d=MK THEN p=високий*
6. *IF s=M AND d=MH THEN p=малий*
7. *IF s=M AND d=M THEN p=малий*
8. *IF s=M AND d=C THEN p=середній*
9. *IF s=M AND d=B THEN p=високий*
10. *IF s=M AND d=MK THEN p=високий*
11. *IF s=C AND d=MH THEN p=середній*
12. *IF s=C AND d=M THEN p=середній*
13. *IF s=C AND d=C THEN p=середній*
14. *IF s=C AND d=B THEN p=високий*
15. *IF s=C AND d=MK THEN p=високий*
16. *IF s=B AND d=MH THEN p=високий*
17. *IF s=B AND d=M THEN p=високий*
18. *IF s=B AND d=C THEN p=високий*
19. *IF s=B AND d=B THEN p=високий*
20. *IF s=B AND d=MK THEN p=високий*
21. *IF s=MK AND d=MH THEN p=високий*
22. *IF s=MK AND d=M THEN p=високий*
23. *IF s=MK AND d=C THEN p=високий*
24. *IF s=MK AND d=B THEN p=високий*
25. *IF s=MK AND d=MK THEN p=високий*

### Підсистема 3. Узагальнення

Входи:  $g$  та  $p$ . Вихід: інтегральний показник  $r$ .

1. *IF g=малий AND p=малий THEN r=малий*
2. *IF g=малий AND p=середній THEN r=середній*
3. *IF g=малий AND p=високий THEN r=високий*
4. *IF g=середній AND p=малий THEN r=середній*
5. *IF g=середній AND p=середній THEN r=середній*
6. *IF g=середній AND p=високий THEN r=високий*
7. *IF g=високий AND p=малий THEN r=високий*
8. *IF g=високий AND p=середній THEN r=високий*
9. *IF g=високий AND p=високий THEN r=високий*

## ДОДАТОК В

### АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ СИГНАЛУ З МІНІМАЛЬНИМ ВПЛИВОМ НА ЯКІСТЬ СИГНАЛУ

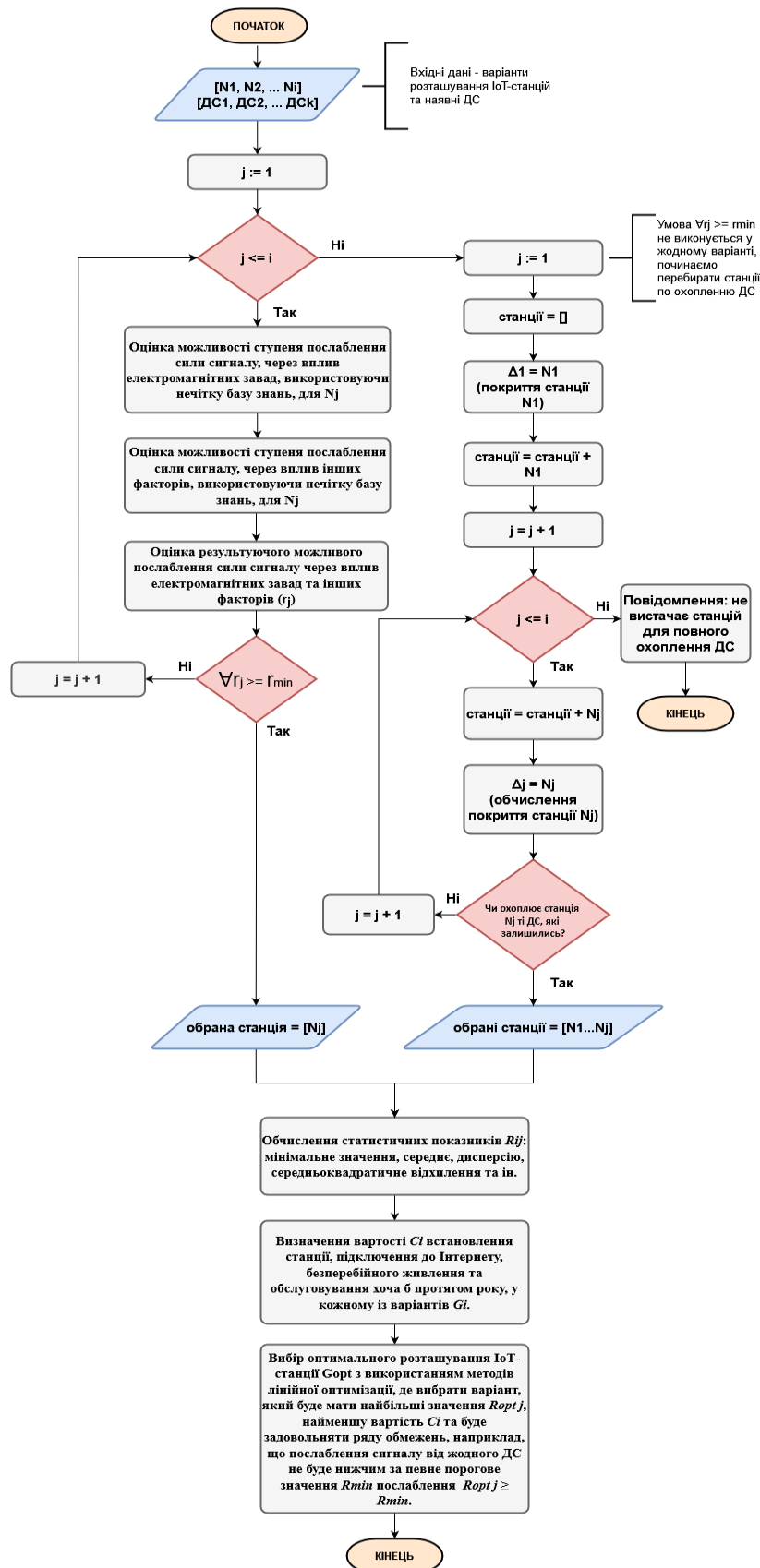
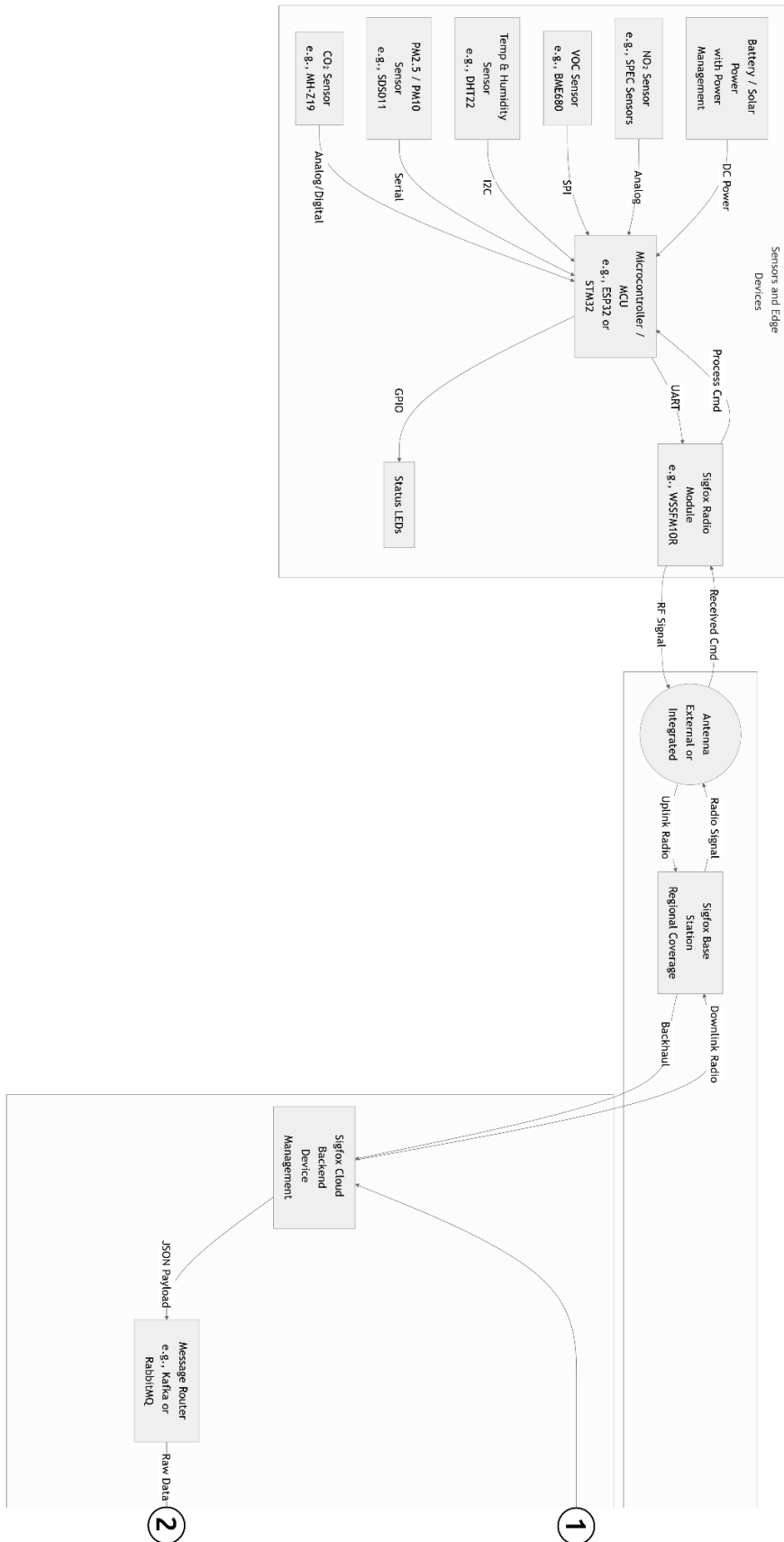


Рисунок В.1 – Алгоритм визначення джерел сигналу з мінімальним впливом

## ДОДАТОК Г РОЗШИРЕНА PFD-ДІАГРАМА



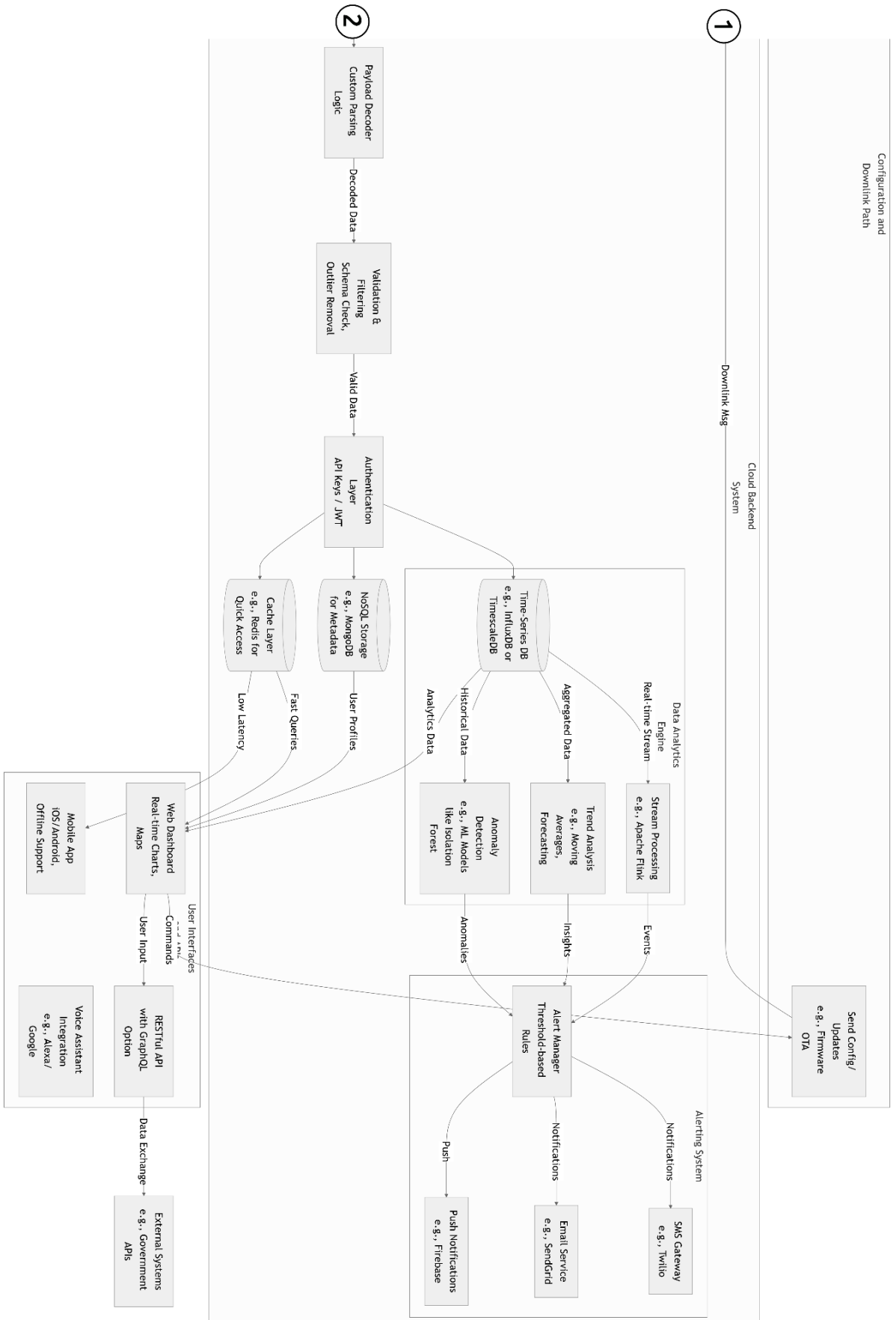


Рисунок Г.1 – Розширена PFD-діаграма

**ДОДАТОК Д**  
**АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**У ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор ТОВ «ПРОМАВТОМАТИКА  
Вінниця»

\_\_\_\_\_ Михайло ГАНЧУК

«ПРОМАВТОМАТИКА» 2025 р.

**АКТ**

**про впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**«Інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проєктування**  
**IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних**  
**факторів»,**  
**Гончаренка Дмитра Валерійовича**

Цей акт підтверджує, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Гончаренка Д. В. рекомендовані до впровадження у практичну діяльність під час створення та використання IoT-системи моніторингу стану водних ресурсів. Зокрема цінними є наступні отримані результати дослідження Гончаренка Д. В.:

- Прототип IoT-пристрою моніторингу стану вод на базі мережі Sigfox із сенсорними вузлами, який забезпечує збирання та передавання екологічних параметрів у реальному часі.

- Технологія визначення оптимальних місць розташування датчиків, яка враховує просторові та техногенні фактори середовища і забезпечує більш повний та точний екологічний моніторинг.

Директор



\_\_\_\_\_ Михайло ГАНЧУК

Технічний директор

\_\_\_\_\_ Олександр КРАВЕЦЬ

Директор з розвитку

\_\_\_\_\_ Сергій АНДРОЩУК

**ДОДАТОК Е**  
**АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС**  
**ВНТУ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з науково-педагогічної роботи та організації освітнього процесу Вінницького національного технічного університету



доц. Олександр ПЕТРОВ

Вересень 2025 р.

**АКТ**

**про впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**Гончаренка Дмитра Валерійовича**

**«Інтелектуальна інформаційна технологія оптимального проєктування IoT-систем на основі LPWAN з урахуванням просторових й техногенних факторів», представлена до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології, в навчальному процесі**

Комісія Вінницького національного технічного університету у складі:

голова комісії – декан Факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації (ФІТА), к.т.н, доцент Севастьянов В. М. та члени комісії – заступник декана з навчально-методичної роботи ФІТА, ст. викладач каф. САІТ Присяжнюк В. В., заступник завідувача кафедри системного аналізу та інформаційних технологій (САІТ) ФІТА, к.т.н., доцент Крижановський Є. М., склала цей акт про підтвердження того, що дійсно у Вінницькому національному технічному університеті під час викладання дисципліни «Інтернет речей та інтелектуальний аналіз даних» для аспірантів, які навчаються за освітньою програмою «Інформаційні системи та технології» рівня «доктора філософії» цієї ж спеціальності 126 впроваджено результати дисертаційної роботи на здобуття доктора філософії аспіранта кафедри САІТ Гончаренка Дмитра Валерійовича у ряді лекцій та лабораторних робіт з питань інформаційних технологій.

При викладанні цих дисциплін використовуються такі результати досліджень, отримані у дисертаційній роботі Гончаренка Д. В.:

- удосконалений метод багатокритеріального вибору LPWAN-технологій та IoT-платформ, який забезпечує формування оптимальної мережевої архітектури систем з урахуванням техніко-економічних та просторових факторів;

- метод просторової оптимізації розміщення давачів і базових станцій із використанням геоінформаційних даних, супутникових знімків та апарату нечіткої логіки;

- метод автоматизованого генерування технологічних PFD-діаграм із текстових описів компонентів системи за допомогою великих мовних моделей, що забезпечує швидке створення архітектурних схем IoT-систем;

Використання зазначених результатів дозволило підвищити якість навчального процесу із згаданих дисциплін.

Голова комісії

 Володимир СЕВАСТЬЯНОВ

Члени комісії

 Василь ПРИСЯЖНЮК

 Євгеній КРИЖАНОВСЬКИЙ