**Міністерство освіти і науки України**
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету )
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій

Виконав: студент VI курсу, групи КТм-61

спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Максимів Д.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Федчак В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Микитишин А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Чихіра І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____ Шовкун О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«_____» листопада 2025 р.__

# ЗАВДАННЯ
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Максиміву Дмитру Романовичу Федчаку Віталію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій

Керівник роботи Миктишин Андрій Григорович, к.т.н., доц. кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 12 » листопада 2025 року № 4/7-962

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про комплекси оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій

4. Зміст роботи
Вступ. 1 Аналітична частина, 1.1 Актуальність оптимізації енергоспоживання, 1.2 Нормативно-стандартизаційні орієнтири, 1.3 Концепція SBEMS/SBA та роль IoT 1.4 Архітектурні підходи до ПАК 1.5 Комунікаційні технології, протоколи, кібербезпека 1.6 Висновок до першого розділу, 2 Технологічна частина, 2.1 Технологічна концепція та архітектура ПАК 2.2 Польовий рівень 2.3 Комунікаційний рівень 2.4 Серверний рівень, 2.5 Модель даних і семантична інтероперабельність 2.6 Модель Аналітика, KPI, формування рекомендацій, 2.7 Інтерфейс користувача, ролі, API 2.8 Інтеграція з інструментами симуляції 2.9 Безпека і надійність 2.10 Висновок до другого розділу, 3 Конструкторська частина, 3.1 Вимоги до конструкції ПАК 3.2 Структура апаратних модулів: RDAU, DC та DH 3.3 Проєктування вузла RDAU, 3.4 Конструкція концентратора DC, Data Hub (DH) та центрального вузла, 3.5 Конструктивні та експлуатаційні вимоги 3.6 Виконавчі пристрої та інтеграція з системами, 3.7 Прототипування, оцінка, масштабування, 3.8 Висновок до третього Розділу, 4 Науково дослідна частина, 4.1 План дослідження та постановка експерименту, 4.2 KPI та методики оптимізації 4.3 Обробка даних, статистичний аналіз та якість вимірювань 4.4 Оцінка енергоефективних заходів і сценаріїв 4.5 Висновок до четвертого розділу, 5 Спеціальна частина, 5.1 Дослідження та оцінка ефективності системи, 5.2 Збір даних та підготовка вибірки, валідація 5.3 Метрики оцінювання, сценарії, KPI 5.4 Висновок до 5 розділу системи в процеси управління 5.4 Висновок до п'ятого розділу. 6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях,6.1 Питання щодо охорони праці, 6.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях, Висновки, Перелік джерел, Додатки. 5. Перелік графічного матеріалу 1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження. 4 Актуальність дослідження. 5 Класифікація втрат енергії та Типова архітектура IoT 6 Архітектура та топологія збору даних. 7 Топологія мережі. 8 Схема DC як шлюзу. 9 Компонування вузлів. 10 Експериментальний стенд. 11 Дашборд платформи. 12 Результати аналізу енергоспоживання. 13 Аналіз теплового балансу. 14 Енергетичні та теплові характеристики 15 Порівняльний аналіз енергоспоживання. 16 Висновки. 17 Завершальний.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці | доц. Тотосько О.В. | | |
| Безпека в надзвичайних ситуаціях | асист. каф. ОХ Теслюк В.М. | | |

7. Дата видачі завдання 12 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1. | Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи | 29.11.2024 | *Виконано* |
| 2. | Підбір джерел про системи моніторингу | 30.11.2025-01.12.2025 | *Виконано* |
| 3. | Вибір компонентної бази | 02.12.2025-03.12.2025 | *Виконано* |
| 4. | Виконання дослідження автоматизованої системи | 04.12.2025-05.12.2025 | *Виконано* |
| 5. | Переклад та опрацювання джерел | 06.12.2025-07.12.2025 | *Виконано* |
| 6. | Розроблення архітектури системи | 08.12.2025-09.12.2025 | *Виконано* |
| 7. | Розроблення панелі керування системи | 10.12.2025-11.12.2025 | *Виконано* |
| 8. | Оформлення розділу «Аналітична частина» | 12.12.2025-13.12.2025 | *Виконано* |
| 9. | Оформлення розділу «Конструкторська частина» | 13.12.2025-14.12.2025 | *Виконано* |
| 10. | Оформлення розділу «Науково дослідна частина» | 14.12.2025-15.12.2025 | *Виконано* |
| 11. | Оформлення розділу «Технологічна частина» | 15.12.2025-16.12.2025 | *Виконано* |
| 12. | Оформлення розділу «Спеціальна частина» | 16.12.2025-17.12.2025 | *Виконано* |
| 13. | Виконання розділу «Охорона праці та безпека в НС» | 17.12.2025-18.12.2025 | *Виконано* |
| 14 | Підготовка графічного матеріалу | 18.12.2025-19.12.2025 | *Виконано* |
| 15. | Оформлення кваліфікаційної роботи | 19.12.2025-20.12.2025 | *Виконано* |
| 16. | Нормоконтроль | 20.12.2025-21.12.2025 | *Виконано* |
| 17. | Перевірка на плагіат | 20.12.2025 | *Виконано* |
| 18. | Попередній захист кваліфікаційної роботи | 21.12.2025 | *Виконано* |
| 19 | Захист кваліфікаційної роботи | 22.12.2025 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент _____ Максимів Д.Р.

Студент _____ Федчак В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Микитишин А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

# АНОТАЦІЯ

Розробка програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Максимів Дмитро Романович, Федчак Віталій Ігорович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, група КТм-61 // Тернопіль, 2025 // С. 87, рис. – 9, табл. – 1, кресл. – 17, додат. – 5, бібліогр. – 52.

***Ключові слова:*** IoT, програмно-апаратний комплекс, моніторинг, енергоспоживання, телеметрія, аналіз даних.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT.

В першому розділі розглянуто сучасні підходи до енергоменеджменту будівель та проаналізовано методи оптимізації енергоспоживання.

В другому розділі досліджено архітектуру, технологічні засади побудови платформи ПАК, засоби збору, передавання й обробки даних.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано конструктивні та апаратні рішення програмно-апаратного комплексу.

В четвертому розділі наведено методики аналізу даних, формування KPI та оцінювання ефективності енергоефективних заходів.

В п'ятому розділі подано результати експериментальних досліджень і практичної перевірки працездатності системи.

В шостому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто забезпечення безпечної роботи з обладнанням.

Об'єкт дослідження: процеси енергоспоживання будівель та системи їх моніторингу й керування з використанням інформаційно-комунікаційних та IoT-технологій.

Предмет дослідження: методи, моделі та програмно-апаратні засоби збору, обробки й аналізу даних для оптимізації енергоспоживання в будівлях на основі IoT-технологій.

# ANNOTATION

Development and research of an automated monitoring and control system for energy consumption in premises using IoT technologies // The educational level "Master" qualification work // Maksymiv Dmytro Romanovych, Fedchak Vitalii Ihorovych // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Department of Computer-Integrated Technologies, KTm-61 group // Ternopil, 2025 // P. 87, fig. - 9, tables - 1, chair. - 17, annexes - 5, ref. - 52.

***Key words:*** IoT, software and hardware complex, monitoring, energy consumption, telemetry, data analysis.

The qualification work is devoted to the development of an automated system for monitoring and controlling energy consumption in premises using IoT technologies.

The first chapter examines modern approaches to building energy management and analyses methods for optimising energy consumption.

The second chapter of the thesis explores the architecture and technological foundations of the PAC platform, data collection, transmission and processing.

The third chapter of the thesis describes the design and hardware solutions of the software and hardware complex.

The fourth chapter presents methods for data analysis, KPI formation, and evaluation of the effectiveness of energy efficiency measures.

The fifth chapter presents the results of experimental research and practical testing of the system's performance.

The sixth chapter of the thesis examines tsafety of working with the equipment.

Object of research: energy consumption processes in buildings and systems for their monitoring and control using information and communication and IoT technologies.

Subject of research: methods, models, and software and hardware tools for collecting, processing, and analysing data to optimise energy consumption in buildings based on IoT technologies.

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

API (англ. Application Programming Interface) – програмний інтерфейс взаємодії програмних компонентів.

BACnet (англ. Building Automation and Control Network) – протокол автоматизації та керування будівлями.

BMS (англ. Building Management System) – система диспетчеризації та керування інженерними системами будівлі.

$CO_2$ – концентрація діоксиду вуглецю в повітрі.

DC (англ. Data Concentrator) – концентратор даних, проміжний вузол агрегації телеметрії.

DH (англ. Data Hub) – центральний вузол збору, обробки та зберігання даних.

EnB (англ. Energy Baseline) – енергетична базова лінія.

EnPI (англ. Energy Performance Indicator) – показник енергетичної ефективності.

HVAC (англ. Heating, Ventilation and Air Conditioning) – системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

IoT (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

IPMVP (англ. International Performance Measurement and Verification Protocol) – міжнародний протокол вимірювання та верифікації енергетичних заощаджень.

KPI (англ. Key Performance Indicator) – ключовий показник ефективності.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

MPC (англ. Model Predictive Control) – прогнозне керування на основі моделі.

MQTT (англ. Message Queuing Telemetry Transport) – легкий протокол обміну повідомленнями для IoT.

ПАК – програмно-апаратний комплекс.

# ЗМІСТ

ВСТУП ..... 7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА ..... 10
1.1 Актуальність оптимізації енергоспоживання ..... 10
1.2 Нормативно-стандартизаційні орієнтири ..... 11
1.3 Концепція SBEMS/SBA та роль IoT ..... 12
1.4 Архітектурні підходи до ПАК ..... 13
1.5 Комунікаційні технології, протоколи, кібербезпека ..... 14
1.6 Висновок до першого розділу ..... 15
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ..... 16
2.1 Технологічна концепція та архітектура ПАК ..... 16
2.2 Польовий рівень ..... 20
2.3 Комунікаційний рівень ..... 21
2.4 Серверний рівень ..... 24
2.5 Модель даних і семантична інтероперабельність ..... 26
2.6 Модель Аналітика, KPI, формування рекомендацій ..... 27
2.7 Інтерфейс користувача, ролі, API ..... 28
2.8 Інтеграція з інструментами симуляції ..... 29
2.9 Безпека і надійність ..... 30
2.10 Висновок до другого розділу ..... 32
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА ..... 33
3.1 Вимоги до конструкції ПАК ..... 33
3.2 Структура апаратних модулів: RDAU, DC та DH ..... 34
3.3 Проєктування вузла RDAU ..... 36
3.4 Конструкція концентратора DC, Data Hub (DH) та центрального вузла ..... 39
3.5 Конструктивні та експлуатаційні вимоги ..... 40
3.6 Виконавчі пристрої та інтеграція з системами ..... 41
3.7 Прототипування, оцінка, масштабування ..... 43
3.8 Висновок до третього розділу ..... 45

4 НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА ..... 46
4.1 План дослідження та постановка експерименту ..... 46
4.2 KPI та методики оптимізації ..... 47
4.3 Обробка даних, статистичний аналіз та якость вимірювань ..... 51
4.4 Оцінка енергоефективних заходів і сценаріїв ..... 52
4.5 Висновок до четвертого розділу ..... 54
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА ..... 56
5.1 Дослідження та оцінка ефективності системи ..... 56
5.2 Збір даних та підготовка вибірки, валідація ..... 57
5.3 Метрики оцінювання, сценарії, KPI ..... 59
5.4 Висновок до п’ятого розділу ..... 61
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..... 62
6.1 Питання щодо охорони праці ..... 62
6.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях ..... 64
6.3 Висновки до шостого розділу ..... 68
ВИСНОВКИ ..... 69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ..... 72
ДОДАТКИ

# ВСТУП

**Актуальність теми.** Підвищення енергоефективності будівель є одним із ключових напрямів зменшення експлуатаційних витрат і досягнення цільових показників сталого розвитку, особливо для об’єктів із великою площею та змінним режимом використання (освітні установи, офіси, громадські будівлі). У практичній експлуатації суттєвою проблемою залишається фрагментованість інженерних підсистем (HVAC, освітлення, електроспоживання, контроль доступу) та висока частка ручного налаштування, що ускладнює керування й знижує швидкість прийняття рішень. У сучасних підходах акцент робиться на інтеграції підсистем в єдине середовище моніторингу та керування, де аналіз великих масивів даних дозволяє зменшувати енергетичні втрати без деградації комфорту користувачів. Перехід до IoT-орієнтованих платформ енергоменеджменту вимагає не лише збирання телеметрії, а й побудови масштабованої архітектури, здатної підтримувати різні канали зв’язку та типи кінцевих пристроїв. Показовим є підхід багатошарової архітектури, де окремо виділяються: (1) рівень польових пристроїв і сенсорів; (2) рівень протоколів/комунікацій; (3) серверний рівень моніторингу, зберігання та аналізу даних, який надає сервісні функції для вузлів мережі.

Додатково, для реальних впроваджень критичними є вимоги кіберзахисту, оскільки управлінські платформи повинні протидіяти несанкціонованому доступу та атакам на доступність (зокрема DoS), реалізуючи механізми контролю дій, розмежування прав доступу та технічні обмеження для підключення пристроїв.

Практична доцільність розробки програмно-апаратного комплексу також підтверджується тим, що комплексний підхід (моніторинг + аналітика + верифікація заходів) здатний давати вимірюваний ефект: у прикладному кейсі поєднання заходів з модернізації вікон та переходу на LED-освітлення забезпечило річну економію енергії на рівні 12.14% порівняно з базовим станом.

**Мета і задачі дослідження.** Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування програмно-апаратного комплексу на базі IoT-технологій для оптимізації енергоспоживання будівель, що забезпечує надійний збір телеметрії, її зберігання та аналітичну обробку, формування керуючих впливів/рекомендацій, а також оцінку ефекту енергоефективних заходів за KPI та/або імітаційного моделювання. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

– Дослідити сучасні методи управління мікромережами з IoT.

– Проаналізувати сучасні підходи до побудови систем енергоменеджменту «розумних будівель» та визначити вимоги до інтеграції інженерних підсистем в єдину платформу.

– Сформувати функціональні та нефункціональні вимоги до комплексу, включно з вимогами до кіберстійкості, керування доступом і відмовостійкості мережі.

– Спроєктувати багатошарову архітектуру комплексу (рівень пристроїв — рівень комунікацій — серверний рівень аналітики/зберігання/візуалізації) та обґрунтувати вибір протоколів і топології.

– Розробити концепцію підсистеми збору даних (точки вимірювання, частоти опитування, маршрутизація/концентрація даних) та підсистеми зберігання і доступу з розмежуванням привілеїв.

– Сформувати підхід оцінювання ефективності на основі KPI, реалізувати логіку індикаторів для користувачів і відповідальних осіб.

– Інтегрувати (на рівні методики або прототипу) інструменти імітаційного моделювання будівлі для верифікації заходів енергоефективності та аналізу сценаріїв керування (зокрема на базі DesignBuilder).

– Обґрунтувати та апробувати алгоритм(и) оптимізації енергоспоживання й оцінити ефект заходів на прикладному сценарії за енергетичними метриками.

– Запропонувати базовий набір технічних заходів кіберзахисту та забезпечення доступності сервісів (включно з протидією DoS та контролем підключення пристроїв).

**Об’єкт дослідження** процеси енергоспоживання та керування інженерними системами будівлі в умовах застосування IoT-засобів моніторингу й автоматизації.

**Предмет дослідження** методи, моделі й технічні рішення побудови програмно-апаратного комплексу, що забезпечують оптимізацію енергоспоживання при збереженні комфорту й керованості.

**Наукова новизна одержаних результатів** роботи полягає в обґрунтуванні узгодженої моделі розробки програмно-апаратного комплексу для будівельного енергоменеджменту, де поєднано: (1) багатошарову IoT-архітектуру з урахуванням різнорідних протоколів; (2) оцінювання результативності через KPI та звітність; (3) верифікацію енергоефективних заходів через інтеграцію інструментів моделювання; (4) базові механізми кіберстійкості з розмежуванням доступу та заходами проти атак на доступність.

**Практичне значення одержаних результатів.** Полягає у формуванні проєктних рішень і рекомендацій щодо впровадження програмно-апаратного комплексу, який забезпечує централізований збір, візуалізацію даних сенсорних вузлів і лічильників, підтримує керовані політики доступу та дозволяє оцінювати ефект енергоефективних заходів на основі KPI та порівняння сценаріїв.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні результати проведених досліджень обговорювались на XIV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025 р.).

**Публікації.** Основні результати кваліфікаційної роботи опубліковано у конференції (Див. додаток А).

**Структура й обсяг кваліфікаційної роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків, списку літератури з 52 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 87 сторінки, з них 78 сторінки основного тексту, який містить 9 рисунків та 1 таблицю.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Оптимізація енергоспоживання в будівлях стала однією з ключових інженерних і управлінських задач, оскільки експлуатаційна фаза будівель формує значну частку сукупного споживання енергії та пов’язаних витрат. Сучасний тренд розвитку «розумних» будівель полягає у переході від локальних, фрагментарних засобів обліку до комплексних програмно-апаратних платформ, які поєднують сенсори, «розумні» лічильники, захищений обмін даними та алгоритми аналітики для підтримки рішень і автоматизованого керування [1]. У межах цього розділу здійснюється аналітичний огляд предметної області та формуються вимоги до програмно-апаратного комплексу оптимізації енергоспоживання на базі IoT-технологій, з урахуванням нормативних орієнтирів, архітектурних підходів, протоколів взаємодії та вимог кібербезпеки [1].

## 1.1 Актуальність оптимізації енергоспоживання

Будівельний фонд у багатьох країнах характеризується високою енергоємністю, зумовленою фізичним старінням огороджувальних конструкцій, застарілими інженерними системами, відсутністю якісного моніторингу та низькими темпами термомодернізації. Для ЄС у наукових та політичних документах часто підкреслюється, що «традиційні» будівлі формують суттєву частку загального енергоспоживання та пов’язаних з енергетикою викидів, а значний відсоток будівель зведено до 2000 року, що пояснює системний потенціал енергозаощадження [1].

На рівні політик ЄС принцип energy efficiency first закріплюється як базовий, а енергоефективність розглядається не лише як технічна модернізація, а як обов’язковий елемент планування та інвестиційних рішень. Це напряму стимулює розвиток інструментів вимірювання, верифікації та керування енергоспоживанням у будівлях, включно з цифровими платформами, які забезпечують прозорість даних і керованість споживання [3]. (EUR-Lex)

Практичну цінність комплексного підходу демонструють і результати впроваджень: зокрема, у кейсі платформи BENEFIT після року експлуатації було сформовано план заходів, а реалізація двох з них (покращення віконної ізоляції та модернізація освітлення) дала 12,14% зниження сумарного енергоспоживання будівлі [1].

Для аналізу причин підвищеного енергоспоживання в будівлях доцільно виконати систематизацію основних джерел енергетичних втрат та факторів неефективності, що виникають як на рівні огороджувальних конструкцій, так і в процесі експлуатації інженерних систем та поведінки користувачів. З цією метою наведено рисунок 1.1, який узагальнює ключові групи факторів та їх вплив на загальний енергетичний баланс будівлі.

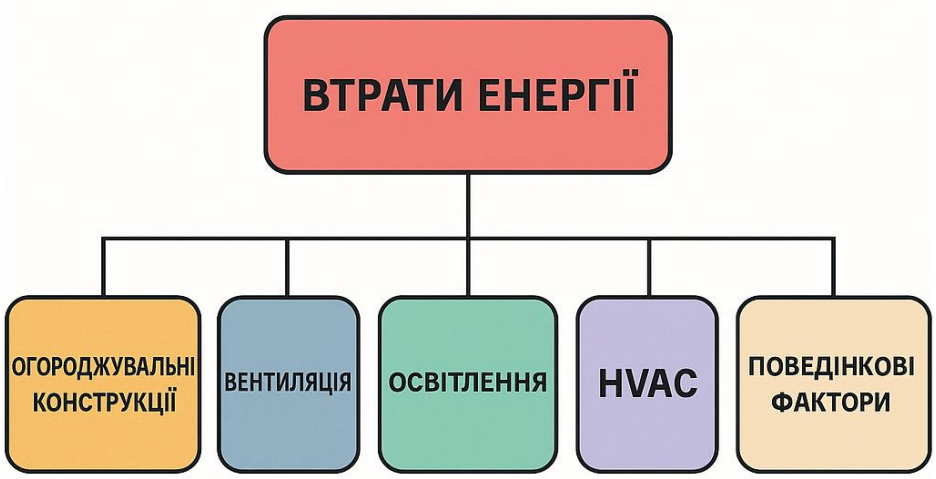



Рисунок 1.1 – Класифікація втрат енергії та джерел неефективності

## 1.2 Нормативно-стандартизаційні орієнтири

Для формування вимог до програмно-апаратного комплексу доцільно узгоджувати технічні рішення з нормативними рамками енергоефективності. У ЄС енергетичні характеристики будівель регулюються, зокрема, Директивою 2010/31/EU (EPBD), яка визначає загальні принципи підвищення енергетичної ефективності будівель та інструменти їх реалізації [2].

Додатково, оновлена Директива (EU) 2023/1791 з енергоефективності (recast) підвищує цільові показники та надає принципу energy efficiency first

юридичного статусу, вимагаючи інтеграції енергоефективності у політики та інвестиції держав-членів [3]. Саме така «правова рамка» підсилює потребу у системах, які здатні не тільки збирати показники, але й формувати доказову базу ефективності заходів, моделювати сценарії та підтримувати рішення відповідальних осіб [1], [3].

На рівні організаційного енергоменеджменту важливим орієнтиром є стандарт ISO 50001:2018, який задає цикл безперервного поліпшення енергетичних показників і вимагає системності у вимірюванні, аналізі та управлінні енергією [4]. Для IoT-платформи це означає, що дані моніторингу мають бути простежуваними, якісними, придатними до порівняння в часі, а аналітика — підпорядкованою логіці енергетичних цілей і показників [4].

### 1.3 Концепція SBEMS/SBA та роль IoT

Сучасні Smart Building Energy Management Systems (SBEMS) еволюціонують від «облікових» систем до інтелектуальних платформ, що інтегрують AMI, мережі сенсорів, AI/ML, цифрові двійники, edge/cloud-обчислення і BIM як джерела та споживачі даних [1].

Ключова ідея SBEMS полягає в тому, що керування енергією має ґрунтуватися на реальних даних про температуру, зайнятість, споживання, стан обладнання та зовнішні умови, а також забезпечувати автоматизоване налаштування HVAC, освітлення й інших систем для поєднання енергоефективності та комфорту [1]. У практичній площині SBEMS логічно пов’язується зі smart building automation (SBA) як мережевою інфраструктурою датчиків, контролерів та ПЗ для моніторингу і керування середовищем будівлі [1].

Окремо важливий висновок аналітичного огляду стану досліджень полягає у тому, що значна частина існуючих робіт і прототипів концентрується на зборі та аналізі даних, але часто недооцінює питання безпеки даних, використання професійних інструментів сценарного аналізу та «зв’язку» рекомендацій з KPI, що ускладнює впровадження у реальних об’єктах [1].

### 1.4 Архітектурні підходи до ПАК

Для практичної реалізації енергоменеджменту в будівлі доцільною є багаторівнева архітектура, де рівні розділяють функції польового збору даних, передачі/агрегації та серверної аналітики. Як приклад, у платформі BENEFIT використано дві системи збору даних: мережу smart-сенсорів і мережу smart-лічильників, інформація з яких агрегується через концентратори зони та централізовано зводиться у data hub із подальшим збереженням у базі даних (MySQL) для обробки та представлення користувачу [1].

Важливо, що багаторівнева модель дозволяє:

- рознести критичні функції (польові вимірювання, транспорт, серверна логіка) та ізолювати домени ризику;
- забезпечити масштабованість (додавання сенсорів та зон);
- стандартизувати інтерфейси взаємодії між рівнями, що полегшує інтеграцію з наявними комерційними системами та дає підстави для подальшого розвитку.

У BENEFIT описано трирівневу структуру: (1) пристрої та компоненти мережі керування, (2) протоколи зв’язку для обміну даними, (3) серверний рівень моніторингу/зберігання/аналітики, який надає сервісні функції мережевим пристроям [1]. Для узагальнення принципів побудови систем моніторингу та керування енергоспоживанням у будівлях на основі IoT наведено рисунок 1.2, який відображає основні рівні обробки та передавання даних.

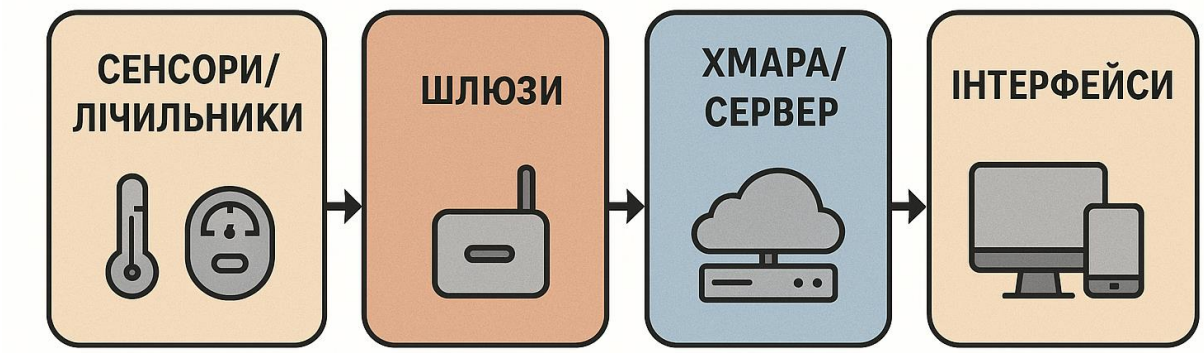



Рисунок 1.2 – Типова архітектура IoT-системи в будівлях

## 1.5 Комунікаційні технології, протоколи, кібербезпека

Транспорт даних у будівельних IoT-системах визначається топологією, енергобюджетом вузлів, необхідною дальністю, проникністю сигналу, вимогами до затримок та сумісністю з BMS/SCADA. У практичних реалізаціях можуть співіснувати ZigBee, LoRaWAN, Wi-Fi, GSM/GPRS та спеціалізовані протоколи сенсорних мереж [1].

Для інтеграції з професійною автоматизацією будівель критичною є підтримка стандартних протоколів і моделей даних. BACnet розглядається як один із базових протоколів будівельної автоматизації та енергоменеджменту, який застосовують для HVAC, освітлення, фізичного доступу та суміжних підсистем [7]. На рівні міжнародної стандартизації BACnet асоційований з ISO 16484-5, що підсилює аргументацію на користь інтероперабельності рішень [11]. (ashrae.org)

У контексті IP-орієнтованих сенсорних мереж перспективним підходом є використання 6LoWPAN для транспорту IPv6 поверх IEEE 802.15-мереж, що спрощує адресацію та взаємодію між виробниками і доменами систем [1].

Зростання «розумності» будівель прямо підвищує площину атак: платформа енергоменеджменту отримує доступ до критичних виконавчих контурів (HVAC, освітлення), зберігає історію споживання та може впливати на режими роботи обладнання. Тому захист від кіберінцидентів має бути закладений в архітектуру як функціональна вимога. У BENEFIT підкреслюється необхідність захисту від кібератак через контроль дій і призначення рівнів доступу користувачів для забезпечення цілісності, конфіденційності даних [1].

На рівні технічних механізмів у BENEFIT виділено, зокрема, використання унікальних MAC-адрес для мережевих пристроїв, апаратне кодування ключів із застосуванням AES-128 для обміну даними, а також жорстке регулювання доступу вузлів до RTU та концентраторів [1]. Такі рішення концептуально узгоджуються з підходами ISA/IEC 62443 (керування ризиками, сегментація, політики доступу та життєвий цикл захисту) [5] і

базовими кіберможливостями IoT-пристроїв за NISTIR 8259A (ідентифікація, конфігурація, захист даних, оновлення тощо) [6].

З практичної точки зору доцільно формувати модель загроз і мінімізувати типові вразливості IoT-екосистем відповідно до OWASP IoT Top 10 (наприклад, слабка автентифікація, незахищені мережеві сервіси, проблеми управління оновленнями) [8]. Це безпосередньо впливає на вимоги до комплексу: необхідність багаторівневого контролю доступу, журналювання подій, захищених каналів обміну, механізмів відновлення після збоїв і мінімізації наслідків DoS/мережевих перевантажень [1], [8].

## 1.6 Висновок до першого розділу

Аналітичний огляд підтверджує, що оптимізація енергоспоживання будівель є задачею, яка поєднує інженерні, інформаційні та організаційні аспекти, а IoT-орієнтований програмно-апаратний комплекс має забезпечувати не лише збір показників, а й їх перетворення на керовані дії через аналітику, KPI та сценарні оцінки [1].

На підставі розглянутих підходів обґрунтовано такі принципові вимоги до розроблюваного комплексу: (1) багаторівнева архітектура з чітким розділенням польового рівня, транспортного рівня і серверної аналітики; (2) інтероперабельність із будівельною автоматизацією через стандартизовані протоколи та моделі даних; (3) підтримка практично значущих функцій — моніторинг, управління, рекомендації та оцінка заходів енергоефективності; (4) «кібербезпека за замовчуванням», яка охоплює автентифікацію, керування доступом, шифрування, журналювання та стійкість до типових атак IoT [1], [5], [6], [8].

# 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Технологічна частина присвячена обґрунтуванню та опису технологій, архітектурних рішень і програмних механізмів, на яких базується програмно-апаратний комплекс оптимізації енергоспоживання будівель із використанням IoT. На відміну від аналітичної частини, де визначено проблематику, вимоги та загальні принципи побудови систем енергоменеджменту, у цьому розділі конкретизуються технічні компоненти: польовий рівень вимірювання, транспортний рівень обміну даними, серверна інфраструктура, моделі даних і семантична інтероперабельність, механізми аналітики та оптимізації, інтерфейси користувача і підсистеми безпеки. Як технологічну основу й еталонну референс-архітектуру використано підхід платформи BENEFIT, що поєднує мережі сенсорів і «розумних» лічильників, ієрархію RDAU/DC/DH, централізований Data Hub і серверний рівень обробки та візуалізації [1]. Додатково враховано сучасні мережеві стандарти й протоколи (MQTT, CoAP, TLS/DTLS), практики формування семантики даних (Brick, Project Haystack), а також підходи до захищеної експлуатації IoT-систем на основі галузевих рекомендацій і стандартів [5], [6], [8], [12]–[18].

## 2.1 Технологічна концепція та архітектура ПАК

Цільовий програмно-апаратний комплекс (ПАК) для оптимізації енергоспоживання в будівлях доцільно трактувати як інтегровану кіберфізичну систему, що реалізує повний цикл роботи з енергетичними даними: від вимірювання та збору (сенсори, лічильники, RDAU), через передачу та агрегування (локальні шлюзи, концентратори, Data Hub), до зберігання, аналізу, прогнозування, формування рекомендацій і автоматизованого впливу на виконавчі підсистеми (HVAC, освітлення, вентиляція, локальні контролери). Така концепція відповідає сучасному баченню SBEMS/SBA, де система повинна забезпечувати моніторинг параметрів, доступність даних для

користувачів і відповідальних осіб та формувати керовані дії, спрямовані на підвищення енергоефективності без деградації комфорту [1].

Критичним технологічним принципом є багаторівнева (multilayer) архітектура. У моделі BENEFIT вона реалізована як: польовий рівень пристроїв і сенсорів; рівень протоколів і мережевого обміну; серверний рівень моніторингу, зберігання й аналітики [1]. Саме цей принцип перенесено в проєктований ПАК, оскільки він забезпечує масштабованість (нарощування кількості точок вимірювання та зон), керованість змін (додавання нових пристроїв без перебудови всієї системи), можливість незалежного оновлення компонентів (наприклад, заміна протоколу «польового» зв’язку без зміни серверної аналітики), а також підвищує кіберстійкість за рахунок сегментації та розділення контурів довіри [5], [6].

Для практичної реалізації концепції оптимізації енергоспоживання ПАК має підтримувати щонайменше три класи сценаріїв:

1. сценарії «прозорості» — надання користувачу/енергоменеджеру верифікованих даних про споживання та умови експлуатації в режимі реального часу і в історичних зрізах [1];
2. сценарії «підтримки рішень» — формування KPI та рекомендацій щодо короткострокових дій (налаштування режимів) і довгострокових заходів (термомодернізація, заміна освітлення, корекція графіків) [1];
3. сценарії «керування» — передача команд до виконавчих підсистем (через контролери/шлюзи/інтеграційні інтерфейси), що переводить систему від пасивного моніторингу до активного енергоменеджменту.

Для забезпечення надійного та масштабованого збору телеметричних даних у будівлях використовується ієрархічна архітектура системи збору даних, що поєднує польові вимірювальні вузли, проміжні концентратори та центральний вузол обробки. Така структура дозволяє реалізувати агрегацію, буферизацію та маршрутизацію даних, а також підвищити відмовостійкість системи в умовах нестабільних каналів зв’язку. Архітектура збору даних зображена на рисунку 2.1.

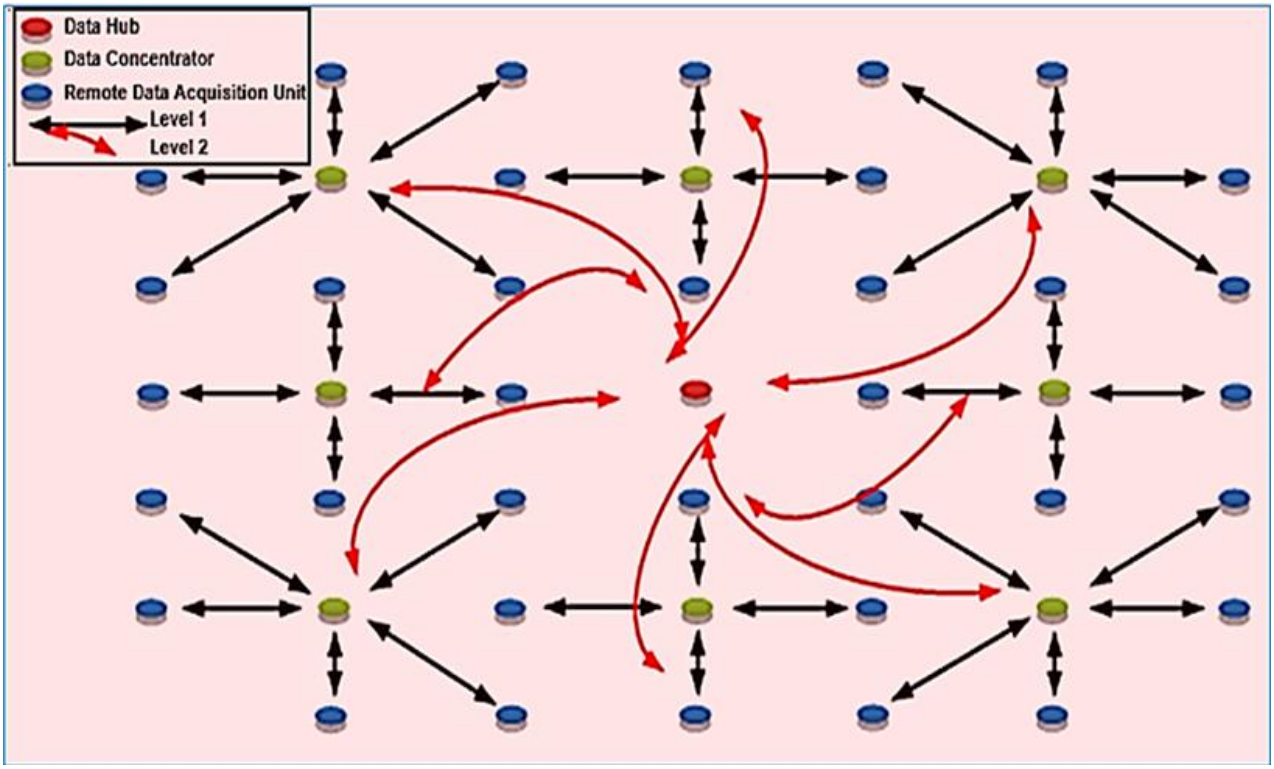



Рисунок 2.1 – Архітектура збору даних

Архітектура ПАК доцільно будується як ієрархічна розподілена система збору даних з локальною агрегацією та централізованою аналітикою. У референс-підході BENEFIT використано два контури збору даних — мережу сенсорів та мережу «розумних» лічильників, дані з яких збираються на рівні концентраторів зони і далі агрегуються в Data Hub, після чого надходять у СУБД (MySQL) та обробляються серверними сервісами [1]. Для проєктованого ПАК даний підхід узагальнюється до чотирьох логічних рівнів.

Перший рівень — польовий. До нього належать датчики мікроклімату (температура, відносна вологість, тиск, $CO_2$/TVOC — за потреби), датчики присутності/зайнятості, сенсори освітленості, а також енергетичні вимірювачі (електроенергія, тепло, у деяких об’єктах — генерація/накопичення). У BENEFIT підкреслено, що тип і розміщення вимірювань залежить від локацій та управлінської мети, визначеної decision-maker (DM) [1]. Цей факт є принципово важливим технологічно: система не повинна «нав’язувати» єдину схему точок, а має підтримувати конфігурованість, оскільки різні будівлі мають різну інженерну структуру, різні режими використання та різний рівень наявної автоматизації.

Другий рівень — рівень локальних вузлів збору (RDAU/RTU). У BENEFIT RDAU розглядаються як віддалені вузли збору, розподілені по будівлі, які передають дані локально на концентратори [1]. Для ПАК цей рівень виконує дві функції: уніфікація сенсорів (зведення різнорідних сигналів до стандартизованих телеметричних повідомлень) та локальна «передобробка» (фільтрація шуму, нормалізація, первинна валідація, буферизація при втраті зв’язку).

Третій рівень — рівень концентраторів (DC) та мережевої топології. У BENEFIT DC виконують роль вузлів 1-го рівня, які ретранслюють команди до RDAU та пересилають пакети даних до Data Hub [1]. Це природно відповідає зональному поділу будівлі: кожна зона (поверх, крило, технічна ділянка) має локальний концентратор, який виконує роль шлюзу між «польовою» мережею і магістральним каналом до серверного рівня.

Четвертий рівень — Data Hub і серверні сервіси. У BENEFIT DH відповідає за синхронізацію мережі, диспетчеризацію команд, збір даних і передачу на сервер керування [1]. Для ПАК DH має бути доповнений брокером повідомлень (для подієвої інтеграції), сервісами зберігання (операційна БД і TSDB), аналітичними сервісами та модулем інтерфейсу (SUI-HUB) для користувачів. Така декомпозиція підвищує модульність і дозволяє масштабувати критичні компоненти незалежно.

Для ілюстрації організації обміну інформацією між елементами програмно-апаратного комплексу наведено рисунок 2.2, який відображає ієрархічну структуру взаємодії вузлів збору, концентраторів і центрального вузла обробки даних.

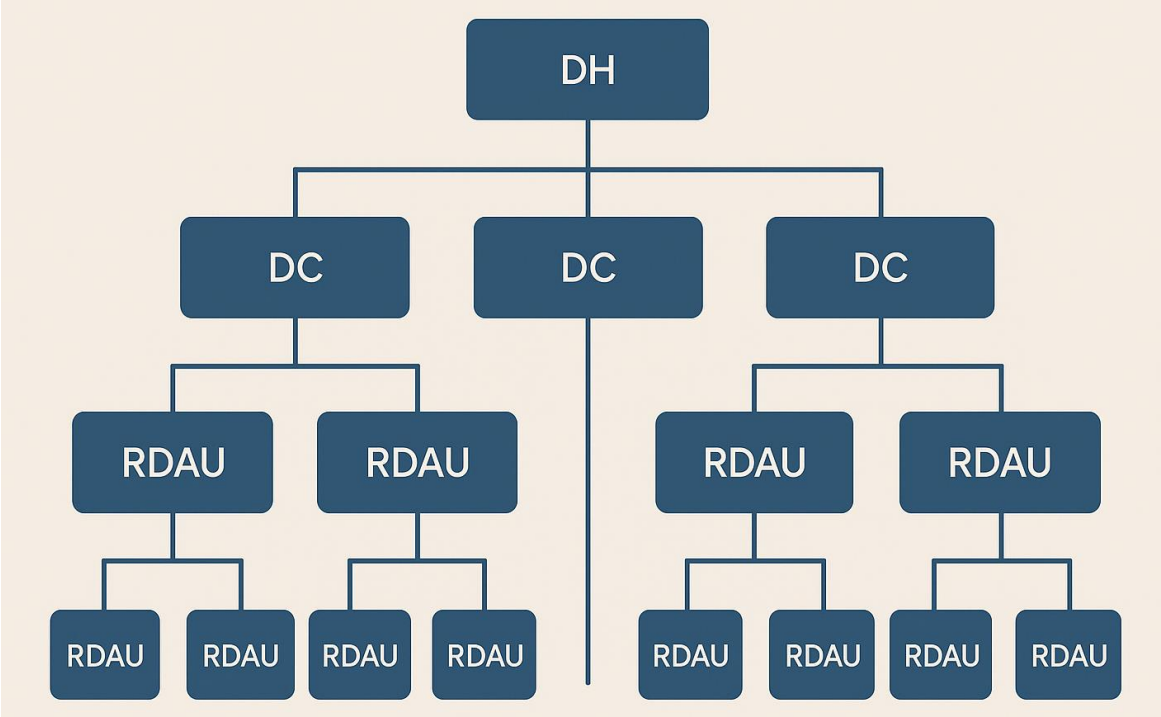



Рисунок 2.2 – Топологія мережі збору даних у будівлі

## 2.2 Польовий рівень

Польовий рівень ПАК визначає якість всієї системи, оскільки помилки вимірювання, відсутність стабільної телеметрії або некоректна дискретизація створюють хибні висновки в аналітиці й, як наслідок, некоректні управлінські рішення. У референс-системі BENEFIT наведено приклади параметрів, що вимірюються: температура, вологість, тиск; енергоспоживання через smart meters; параметри, які користувач може обирати через мобільний застосунок [1]. З технологічної точки зору це означає, що польовий рівень має підтримувати гетерогенність джерел і різні частоти дискретизації: кліматичні параметри часто достатньо вимірювати з періодом від 30 с до 5 хв, тоді як енергоспоживання (особливо для задач виявлення піків і оцінки якості керування) може потребувати інтервалів 1–15 с на ключових вузлах.

Практична реалізація польового рівня залежить від класу будівлі. У будівлях із наявною BMS доцільно використовувати протоколи інтеграції (BACnet/Modbus/KNX тощо), але у межах цього ПАК фокус робиться на IoT-підході: встановлення сенсорних вузлів і лічильників там, де дані відсутні або недоступні. Технологічно важливо, щоб RDAU могли працювати в умовах

енергетичних обмежень, мати режими сну та підтримувати «надійну телеметрію» — гарантовану доставку або буферизацію з повторною відправкою. Саме тому на наступному рівні критичним стає вибір транспортних протоколів та стратегії QoS.

## 2.3 Комунікаційний рівень

Розглянемо загальні вимоги до мережевого обміну.Комунікаційний рівень у ПАК має забезпечувати: низькі накладні витрати, стабільність у середовищах з перешкодами (бетон, металоконструкції), підтримку масштабування, прийнятні затримки для керуючих команд та безпеку передачі. У BENEFIT як приклади протоколів обміну наведено ZigBee, LoRaWAN, Wi-Fi, GSM/GPRS та спеціалізовані протоколи сенсорних мереж [1]. Це відображає практику: для будівлі може знадобитися комбінація технологій, де локальні сенсори працюють у малопотужній мережі, а магістральний канал до Data Hub використовує Ethernet/Wi-Fi/стільниковий зв’язок залежно від умов.

Топологічно доцільною є деревоподібна структура (tree-structured network), де RDAU під’єднані до найближчого DC, а DC забезпечує маршрут до DH, включно з резервуванням шляхів при відмовах [1]. Такий підхід безпосередньо впливає на технології адресації і маршрутизації, а також на механізми відновлення з’єднання. У BENEFIT підкреслюється, що правильне позиціонування RDAU та DC і наявність failover-механізмів забезпечують автоматичне відновлення після збоїв, а також зменшують енергоспоживання малопотужних вузлів, які мають залишатися в зоні покриття хоча б одного концентратора [1]. У ПАК це перетворюється на технологічну вимогу до планування мережі на етапі монтажу (радіопланування, тестування проникності сигналу, вимірювання SNR/Link quality).

**Протоколи прикладного рівня: MQTT і CoAP**

Для прикладного рівня телеметрії та команд у IoT-системах найбільш поширеними є MQTT і CoAP. MQTT (у сучасній версії 5.0) є легким publish/subscribe протоколом «клієнт–сервер», який проєктувався для M2M/IoT

сценаріїв та підтримує різні механізми якості доставки (QoS) [12]. Технологічна перевага MQTT у контексті ПАК полягає у природній подієвості: телеметрія публікується у теми, сервіси підписуються на теми, а брокер забезпечує маршрутизацію й ізоляцію виробників/споживачів даних. Для будівельного енергоменеджменту це зручно, оскільки різні підсистеми (збір, аналітика, візуалізація, алерти, архівація) можуть незалежно обробляти потік телеметрії без прямого зв’язування.

CoAP (RFC 7252) — UDP-орієнтований протокол передачі для обмежених вузлів і «втратних» мереж, який концептуально близький до HTTP-моделі, але має менший overhead і підтримує механізми, важливі для IoT (наприклад, роботу в constrained середовищах) [13]. У ПАК CoAP доцільний для сценаріїв, де потрібна проста REST-подібна взаємодія із сенсорами/контролерами, а також для локальних мереж з обмеженим ресурсом вузлів. На практиці можливий комбінований підхід: CoAP — на периметрі «сенсор ↔ шлюз», MQTT — у магістральному подієвому контурі між DH і серверними сервісами. Така комбінація дозволяє оптимізувати ресурси польових вузлів і водночас отримати сильну інтеграційну шину на серверному рівні [12], [13].

Для пояснення механізмів передавання даних і команд між компонентами програмно-апаратного комплексу наведено рисунок 2.3, який ілюструє розподіл протоколів за рівнями системи та напрямами інформаційних потоків.

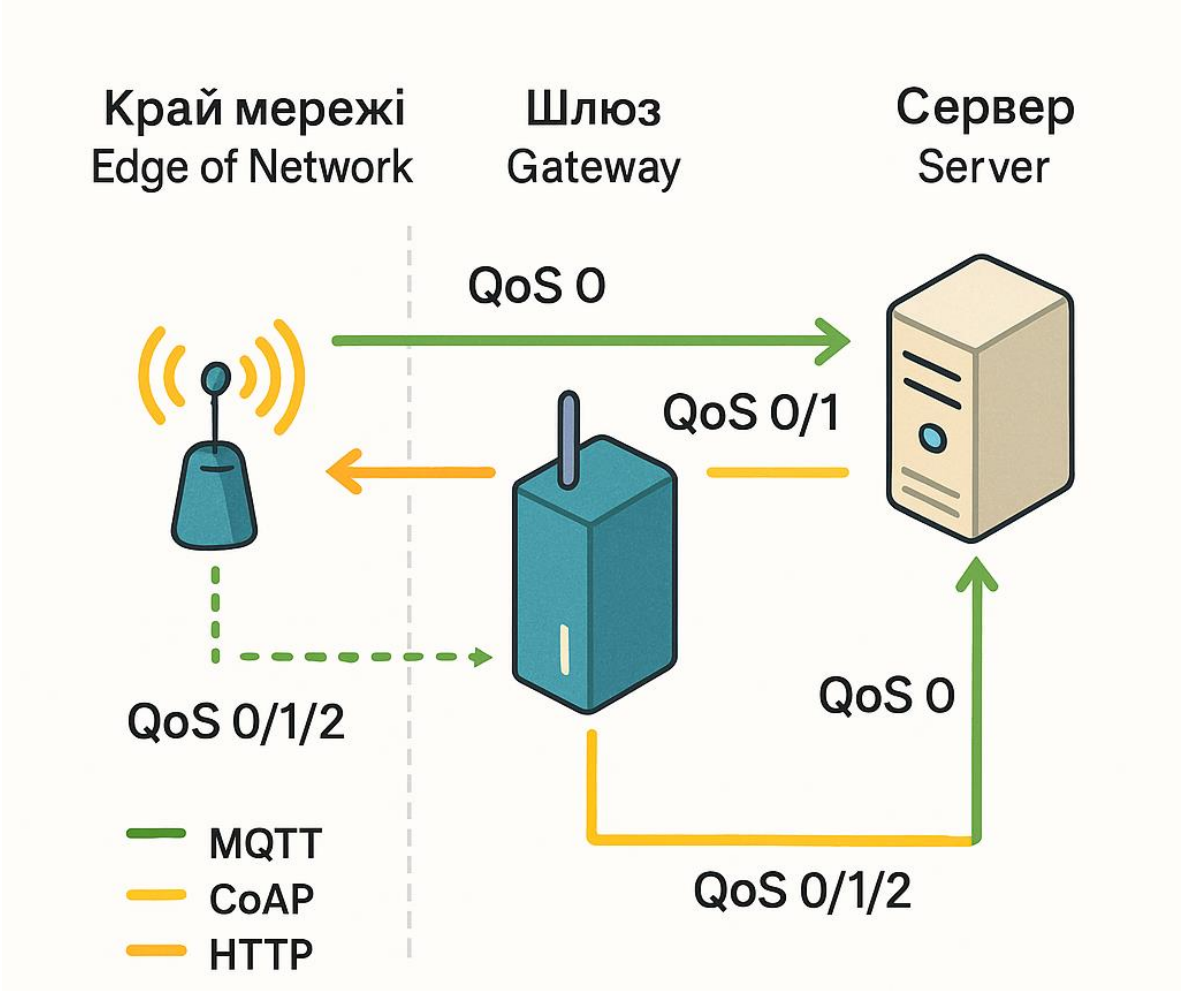



Рисунок 2.3 – Топологія мережі збору даних у будівлі

**Захищений транспорт: TLS і DTLS, а також OSCORE для CoAP**

Оскільки енергоменеджмент-платформа оперує критичними даними та потенційно керує виконавчими пристроями, захищений транспорт є обов'язковим. TLS 1.3 стандартизовано як сучасний протокол захисту клієнт-серверного обміну, орієнтований на протидію прослуховуванню, підміні та фальсифікації повідомлень [14]. Для UDP-сценаріїв використовується DTLS 1.3, який забезпечує аналогічні властивості захисту для датаграмних протоколів [15]. У ПАК TLS/DTLS застосовуються відповідно до вибраного прикладного протоколу: MQTT over TLS для магістральної телеметрії та команд, CoAP over DTLS для обмежених вузлів у польовій мережі.

У випадках, коли потрібен end-to-end захист на прикладному рівні при наявності проксі/шлюзів, доцільно застосовувати OSCORE (RFC 8613) — механізм об'єктного захисту для CoAP, який використовує COSE та забезпечує

наскрізний захист між кінцевими вузлами навіть при проміжних перетвореннях [16]. Технологічно це важливо для будівельних мереж, де концентратори та шлюзи можуть виконувати трансляцію протоколів або локальну агрегацію, але не повинні отримувати доступ до «чутливого» вмісту.

**Формати даних: JSON і CBOR**

Стандартизація формату телеметрії визначає сумісність і витрати на обробку. JSON (RFC 8259) є легким текстовим форматом обміну структурованими даними і добре підтримується практично в усіх мовах програмування, тому є природним вибором для API та інтеграційного рівня [24]. Для constrained вузлів або мереж, де критичний розмір повідомлень, доцільно застосовувати CBOR (RFC 8949) як компактний двійковий формат, який зберігає семантичну близькість до JSON-моделі, але істотно зменшує overhead [25]. У ПАК практично виправданим є підхід «CBOR на краю, JSON у центрі»: сенсори/шлюзи передають CBOR, Data Hub виконує декодування та нормалізацію до JSON або до внутрішньої моделі.

## 2.4 Серверний рівень

**Data Hub як технологічний «центр тяжіння»**

Data Hub у ПАК є точкою консолідації потоків телеметрії та команд. У BENEFIT DH виконує синхронізацію, розсилає команди DC/RDAU та збирає дані, після чого передає їх на сервер керування [1]. Для ПАК DH доцільно реалізувати як програмно-апаратний шлюзовий компонент, який включає: модулі підключення до польових протоколів, буферизацію, нормалізацію даних, локальну валідацію, а також публікацію подій у брокер повідомлень.

Ключовим технологічним рішенням є забезпечення «неперервності» даних при проблемах зв’язку. DH має мати локальний буфер (черга) і механізм повторної доставки, щоб при тимчасових збоях каналу не втрачати критичні часові ряди. Ця вимога узгоджується з логікою BENEFIT щодо стійкості мережі та автоматичного відновлення маршрутів при відмовах вузлів [1]. Результатом

стає підвищення якості даних для аналітики, особливо в частині KPI та порівняння «до/після» для заходів енергоефективності.

**Брокер повідомлень і подієва інтеграція**

При використанні MQTT брокер стає центральним компонентом подієвої інтеграції, що відділяє producers (сенсорні вузли, DH, інтеграційні шлюзи) від consumers (аналітичні сервіси, модуль візуалізації, алертинг, архівація). MQTT 5.0 технологічно підтримує необхідні механізми для масштабування IoT-сценаріїв, включно з розширеними властивостями повідомлень і більш гнучким керуванням сесіями [12]. Для енергоменеджменту це практично корисно, бо телеметрія може оброблятися різними сервісами паралельно: один сервіс агрегує дані до хвилинних/годинних значень, інший — виконує виявлення аномалій, третій — формує алерти, четвертий — обчислює KPI.

**Сховище: операційна БД та часові ряди**

У BENEFIT дані після агрегації в DH зберігаються у MySQL [1]. Реляційна БД є прийнятною для конфігураційних даних (користувачі, ролі, опис локацій, інвентар пристроїв, довідники KPI, політики доступу) і для агрегованих показників із помірною частотою. Водночас «сирі» сенсорні дані мають часовий характер і зазвичай швидко ростуть, що створює навантаження на традиційні реляційні підходи. Саме тому в сучасних IoT-платформах часто застосовують time-series database (TSDB) як окремий компонент сховища, оптимізований для time-stamped даних.

Питання вибору між реляційною БД та TSDB доцільно вирішувати гібридно: реляційна БД (наприклад, MySQL/PostgreSQL) для метаданих, конфігурації та агрегатів; TSDB для високочастотної телеметрії та довготривалого зберігання часових рядів. Практична доцільність TSDB для IoT підтверджується дослідженнями продуктивності, де порівнюються підходи різних СУБД на типових IoT-навантаженнях [19]. У ПАК це дозволяє реалізувати ефективні запити «за період», downsampling, retention policies і побудову панелей моніторингу без деградації швидкодії при зростанні кількості сенсорів.

## 2.5 Модель даних і семантична інтероперабельність

Однією з практичних проблем «розумних» будівель є те, що навіть при наявності великої кількості даних їх важко переносити між об’єктами та використовувати для повторно застосовних аналітичних модулів. Причина полягає у відсутності уніфікованої метамоделі: різні виробники і різні інженерні команди описують однакові сутності різними іменами, без формалізованих зв’язків «сенсор–підсистема–зона–обладнання». Для вирішення цього класу проблем у науковій та інженерній спільноті запропоновано схеми метаданих, зокрема Brick, що є уніфікованою онтологією для представлення сенсорів, підсистем і відношень у будівлях [17]. У контексті ПАК використання Brick (або сумісної семантичної моделі) забезпечує переносимість аналітики: алгоритм може «знати», що певний датчик є температурою у конкретній зоні, пов’язаний із контуром HVAC, і має використовуватися в обчисленні комфорту та енергоефективності.

Практичним доповненням до онтологічного підходу є Project Haystack, який стандартизує «семантичне тегування» даних будівельної автоматизації та IoT з метою полегшення пошуку й інтерпретації потоків даних прикладним ПЗ [18]. Для ПАК Haystack-подібні теги корисні як «легка семантика» для швидкого впровадження, тоді як Brick може застосовуватися в складніших сценаріях — побудова графа обладнання, автоматизоване формування дашбордів, уніфікована інтеграція додаткових сервісів.

Технологічно семантика реалізується як шар метаданих, який «накладається» на телеметрію. У ПАК це доцільно виконувати на серверному рівні: кожна точка вимірювання отримує унікальний ідентифікатор, прив’язку до локації, тип вимірювання, одиниці, частоту та набір семантичних міток (Haystack tags) або посилання на класи/відношення Brick. Далі ця інформація використовується аналітичними сервісами та UI. Таким чином, дані з різних сенсорів і лічильників стають інтероперабельними не тільки «технічно» (за форматом повідомлень), але й «змістовно» — за інтерпретацією.

## 2.6 Модель Аналітика, KPI, формування рекомендацій

Розглянемо підхід до аналітики в енергоменеджменті. Аналітична підсистема має перетворювати «сирі» дані на показники, які підтримують управлінські рішення. У BENEFIT прямо підкреслено, що платформа на запит decision-maker або мешканців надає звіти зі специфічними та загальними KPI, отриманими з аналізу даних [1]. У ПАК аналогічно виділяються три рівні аналітики: оперативна (моніторинг у реальному часі), тактична (KPI за періодами, порівняння режимів, виявлення аномалій), стратегічна (оцінка заходів енергоефективності, сценарні розрахунки, підтримка планування модернізації).

Оперативна аналітика реалізує панелі поточного стану: температура по зонах, поточна потужність/споживання, статуси обладнання, алерти. Тактична аналітика забезпечує агрегування, сезонні профілі, базові моделі нормалізації (наприклад, корекція від температури зовнішнього повітря), аналіз піків, а також обчислення KPI енергоефективності та комфорту. Стратегічна аналітика підключає інструменти моделювання будівлі, оцінку заходів (наприклад, модернізація вікон/освітлення) та багатокритеріальну оптимізацію, що підсилює технологічну цінність платформи [1].

KPI як формалізований інтерфейс між даними та рішеннями. KPI у ПАК повинні бути формалізовані так, щоб: а) їх можна було відтворити з даних; б) вони були інтерпретовані користувачем; в) вони були порівнювані між періодами та сценаріями. BENEFIT наводить приклад звітності по KPI та прив’язку KPI до періодів і умов вимірювання [1]. У технологічному плані це означає, що KPI-модуль має власну модель даних: опис KPI, формула/алгоритм, джерела даних (які сенсори/лічильники), періодичність обчислення, правила валідності, одиниці, а також контекст (локація/система). Реалізація такого модуля у вигляді окремого сервісу дозволяє незалежно розширювати бібліотеку KPI і робити їх доступними як через UI, так і через API.

Рекомендації та контур оптимізації. У BENEFIT «набір рекомендованих дій» розглядається як критична складова, що пропонує користувачам заходи

для підвищення енергоефективності; зазначено, що рекомендації можуть мати миттєвий ефект (наприклад, зниження температури у приміщенні) або довгостроковий (зміна енергоспоживання будівлі через заходи) [1]. Технологічно рекомендаційний модуль у ПАК має базуватися на сукупності правил, подій, обмежень (наприклад, комфортні межі, графіки роботи, вимоги безпеки) та результатів аналітики.

Раціональним є поєднання двох підходів. Перший підхід — rule-based рекомендації як швидкий і надійний механізм для типових ситуацій (перевищення температури, робота освітлення без зайнятості, аномальне зростання потужності). Другий підхід — оптимізаційний контур, який може використовувати прогноз і багатокритеріальну оптимізацію режимів (енергія/комфорт/вартість/викиди) на горизонті часу. Практична реалізація оптимізації в будівлях часто спирається на моделювання та чисельні процедури, що пов’язує рекомендаційний модуль із підсистемою симуляції та цифрових двійників.

### 2.7 Інтерфейс користувача, ролі, API

Розглянемо SUI-HUB як технологічна точка взаємодії з платформою. У BENEFIT доступ до Smart User Interface Hub вимагає автентифікації, а функції згруповані навколо пристроїв, локацій і сповіщень; користувач може додавати пристрої, переглядати список підключених пристроїв, імпортувати дані та виконувати операції над записаними даними [1]. У ПАК подібна логіка доцільна як базова, оскільки в енергоменеджменті ключовою є прив’язка «пристрій ↔ локація ↔ вимірювання». Технологічно UI має працювати з двома класами даних: конфігураційними (структура будівлі, обладнання, призначення сенсорів) і часовими рядами (історія вимірювань, агрегати, KPI).

Рольова модель доступу повинна відображати практичні ролі: адміністратор платформи, енергоменеджер/decision-maker, технічний персонал, звичайний користувач/мешканець, а також інтеграційні клієнти (API-клієнти). Ця модель узгоджується з підходом BENEFIT, де сервер надає доступ до

ресурсів на різних пріоритетних рівнях і контролює інформацію, доступну різним типам клієнтів [1].

API, документація та керований доступ (OpenAPI, OAuth 2.0)/ Для інтеграції ПАК із зовнішніми системами (BMS, CMMS, білінг, корпоративні системи, наукові модулі аналізу) необхідний формалізований API. Практично доцільним є REST/HTTP API для конфігураційних та агрегованих даних, а також подієві інтерфейси (MQTT topics) для телеметрії та команд [12], [24]. Для стандартизації та однозначності контрактів API рекомендовано застосовувати OpenAPI Specification 3.1 як машинозчитуваний опис інтерфейсів, який полегшує тестування, генерацію клієнтів і контроль сумісності версій [26].

Питання авторизації та делегованого доступу до API доцільно вирішувати через OAuth 2.0, який визначає рамку отримання обмеженого доступу до HTTP-сервісів від імені власника ресурсу або від імені клієнта [27]. У ПАК це дозволяє реалізувати сценарії, коли зовнішній аналітичний сервіс або мобільний клієнт отримує доступ лише до певних будівель/зон/типів даних, не порушуючи принципу мінімальних привілеїв.

### 2.8 Інтеграція з інструментами симуляції

Однією з технологічних відмінностей «просунутих» платформ енергоменеджменту є поєднання фактичних даних з моделюванням будівлі. У BENEFIT зазначено, що програмний застосунок інтегрується для моніторингу будівлі та підтримується Building Simulation Tool для підвищення енергоефективності, а як інструмент симуляції використано DesignBuilder з широким набором функцій, включно з розрахунком енергоспоживання, тепловими симуляціями, моделюванням HVAC/вентиляції з CFD та підтримкою стандартів ASHRAE 90.1 і LEED [1]. Технологічно це означає, що платформа має канали імпорту параметрів моделі (геометрія, матеріали, режими), канали експорту фактичних профілів (зайнятість, кліматичні дані, графіки роботи систем), а також механізми порівняння «модель ↔ факт».

Інтеграція з DesignBuilder на практиці може бути організована як сервісний контур, який запускає симуляції для заданих сценаріїв та повертає результати у платформу як окремі часові ряди та KPI. Це дозволяє виконувати верифікацію заходів енергоефективності й обґрунтовувати інвестиційні рішення на основі «цифрового двійника», а не лише на основі ретроспективних спостережень. Важливо, що DesignBuilder позиціонується як інструмент аналізу продуктивності будівель, а його документація містить спеціалізовані можливості CFD-аналізу, що корисно для задач комфорту та оптимізації вентиляції [20]. Додатково, прив’язка моделювання до нормативних орієнтирів (ASHRAE 90.1 як мінімальні вимоги енергоефективності та LEED як система оцінювання «зелених» будівель) дозволяє технологічно узгодити результати платформи з практиками сертифікації та проєктування [21], [22].

### 2.9 Безпека і надійність

Безпека мережі та пристроїв: У BENEFIT захист даних і цілісності системи збору параметрів будівлі реалізується через три групи заходів: унікальна ідентифікація пристроїв за MAC-адресами, апаратне кодування ключів із AES-128 для обміну даними у мережі та суворий контроль доступу вузлів до RTU і DC; зазначено, що частина заходів спрямована проти DoS-атак на канал даних [1]. Для ПАК цей підхід задає базовий «технічний мінімум», але в сучасних реалізаціях він має бути підсилений системними практиками захисту IoT.

По-перше, необхідно застосовувати «baseline» кіберможливостей IoT-пристроїв: керована ідентифікація, безпечні конфігурації, захист даних, безпечні оновлення, контроль доступу та журналювання, що узгоджується з NISTIR 8259A [6]. По-друге, архітектура повинна враховувати принципи ISA/IEC 62443 щодо сегментації, зон і каналів, управління ризиками та захисту промислових/кіберфізичних мереж [5]. По-третє, доцільно опиратися на класи типових уразливостей IoT (OWASP IoT Top 10) як контрольний перелік для проєктування, тестування та аудиту [8].

Криптографічний захист і керування ключами: На транспортному рівні основою є TLS 1.3 для TCP-сценаріїв і DTLS 1.3 для UDP-сценаріїв [14], [15]. На прикладному рівні для CoAP за необхідності застосовується OSCORE для end-to-end захисту в присутності проксі/шлюзів [16]. При цьому критично важливим є керування ключами: у промислових IoT мережах проблемою часто стає не алгоритм шифрування, а життєвий цикл ключів (генерація, ротація, компрометація, відновлення). У ПАК керування ключами доцільно централізувати на рівні DH/серверної інфраструктури, забезпечивши мінімальні криптографічні операції на найбільш обмежених вузлах, але без деградації до «спільних ключів» на всю мережу.

Авторизація, аудит і спостережуваність: Оскільки платформа має різні категорії користувачів, авторизація на рівні API є не менш важливою, ніж криптографія каналу. Використання OAuth 2.0 дозволяє реалізувати делегований доступ з обмеженням прав до конкретних ресурсів [27]. Для енергоменеджменту це особливо важливо у випадках, коли платформа використовується багатьма орендарями або підрозділами, а також коли частина даних доступна лише енергоменеджеру/адміністратору.

Окремим технологічним компонентом є аудит і спостережуваність (observability): журналювання подій доступу, зміни конфігурацій, критичні дії (надсилання команд керування), а також метрики працездатності компонентів (стан брокера, затримки доставки, втрати пакетів, заповненість буферів). Для системи оптимізації енергоспоживання це має подвійне значення: з одного боку, кібербезпека та розслідування інцидентів; з іншого — доказовість якості даних, що напряму впливає на коректність KPI та оцінки заходів енергоефективності.

Технологія розгортання та супровід платформи: У промисловій експлуатації ПАК має бути відтворюваним у розгортанні та керованим у супроводі. Це означає, що серверний рівень доцільно реалізувати як набір сервісів із чіткими контрактами (API/події), керованими конфігураціями та процедурою оновлення без простою. Хоча конкретні інструменти DevOps у межах магістерської роботи можуть описуватися на рівні концепції,

технологічні вимоги є однозначними: контроль версій, тестове середовище, регулярні резервні копії БД, контроль цілісності, план відновлення після збоїв, а також політики збереження телеметрії (retention) для TSDB.

Окремо слід підкреслити необхідність «життєвого циклу пристроїв»: облік встановлених вузлів, процедури первинної прив’язки до платформи (provisioning), контроль прошивок, безпечні оновлення та можливість віддаленої діагностики. Це безпосередньо узгоджується з вимогами NIST до базових кіберможливостей IoT-пристроїв [6] і практичними аспектами стійкості мережі, які розглядаються в BENEFIT [1].

## 2.10 Висновок до другого розділу

У технологічній частині обґрунтовано, що програмно-апаратний комплекс оптимізації енергоспоживання в будівлях має будуватися як багаторівнева IoT-платформа із зональною ієрархією збору даних (RDAU/DC/DH), централізованим Data Hub та серверним контуром аналітики й візуалізації, що відповідає референсному підходу BENEFIT [1]. Розглянуто технологічні альтернативи та доповнення: подієва інтеграція на базі MQTT 5.0 [12], використання CoAP для constrained вузлів [13], застосування сучасних механізмів захищеного транспорту TLS/DTLS [14], [15] і прикладного захисту OSCORE [16], а також стандартизовані формати даних JSON/CBOR [24], [25]. Показано, що масштабованість і переносимість аналітики вимагають семантичної інтероперабельності даних, для чого доцільно застосовувати Brick-онтологію та/або Project Haystack як практичні схеми метаданих [17], [18]. Окремо обґрунтовано необхідність інтеграції з інструментами симуляції (DesignBuilder) для верифікації заходів енергоефективності та переходу від ретроспективного моніторингу до доказового енергоменеджменту з підтримкою стандартів ASHRAE/LEED [1], [20–22]. Кібербезпека і надійність не є «додатковими» функціями, а формують базові вимоги до ПАК відповідно до практик ISA/IEC 62443, NIST та OWASP IoT [5], [6], [8].

# 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Конструкторська частина спрямована на обґрунтування та проєктування фізичної реалізації програмно-апаратного комплексу (ПАК) оптимізації енергоспоживання будівель на базі IoT-технологій. Якщо у технологічній частині було визначено мережеві, програмні та протокольні механізми, то в цьому розділі конкретизуються апаратні модулі, їх структурна декомпозиція (вузол збору даних, концентратор, Data Hub), інтерфейсування з датчиками/лічильниками/виконавчими пристроями, енергоживлення, конструктивне виконання (корпуси, монтаж, захист), а також питання ремонтопридатності, масштабованості та сумісності з вимогами електробезпеки й EMC. Архітектурною основою прийнято підхід із розподіленими вузлами збору даних (RDAU), концентраторами (DC) і центральним вузлом Data Hub (DH), що застосований у платформі BENEFIT [1].

## 3.1 Вимоги до конструкції ПАК

Під час конструювання ПАК ключовими є вимоги до якості вимірювань, надійності збору й доставки телеметрії, безпеки, енергетичної автономності польових вузлів та сумісності з інженерною інфраструктурою будівлі. У референс-архітектурі BENEFIT підкреслено, що типи та розподіл вимірюваних величин визначаються локаціями й управлінськими потребами (рішеннями відповідальної особи/decision-maker), а дані від RDAU агрегуються концентраторами DC і передаються до Data Hub [1]. Ця логіка є конструктивно важливою, оскільки апаратна частина повинна підтримувати змінний склад сенсорів, різні середовища експлуатації (кабінети, коридори, технічні приміщення, електрощитові) та різні канали зв’язку.

Конструктивні принципи ПАК формуються як сукупність: модульності (окремі функціональні блоки RDAU/DC/DH), уніфікації інтерфейсів ($I^2C$/SPI/UART/RS-485, стандартизовані роз’єми та кабелювання), механічної сумісності з типовими монтажними системами (DIN-рейка, монтажні коробки,

шафи автоматики), керованості живлення (розділення контурів живлення сенсорів і логіки, захист від перенапруг), а також ремонтопридатності (можливість заміни вузлів без демонтажу всієї системи). З огляду на те, що система може здійснювати не лише моніторинг, але й керування енергоспоживанням (через виконавчі пристрої), апаратна частина має забезпечити чітке розділення контурів низьковольтної логіки та силових кіл, включно з гальванічною розв’язкою, захистом від імпульсних завад і фільтрацією.

Для наочного представлення інтерфейсів обміну даними між мікроконтролером і вимірювальними пристроями наведено рисунок 3.1, який відображає типові варіанти апаратної інтеграції сенсорів у складі програмно-апаратного комплексу.

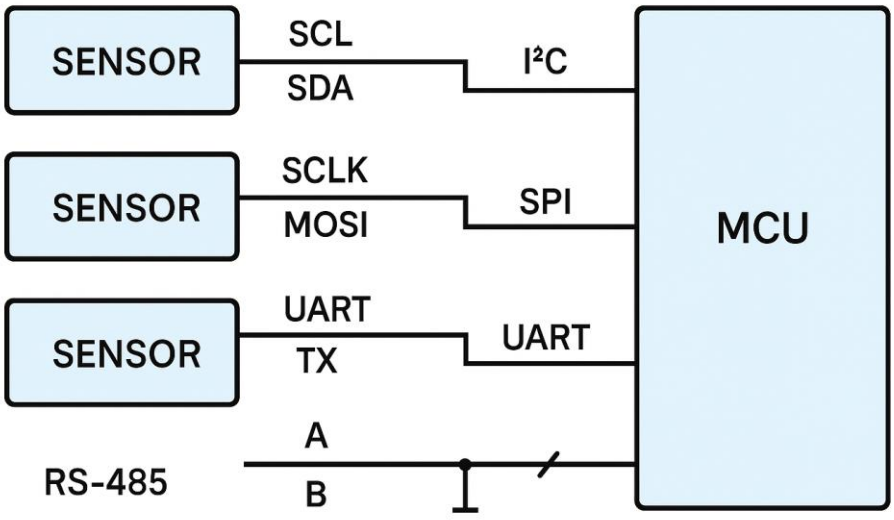



Рисунок 3.1 – Схема підключення сенсорів до MCU (I²C/SPI/UART/RS-485)

### 3.2 Структура апаратних модулів: RDAU, DC та DH

Вузли RDAU як основа «польового» рівня. RDAU (Remote Data Acquisition Units) у складі ПАК є розподіленими вузлами, що реалізують первинне зчитування показників з датчиків та/або лічильників, їх первинну

обробку (фільтрацію, усереднення, маркування часовою міткою), локальну буферизацію, а також передачу даних у напрямку концентратора. У моделі BENEFIT RDAU фізично розміщуються по будівлі, формують «горизонтальний» шар вимірювальних точок, а зібрані дані локально акумулюються DC і далі передаються до DH [1]. Така структура є доцільною для будівель із великою кількістю зон, де пряме підключення кожного сенсора до центрального вузла ускладнює кабелювання, підвищує ризики відмов і збільшує витрати.

Концентратори DC як шлюзи та вузли зональної агрегації. DC (Data Concentrators) у ПАК виконують дві функції: по-перше, виступають шлюзами між локальними мережами сенсорів (радіомережі або дротові сегменти) і магістральним транспортом до DH; по-друге, реалізують зональну агрегацію та керування (прийом телеметрії від групи RDAU, маршрутизація команд до вузлів, контроль QoS, локальні правила роботи при втраті зв’язку). У BENEFIT зазначено, що правильне розміщення RDAU/DC і наявність failover-механізмів забезпечують автоматичне відновлення після відмов, а в проєктуванні мережі враховуються перешкоди зв’язку [1]. Конструктивно це означає, що DC мають бути пристосовані до встановлення у технічних зонах (шафи, щитові), мати стабільне живлення, розширені інтерфейси (Ethernet/RS-485/Wi-Fi/стільниковий зв’язок залежно від умов) і достатні ресурси для буферизації/маршрутизації.

Data Hub (DH) як центральний вузол інтеграції та диспетчеризації. DH у ПАК реалізує централізовану диспетчеризацію: збір і синхронізацію даних, комутацію команд, передавання телеметрії до серверного рівня, а також може включати брокер повідомлень і служби локального зберігання для сценаріїв відмовостійкості. У BENEFIT DH розглядається як ключова ланка між мережею збору даних і серверним рівнем керування [1]. Конструктивно DH доцільно виконувати на базі одноплатного комп’ютера або промислового мікросервера (із можливістю резервного накопичувача), який розміщується в безпечній технічній зоні будівлі.

### 3.3 Проєктування вузла RDAU

Для RDAU у ПАК обґрунтовано використання енергоефективного мікроконтролера з інтегрованими засобами бездротового зв'язку або з підтримкою зовнішнього радіомодуля. Практично доцільними є дві базові конфігурації:

1. RDAU на базі Wi-Fi/BLE мікроконтролера, що підходить для зон із наявним стабільним покриттям мережі;
2. RDAU на базі IEEE 802.15.4 (Zigbee/Thread) або LoRa (за потреби великої дальності та низького енергоспоживання).

Як універсальне ядро для Wi-Fi-орієнтованого вузла може застосовуватися ESP32 (двоядерний MCU з інтегрованим Wi-Fi/BLE), який має достатні ресурси для опитування сенсорів, локальної буферизації та криптографічних операцій [28].

Для сценаріїв, де потрібні IEEE 802.15.4/Zigbee/Thread, доцільним є CC2652R як мультипротокольний MCU для низькопотужних мереж будівельної автоматики [41].

Для далеких та складних радіоумов (підвали, технічні коридори, віддалені вузли) можливий LoRa-орієнтований вузол на базі трансивера SX1276 із зовнішнім MCU [42].

Вибір конкретної конфігурації в проєкті доцільно здійснювати з урахуванням доступності інфраструктури, вимог до енергоспоживання та особливостей будівлі. При цьому конструкція RDAU повинна залишатися уніфікованою на рівні підключення сенсорів і логіки вимірювання, а різнитися лише комунікаційним модулем/прошивкою.

Сенсорний склад визначається KPI енергоменеджменту та вимогами комфорту. Мінімально доцільними є вимірювання температури/вологості/тиску (для контексту HVAC і теплових режимів) та, за можливості, $CO_2$ як індикатора якості повітря та непрямого показника зайнятості. Для комбінованого вимірювання мікроклімату може використовуватися BME280 як цифровий

датчик температури, вологості й тиску з малими габаритами та низьким енергоспоживанням [29].

Для підвищеної точності вимірювання температури/вологості на рівні зон доцільні датчики класу SHT3x (SHT31/SHT35), які є каліброваними та підтримують цифровий інтерфейс I²C [30]. (Sensirion AG)

Як сенсор $CO_2$ раціонально використовувати SCD4x, що базується на фотоакустичному принципі та має I²C-інтерфейс; це дає змогу будувати сценарії оптимізації вентиляції за якістю повітря [31].

Для оцінки освітленості, що критично для сценаріїв керування освітленням (денне світло/присутність/графіки), може застосовуватися BH1750 як цифровий датчик освітленості з I²C [32].

Окремий клас сенсорів — зайнятість/присутність. Конструктивно найпоширенішим є PIR-датчик, який простий у монтажі, має низьке енергоспоживання, але обмежений у точності (не «бачить» нерухомих людей). Для підвищення якості детекції у критичних зонах можливе застосування mmWave-датчиків присутності (конструктивно складніші й дорожчі), але в межах магістерського проєкту достатньо PIR як базового рівня.

Оптимізація енергоспоживання потребує даних не лише про мікроклімат, але й про електричні навантаження та/або тепло. Конструктивно можливі два підходи:

1. інтеграція RDAU з лічильниками/датчиками струму на рівні електрощита (наближено до «smart meter»);
2. зчитування показників зі сторонніх лічильників через промислові інтерфейси (наприклад, RS-485/Modbus), що часто є практичнішим для об’єктів із наявними засобами обліку.

Для власного вимірювання електроенергії на рівні лінії/фази доцільні спеціалізовані мікросхеми енергомоніторингу (energy metering IC). Наприклад, ADE9153A забезпечує вимірювання електричних параметрів і підтримує сценарії побудови однофазних лічильників/моніторів, включно з функціями автокалібрування, що важливо для повторюваності показників при масштабуванні системи [33]. Для коректності класу точності й метрологічних

вимог (особливо у сценаріях офіційного обліку) слід орієнтуватися на стандарти, зокрема IEC 62053-21 для статичних лічильників активної енергії класів 1 і 2 [40]. Водночас у межах енергоменеджменту будівлі часто достатньо «технічного обліку» (sub-metering) із відомою похибкою, якщо система використовується для порівняння режимів і виявлення відхилень.

Уніфікація інтерфейсів суттєво спрощує конструювання. Для сенсорів мікроклімату типовим є I²C, який дозволяє підключати кілька датчиків на одну шину за умови коректної адресації. Для енергомоніторингу (особливо при використанні metering IC) часто використовується SPI. Для інтеграції зі сторонніми приладами обліку та деякими контролерами доцільний RS-485 як фізичний рівень, над яким широко застосовується Modbus.

Специфікація Modbus Application Protocol V1.1b3 є базовим документом для інтероперабельного зчитування регістрів у промислових пристроях [38].

З конструктивної точки зору RS-485 потребує коректного узгодження лінії (термінування), дотримання правил топології (шинна структура без «зірок»), а також захисту від імпульсних перенапруг (TVS-діоди, варистори) та гальванічної розв’язки у складних електромагнітних середовищах (електрощитові, поруч із силовими кабелями).

Живлення RDAU визначається місцем встановлення. У «кімнатних» зонах можливе живлення від мережевого адаптера 5/12 В або від PoE-сплітера (якщо поруч Ethernet). Для автономних вузлів можливий батарейний режим із агресивним енергозбереженням (sleep-цикли), але тоді вибір протоколу і частоти вимірювань стає критичним.

Конструкція плати RDAU має містити стабілізатори живлення (із низьким струмом спокою для батарейних конфігурацій), захист від переполюсовки, запобіжний елемент (polyfuse) та розділення аналогової/цифрової «землі» за потреби (особливо для енергомоніторингу).

### 3.4 Конструкція концентратора DC, Data Hub (DH) та центрального вузла

DC у ПАК — це зональний пристрій, який зазвичай має стабільне живлення і може бути виконаний як: (а) MCU-шлюз із двома радіоінтерфейсами (наприклад, Zigbee/Thread + Ethernet/Wi-Fi); або (б) малий SBC-шлюз. Практично ефективним є виконання DC на базі промислового мікрокомп'ютера або одноплатного комп'ютера з підтримкою Linux, оскільки це полегшує реалізацію протокольних мостів, локальних черг повідомлень та оновлення ПЗ.

Конструктивно DC має включати: радіомодуль локальної сенсорної мережі (IEEE 802.15.4 або LoRa), магістральний інтерфейс до DH (Ethernet як пріоритетний, Wi-Fi/стільниковий як резервний), локальну пам'ять для буферизації телеметрії при розривах зв'язку, а також засоби апаратного сторожового таймера для самовідновлення. Такий підхід узгоджується з тезою BENEFIT про failover-механізми та автоматичне відновлення після відмов у мережі збору даних [1]. Додатково, оскільки DC є «точкою концентрації», для нього критичні захист портів, EMC-стійкість і механічний захист.

Для DH у ПАК доцільним є використання SBC класу Raspberry Pi 4 Model B як доступної апаратної платформи з достатньою продуктивністю для шлюзових і сервісних функцій (локальний брокер, кеш/буфер, сервіс збору та нормалізації) [34].

У випадках, коли потрібна більш «вбудована» інтеграція в шафу автоматики або спеціальний форм-фактор, доцільним є Raspberry Pi Compute Module 4 як SoM для побудови кастомного DH-пристрою (наприклад, плата-носій із промисловими роз'ємами, живленням, корпусом під DIN-рейку) [35].

Конструкція DH повинна передбачати: резервування накопичувача (наприклад, SSD або eMMC у CM4-варіанті), джерело безперебійного живлення (UPS або DC-резерв), мережевий комутатор/маршрутизатор (якщо DH одночасно є мережевим вузлом), а також фізичний захист доступу. Оскільки на DH зосереджується конфіденційна телеметрія і команди керування, саме на цьому рівні доцільно реалізувати апаратно підсилені механізми захисту

(захищене завантаження, керування ключами), розширене журналювання подій та контроль мережевих політик. Для пояснення ролі проміжного вузла в ієрархії програмно-апаратного комплексу наведено рисунок 3.2, який відображає функції агрегування, маршрутизації та передавання даних між вузлами збору та центральним сервером.

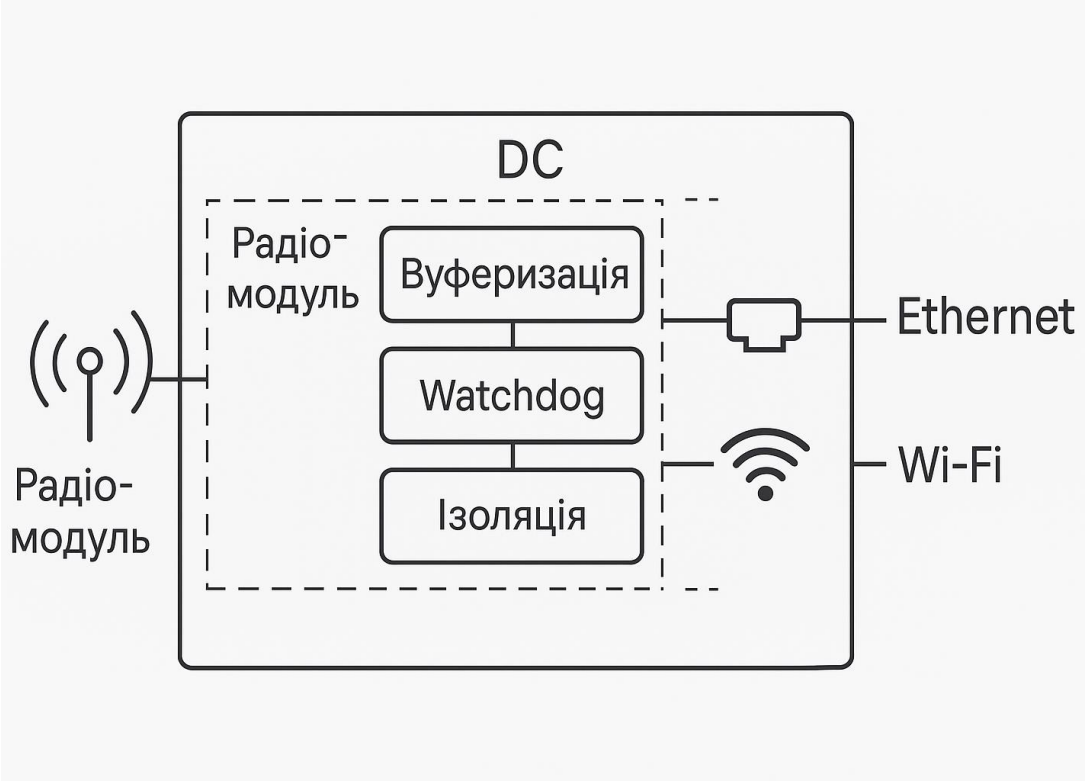



Рисунок 3.2 – Схема DC як шлюзу

### 3.5 Конструктивні та експлуатаційні вимоги

Вузли RDAU, встановлені у житлових/офісних приміщеннях, можуть мати «легкий» корпус із захистом від пилу та випадкового торкання, але вузли, розміщені у технічних приміщеннях або поблизу інженерного обладнання, потребують підвищеного ступеня захисту від пилу/вологи. Для формалізації вимог до корпусів застосовується IEC 60529 (IP Code), що класифікує ступені захисту оболонок електрообладнання [36]. (webstore.iec.ch)

Практично це означає, що для щитових/підвальних зон доцільно орієнтуватися на IP54–IP65 залежно від ризику пилу та конденсату, тоді як для

«кімнатних» сенсорних вузлів часто достатньо IP20-класу із забезпеченням вентиляції корпусу для коректного вимірювання температури/вологості/$CO_2$.

Монтаж: DIN-рейка, розміщення сенсорів, кабелювання. Уніфікованим рішенням для технічних зон є монтаж DC/DH (і, за потреби, енергомоніторингових RDAU) у корпусах під DIN-рейку. Це спрощує сервіс і забезпечує сумісність із типовими шафами автоматики. Для сенсорних RDAU в кімнатах важливе коректне місце встановлення: уникнення прямого сонячного проміння, теплових потоків від радіаторів, зон протягів, близькості до вентвиводів; для $CO_2$ — розміщення в зоні перебування людей, але не впритул до вентиляційних решіток.

Кабелювання для RS-485/Modbus виконується екранованою витою парою з правильним заземленням екрана та рознесенням від силових трас. Для ліній живлення сенсорних вузлів доцільно застосовувати окремі низьковольтні кабелі та захисні елементи від перенапруг.

EMC та впливи середовища. Оскільки ПАК працює в електромагнітно насичених середовищах (пускові струми двигунів, перетворювачі, реле, довгі кабельні лінії), конструкція вузлів повинна забезпечувати стійкість до завад і обмеження власних випромінювань. IEC 61326-1 визначає вимоги до електромагнітної сумісності для електрообладнання вимірювання, керування і лабораторного використання; цей документ доцільно використовувати як орієнтир для загальних EMC-вимог до вузлів вимірювання [37]. На практиці це реалізується через фільтрацію живлення, правильно організовані землі, екранування, TVS-захист портів, рознесення цифрових і аналогових ланцюгів та обмеження довжин неекранованих ліній.

### 3.6 Виконавчі пристрої та інтеграція з системами

Оптимізація енергоспоживання в будівлях є найбільш ефективною тоді, коли система переходить від «спостереження» до «керування»: вплив на HVAC (режими температури/вентиляції), освітлення (димування/вимкнення у відсутність людей), локальні навантаження (розетки групового керування,

обмеження пікових навантажень). Конструктивно підключення до виконавчих пристроїв може реалізовуватися у двох формах.

Перша форма — дискретне керування (реле/контактори) з гальванічною розв'язкою, що є простим, але обмеженим за «плавністю» регулювання. Друга форма — аналогове або цифрове керування (0–10 В, PWM, DALI, Modbus-керовані приводи). Для інтеграції з існуючими будівельними системами важливо підтримувати промислові протоколи. На рівні промислової сумісності доцільно орієнтуватися на Modbus для роботи з багатьма контролерами/лічильниками [38], а також на BACnet як поширений протокол будівельної автоматизації (формально описаний у межах ISO 16484-5) [39]. Це дозволяє розглядати ПАК як надбудову над наявною BMS або як автономну систему для будівель без повноцінної автоматики.

У платформі BENEFIT для захисту даних і цілісності системи збору параметрів будівлі застосовано три групи заходів: унікальна MAC-ідентифікація мережевих пристроїв, апаратне кодування ключів із AES-128 для даних у мережі та жорсткий контроль доступу вузлів до RTU/DC; також зазначається, що частина заходів спрямована проти DoS-атак на канал даних [1]. З конструктивної точки зору ці рішення мають бути підтримані на рівні апаратної платформи ПАК: наявність унікального ідентифікатора/ключового матеріалу у вузлі, можливість захищеного зберігання ключів, апаратні watchdog-механізми та обмеження «небезпечних» режимів (наприклад, блокування небажаних команд керування при відсутності автентифікації).

Для RDAU, що працюють у потенційно недовірених зонах, доцільно передбачити «пломбування» корпусу або датчики вскриття (tamper), що підвищує захист від фізичного втручання. Для вузлів DC/DH у технічних приміщеннях важливим є фізичний контроль доступу до шаф, обмеження USB-портів, а також розділення мережевих сегментів (внутрішній сегмент сенсорної мережі та сегмент серверної інфраструктури).

### 3.7 Прототипування, оцінка, масштабування

Практична реалізація ПАК у межах магістерської роботи передбачає створення демонстраційного стенду, який відтворює типову зону будівлі: RDAU із сенсорним блоком, DC-шлюз, DH-вузол, а також простий виконавчий контур (наприклад, кероване освітлення або імітатор навантаження). На етапі прототипування критичними є:

1. калібрування сенсорів та перевірка стабільності показників у часі (особливо $CO_2$ і вологості), що забезпечує достовірність KPI;
2. тестування стійкості зв’язку (втрата пакета, повторна доставка, поведінка при розриві каналу), що напряму впливає на цілісність часових рядів;
3. тестування живлення (просадки, відновлення, поведінка при короткочасних відключеннях);
4. перевірка електромагнітних впливів у «шумних» середовищах (поруч із пусковою апаратурою), оскільки саме в таких умовах вимірювальні вузли часто демонструють деградацію якості даних.

Такий підхід дозволяє узгодити конструктивні рішення з технологічними механізмами збору даних та безпеки, а також підготувати основу для подальшої науково-дослідної частини (моделювання, оптимізація, оцінка ефекту).

Для відображення принципів розміщення елементів програмно-апаратного комплексу в межах будівлі наведено рисунок 3.3, який ілюструє розташування вузлів збору даних, шлюзів та центрального обладнання з урахуванням зонування приміщень.

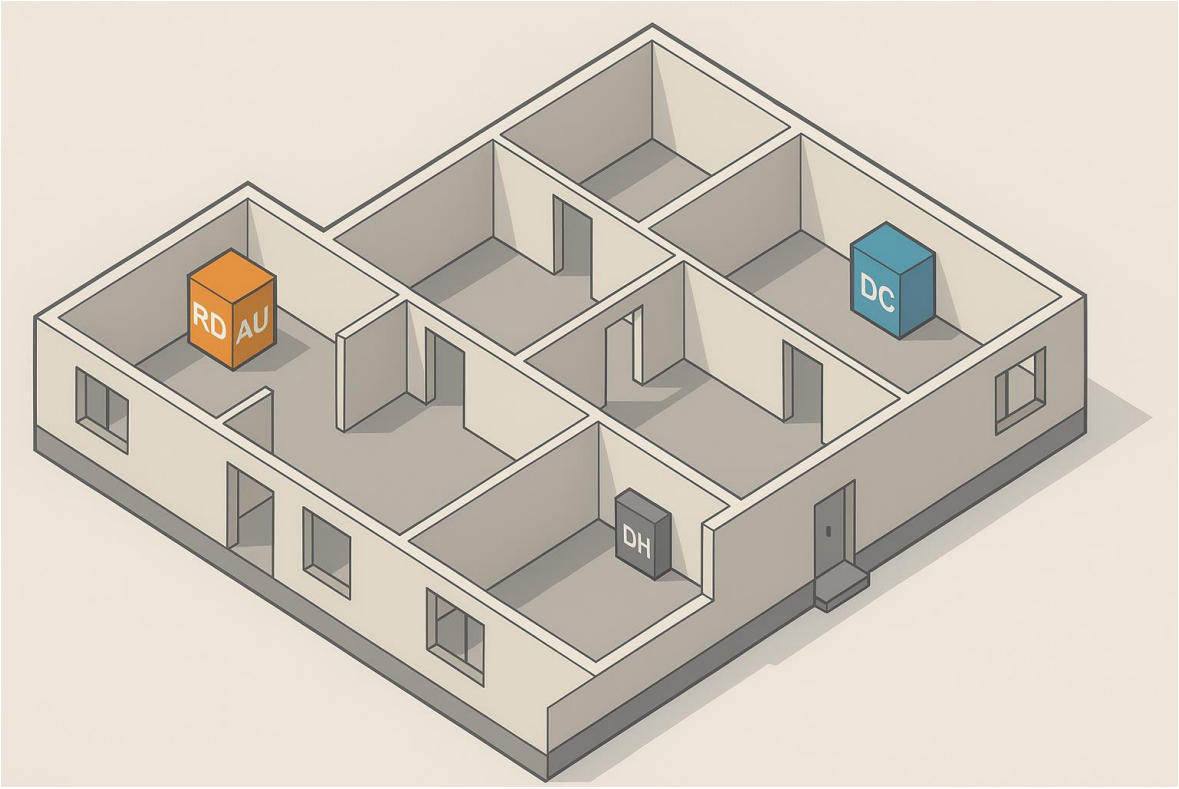



Рисунок 3.3 – Компонування вузлів у будівлі (монтажна схема)

Конструктивна масштабованість ПАК досягається повторюваністю вузлів RDAU (типові сенсорні «профілі» для кімнат/коридорів/технічних зон) та стандартизованими DC-шлюзами на кожну зону.

Економічна ефективність при масштабуванні визначається тим, що вартість «центру» (DH і серверних сервісів) розподіляється на кількість зон, а основні витрати переміщуються на польові вузли, де важливими стають ціна компонентів і швидкість монтажу.

У межах магістерської реалізації доцільно формувати мінімальний набір вузлів для демонстрації повного циклу: 2–3 RDAU з різними профілями сенсорів, 1 DC як шлюз, 1 DH як центральний вузол. Таке прототипування є достатнім, щоб підтвердити працездатність конструкції, показати масштабованість (додавання RDAU) та підготувати експериментальні дані для подальших розділів.

## 3.8 Висновок до третього розділу

У розділі обґрунтовано конструктивну реалізацію програмно-апаратного комплексу оптимізації енергоспоживання будівель як модульної системи з розподіленими вузлами збору даних (RDAU), зональними концентраторами (DC) та центральним вузлом Data Hub (DH), що відповідає референс-архітектурі платформи BENEFIT [1].

Розроблено підхід до апаратного проєктування RDAU з уніфікованими інтерфейсами I²C/SPI/UART/RS-485, сенсорним набором для мікроклімату й якості повітря (BME280/SHT3x/SCD4x, датчик освітленості), а також можливістю підключення/реалізації енергомоніторингу на базі спеціалізованих metering-рішень та із врахуванням метрологічних орієнтирів IEC 62053-21 [29]–[33], [40]. Запропоновано конструктив DH на базі SBC/SoM (Raspberry Pi 4 або CM4) як практично реалізований вузол інтеграції й диспетчеризації [34], [35].

Визначено вимоги до корпусів і монтажу з урахуванням ступеня захисту IP за IEC 60529 та орієнтирів EMC за IEC 61326-1, а також описано інтеграційні можливості з інженерними системами будівлі через Modbus і BACnet/ISO 16484-5 [36]–[39]. Окремо враховано апаратні аспекти безпеки та ідентифікації вузлів відповідно до практик, наведених у BENEFIT (MAC-ідентифікація, AES-захист, контроль доступу) [1], що створює основу для надійної експлуатації ПАК та подальших досліджень ефекту оптимізації.

# 4 НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

Науково-дослідна частина спрямована на формування відтворюваної методики оцінювання енергоефективності та обґрунтування результативності розробленого програмно-апаратного комплексу (ПАК) на базі IoT-технологій. Логіка дослідження спирається на концепцію платформного енергоменеджменту «моніторинг → аналітика → рекомендації/керування → верифікація ефекту», що використовується у референсному підході BENEFIT із поєднанням мереж сенсорів і «розумних» лічильників, звітності за KPI та інтеграції інструмента моделювання DesignBuilder для аналізу сценаріїв і заходів енергоефективності [1]. Для забезпечення доказовості отриманих результатів застосовуються підходи вимірювання і верифікації (M&V) та стандартизовані підходи енергоменеджменту (ISO 50001, ISO 50006, ISO 50015), а також методи калібрування моделі будівлі відповідно до ASHRAE Guideline 14 [4], [43]–[47].

## 4.1 План дослідження та постановка експерименту

Дослідження ефективності ПАК доцільно організувати як сукупність етапів, що відділяють вплив платформи (моніторинг/алгоритми/керування) від впливу зовнішніх факторів (погода, зайнятість, зміни режиму експлуатації). Практично коректним є поділ на три фази: базову (до впровадження або до активного керування), фазу стабілізації (налаштування сенсорної мережі, валідація даних, формування базових профілів) та фазу впливу (виконання керувальних стратегій або впровадження заходів енергоефективності з подальшою оцінкою ефекту). Такий підхід узгоджується з платформною логікою BENEFIT, де дані використовуються для формування рекомендацій, а ефект заходів підтверджується річним порівнянням споживання в базовому і модернізованому станах [1].

У межах магістерської роботи об’єктом дослідження доцільно визначити будівлю або її репрезентативну частину (зона/поверх), що має вимірювані

електричні навантаження, освітлення та принаймні один контур HVAC (або еквівалентне керування температурою). Дослідницька постановка повинна містити: часовий горизонт (не менше 2–4 тижнів для базової фази та 2–4 тижнів для фази впливу, а для довготривалих заходів — сезонний або річний аналіз), опис точок вимірювання (споживання, температура, вологість, $CO_2$/зайнятість, зовнішня температура), а також визначення контрольних умов (робочі/неробочі дні, часові інтервали, правила виключення аномальних діб). Для забезпечення порівнянності необхідно виконувати нормалізацію за погодою та/або зайнятістю, оскільки ці фактори суттєво впливають на енергоспоживання будівель [1], [46], [47].

Верифікацію ефекту можна організувати за підходами IPMVP, де для будівельного енергоменеджменту найбільш придатними є: оцінювання на рівні всього об’єкта/зони (Option C) або на рівні конкретної системи (Option B), залежно від доступності обліку та мети дослідження [43]. У випадку платформного підходу, коли змінюється не лише обладнання, але й керувальні політики (розклади, режими), Option C із корекцією базової лінії часто є найпрактичнішим.

### 4.2 KPI та методики оптимізації

Ключовою відмінністю «керованого» енергоменеджменту від простого обліку є використання KPI (або EnPI — energy performance indicators) як формалізованого інтерфейсу між даними та рішеннями. У BENEFIT прямо зазначено, що платформа формує звіти із специфічними й загальними KPI на основі аналізу даних, на запит відповідальної особи або користувачів [1]. Для магістерського дослідження KPI доцільно визначити у трьох групах: енергетичні, експлуатаційно-комфортні та інтегральні (енергія з урахуванням умов).

Енергетичні KPI можуть включати питомі показники споживання електроенергії (кВт·год/м² за добу/тиждень/місяць), профіль пікового навантаження (максимальна потужність у пікові години), енергію освітлення

(за наявності підобліку), а також частку споживання у неробочий час, що є типовим маркером неефективних режимів. Формування базової лінії та EnPI повинно відповідати логіці ISO 50006, де EnPI розглядаються у прив'язці до енергетичної бази (EnB) та релевантних змінних (погода, режим роботи, завантаженість) [46]. У цьому контексті «проста» метрика кВт·год за період є недостатньою без нормалізації, оскільки різні зовнішні умови можуть створювати хибний висновок про покращення або погіршення.

Для кількісної оцінки ефективності енергоспоживання та результативності впроваджених заходів у сучасних платформах енергоменеджменту застосовується система ключових показників ефективності (KPI). Узагальнений перелік таких показників, сформований у межах проєкту BENEFIT, охоплює як енергетичні, так і експлуатаційні аспекти функціонування будівель, що дозволяє комплексно оцінювати результати оптимізації (табл. 4.1)

Експлуатаційно-комфортні KPI необхідні для перевірки, що оптимізація не погіршує умови перебування. Доцільно застосовувати показники часу перебування температури у комфортному коридорі (наприклад, 20–24 °C для офісної експлуатації) та час перевищення порогів $CO_2$, якщо система контролює вентиляцію. Як нормативний орієнтир для інтерпретації теплового комфорту застосовується ASHRAE 55, який формалізує критерії теплового комфорту в приміщеннях і дає основу для визначення допустимих діапазонів [45].

Для задач керування освітленням аналогічно можуть використовуватися показники виконання графіків і реакції на зайнятість (частка часу, коли світло увімкнене без присутності, як проксі-ознака неефективності).

Таблиця. 4.1 Показники, одиниці вимірювання, умови та методи вимірювання

| **Показник** | **Од. вим.** | **Періоди та умови вимірювання** | **Метод / інструмент вимірювання** |
|---|---|---|---|
| **Температура** | [°C] | Кількість тепла в матеріалі (твердому, рідкому або газоподібному). | Системи збору даних, які контролюють температуру з наперед визначеними / заданими часовими інтервалами |
| **Вологість** | [%] | Відносна вологість повітря (RH). | Системи збору даних, що вимірюють вологість у задані часові інтервали разом із показниками температури. |
| **Рівень освітленості** | [lx] | Світловий потік на одиницю площі, що характеризує інтенсивність світла, сприйнятого людським оком при проходженні через поверхню. | Світлові датчики, які вимірюють кількість світла (природного або штучного) у будівлі, зазвичай кожні 15–30 хвилин. |
| **Вентиляція** | [ACH] | Кратність повітрообміну за годину (ACH), що показує, який об’єм свіжого повітря циркулює в будівлі. Залежить від швидкості повітря, розмірів отворів (двері, вікна) та притоку. | Анемометр вимірює швидкість повітря. Для природної вентиляції показники фіксуються кожні 15 хвилин, для механічної — вимірювання.коригуються відповідно до цільового рівня комфорту. |
| **Вуглецевий слід** | [$CO_2e$] | Показник загальної кількості парникових газів, що викидаються прямо або опосередковано для забезпечення комфорту людей за допомогою систем HVAC. Підвищення енергоефективності будівлі дозволяє зменшити цей показник. | Споживання енергії, розраховане за допомогою моделей енергетичної ефективності будівлі або отримане з реальних вимірювань, використовується для оцінки викидів $CO_2$. |
| **Загальний коефіцієнт теплопередачі** | [W/м²·K] | Значення U-коефіцієнта змінюється залежно від середовища; для нього задається допустимий діапазон. | Визначається на основі теплотехнічних властивостей будівельного матеріалу. |

Інтегральні KPI дозволяють поєднати енергетичні та комфортні критерії, що особливо важливо для алгоритмічного керування. Технологічно зручною є постановка «енергія при збереженні комфорту»: наприклад, оцінювати енергоспоживання лише у ті часові інтервали, коли температура знаходиться в допустимих межах, або додавати штрафні функції за порушення комфорту в оптимізаційній задачі. Такий підхід дозволяє уникнути ситуації, коли економія досягається виключно через погіршення умов, що є неприпустимим з точки зору енергоменеджменту та практики експлуатації.

**Метод оптимізації енергоспоживання та постановка задачі керування**

Для дослідницької частини ПАК доцільно описати два рівні керування: базовий (правила і сценарії) та оптимізаційний (алгоритмічне керування на горизонті часу). Така комбінація узгоджується з референсною логікою BENEFIT щодо рекомендацій, які можуть мати миттєвий ефект (наприклад, корекція температури) або довготривалий (впровадження заходів) [1].

Правиловий рівень передбачає формування «керувальних політик» на основі часових графіків (робочий/неробочий час), зайнятості та простих тригерів (перевищення порогу температури/$CO_2$/потужності). На цьому рівні науковий внесок полягає у формалізації правил як відтворюваних операторів над даними (умова → дія → очікуваний KPI-ефект), що дозволяє кількісно оцінювати їхню результативність і переносити на інші об’єкти за умови семантичної уніфікації даних [17], [18].

Оптимізаційний рівень доцільно формалізувати як задачу мінімізації витрат або енергії за обмеженнями комфорту та експлуатаційних правил. Типова постановка може бути подана у вигляді функції мети:

$$J = \sum_{t=1}^{T} \left(c_t \cdot P_t \cdot \Delta t\right) + \lambda \sum_{t=1}^{T} \phi(T_{in,t}, T_{set,t}), \tag{4.1}$$

де (P_t) — потужність (або енергія за інтервал), (c_t) — тариф/вага часу, (phi) — штраф за відхилення від комфортної області, (lambda) — коефіцієнт компромісу «енергія–комфорт». Обмеженнями виступають допустимі межі температури/$CO_2$, межі керувальних впливів (наприклад, швидкість зміни уставки HVAC), а також фізичні обмеження обладнання. У магістерській реалізації достатньо обґрунтувати вибір горизонту оптимізації (наприклад, 1–6 годин для HVAC), джерела прогнозів (зовнішня температура, графік зайнятості) та порядок інтеграції з платформою (передача уставок через DH/DC на виконавчі пристрої із захищеним каналом) [14], [15], [27].

### 4.3 Обробка даних, статистичний аналіз та якість вимірювань

Для коректної оцінки ефекту оптимізації необхідно забезпечити якість даних на рівні збору, зберігання та аналізу. У платформному підході BENEFIT передбачено централізований збір і зберігання даних для подальшої обробки та формування KPI [1]. У межах дослідження пропонується використовувати три етапи підготовки даних: валідацію, очищення та агрегацію.

Валідація полягає у перевірці фізичних меж (температура/вологість/$CO_2$ у можливих діапазонах), перевірці часової цілісності (монотонність часових міток, відсутність «стрибків» через некоректну синхронізацію), а також перевірці узгодженості (наприклад, нереалістично швидкі зміни температури або потужності як ознака помилки сенсора). Для польових вузлів це доповнюється вимогою буферизації та повторної доставки, щоб зменшити втрати часових рядів при збоях мережі [1], [12].

Очищення даних включає роботу з пропусками та викидами. Пропуски доцільно обробляти диференційовано: короткі пропуски (1–5 інтервалів) можуть заповнюватися інтерполяцією або переносом останнього валідного значення, довші пропуски мають позначатися як «непридатні» для KPI, якщо вони впливають на достовірність. Викиди (аномально великі/малі значення) доцільно визначати за статистичними критеріями (наприклад, IQR або robust z-score) з урахуванням контексту (перехідні режими обладнання можуть

створювати короткочасні піки, що не є помилкою). Для енергетичних даних важливо не «вирізати» піки без обґрунтування, оскільки саме пікові навантаження часто є ціллю оптимізації.

Агрегація та аналіз часових рядів виконуються у декількох масштабах: секундно-хвилинний рівень для аналізу керування та піків, годинний/добовий — для KPI енергоменеджменту, тижневий/місячний — для оцінки трендів і сезонності. У випадку високочастотних даних доцільно застосовувати підходи TSDB та downsampling, що забезпечує ефективність аналітики при масштабуванні сенсорної мережі [19]. Далі статистичний аналіз має включати порівняння розподілів енергоспоживання «до/після», оцінку варіативності, а також перевірку значущості змін із врахуванням релевантних змінних. Для енергоменеджменту критично важливим є коригування базової лінії (baseline adjustment) за погодою та режимами, що прямо узгоджується з логікою ISO 50006 та підходами M&V [43], [46], [47].

Також Додаток Б ілюструє як саме обробляються великі масиви вимірювань перед переходом до оцінки ефективності.

### 4.4 Оцінка енергоефективних заходів і сценаріїв

Оцінка ефекту в ПАК має підтримувати як «м’які» заходи (керування, розклади, оптимізаційні політики), так і «жорсткі» (модернізація вікон, освітлення, обладнання). У BENEFIT наведено приклад плану заходів, де реалізація двох дій — покращення ізоляції вікон та модернізація освітлення до LED — забезпечила зниження сумарного річного енергоспоживання на 12,14% відносно базового стану [1]. Цей кейс є методично важливим: він демонструє необхідність довгого горизонту оцінки, а також доцільність поєднання інженерних заходів із платформною аналітикою, що забезпечує доказовість ефекту.

У межах магістерського дослідження доцільно реалізувати двоканальну методику оцінки: за фактичними даними та за моделлю/симуляцією. Фактична оцінка ґрунтується на побудові базової лінії споживання, яка коригується за

погодою та режимами (наприклад, через регресійну модель залежності енергії від зовнішньої температури та індикаторів зайнятості). Після впровадження заходу або політики оцінюється відхилення від скоригованої бази. Саме така логіка відповідає M&V-підходам IPMVP та стандартам ISO 50015 [43], [47]. Для прозорості результатів обов'язково наводиться інтервал довіри або оцінка невизначеності, оскільки енергетичні дані мають природну варіативність.

Симуляційна оцінка передбачає застосування інструментів моделювання будівлі як цифрового двійника для сценарного аналізу. У BENEFIT як Building Simulation Tool застосовано DesignBuilder, що використовується для оцінювання енергоспоживання, теплових режимів і сценаріїв модернізації [1], [20]. У методиці ПАК DesignBuilder доцільно використовувати у двох режимах: (1) прогнозно-порівняльному — оцінка потенційного ефекту заходу до його реалізації; (2) верифікаційному — калібрування моделі під фактичні дані та порівняння симульованого і виміряного споживання. Для калібрування моделі застосовуються критерії ASHRAE Guideline 14 (наприклад, NMBE і CVRMSE як метрики відповідності моделі фактичним даним) [44]. Перевага цього підходу полягає у можливості пояснювати ефект заходів не лише числом економії, але й причинно-наслідковими змінами теплового балансу, режимів HVAC та впливом на комфорт, що підсилює наукову якість обґрунтувань [45].

Після отримання результатів за фактичними даними та/або симуляцією необхідно виконати критичний аналіз, який відділяє реальний ефект оптимізації від артефактів вимірювання або зовнішніх факторів. На цьому етапі важливим є зіставлення отриманих KPI з енергетичними цілями та контекстом експлуатації відповідно до циклу безперервного поліпшення ISO 50001 [4]. Якщо система демонструє зниження енергії, але одночасно погіршує комфорт (порушення критеріїв ASHRAE 55), то результат не може вважатися прийнятним енергоменеджментом, і необхідна корекція політик або оптимізаційної функції [45].

Суттєвим компонентом обговорення є аналіз масштабованості та переносимості результатів. У реальних будівлях різна структура зон і різні інженерні системи можуть призводити до того, що одна й та сама стратегія

керування має різний ефект. Для зменшення цієї проблеми у технологічній частині було обґрунтовано використання семантичних моделей (Brick/Haystack), які роблять дані «змістовно інтероперабельними» [17], [18]. У науково-дослідній частині це означає можливість порівнювати результати між зонами та будівлями не лише за абсолютними кВт·год, а за узгодженими EnPI, прив’язаними до однакових класів датчиків/підсистем і однакових правил агрегації. Такий підхід підсилює відтворюваність і робить результати дослідження придатними для повторного застосування.

Окремо розглядається вплив кібербезпеки та надійності на достовірність оцінки. Платформа, що здійснює керування, повинна забезпечувати захищені канали (TLS/DTLS), контроль доступу (OAuth 2.0) та базову кіберстійкість пристроїв, оскільки будь-яке несанкціоноване втручання може спотворити дані й компрометувати наукові висновки [6], [14], [15], [27]. Відповідно, у дослідженні доцільно фіксувати, що телеметрія і команди проходять через автентифіковані контури, а зміни конфігурацій логуються та можуть бути відтворені під час аналізу.

Додаткові результати аналізу часових рядів енергоспоживання, розширені графічні матеріали та допоміжні візуалізації, що підтверджують отримані висновки, наведено в Додатку В.

Розширені результати аналізу енергоспоживання, додаткові графічні матеріали та допоміжні візуалізації, що деталізують і підтверджують отримані висновки, наведено в Додатку Г та Додатку Ґ.

### 4.5 Висновок до четвертого розділу

У розділі сформовано науково обґрунтовану методику оцінювання ефективності ПАК оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT. Показано, що доказовість результатів забезпечується поєднанням KPI/EnPI (відповідно до ISO 50006) із процедурами вимірювання і верифікації енергетичних заощаджень (IPMVP та ISO 50015), що дозволяє коректно порівнювати базовий та удосконалений стани із нормалізацією за релевантними

змінними [43], [46], [47]. Визначено роль інструментів симуляції (DesignBuilder) як каналу сценарного аналізу та верифікації заходів, а також доцільність калібрування моделі будівлі за ASHRAE Guideline 14 для узгодження моделі з фактичними даними [1], [20], [44]. На основі референсного кейсу BENEFIT підкреслено, що комбіновані заходи (наприклад, покращення вікон і LED-освітлення) здатні забезпечувати вимірюваний ефект на рівні двозначних відсотків за умови наявності коректної платформи збору даних і аналітики [1]. Додатково обґрунтовано, що оптимізація повинна виконуватися із жорсткими обмеженнями комфорту (ASHRAE 55) та із забезпеченням захищеного контуру даних і керування, оскільки надійність телеметрії та цілісність конфігурацій є необхідною умовою коректності наукових висновків [6], [14], [15], [27], [45]..

# 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

## 5.1 Дослідження та оцінка ефективності системи

Експериментальна частина спрямована на підтвердження працездатності розробленої IoT/вбудованої системи (з елементами TinyML на Arduino Nano 33 BLE Sense) у реальних умовах експлуатації складських та/або холодильних приміщень. Основним критерієм успішності є здатність системи надійно збирати телеметрію, виявляти події/аномалії в режимі, близькому до реального часу, формувати сповіщення для відповідальних осіб і забезпечувати відтворюваність результатів за різних режимів роботи об’єкта (стабільна температура, цикли відтаювання, відкривання дверей, пікові навантаження, перебої зв’язку тощо).

З огляду на це, експериментальна методика побудована у вигляді послідовності перевірок: (1) функціональні випробування вузлів (сенсори, передавання, сховище, панель/логіка сповіщень), (2) валідація TinyML-моделі на контрольних наборах даних, (3) вимірювання обчислювальних характеристик на мікроконтролері (затримка, пам’ять, енергоспоживання), (4) польові випробування на об’єкті та статистичне узагальнення показників на часових рядах.

**Експериментальний стенд і умови проведення випробувань**

Стенд формується як мінімально необхідна конфігурація для відтворення «бойового» циклу роботи: сенсорний вузол на базі Arduino Nano 33 BLE Sense з підключеними датчиками мікроклімату та/або технологічних параметрів; комунікаційний канал (Wi-Fi/LoRaWAN/інша технологія залежно від реалізації); проміжний шлюз або сервер збору даних; база даних та сервіс візуалізації/сповіщень; а також контрольний інструмент для маркування подій (журнал оператора або еталонний вимірювач).

Умови випробувань необхідно зафіксувати у вигляді протоколу: температурний режим приміщення, допустимі межі вологості, частота відкривання дверей, тривалість «робочого дня» об’єкта, наявність циклів

відтаювання (для холодильної техніки), а також типові джерела завад (металеві стелажі, екранування, перешкоди для радіоканалу). Важливо окремо вказати частоту опитування сенсорів і частоту передачі пакетів, оскільки саме ці параметри визначають і точність відстеження подій, і витрати енергії вузла.

Для демонстрації практичної реалізації та умов проведення досліджень наведено рисунок 5.1, який відображає склад і взаємне розташування апаратних та програмних компонентів під час експериментальних випробувань.

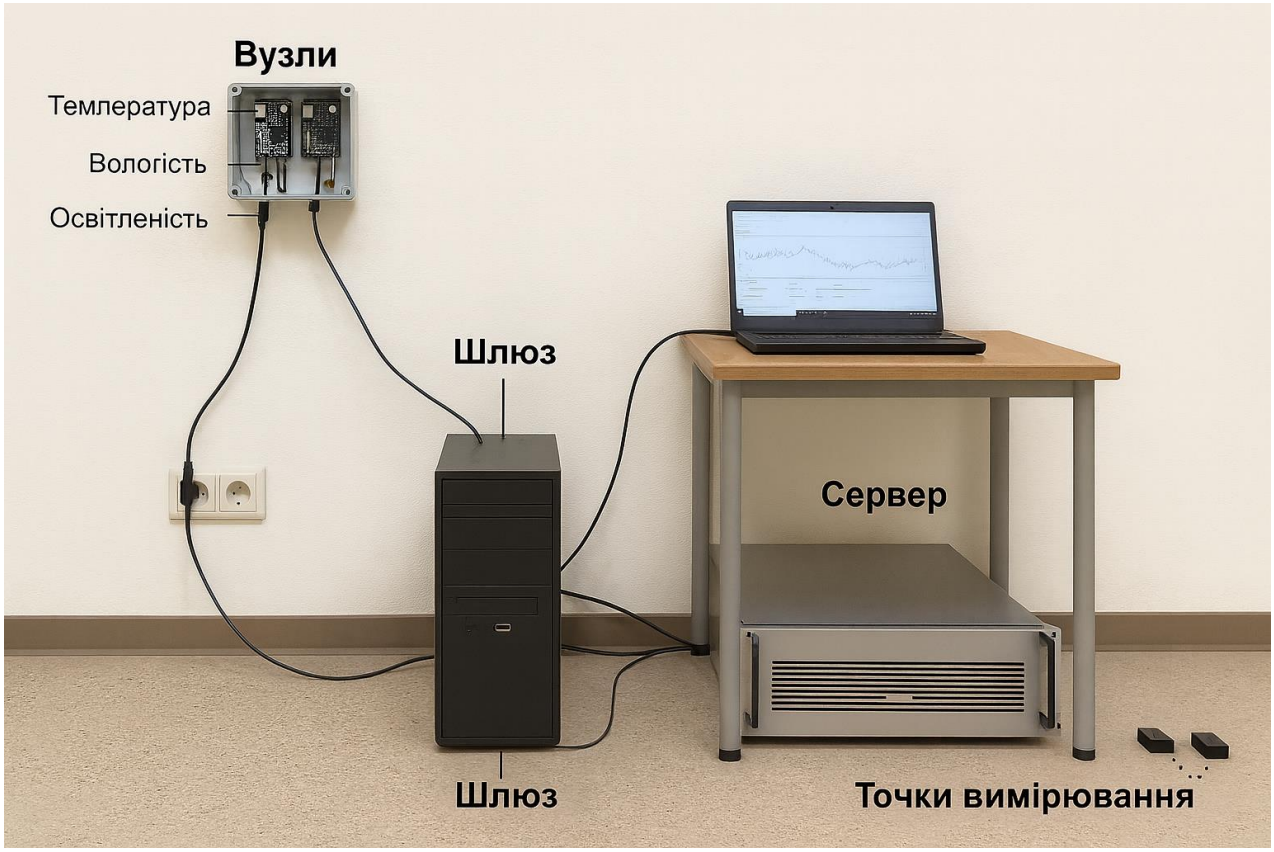



Рисунок 5.1 – Фото/схема експериментального стенду

### 5.2 Збір даних та підготовка вибірки, валідація

Для TinyML-підходу критичним є якісне формування навчальної та тестової вибірок. Дані збираються у «природних» режимах (нормальна робота) та у «стресових» сценаріях (короткочасне відкривання дверей, тривале відкривання, розбалансування температури, збій живлення, відмова компресора/вентилятора, нетипові коливання вологості). Кожен сценарій має

бути описаний часовими межами та ознаками, за якими він маркується як клас події/аномалії.

Підготовка вибірки включає синхронізацію часових міток, очищення від пропусків, фільтрацію явних артефактів (наприклад, «стрибків» через розрив контакту), нормалізацію/стандартизацію ознак, а також формування вікон (sliding window) для моделі, якщо класифікація подій виконується за фрагментами сигналу. На практиці доцільно контролювати дисбаланс класів: нормальні стани зазвичай домінують, і без компенсацій (ваги класів/оверсемплінг) модель може «ігнорувати» рідкісні, але важливі події.

Для наочного представлення результатів моніторингу та аналітики енергоспоживання наведено рисунок 5.2, який відображає основні показники ефективності, поточний стан системи та засоби візуалізації даних для користувача.

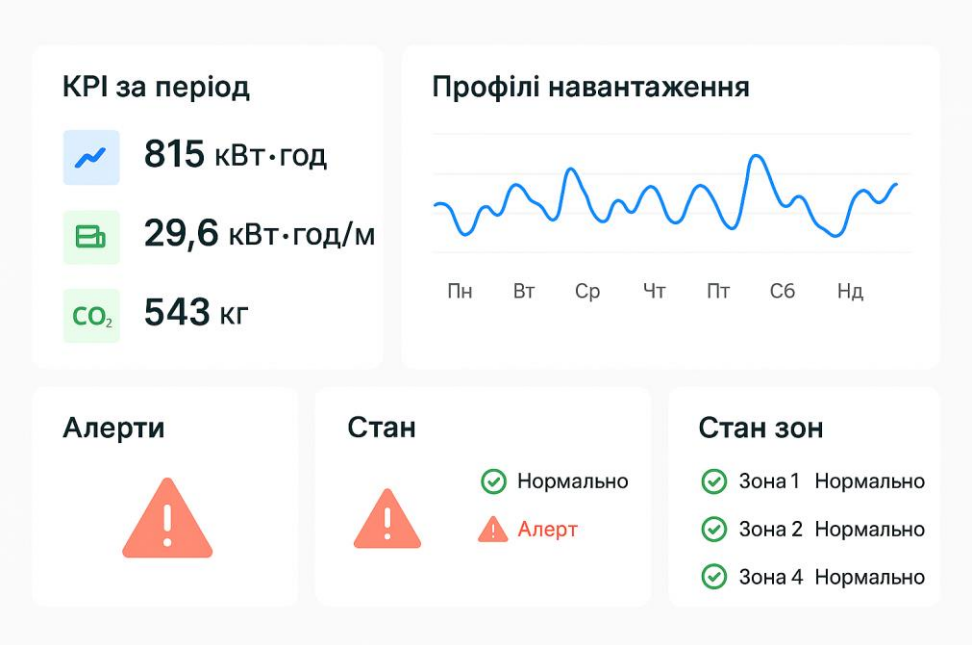



Рисунок 5.2 – Дашборд платформи

**Валідація ML-моделі та придатність до виконання на мікроконтролері.**

Валідацію моделі слід проводити у два етапи: спочатку на «великому» середовищі (ПК) із фіксацією якості класифікації, а потім — після перетворення для вбудованого виконання (квантизація, оптимізація графа, перехід у формат

TensorFlow Lite Micro або еквівалент) із повторною перевіркою якості та стабільності.

Окремо оцінюється «вбудована придатність» моделі: обсяг Flash/RAM, пікова потреба в оперативній пам’яті під час інференсу, середня та максимальна затримка інференсу, а також тепловий/енергетичний режим вузла. Практично важливо підтвердити, що інференс не порушує часові вимоги системи (наприклад, інференс має вкладатися у міжвимірювальний інтервал) та не «витісняє» критичні задачі (передавання даних, обробка переривань, журналювання).

## 5.3 Метрики оцінювання, сценарії, KPI

Розглянемо метрики оцінювання: якість виявлення подій і системні показникиДля подієвих/аномальних сценаріїв якість доцільно оцінювати через стандартні метрики класифікації: Accuracy, Precision, Recall, F1-score, а також матрицю помилок. У вигляді розрахункових співвідношень (для бінарного випадку) це можна подати так:

- Precision = TP / (TP + FP)
- Recall = TP / (TP + FN)
- F1 = 2 · Precision · Recall / (Precision + Recall)

Паралельно обов’язково фіксуються системні метрики: середня затримка «сенсор → запис у БД», відсоток втрачених пакетів/повторних передач, доступність сервісу (uptime), стабільність під навантаженням, а також ефективність механізму сповіщень (час доставки, відсутність дублювань, коректність умов спрацювання). Для складських/холодильних приміщень окремим KPI може бути «час виходу параметра за допустимі межі до моменту сповіщення».

**Польові сценарії та інтерпретація результатів**

Польові випробування доцільно організувати як серію контрольованих сценаріїв із повтореннями. Наприклад: коротке відкривання дверей (30–60 с), тривале відкривання (3–10 хв), пікове завантаження/розвантаження, зміна

уставок, імітація відмови датчика (відключення) або деградації каналу зв’язку (штучне екранування). Для кожного сценарію фіксується: (1) фактичний початок події, (2) реакція сенсорних ознак, (3) момент спрацювання ML/правил, (4) доставка сповіщення, (5) повернення до норми.

Інтерпретація результатів повинна відображати не лише «відсоток правильних відповідей», а й характер помилок. Хибнопозитивні спрацьовування (FP) збільшують шум у сповіщеннях та знижують довіру персоналу, а хибнонегативні (FN) є критичними з точки зору втрат продукції або порушення умов зберігання. Тому в тексті розділу варто акцентувати баланс між Recall (не пропустити небезпечні стани) та Precision (не створювати зайві тривоги), обґрунтовуючи вибір порогів або логіки постобробки.

**Статистичне узагальнення часових рядів та KPI**

Для довготривалих даних (тижні/місяці) доцільно застосувати статистичне узагальнення за середніми значеннями, стандартним відхиленням і квартилями. Квартильний аналіз є практичним інструментом для опису сезонності/режимності та виявлення «нетипових» періодів, а представлення у вигляді box-plot дозволяє наочно показувати міжквартильний розмах і крайні значення. Подібний підхід (середнє, стандартне відхилення, квартилі Q0–Q4 та box-plot) застосовується в енергетичних дослідженнях для аналізу споживання і виділення періодів з ненульовою активністю.

У контексті розробленої системи цей інструментарій доцільно використати для:

- оцінки стабільності мікроклімату в робочі/неробочі періоди;
- виділення «аномальних» добових вікон (наприклад, нічні відхилення);
- порівняння режимів до/після налаштувань (уставок, графіків роботи, профілів доступу).

Також важливим є питання безпеки, цілісності даних та стійкості до збоїв. Оскільки система є кіберфізичною (сенсори → мережа → сервер → рішення), експериментально слід підтвердити принаймні базові властивості безпеки: автентифікацію вузлів, контроль доступу до сервісів, захищений канал

передавання та коректну поведінку при часткових відмовах (втрата зв’язку, перезавантаження, деградація сенсора). Практика використання у подібних платформах унікальних ідентифікаторів мережевих вузлів та симетричного шифрування для обміну даними (зокрема, на рівні AES-128) демонструє доцільність такого підходу як мінімального стандарту для зниження ризику втручання і підміни телеметрії.

У польових умовах це має проявлятися у відсутності «неавторизованих» вузлів у системі, неможливості запису даних без ключів/токенів, а також у коректній черзі відкладеної доставки (store-and-forward), якщо передбачено буферизацію на вузлі або шлюзі.

### 5.4 Висновок до п’ятого розділу

За результатами експериментальної частини в розділі необхідно узагальнити: (1) якість виявлення подій/аномалій (із зазначенням метрик і типів помилок), (2) часові характеристики системи (затримки, стабільність, втрати пакетів), (3) ресурсні характеристики TinyML на мікроконтролері (пам’ять, інференс-час, енергоспоживання), (4) ефективність сповіщень і придатність до реальної експлуатації. Окремо доцільно зазначити потенціал практичного ефекту від систематичного моніторингу й подальшого впровадження рекомендацій: у суміжних рішеннях для будівель після реалізації окремих заходів фіксують зниження сумарного енергоспоживання (порядку 12% після цільових покращень), що підтверджує прикладну доцільність підходу «дані → аналітика → управлінське рішення».

# 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

## 6.1 Питання щодо охорони праці

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» присвячена розробці та дослідження програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій. Тому доцільно розглянути наступні питання.

Робота за комп'ютером може здатися безпечною на перший погляд, але надмірна легковажність може призвести до певних проблем у здоров'ї людини. Програмісти та інші фахівці IT-технологій вимагають великої розумової роботи. Розробники дуже захоплені, що навіть коли вони не працюють над проєктом, вони все ще думають про нього. Нерідко відпочинок розглядається як заміна основної діяльності. Наприклад, читання профільної літератури, верстка сайтів або навчання нових мов програмування є прикладами таких діяльностей. Тим не менш, розробник прагне допомогти користувачам досягти особистісного та професійного зростання, оскільки мозок не може безперервно приймати корисну інформацію.

Багато IT-компаній зараз обладнають свої офіси зонами відпочинку та кімнатами відпочинку, щоб допомогти працівникам відпочити та розслабитися. Таким чином, окремий робочий стол з ноутбуком вже давно не дивує. Отже, міжнародні компанії змагаються за перетворення нудних, одноманітних офісів у творчі місця, де можна генерувати нові ідеї без надмірних зусиль.

Не забувайте, що умови роботи програмістів можуть бути впливом наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів: шум; тепловиділення, яке може завдати шкоди організму як за високими, так і за низькими температурами; іонізуючі та неіонізуючі випромінювання: рентгенівське, інфрачервоне, ВЧ і СВЧ електромагнітне випромінювання; статична електрика; недостатнє природне та штучне освітлення; і візуальні фактори

За таких умов охорона праці, яка складається з правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних систем, має вирішальне значення для збереження здоров'я та працездатності людей під час роботи. Зрештою, науково-технічні досягнення можуть бути корисними лише в тій мірі, в якій вони забезпечують людям безпеку, комфорт і зручність під час роботи.

Таким чином, коли справа доходить до сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, працівники ІТ-індустрії повинні дотримуватися певних правил і вимог щодо безпеки праці. Ці правила включають нормування праці з урахуванням віку працівників і загального інформаційного навантаження. Крім того, необхідно створити та впровадити щотижневі та щорічні плани праці та відпочинку, які допомагають працівникам уникнути перевтоми та підвищити розум Ергономічний дизайн робочих місць і оптимізація взаємодії людини в системі «оператор-термінал» повинні відігравати важливу роль у цьому напрямі. Відповідні стандарти підприємств, які регулюють різноманітні питання охорони та психології безпеки праці працівників ІТ-індустрії, повинні вмістити всі ці вимоги.

У зв'язку з появою та впровадженням нових інформаційно-комунікаційних технологій необхідно продовжувати вдосконалювати охорону праці працівників ІТ-індустрії.

У національному класифікаторі ДК-003-2010 необхідно розширити перелік основних професій комп'ютерної галузі та підготувати відповідний випуск у кваліфікаційному довіднику посад фахівців ІТ-індустрії. Це сприятиме вирішенню питань соціального захисту, пенсійного забезпечення та атестації робочих місць основних професій за умовами праці для подальшого надання певних видів пільг і компенсацій за важкі шкідливі і не

Відповідно до п'ятої статті Закону України «Про охорону праці» проведення психофізіологічної експертизи є важливим компонентом оцінки професійної придатності фахівців з інформаційних технологій.

Робота з комп'ютерами нового покоління характеризується психофізіологічними перенавантаженнями, втомою зорового аналізатора,

гіпокінезією та відсутністю норм праці та відпочинку для віку, статі, категорії зорової роботи та щорічної відпустки.

Все це вимагає розробки нових законів, які регулюють роботу та відпочинок працівників ІТ-індустрії, а також стандартів підприємств, комп'ютерних центрів, центрів інформаційних технологій і сучасних комп'ютерних класів.

Збереження та відновлення здоров'я працівників комп'ютерної галузі залежить від попереднього та періодичного нагляду, подальшої психофізіологічної експертизи та встановлення професійної придатності до роботи з комп'ютерами нового покоління, а також виявлення певних факторів ризику електротравматизму під час ремонту та обслуговування комп'ютерів. Відповідно до ДНАОП 0.00-8.20-99 фахівці, які проводять експертизу на предмет безпечної експлуатації ПЕОМ, повинні отримати офіційне підтвердження фактичних параметрів електробезпеки та їх відповідності вимогам нормативної документації. За результатами експертизи повинні прийматися рішення про відповідність ПЕОМ стандартам безпеки, терміни повторної експертизи, протоколи вимірювань і випробувань, розрахунки та експертні висновки [66].

За допомогою ергономічної оптимізації зорової роботи в системі «оператор-термінал» можна підвищити розумову працездатність, а також відновити психосоматичне здоров'я фахівців ІТ-індустрії.

### 6.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях

Тема кваліфікаційної роботи освітнього присвячена підвищенню рівня повноти та достовірності подання інформації програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій, тому доцільно розглянути питання з вимог електробезпеки до приміщень з ЕОМ.

Персональні комп'ютери були широко поширені. Тим не менш, їх використання загострило проблеми збереження власного та суспільного здоров'я; тому необхідно удосконалити існуючі методи організації робочих

місць і розробити нові, щоб запобігти негативним наслідкам ПК на здоров'я користувачів.

Соціальна, психологічна та медична безпека є трьома основними компонентами безпеки користувачів персональних комп'ютерів.

Розв'язання цих проблем у соціальному плані передбачає оптимізацію умов життя, праці, відпочинку, харчування, побуту, розвитку культури та транспорту.

Психологія праці має важливе значення для запобігання розладам здоров'я на робочому місці. Таким чином, створення розумних виробничих колективів, у яких відсутня психологічна несумісність, зменшує нервово-психічне напруження та підвищує ефективність праці.

Психоемоційний стрес, який проявляється більшою чи меншою мірою у кожного, особливо важливий для користувачів відеодисплейних терміналів.

Оскільки відразу вирішити цю проблему на рівні підприємства неможливо, компанії постійно усувають виробничі умови, які сприяють емоційному стресу.

Медицина відіграє важливу роль у запобіганні захворюванням користувачів ПК. Існує широкий спектр заходів профілактики для користувачів ПК, які включають як первинну профілактику здоров'я, яка включає відбір професії, так і вторинну, яка спрямована на зниження ризику розвитку перевтоми та перенапруження. З метою відновлення опорно-рухового апарату та зору використовуються ці комплексні заходи.

Наказ Міністерства соціальної політики від 14.02.2018 р. No207 «Про затвердження Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» (Вимоги), зареєстрований в Міністерстві юстиції України 25 квітня 2018 р. No508/31960, стосується всіх суб'єктів господарювання, незалежно від форм власності, організаційно-правової форми та виду діяльності. Вимоги визначають мінімальні вимоги до безпеки та

Крім того, згідно з Законом про охорону праці роботодавець зобов'язаний поінформувати працівників під розписку про умови праці та наявність небезпечних та шкідливих виробничих факторів (фізичних, хімічних,

біологічних і психофізіологічних) на робочому місці, які виникають під час роботи з екранами та ще не усунуто, а також про можливі наслідки цих факторів на здоров'я працівників.

• Навчання та перевірка знань працівників з питань охорони праці та безпечного використання екранних пристроїв до початку роботи з ними, а також організація роботи обладнання в разі зміни та організації роботи.

• Робітодавець повинен вжити відповідних заходів, щоб переконатися, що робоче місце працівника відповідає цим Вимогам.

• Під час облаштування робочого місця працівника з екранами необхідно використовувати устаткування, яке не виділяє надлишкового тепла та не створює зайвого шуму. Рівень шуму на робочих місцях осіб, які працюють з екранними пристроями, повинен відповідати Санітарним нормам виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99, затвердженим постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 р. No37.

• Враховуючи тривалість робочого дня, необхідно організувати внутрішні перерви для відпочинку відповідно до Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПІН 3.3.2.007-98, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 р. No7 (далі – ДСанПІН 3.3.2.007-98).

• Забезпечити, щоб працівники проходили медичні огляди відповідно до вимог Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій, затвердженого наказом МОЗ від 21.05.2007 р. No246, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 23 липня 2007 р. за No846/14113. • Роботодавці зобов'язані проводити лабораторні дослідження умов праці працівників, щоб визначити шкідливі та небезпечні фактори виробничого середовища, важ

Окремо зазначимо, що згідно з діючим класифікатором професій виділено три професійні групи за характером роботи, яка виконується при роботі з відеотерміналами електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) і персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ): • Розробники програм (інженери-програмісти) — виконують роботу з відеотерміналами та

документацією при необхідності інтенсивного обміну інформацією з ЕОМ і високої частоти прийняття рішень  Робота характеризується високою розумовою та творчою працею, підвищеним напруженням зору, концентрацією уваги, вимушеною робочою позою, загальною гіподинамією та періодичним навантаженням верхніх кінцівок.

В умовах дефіциту часу робота виконується в режимі діалогу з ЕОМ у вільному темпі з періодичним пошуком помилок; • Оператори електронно-обчислюваних машин – виконують роботу, пов’язану з обліком інформації, отриманої з ВДТ за попереднім запитом або тієї, що надходить з ВДТ, супроводжується перервами різної тривалості, пов’язаними з виконанням іншої роботи; ця робота характеризується напруженням

Відповідно до наведеної вище класифікації та згідно з вимогами ДСанПІН 3.3.2.007-98 при 8-годинній денній робочій зміні в залежності від характеру праці існують такі внутрішньозмінні режими праці та відпочинку: • Розробникам програм із застосуванням ЕОМ слід призначати регламентовану перерву для відпочинку тривалістю 15 хвилин кожну годину роботи.

Операторам із застосуванням електронних систем (ЕОМ) слід призначати регулярні перерви для відпочинку 15 хвилин через кожні дві години роботи; операторам комп’ютерного набору слід призначати регулярні перерви для відпочинку 10 хвилин після кожної години роботи.

Для 12-годинної робочої зміни необхідні регулярні перерви тривалістю 15 хвилин протягом перших восьми годин роботи, а також протягом останніх чотирьох годин роботи, незалежно від характеру роботи.

Таким чином, тривалість робочої зміни електронно-обчислювальної техніки повинна включати внутрішньозмінні режими праці та відпочинку, встановлені відповідно до ДСанПІН 3.3.2.007-98 [66]..

## 6.3 Висновки до шостого розділу

Розробка магістерської кваліфікаційної роботи, присвяченої програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій, вимагає глибокого аналізу та забезпечення вимог охорони праці (ОП) і безпеки в надзвичайних ситуаціях (БНС). Використання безпечного виробничого обладнання, застосування безпечних технологічних процесів і розумна організація робіт є трьома основними способами забезпечення безпеки праці. Згідно з ГОСТ 12.2.003–91, безпека обладнання включає конструктивні рішення, спрямовані на зменшення ризиків (наприклад, за допомогою мінімізації енергії, обов'язкових вбудованих засобів захисту та мінімізації споживання енергії), дотримання ергономічних вимог (ГОСТ 12.2.032–78 та інші) та забезпечення його стійкості до збоїв, особливо щодо відновлення енергопостачання.

Відповідно до ГОСТ 12.3.002–75, безпека технологічних процесів передбачає відсутність прямого контакту працівників з небезпечними факторами, комплексну автоматизацію, впровадження систем контролю для аварійного відключення та своєчасного інформування про небезпечні ситуації, а також суворе дотримання вимог до розміщення обладнання та раціональної організації праці та відпочинку. Особливу увагу слід приділяти вимогам до фізичного та психічного здоров'я працівників, які отримують дозвіл на роботу.

Завдяки автоматизації IoT-системи взаємодія в системі «людина-машина» стає важливою, оскільки оператор продовжує виконувати основну функцію, особливо щодо прийняття рішень у непередбачуваних ситуаціях. У своїй роботі оператор постійно сприймає інформацію з індикаторів, оцінює її та переробляє, щоб створити концептуальну модель процесу, приймати рішення та виконувати керівні дії. Він постійно контролює свої дії, щоб гарантувати, що він працює правильно. Таким чином, для успіху проекту необхідні технічна безпека та ергономічні рішення з високою надійністю людського фактора, щоб запобігти небезпечним ситуаціям, спричиненим як технічними, так і людськими помилками.

# ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв’язано актуальну науково-практичну задачу, що полягає у розробці та дослідженні програмно-апаратного комплексу для оптимізації енергоспоживання в будівлях на базі IoT-технологій. Актуальність тематики зумовлена зростанням енергетичних витрат, необхідністю підвищення енергоефективності будівель, впровадженням концепцій сталого розвитку та переходом до цифрових технологій управління інженерними системами. У роботі враховано сучасні вимоги до систем енергоменеджменту, інтероперабельності, кібербезпеки та доказовості результатів енергоефективних заходів.

У ході виконання роботи досягнуто поставленої мети, яка полягала у створенні науково обґрунтованого підходу до побудови програмно-апаратного комплексу для моніторингу, аналізу та оптимізації енергоспоживання будівель із використанням IoT-інфраструктури. Для досягнення цієї мети було послідовно виконано всі поставлені завдання дослідження.

У першому розділі здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджень у сфері енергоменеджменту будівель. Розглянуто основні джерела енергетичних втрат і чинники неефективності, пов’язані з огороджувальними конструкціями, інженерними системами та поведінковими особливостями користувачів. Проаналізовано існуючі підходи до оптимізації енергоспоживання, зокрема правилові, оптимізаційні (MPC), методи на основі машинного навчання та гібридні підходи. Показано, що жоден із підходів окремо не забезпечує оптимального поєднання адаптивності, пояснюваності та практичної придатності, що обґрунтовує доцільність використання комбінованих архітектур на базі IoT-платформ.

У другому розділі розроблено технологічну архітектуру програмно-апаратного комплексу, яка ґрунтується на ієрархічній багаторівневій моделі з розподілом на польовий рівень, рівень комунікацій, центральний вузол обробки даних (Data Hub), аналітичні сервіси та користувацькі інтерфейси. Обґрунтовано вибір протоколів обміну даними (MQTT, CoAP, HTTP)

відповідно до вимог щодо затримок, надійності та масштабованості. Визначено механізми захисту інформації, автентифікації вузлів і контролю доступу, що є критично важливим для кіберфізичних систем. Запропоновано використання системи ключових показників ефективності (KPI/EnPI) як основи для прийняття управлінських рішень та оцінювання енергетичної ефективності.

У третьому розділі розглянуто конструктивні та апаратні аспекти реалізації програмно-апаратного комплексу. Обґрунтовано вибір вузлів збору даних (RDAU), концентраторів (DC) та центрального вузла обробки (DH), а також принципи їх розміщення в будівлі з урахуванням зонування та надійності зв’язку. Розглянуто типові схеми підключення сенсорів до мікроконтролерів за інтерфейсами I²C, SPI, UART і RS-485. Показано, що запропонована структура дозволяє масштабувати систему, адаптувати її до різних типів будівель і забезпечувати безперервний збір телеметричних даних.

У четвертому розділі виконано науково-дослідну частину роботи, спрямовану на формування методики аналізу даних та оцінювання ефективності енергоефективних заходів. Розроблено підхід до статистичної обробки часових рядів, формування базових ліній енергоспоживання та розрахунку KPI з урахуванням зовнішніх факторів, таких як погодні умови та режими експлуатації. Показано доцільність використання підходів вимірювання і верифікації (M&V) для коректного порівняння базового та удосконаленого станів будівлі. Результати аналізу узгоджено з підходами, застосованими у платформі BENEFIT, що підтверджує їх наукову обґрунтованість та відповідність міжнародним стандартам енергоменеджменту.

У п’ятому розділі подано результати експериментальних досліджень і практичної перевірки працездатності запропонованого програмно-апаратного комплексу. Наведено результати обробки експериментальних даних, статистичного узагальнення показників енергоспоживання та аналізу KPI. Показано, що використання системи моніторингу й аналітики дозволяє виявляти неефективні режими роботи, формувати рекомендації щодо оптимізації та обґрунтовано оцінювати ефект від упроваджених заходів.

Додаткові графічні матеріали та розширені результати аналізу винесено у додатки, що забезпечує повноту та прозорість поданих результатів.

У шостому розділі розглянуто питання охорони праці, безпечного поводження з обладнанням.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному поєднанні IoT-інфраструктури, ієрархічної архітектури збору даних, системи KPI та методів статистичного аналізу для оцінювання енергоефективності будівель. Запропонований підхід забезпечує узгоджене використання даних різного типу, їх семантичну структуризацію та можливість масштабування системи без суттєвих змін базової архітектури. Отримані результати розширюють уявлення про практичне застосування платформ енергоменеджменту та можуть бути використані як основа для подальших досліджень у сфері розумних будівель і міст.

Практична цінність роботи полягає в можливості використання розробленого програмно-апаратного комплексу для реальних об’єктів житлового, адміністративного та громадського призначення. Запропоновані рішення можуть бути інтегровані в існуючі системи диспетчеризації будівель або використані як основа для створення нових платформ енергоменеджменту. Результати роботи можуть бути корисними для енергоменеджерів, проєктувальників систем автоматизації, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців з інформаційних технологій та енергоефективності.

# ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1 Aradoaei, M., Ciobanu, R.-C., Schreiner, C. M., Grigoraș, G., & Livadariu, R.-P. BENEFIT: An Energy Management Platform for Smart and Energy Efficient Buildings. Energies, 18, 4542 (2025). https://doi.org/10.3390/en18174542

2 European Parliament and the Council. Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union (2010).

3 European Parliament and the Council. Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency (recast). Official Journal of the European Union (2023).

4 ISO. ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization (2018).

5 International Society of Automation. ISA/IEC 62443 Series of Standards.

6 Fagan, M., et al. NISTIR 8259A: IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline. National Institute of Standards and Technology (2020).

7 ASHRAE. BACnet™ (Building Automation and Control Networking Protocol) (веб-ресурс).

8 OWASP Foundation. OWASP Internet of Things Top 10 (2018) (веб-ресурс).

9 Efficiency Valuation Organization (EVO). (2016). International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP): Core Concepts. Washington, DC: EVO.

10 ISO. (2018). ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization.

11 ISO. ISO 16484-5:2017 Building automation and control systems — Part 5: Data communication protocol. Geneva: International Organization for Standardization (2017).

12 OASIS. (2019). MQTT Version 5.0 (OASIS Standard). OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) TC.

13 Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). The Constrained Application Protocol (CoAP) (RFC 7252). IETF.

14 Rescorla, E. (2018). The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). IETF.

15 Rescorla, E., Tschofenig, H., Fossati, T., & others. (2022). The Datagram Transport Layer Security (DTLS) Protocol Version 1.3 (RFC 9147). IETF.

16 Selander, G., Mattsson, J., Palombini, F., & Seitz, L. (2019). Object Security for Constrained RESTful Environments (OSCORE) (RFC 8613). IETF.

17 Balaji, B., Bhattacharya, A., Fierro, G., Gao, J., Gluck, J., Hong, D., Johansen, A., Koh, J., Ploennigs, J., Agarwal, Y., Bergés, M., Culler, D., Gupta, R., Kjærgaard, M. B., Srivastava, M., & Whitehouse, K. (2016). Brick: Towards a Unified Metadata Schema For Buildings. Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments (BuildSys ’16).

18 Project Haystack. (2021). Guide Specifications for Data Modeling Standard.

19 Shah, B., et al. (2022). Performance Study of Time Series Databases. arXiv preprint.

20 DesignBuilder Software Ltd. (n.d.). DesignBuilder CFD Draft Manual.

21 ASHRAE. (2022). ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.

22 U.S. Green Building Council (USGBC). (2019). LEED v4.1 Building Design and Construction (BD+C) Beta Guide.

23 IEC. (2023). IEC 62351: Power systems management and associated information exchange — Data and communications security.

24 Bray, T. (2017). The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format (RFC 8259). IETF.

25 Bormann, C., & Hoffman, P. (2020). Concise Binary Object Representation (CBOR) (RFC 8949). IETF.

26 The OpenAPI Initiative. (2021). OpenAPI Specification, Version 3.1.0.

27 Hardt, D. (2012). The OAuth 2.0 Authorization Framework (RFC 6749). IETF.

28 Espressif Systems. (2024). ESP32 Series Datasheet (v5.1).

29 Bosch Sensortec. (2022). BME280 Data Sheet (BST-BME280-DS001, Rev. 1.23). Bosch Sensortec

30 Sensirion. (2022). Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and Temperature Sensor (Version 7). Sensirion AG

31 Sensirion. (2023). Sensirion SCD4x Datasheet (SCD40/SCD41). Sensirion AG

32 ROHM Semiconductor. (2011). BH1750FVI: Digital 16-bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC (Datasheet). mouser.com

33 Analog Devices. (2017). ADE9153A: Energy Metering IC with Autocalibration (Data Sheet). analog.com

34 Raspberry Pi Ltd. (2025). Raspberry Pi 4 Model B Product Brief (Published February 2025). datasheets.raspberrypi.com

35 Raspberry Pi Ltd. (2024). Compute Module 4 Datasheet (RP-008168-DS-1). pip.raspberrypi.com

36 International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code) (IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013). webstore.iec.ch

37 International Electrotechnical Commission. (2012). IEC 61326-1: Electrical equipment for measurement, control and laboratory use — EMC requirements — Part 1: General requirements. webstore.iec.ch

38 Modbus Organization. (2012). Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. afs.enea.it

39 International Organization for Standardization. (2017). ISO 16484-5: Building automation and control systems (BACS) — Part 5: Data communication protocol. iso.org

40 International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 62053-21: Electricity metering equipment (a.c.) — Particular requirements — Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2). webstore.iec.ch

41 Texas Instruments. (2025). CC2652R SimpleLink™ Multiprotocol 2.4 GHz Wireless MCU (Datasheet). Texas Instruments

42 Semtech Corporation. (2015). SX1276/77/78/79: 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver (Datasheet, Rev. 4).

43 Efficiency Valuation Organization (EVO). (2016). International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP): Core Concepts. Washington, DC: EVO.

44 ASHRAE. (2014). ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

45 ASHRAE. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: ASHRAE.

46 ISO. (2014). ISO 50006:2014 Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) — General principles and guidance. Geneva: International Organization for Standardization.

47 ISO. (2014). ISO 50015:2014 Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance. Geneva: International Organization for Standardization.

48 ISO. (2021). ISO 52120-1:2021 Energy performance of buildings — Contribution of building automation, controls and building management — Part 1: General framework and procedures. Geneva: International Organization for Standardization.

49 Stanko, A., Wieczorek, W., Mykytyshyn, A., Holotenko, O., & Lechachenko, T. (2024). Real-time air quality management: Integrating IoT and Fog computing for effective urban monitoring. CITI’2024: 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0, June 12–14, 2024, Ternopil, Ukraine.

50 Stanko, A., Palka, O., Matiichuk, L., Martsenko, N., & Matsiuk, O. (2021, September). Smart City: A Review of Model Architecture and Technology. In 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Vol. 2, pp. 273-277). IEEE.

51 Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с

52 Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

# ДОДАТКИ

**Додаток А**

## Тези конференцій

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**
**Маріборский університет (Словенія)**
**Технічний університет у Кошице (Словаччина)**
**Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)**
**Краківський економічний університет (Польща)**
**Вроцлавський економічний університет (Польща)**
**Університет «Опольська Політехніка» (Польща)**
**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**
**Вінницький національний аграрний університет**
**Львівський національний університет ім. І. Франка**
**Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області**
**Наукове товариство ім. Шевченка**
**Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти**
**Сумський державний педагогічний університет**
**Запорізький національний університет**

# АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Збірник**

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів**

11-12 грудня 2025 року

**УКРАЇНА**
**ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

УДК 621.311.1:681.5:004.912
**Микитишин А.Г., к.т.н., доц., Максимів Д.Р., Федчак В.І.**
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПЛАТФОРМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ: КОНЦЕПЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ BENEFIT

**Mykytyshyn A.G., Ph.D., Assoc. Prof., Maksymiv D.R., Fedchak V. I.**

## INTELLIGENT ENERGY MANAGEMENT PLATFORMS AS A TOOL FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS: CONCEPT AND RESULTS OF BENEFIT IMPLEMENTATION

Питання енергоефективності будівель є одним із ключових елементів сучасної європейської політики, спрямованої на зменшення викидів парникових газів, оптимізацію енерговитрат і підвищення стійкості інфраструктур. У країнах ЄС саме будівлі споживають близько 40 % загального обсягу енергії, а близько 36 % викидів $CO_2$ пов'язані з їх опаленням та експлуатацією [1]

Ураховуючи той факт, що більшість будівель була зведена до 2000 року, коли вимоги до теплоізоляції, автоматизації та енергоконтролю були значно нижчими, проблема модернізації стає стратегічно важливою. Економічні, екологічні та соціальні фактори підсилюють актуальність пошуку нових технологічних рішень, здатних забезпечити ефективне управління енергоспоживанням.

Одним із напрямів, що стрімко розвивається, є використання інтелектуальних систем енергоменеджменту (Smart Building Energy Management Systems — SBEMS). Такі системи поєднують цифрові сенсори, інтернет речей (IoT), смарт-лічильники, засоби автоматизації, обчислювальні моделі та аналітичні алгоритми. Вони дозволяють будівлям реагувати на поточні умови в режимі реального часу, а також прогнозувати майбутні зміни в навантаженні, погоді, рівні зайнятості приміщень та інших зовнішніх факторах. На відміну від традиційних систем керування, що працюють за статичними планами, SBEMS володіють адаптивністю, що дає можливість економити ресурси, зменшувати пікові навантаження та підвищувати комфорт користувачів [2], [3].

Інтелектуальні системи управління енергоспоживанням базуються на поєднанні кількох ключових принципів. Насамперед йдеться про глибокий моніторинг параметрів, таких як температура, вологість, рівень освітлення, споживання теплової та електричної енергії. Важливо, що джерела даних є розподіленими та здатними взаємодіяти між собою через бездротові протоколи — ZigBee, LoRaWAN, GSM/GPRS, Wi-Fi чи технологію 6LoWPAN, яка відкриває шлях до впровадження IPv6 у сенсорних мережах [1]

Ці дані збираються в єдиному аналітичному модулі, де обробляються за допомогою алгоритмів прогнозування, статистичного аналізу та математичного моделювання. Саме аналітична складова перетворює платформу з «реєстратора подій» на «інтелектуального оператора», здатного генерувати рекомендації, попередження та оптимальні сценарії роботи обладнання.

У цьому контексті платформа BENEFIT (Building Energy Efficiency in Totality) є одним із найбільш показових прикладів сучасних SBEMS. Будучи розробленою для комплексного керування енергоспоживанням у будівлях різних типів — навчальних, адміністративних, лабораторних чи житлових — вона поєднує відкриту архітектуру, гнучку інфраструктуру збору даних та розширені засоби аналітики [1]

Її побудовано за трирівневою моделлю: рівень фізичних пристроїв включає датчики, лічильники та виконавчі блоки; комунікаційний рівень забезпечує зв'язок між елементами мережі, а серверний рівень відповідає за аналіз даних, візуалізацію та формування рішень. Завдяки цьому платформа здатна інтегрувати широкий спектр обладнання та адаптуватися під потреби конкретної будівлі.

Особливу увагу розробники BENEFIT приділили питанням кібербезпеки. Для багатьох систем енергоменеджменту цей аспект часто залишається «слабким місцем», що дозволяє потенційні втручання у критичні процеси. На противагу цьому BENEFIT використовує унікальні MAC-ідентифікатори всіх пристроїв та апаратне шифрування AES-128, що суттєво підвищує захищеність мережі від атак і несанкціонованого доступу [1]. Завдяки цьому система набуває стійкості до зовнішніх впливів та забезпечує цілісність даних у процесах моніторингу та керування.

Одним із ключових елементів платформи є можливість моделювання енергетичних процесів. Завдяки інтеграції з DesignBuilder здійснюється не лише аналіз історичних даних, а й прогнозування майбутнього енергоспоживання на основі фізичних моделей теплових процесів. Це дозволяє оцінювати теплові втрати будівлі, моделювати сценарії роботи вентиляційних та опалювальних систем, прогнозувати комфортні умови та визначати найбільш енергоефективні стратегії модернізації. Для прийняття рішень такий інструмент є надзвичайно важливим, оскільки дозволяє порівняти вплив різних заходів ще до їх реалізації — від заміни вікон до встановлення сонячних панелей [4].

Результати впровадження BENEFIT у будівлі технічного університету свідчать про її ефективність у реальних експлуатаційних умовах. Протягом року було зібрано повний масив даних щодо внутрішніх та зовнішніх температур, показників споживання тепла та електроенергії, режимів роботи систем освітлення та вентиляції. На основі цих даних платформа виявила, що заміна традиційних вікон на скління з низьким коефіцієнтом емісії дозволила скоротити річну витрату енергії на 8.33 %. Додатковий перехід на LED-освітлення збільшив загальний ефект до 12.14 % [1]

Більш детальний аналіз продемонстрував, що найпотужніший ефект досягався саме в зимовий період, що є логічним з огляду на інтенсивне використання систем опалення. Фактичні дані також підтвердили значне зниження пікових теплових навантажень у періоди різких температурних змін.

З огляду на отримані результати стає зрозуміло, що інтелектуальні платформи енергоменеджменту можуть відігравати вирішальну роль у формуванні стратегії модернізації будівель. Вони не лише забезпечують безперервний контроль параметрів, але й дозволяють переосмислити саму логіку управління енергією. Цифрова система здатна вчасно визначати відхилення, прогнозувати ризики, адаптувати режими роботи обладнання та пропонувати найбільш раціональні рішення. У сукупності це створює основу для розвитку «розумних», екологічних і економічно ефективних будівель, що відповідають вимогам сучасної енергетичної політики.

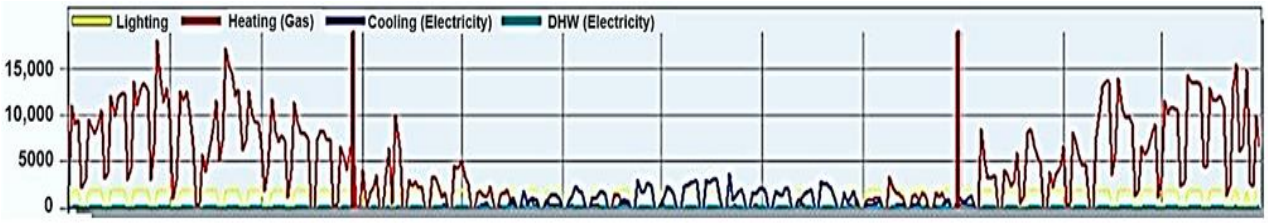
Отже, платформа BENEFIT демонструє, що поєднання IoT-технологій, хмарних сервісів, математичного моделювання та інтелектуальних механізмів керування створює новий рівень ефективності в управлінні енергетичними процесами. Завдяки комплексному підходу, високому рівню безпеки та можливості адаптації її можна розглядати як перспективний інструмент для розвитку енергоефективних та стійких інфраструктур, що відповідають концепції «нульового» або навіть позитивного енергобалансу.

**Література**

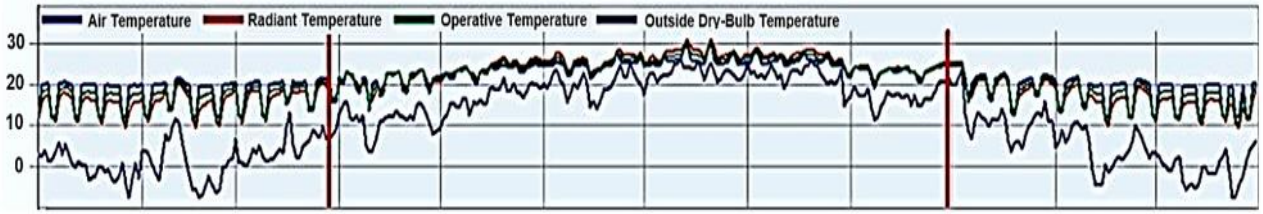

1. Aradoaei, M., Ciobanu, R.-C., Schreiner, C. M., Grigoras, G., Livadariu, R.-P. BENEFIT: An Energy Management Platform for Smart and Energy Efficient Buildings. Energies, 18(4542), 2025.
2. Suciu, G. et al. Building energy consumption monitoring and analytics. Journal of Cleaner Production, 2019.
3. Chatzikonstantinidis, A. et al. Digital Twins in smart building energy forecasting. Energy and Buildings, 2025.
4. Revati, T. et al. Data-driven load prediction for commercial buildings. Energy Reports, 2021.
5. Piras, A. et al. IoT-based decision support for smart building energy management. Sustainable Cities and Society, 2025.

**Додаток Б**

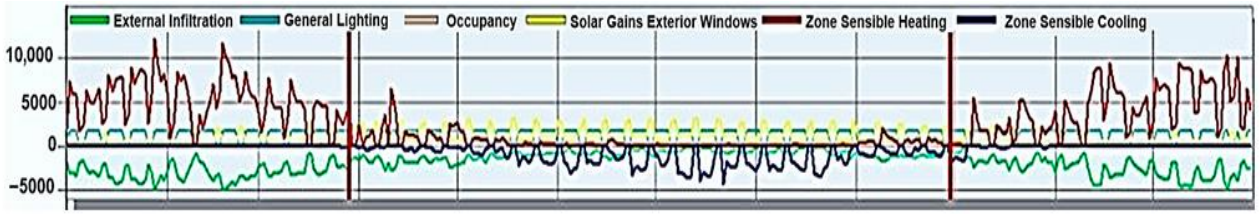
## Результати моделювання енергоспоживання та теплового балансу будівлі




Добове енергоспоживання будівлі за основними складовими (освітлення, опалення, охолодження та гаряче водопостачання) протягом року, кВт.



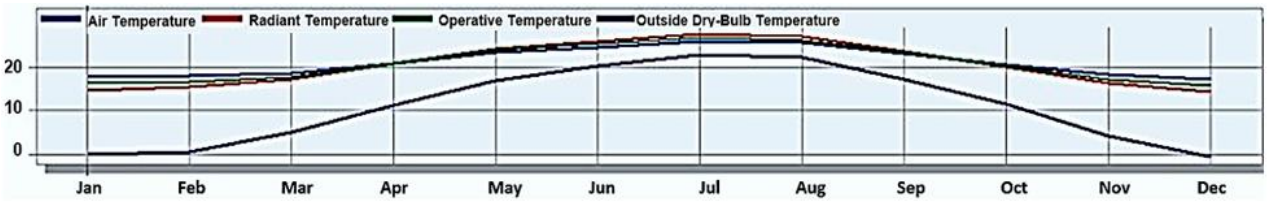

Річна динаміка температури внутрішнього та зовнішнього повітря будівлі, °С.



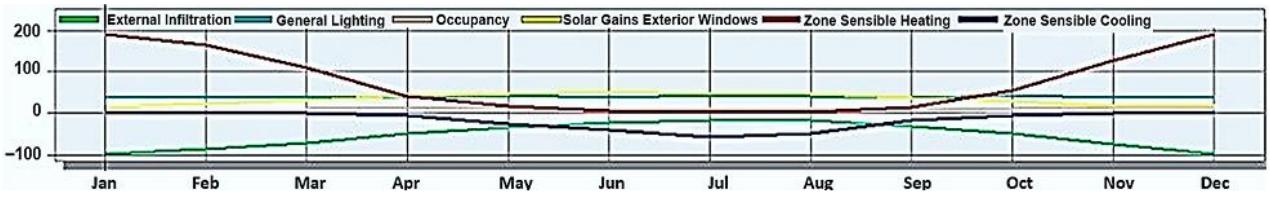

Добовий тепловий баланс будівлі протягом року, кВт.

## Результати аналізу енергоспоживання, теплового балансу та температурних режимів будівлі

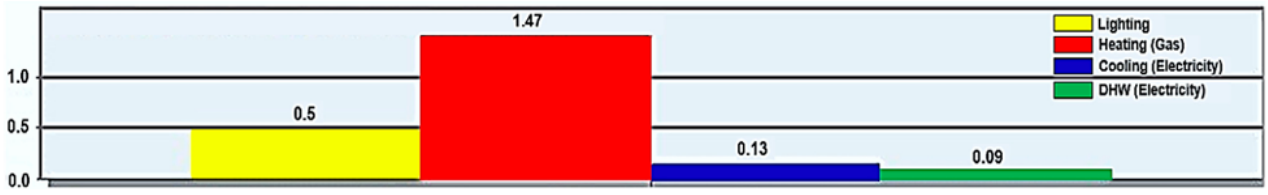
Місячне енергоспоживання будівлі за складовими (освітлення, опалення, охолодження та гаряче водопостачання) протягом року, МВт·год.




Середньомісячні значення температури внутрішнього та зовнішнього повітря будівлі протягом року, °С.

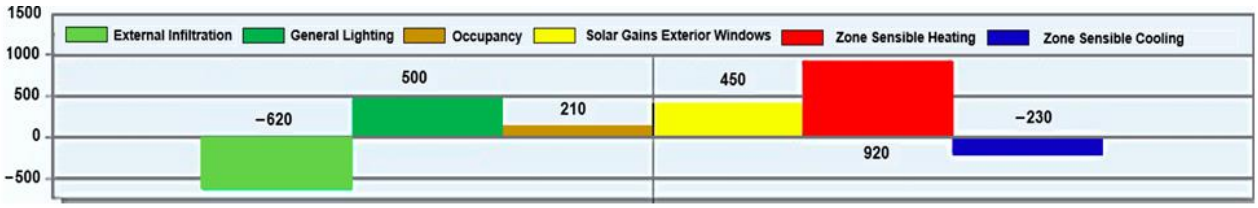



Місячний тепловий баланс будівлі протягом року, МВт·год.




Річне енергоспоживання будівлі за складовими (освітлення, опалення, охолодження та гаряче водопостачання), ГВт·год.

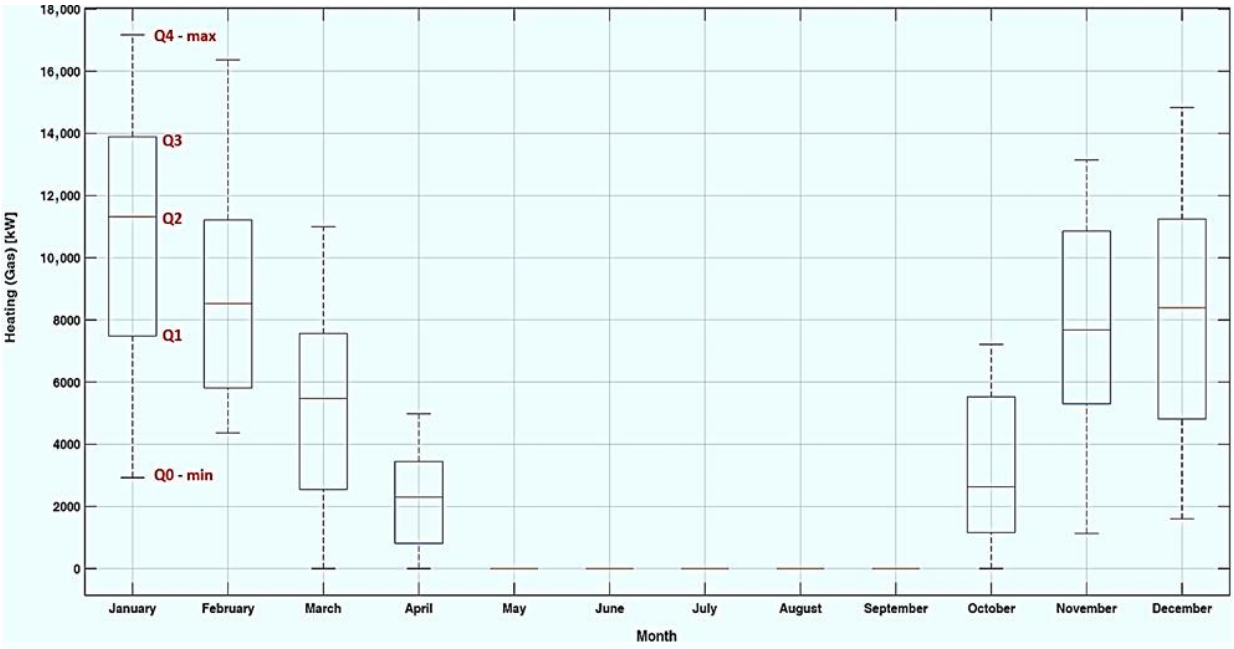
Середньорічні значення температури внутрішнього та зовнішнього повітря будівлі, °С.



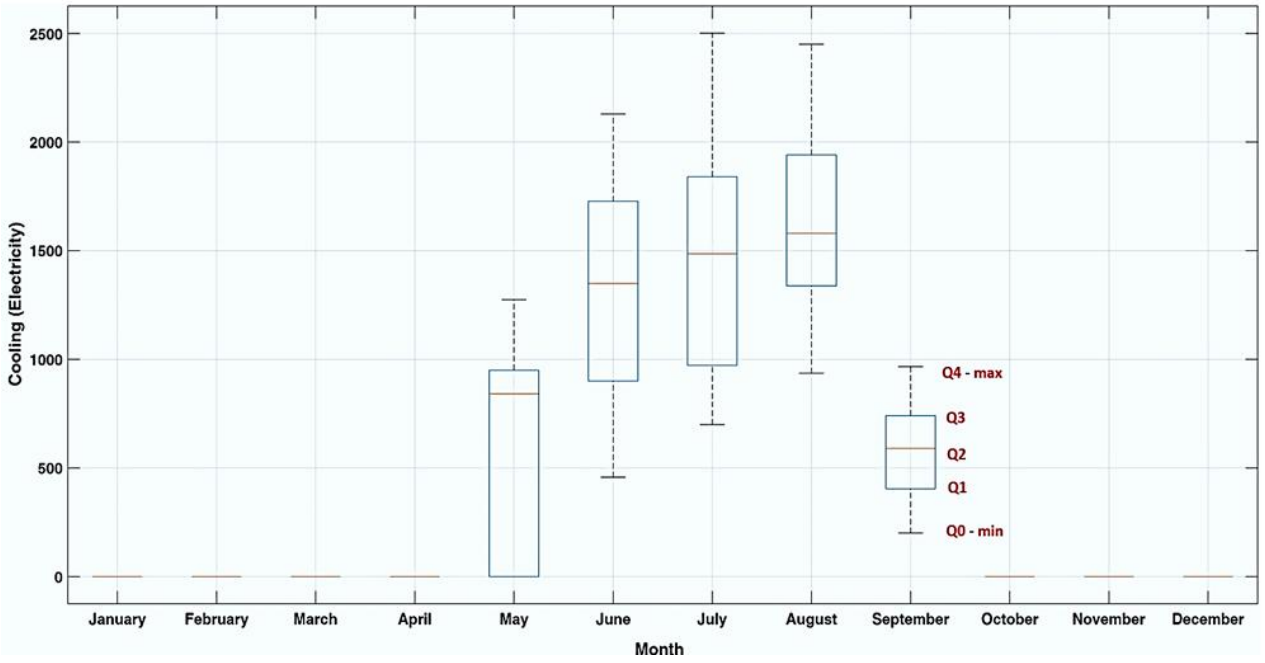

Річний тепловий баланс будівлі, МВт·год.

**Додаток Г**

## Енергетичні показники та теплові характеристики будівлі



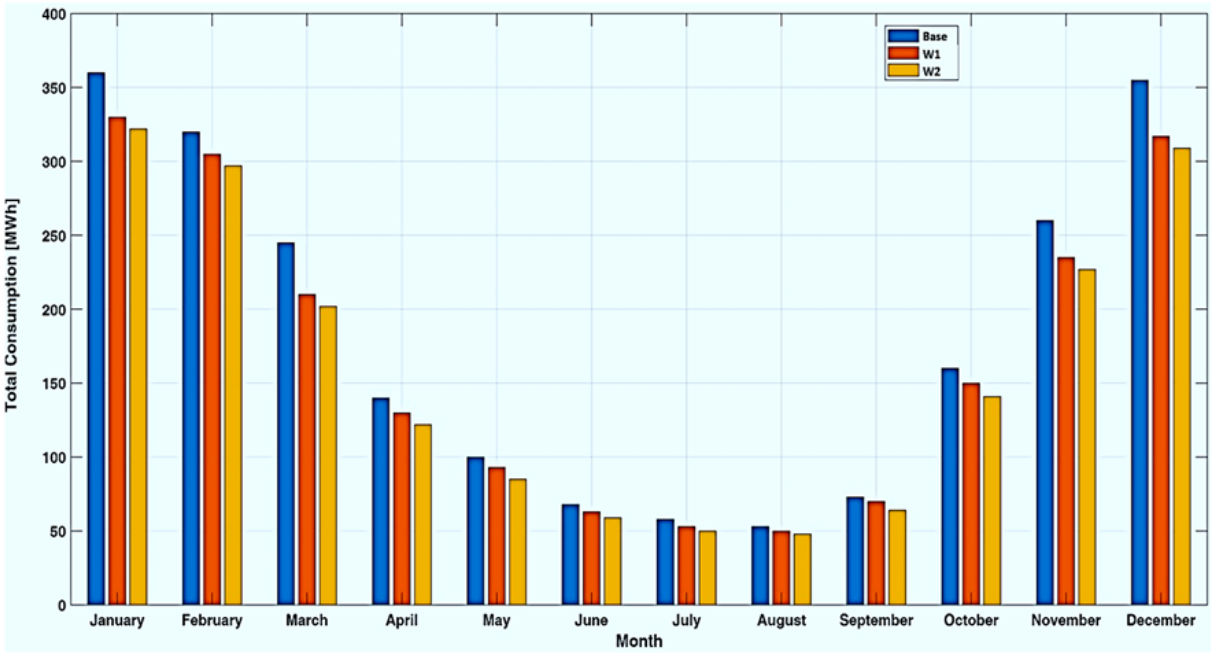

Діаграма розмаху споживання енергії на опалення, кВт.



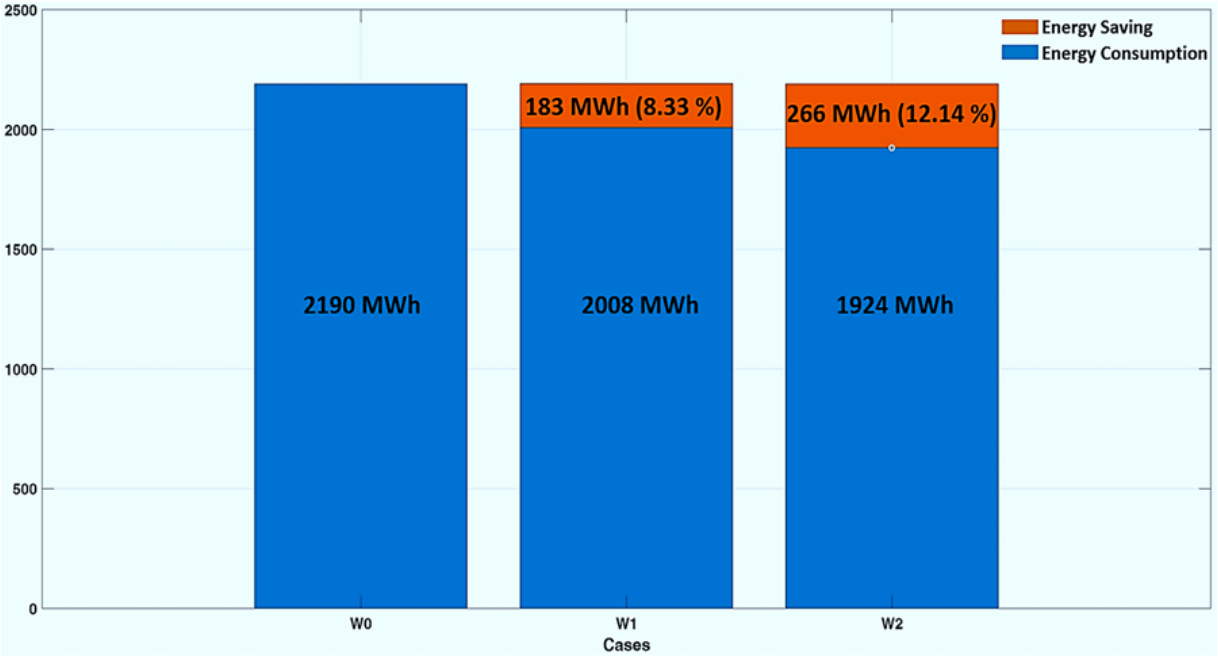

Діаграма розмаху споживання енергії на охолодження, кВт.

**Додаток Ґ**

**Порівняльний аналіз енергоспоживання будівлі при впровадженні заходів енергоефективності**




Порівняння місячного енергоспоживання будівлі без заходів з енергоефективності (базовий варіант, W0) та з упровадженням заходів з енергоефективності (варіанти W1 і W2).




Порівняння річного енергоспоживання будівлі без заходів з енергоефективності (W0) та з упровадженням заходів з енергоефективності (W1 і W2), а також відповідна економія енергії, МВт·год і