

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Олена БОРИЧЕНКО

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

освітня програма Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «Інтелектуальна система моніторингу енергоспоживання муніципальних будівель»

Виконала: студентка II курсу, групи ГН-41мп

_____ Ярошук Світлана Олександрівна _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Бориченко О.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль провідний інженер Прокопенко І.Д. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»
«Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

Завідувач кафедри

_____ Олена БОРИЧЕНКО

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ярошук Світлані Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації « Інтелектуальна система моніторингу енергоспоживання муніципальних будівель »

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Бориченко О.В _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 03 листопада 2025 р. №4749-с

2. Строк подання студентом дисертації 17 грудня 2025 року

3. Об'єкт дослідження інтелектуальна система моніторингу енергоспоживання для муніципальних будівель

4. Предмет дослідження методи та способи інтелектуального моніторингу енергоспоживання, алгоритми аналізу та прогнозування часових рядів, структурні компоненти інтелектуальних систем енергомоніторингу.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1.) Провести аналіз енергоефективності та технічного стану муніципальної будівлі (лицей №6); 2.) Дослідити наявну АСЕМ, її архітектуру та можливості; 3.) Розробити концепцію та архітектуру інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання (ISEM); 4.) Розробити алгоритми

автоматичного аналізу даних, прогнозування навантаження (ARIMA–LSTM) та виявлення аномалій; 5.) Оцінити можливості інтеграції ISEM з існуючою АСЕМ Ліцею №6; 6.) Розробити концепцію стартап-проєкту для впровадження ISEM у муніципальних будівлях

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1.) Діаграми динаміки енергоспоживання; 2.) Добові графіки електроспоживання; 3.) Схеми підключення обладнання АСЕМ; 4.) Структурна схема інтеграції АСЕМ та ISEM; 5.) Блок-схема гібридної моделі ARIMA–LSTM

7. Орієнтовний перелік публікацій тези доповіді, опубліковані в збірниках: XI Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'25» та XVII науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина».

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль

Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання 01 вересня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2025	Вик.
2	Аналіз літературних джерел та нормативної бази	01.09.2025 – 10.09.2025	Вик.
3	Збір вихідних даних і формування опису об'єкта (ліцей №6)	10.09.2025 – 17.09.2025	Вик.
4	Аналіз технічного стану будівлі та існуючої АСЕМ	17.09.2025 – 27.09.2025	Вик.
5	Аналіз даних енергоспоживання за 2021–2023 роки (тренди, сезонність, аномалії)	27.09.2025 – 05.10.2025	Вик.
6	Розроблення концепції та архітектури інтелектуальної системи моніторингу (ISEM)	05.10.2025 – 17.10.2025	Вик.
7	Розроблення алгоритмів прогнозування та виявлення аномалій (ARIMA–LSTM)	17.10.2025 – 30.10.2025	Вик.
8	Опрацювання рішень інтеграції ISEM з АСЕМ	30.10.2025 – 10.11.2025	Вик.
9	Розроблення концепції стартап-проєкту	10.11.2025 – 22.11.2025	Вик.
10	Оформлення основного тексту магістерської дисертації	22.11.2025 – 10.12.2025	Вик.
11	Підготовка реферату, графічного матеріалу та презентації	10.12.2025 – 18.12.2025	Вик.
12	Захист магістерської дисертації	22.12.2025	—

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська дисертація викладена на 115 сторінках. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаних джерел. Містить 19 рисунків, 28 таблиць та 39 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення енергоефективності муніципальних будівель в умовах зростання вартості енергоресурсів, обмеженості бюджетного фінансування та посилення вимог державної політики у сфері енергозбереження. Більшість будівель бюджетного сектору працюють із застарілими інженерними системами та не мають сучасних інструментів для автоматизованого контролю та аналізу енергоспоживання, що призводить до неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів.

Існуючі автоматизовані системи енергомоніторингу здебільшого виконують облікові завдання але не підтримують інтелектуальне управління енергоспоживанням. Розробка інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання є актуальним науково-практичним завданням. Ця система повинна бути здатна аналізувати, прогнозувати та знаходити неефективні режими роботи, щоб зменшити витрати на енергію в муніципальних будівлях.

Метою дослідження є розроблення концепції та архітектури інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання муніципальних будівель з можливостями автоматичного аналізу даних, прогнозування енергетичних навантажень та виявлення неефективних режимів роботи з метою підвищення ефективності енергоменеджменту.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

1. проаналізовані теоретичні основи інтелектуальних систем моніторингу енергоспоживання в муніципальних будівлях;
2. проаналізовано технічний стан та енергоспоживання ліцею №6;

3. розроблено інтелектуальну систему енергетичного моніторингу для муніципальних будівель;

4. розроблено стартап-проект за результатами проведеного дослідження.

Об'єкт дослідження. Система моніторингу енергії для муніципальних будівель із акцентом на процесах збору, передачі та аналізу даних в АСЕМ та ISEM.

Предмет дослідження. Методи та засоби інтелектуального моніторингу енергоспоживання, алгоритми аналізу та прогнозування часових рядів, а також архітектурні рішення автоматизованих та інтелектуальних систем енергомоніторингу.

Методи дослідження. У роботі використовуються наступні наукові підходи, зокрема систематичний аналіз технічного стану та інженерної інфраструктури будівлі; статистичні методи обробки часових рядів; регресійний аналіз для моделювання взаємозв'язків між споживанням та погодою; алгоритми машинного навчання та прогнозування (ARIMA, LSTM); рекомендації щодо архітектури IoT, протоколи передачі даних (MQTT), а також методи очищення, нормалізації та попередньої обробки даних як частина конвеєра даних.

Наукова новизна полягає у розробленні узагальненої архітектури інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання для муніципальної будівлі з інтеграцією автоматизованої системи енергомоніторингу та інтелектуальних алгоритмів аналізу даних і прогнозування.

Практичне значення. Система ISEM із запропонованою архітектурою може бути впроваджена в школах, ліцей, лікарнях, адміністративних установах та інших підприємствах державного сектору. Вона може мінімізувати витрати на енергію, поліпшити управління енергією, зробити контроль показників прозорим та надавати автоматичні звіти про споживання енергії відповідно до стандартів ISO 50006.

Апробація результатів дослідження. Результати дослідження були

представлені на XI Міжнародній науково-технічній конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'25".

Публікації. С.О. Ярощук, О. В. Бориченко. "Роль гнучкого попиту (demand response) у декарбонізації енергетичних систем: міжнародний досвід і можливості для України", м. Київ 28-29.04.2015 р. та Ярощук С.О., Бориченко О.В. "Роль автоматизованих систем енергомоніторингу в енергоменеджменті муніципальних будівель", м. Київ 19.11.2015 р.

Ключові слова. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ISEM, ACEM, IOT, SCADA/BACS, MQTT, ARIMA-LSTM, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Structure and scope of work. The master's thesis is presented on 115 pages. The work consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references. It contains 19 figures, 28 tables, and 39 bibliographic references.

Relevance of the research topic. The relevance of the topic is due to the need to improve the energy efficiency of municipal buildings in the context of rising energy costs, limited budget funding, and stricter government energy conservation policies. Most buildings in the budget sector operate with outdated engineering systems and do not have modern tools for automated control and analysis of energy consumption, which leads to inefficient use of fuel and energy resources.

Existing automated energy monitoring systems mostly perform accounting tasks but do not support intelligent energy consumption management. The development of an intelligent energy consumption monitoring system is a pressing scientific and practical task. This system should be capable of analyzing, predicting, and identifying inefficient operating modes in order to reduce energy costs in municipal buildings.

The aim of the study is to develop the concept and architecture of an intelligent energy consumption monitoring system for municipal buildings with the ability to automatically analyze data, forecast energy loads, and identify inefficient operating modes in order to improve energy management efficiency.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

1. the theoretical foundations of intelligent energy consumption monitoring systems in municipal buildings were analyzed;
2. the technical condition and energy consumption of Lyceum No. 6 were analyzed.
3. an intelligent energy monitoring system for municipal buildings was developed.
4. a startup project was developed based on the results of the study.

Object of research. Energy monitoring system for municipal buildings with a focus on data collection, transmission, and analysis processes in ASEM and ISEM.

Subject of research. Methods and means of intelligent energy consumption monitoring, algorithms for analyzing and forecasting time series, as well as architectural solutions for automated and intelligent energy monitoring systems.

Research methods. The work uses the following scientific approaches, in particular systematic analysis of the technical condition and engineering infrastructure of the building; statistical methods of time series processing; regression analysis for modeling the relationship between consumption and weather; machine learning and forecasting algorithms (ARIMA, LSTM); recommendations for IoT architecture, data transfer protocols (MQTT), as well as methods for cleaning, normalizing, and preprocessing data as part of the data pipeline.

The scientific novelty lies in the development of a generalized architecture for an intelligent energy consumption monitoring system for municipal buildings, integrating an automated energy monitoring system and intelligent data analysis and forecasting algorithms.

Practical significance. The ISEM system with the proposed architecture can be implemented in schools, lyceums, hospitals, administrative institutions, and other public sector enterprises. It can minimize energy costs, improve energy management, make performance monitoring transparent, and provide automatic energy consumption reports in accordance with ISO 50006 standards.

Approval of research results. The research results were presented at the XI International Scientific and Technical Conference “Energy Management: Status and Development Prospects – PEMS'25.”

Publications. S.O. Yaroshchuk, O.V. Borichenko. “The role of flexible demand (demand response) in the decarbonization of energy systems: international experience and opportunities for Ukraine,” Kyiv, April 28-29, 2015, and Yaroshchuk S.O., Borichenko O.V. “The role of automated energy monitoring systems in energy management of municipal buildings,” Kyiv, November 19, 2015.

Keywords: INTELLIGENT ENERGY MONITORING, ISEM, ASEM, IOT, SCADA/BACS, MQTT, ARIMA-LSTM, ENERGY EFFICIENCY.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Скорочення

АСЕМ – автоматизована система енергомоніторингу;

ISEM – інтелектуальна система енергетичного моніторингу;

IoT – Internet of Things (інтернет речей);

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition, система диспетчерського контролю та збору даних;

BACS – Building Automation and Control Systems, системи автоматизації та керування будівлями;

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport, протокол передавання даних для IoT-систем;

TSDB – Time Series Database (база даних часових рядів);

ARIMA – Autoregressive Integrated Moving Average, статистична модель прогнозування часових рядів;

EnB – Energy Baseline, базовий рівень енергоспоживання згідно з ISO 50006;

EnPI – Energy Performance Indicator, індикатор енергетичної ефективності;

HDD – Heating Degree Days (градусо-добові показники).

Терміни

REST API – програмний інтерфейс для взаємодії клієнт–сервер через HTTP;

WebSocket – двосторонній канал обміну даними між клієнтом і сервером у режимі реального часу;

Modbus RTU/TCP – промислові протоколи передачі даних, що використовуються лічильниками та датчиками АСЕМ;

M-Bus – Meter-Bus, протокол для передачі даних від лічильників води та тепла;

Soberry B – контролер АСЕМ, що приймає дані з датчиків і передає їх у систему ISEM;

TimescaleDB – розширення PostgreSQL для зберігання часових рядів, використовується у ISEM;

TLS 1.2/1.3 – протоколи шифрування для захищеної передачі даних;

Data-pipeline – послідовність процесів обробки даних: очищення, нормалізація, агрегація, підготовка до аналізу та ML;

LSTM – Long Short-Term Memory, вид рекурентних нейронних мереж, використовується для прогнозування;

ARIMA–LSTM – гібридна модель прогнозування енергоспоживання в ISEM;

Z-score – статистичний критерій для виявлення короткочасних аномалій у даних енергоспоживання;

MAD – Median Absolute Deviation, метод визначення довготривалих аномалій у часових рядах.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	10
ВСТУП.....	12
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЛЯХ.....	14
1.1 Енергоефективність муніципальних будівель в Україні та світі.....	14
1.2 Сучасні системи моніторингу енергоспоживання (SCADA, АСЕМ, ІоТ, Smart-Metering)	15
1.3 Інтелектуальні системи аналізу та оптимізації енергоспоживання	18
1.4 Архітектура автоматизованих систем енергетичного моніторингу.....	19
1.5 Нормативно-правова база України та міжнародні стандарти (Закон України «Про енергетичну ефективність», ISO 50006, КМУ №1140)	24
1.6 Підходи до побудови базового рівня енергоспоживання та індикаторів енергоефективності (EnB, EnPI)	27
Висновки до розділу 1	32
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЛІЦЕЮ №6.	34
2.1 Загальна інформація про будівлю ліцею №6.....	34
2.2 Аналіз огорожувальних конструкцій та теплотехнічних характеристик будівлі.....	35
2.3 Аналіз систем теплопостачання, вентиляції та гарячого водопостачання	38
2.4 Аналіз електропостачання та системи освітлення	39
2.5 Дані енергоспоживання за 2021–2023 роки: тенденції, аномалії, сезонність 40	40
2.6 Опис наявної АСЕМ Ліцею №6 та її функціональні можливості	46
2.7 Впроваджені заходи з енергоефективності.....	50
Висновки до розділу 2	51
3 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО	

МОНІТОРИНГУ ДЛЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ	53
3.1 Загальна концепція інтелектуальної системи енергомоніторингу	53
3.2 Аналіз та технічна оцінка існуючої АСЕМ Ліцею №6.....	56
3.3 Архітектура інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM)	62
3.4 Архітектура інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM)	68
3.5 Безпека та надійність функціонування ISEM.....	79
3.6 Інтеграція інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM) з існуючою системою АСЕМ у ліцеї №6.....	80
3.7 Технічні характеристики обладнання інтелектуальної системи енергомоніторингу	84
Висновки до розділу 3	86
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	88
4.1 Ідея проекту.....	88
4.2 Технологічна оцінка можливостей реалізації проекту	91
4.3 Аналіз можливостей ринку для запуску стартап-проекту	93
4.4 Стратегічне планування ринкової діяльності стартап-проекту	100
4.5 Маркетингова програма стартап-проекту.....	102
Висновки до розділу 4	105
ВИСНОВКИ.....	107
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109

ВСТУП

У зв'язку з прискореною цифровізацією та зростаючою потребою в ефективному використанні енергоресурсів виникає нагальна потреба впровадження сучасних систем контролю та моніторингу на муніципальних об'єктах. Значна частина цих об'єктів, і особливо освітні та адміністративні будівлі, були створені в період, коли енергоефективність не була включена до порядку денного. Як наслідок, робота на об'єктах із застарілими інженерними мережами, відсутність систем автоматичного керування та значні втрати енергії збільшують витрати на енергоспоживання та збільшують витрати місцевих бюджетів. У цьому сценарії цифрові технології та аналітичне програмне забезпечення можна розглядати як основні компоненти, що забезпечують енергоефективність та оптимізоване використання енергії.

Огляд академічної літератури показує, що деякі компоненти моніторингу, такі як автоматичні системи збору даних, інтелектуальні лічильники, системи SCADA та рішення IoT, були широко впроваджені в промислових і комерційних масштабах. Однак існує невідповідність щодо включення цих компонентів в інтелектуальну систему, здатну не тільки передавати дані, але й аналізувати, визначати базове споживання, прогнозувати та ідентифікувати неефективні режими роботи. Крім того, це підкреслює прогалину в дослідженнях, яка вимагає зосередження уваги на розробці нових технологій для кращих аналітичних функцій та їх впровадження в рамках існуючої інженерної структури.

Завдання поточного дослідження спрямоване на створення інтелектуальної системи, яка дозволить контролювати та відстежувати споживання енергії в міських будівлях та робити прогнози та оцінки щодо енергоефективності.

Предметом дослідження тут є споживання енергії в муніципальних будівлях.

Сфера досліджень зосереджена на методах, моделях, програмному забезпеченні та технічних інструментах для інтелектуального моніторингу енергоспоживання. Для виконання вищезазначеної мети дослідження об'єднує

новітні законодавчі вимоги з новими підходами до організації системи енергомоніторингу, виконує оцінку технічного стану, структурних особливостей та енергетичних характеристик ліцею №6, аналізує динамічну структуру енергоспоживання з використанням історичних даних та визначає вирішальні фактори, що впливають на неї, оцінює можливості та обмеження в рамках автоматизованої системи моніторингу енергетики та систем (АСЕМ), проектує структуру інтелектуальної системи енергомоніторингу з урахуванням модулів аналітичної обробки даних, прогнозування та виявлення ненормальних режимів та розробляє рекомендації щодо підвищення енергоефективності муніципальних будівель із зазначенням можливостей реалізації стартап-проекту на основі запропонованих рішень.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЛЯХ

1.1 Енергоефективність муніципальних будівель в Україні та світі

Енергоефективність муніципальних будівель є однією з найважливіших проблем сучасної енергетичної політики. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), на будівлі припадає приблизно 26% глобальних викидів CO₂ і споживається приблизно 30% світових енергетичних ресурсів [1]. Відповідно, цей сектор має надзвичайно значний потенціал для зменшення споживання енергії, що робить його пріоритетом у стратегіях сталого розвитку та енергоефективності.

Енергоефективність в Україні не бралася до уваги під час будівництва муніципальних об'єктів, таких як школи, дитячі садки та адміністративні будівлі, в період з 1960-х до 1990-х років. Це призвело до того, що існуюча інфраструктура має застарілі системи опалення та вентиляції, погану теплоізоляцію стін і дахів, а також відсутність автоматизованих систем управління енергоспоживанням.

В свою чергу ситуація в країнах-членах ЄС значно покращилася. Інформаційні технології, автоматизація та використання датчиків зменшують енергоспоживання та підвищують комфорт кінцевих споживачів. За даними eu.bas, у 2022 році впровадження автоматизації в навчальних закладах може забезпечити можливе скорочення викидів CO₂ у школах та вищих навчальних закладах приблизно на 26 %, а в офісах та лекційних залах – до 52 % [2].

Дослідження, проведені в 2023 році, також показали, що застосування інтелектуальних систем моніторингу на основі технології IoT в навчальних закладах та адміністративних будівлях допомагає заощадити від 10% до 30% електричної та теплової енергії [3]. Тому, навіть старі будівлі, що належать муніципалітетам, мають великий потенціал для підвищення енергоефективності.

Для реалізації цієї мети необхідне впровадження систем збору та обробки даних для автоматичного контролю енергоспоживання. Розробка інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання є однією з цілей магістерської програми.

1.2 Сучасні системи моніторингу енергоспоживання (SCADA, АСЕМ, IoT, Smart-Metering)

Методи моніторингу енергоспоживання зазнали багатьох змін за останні роки порівняно зі старими техніками, що використовувалися раніше. За старими методами інформація з лічильників у багатьох будівлях отримувалася вручну. Саме це було причиною того, що процес вимагав значних зусиль. Крім того, дані, які були отримані, не дозволили швидко вирішити проблему марнотратства енергетичних ресурсів. Сучасні технології дозволяють автоматизувати весь процес, що передбачає отримання великої кількості даних для контролю витрат майже в режимі реального часу.

В Україні стали популярні автоматизовані системи моніторингу енергії (АСЕМ). Вони дозволяють автоматично збирати та надсилати дані з лічильника на центральний сервер. Виробники стверджують, що використання АСЕМ може знизити витрати на енергопостачання та обслуговування обладнання на 5–30 % [4]. АСЕМ є важливою частиною створення основної інфраструктури моніторингу енергії. Вони дозволяють зберігати історію та аналізувати динаміку споживання енергії. Тим не менш, функціонал полягає в основному в зборі даних без їх ретельного аналізу.

Задля того щоб підвищити ефективність моніторингу та розширити можливості аналізу, на зміну базовим АСЕМ приходять розумні лічильники – інструменти, що використовують технологію Інтернету речей (IoT) для дистанційного вимірювання та управління споживанням електроенергії, води, газу або тепла [5]. Крім того, впровадження рішень IoT та використання інтелектуальних лічильників значно покращує можливості моніторингу. Вони функціонують у комунікаційних мережах LoRaWAN, NB-IoT, M-Bus або Modbus,

а також передають інформацію кожні 15 хвилин до 1 години. Ці можливості дозволяють проводити детальний аналіз енергоспоживання, швидко виявляти аномалії у вигляді різкого зростання енергоспоживання та розробляти стратегії для усунення аномалій. Головною перевагою IoT є додаткова можливість включення більшої кількості датчиків для вимірювання таких факторів, як температура, рівень вологості та рівень CO₂. У поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту це забезпечує детальний моніторинг стану будівлі та сприяє підвищенню ефективності функціонування систем клімат-контролю.

Система автоматизації будівлі (BACS) об'єднує контроль за інженерними мережами будівлі та сприяє ефективній оптимізації енергоспоживання. Основні функції системи BACS показані на рисунку 1.1.

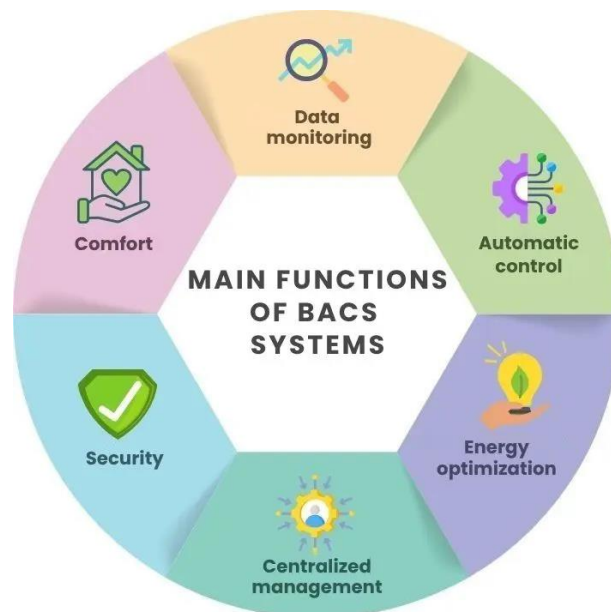


Рисунок 1.1 – Основні функції BACS [6]

На даному рисунку показані основні завдання систем BACS: контроль параметрів у реальному часі, оптимізація використання ресурсів, забезпечення сприятливих умов, централізоване управління параметрами та підвищення безпеки.

Системи SCADA та BACS мають вищу складність щодо об'єкта управління,

оскільки можуть передбачати як моніторинг, так і дистанційне управління інженерними системами будівлі. Ці системи дозволяють контролювати теплопостачальні установки, насосні станції, вентиляційні установки та освітлення. SCADA регулює режими роботи обладнання залежно від часу доби, навантаження або присутності людей у будівлі, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів та підвищити комфорт. Загальна конфігурація системи SCADA, включаючи опис функціональних можливостей різних компонентів SCADA, наведена на рисунку 1.2.

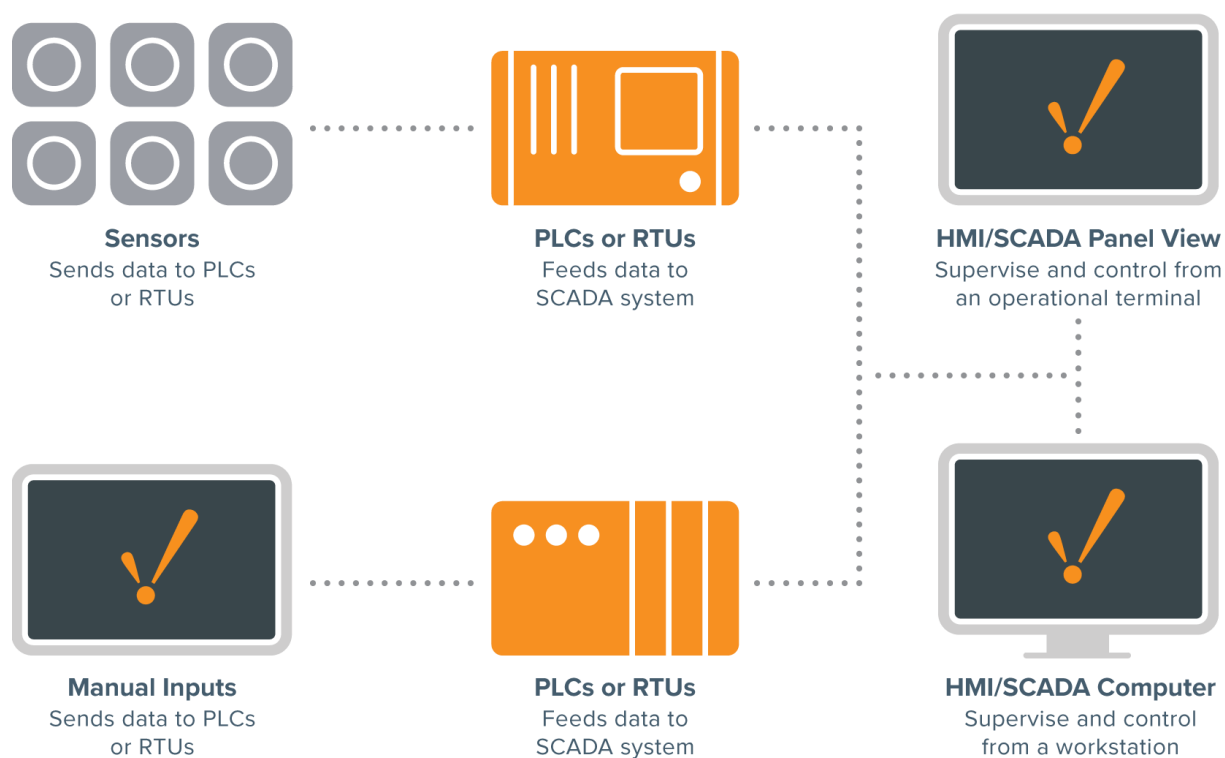


Рисунок 1.2 – Структура системи SCADA [7]

ASEM, технологія IoT та SCADA/BACS разом утворюють єдину технологічну платформу для впровадження інтелектуальних систем моніторингу енергоспоживання. Окрім можливості збирати інформацію, її аналіз також дозволяє прогнозувати навантаження, відхилення та надавати рекомендації щодо оптимальних режимів функціонування обладнання. Це створює основу для впровадження інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання для

муніципальних будівель.

1.3 Інтелектуальні системи аналізу та оптимізації енергоспоживання

У процесі підвищення енергоефективності будівель збір даних є лише першим кроком. Будівля не може просто збирати інформацію; вона повинна аналізуватися, прогнозувати навантаження та автоматично керувати різними системами. Сучасні інтелектуальні рішення включають інфраструктуру Інтернету речей (IoT), системи автоматизації будівель (BACS), SCADA та аналітичні програми. Це дозволяє відстежувати поточне споживання енергії та оптимізувати роботу всіх інженерних мереж у будівлі.

Web of Things (WoT) є одним із ключових елементів для таких програм. Це дозволяє об'єднувати декілька пристроїв у систему енергоменеджменту будівлі (BEMS). Це високоефективно для будівель, які були побудовані кілька десятиліть тому і містять різні типи та покоління пристроїв. За допомогою ідеї WoT стає просто додати більше датчиків, щоб дозволити дешевше об'єднати додаткові будівлі в цю систему. Як результат, будь-яку будівлю можна зробити розумнішою за допомогою цієї інтеграції з поточними онлайн-платформами [8].

Іншим важливим інструментом є моніторинг у режимі реального часу систем вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC). Згідно з дослідженнями, постійне спостереження за системами опалення, вентиляції та кондиціонування дозволяє робити розумні вибори щодо оптимізації енергоспоживання. Наприклад, у кампусі в Іспанії було виявлено, що цей метод є фундаментальним для підвищення енергоефективності будівель, які мають тривалу історію експлуатації. Система не тільки керує температурою та функціями вентиляції, але й прогнозує пікові навантаження, визначає періоди неефективного використання та адаптується до будь-яких змін, які відбуваються [9].

Крім того, результати, отримані після впровадження IoT-систем у муніципальних будівлях, вражають. Згідно з дослідженнями, будівлі з тривалою

експлуатаційною історією можуть зменшити споживання енергії на 40–70% за допомогою IoT-моніторингу та керування системами кондиціонування повітря та кондиціонування [9]. Крім того, інші дослідження показують, що екосистеми IoT можуть збільшити економію енергії на 10–15 відсотків у муніципальних об'єктах, навіть у старих будівлях [10]. Це не тільки дозволяє економити гроші на енергоресурсах, але й значно покращує комфорт для людей у будівлі, підвищує надійність обладнання та продовжує термін його служби.

Поєднання WoT і IoT-моніторингу дозволяє створити єдину інтелектуальну систему енергоменеджменту, яка дозволяє: інтегрувати різні системи та пристрої в одну платформу; розширювати систему на будь-який об'єкт, включно зі старими будівлями; зменшувати витрати на розробку та обслуговування; і підвищувати ефективність систем кондиціонування повітря та кондиціонування повітря (HVAC). Такі системи також дозволяють створювати аналітичні панелі, складати звіти та надавати поради енергоменеджерам і керівництву. Це полегшує прийняття рішень щодо планування ремонтів, оптимізації бюджету та модернізації обладнання.

Таким чином, впровадження WoT і IoT є реальним і ефективним, оскільки це модернізує муніципальні будівлі. Навіть у будівлях із застарілими інженерними системами та конструкціями це дозволяє створювати «розумні» будівлі, які поєднують автоматичне управління, аналітику та збір даних. Це значно підвищує енергоефективність.

1.4 Архітектура автоматизованих систем енергетичного моніторингу

1.4.1 Загальні принципи архітектурного проектування

Структура автоматичного моніторингу споживання енергії визначає потік енергетичної інформації від лічильників енергії до процесу аналізу та прийняття рішень. Це особливо важливо для громадських (муніципальних) будівель, оскільки більшість із них мають застарілу інженерну інфраструктуру,

різноманітне обладнання та обмежені ресурси для модернізації. Таким чином, сучасні системи будуються за принципом багаторівневої побудови, де кожен рівень виконує певний процес (наприклад, збір, передачу, зберігання та аналіз даних).

Сучасні національні та міжнародні стандарти визначають дизайн сучасних систем моніторингу та управління енергоспоживанням. ДСТУ EN ISO 16484-1:2014 детально описує загальні стандарти побудови автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями, включаючи структуру рівнів, вимоги до надійності, обміну даними та інтеграцію підсистем [11].

У загальному випадку автоматизована система комерційного обліку енергетичних ресурсів (АСКОЕ) складається з кількох рівнів. Початковий рівень включає лічильники електроенергії та лічильники тепла та води, а також додаткові датчики для вимірювання рівнів вуглекислого газу, температури та вологості, необхідні для збору даних про використання енергії. На цьому рівні виробляється основна інформація щодо використання ресурсів у будівлях.

На другому рівні окремі шлюзи та контролери збирають дані з лічильників через ряд інтерфейсів, таких як M-Bus, RS-232 і RS-485. Вони виконують стандартні завдання, що включають обробку даних, наприклад фільтрацію помилок, перевірку точності зчитування та агрегацію даних перед передачею.

Структура АСКОЕ з інтерфейсами RS-485 і RS-232 показана на рисунку 1.3. У цій конфігурації один контролер збирає дані з групи лічильників, підключених через шину RS-485, а також приймає інформацію від пристрою за допомогою інтерфейсу RS-232. Потім контролер передає зібрані дані до центральної системи.

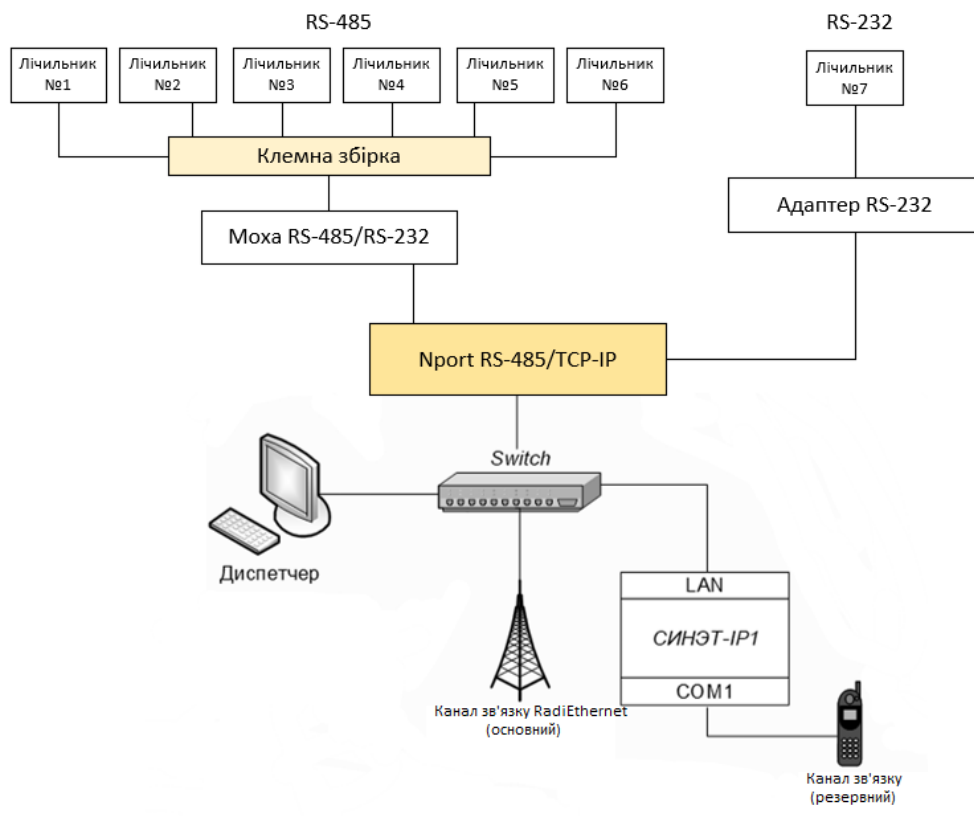


Рисунок 1.3 – Структура АСКОЕ з інтерфейсами RS-485 та RS-232

RS-485 є одним із найпоширеніших типів інтерфейсу АСКОЕ і зазвичай зустрічається в традиційних будівлях. Основна перевага RS-485 полягає в тому, що можна досягти шинної топології. Це означає, що кілька лічильників можна об'єднати в мережу за допомогою одного контролера для взаємозв'язку. Масштабовані мережі можна створити за допомогою рішень підключення RS-485. Крім того, можна легко включити додаткові лічильники з мінімальним впливом на конфігурацію системи. Такий метод є ефективним рішенням для муніципальних установ, де модернізація часто здійснюється поступово.

Передача даних лежить на третьому рівні архітектури. Використовуються дротові мережі Ethernet у поєднанні з поточними бездротовими рішеннями, такими як Wi-Fi, NB-IoT і підключення LoRaWAN. Важливим застосуванням є шлюзи Інтернету речей, які допомагають у консолідації та передачі зібраних даних на центральний сервер/хмару. У мережах NB-IoT і LoRaWAN організація процесу збору даних можлива навіть для складних ділянок, які не підтримують

підключення до кабельної мережі.

Інфраструктура та сервери зберігання утворюють четвертий рівень. Він відповідає за накопичене зберігання та сортування даних і початкові етапи аналізу. Сервери можуть бути локальними та хмарними; це зручно для місцевих будівель.

Саме на п'ятому рівні представлений аналіз. На цьому етапі реалізуються алгоритми прогнозування енергоспоживання, виявлення аномалій, оцінки системи, а також дизайн панелей і звітів для енергоменеджерів і системних адміністраторів. Саме на цьому етапі можна документувати споживання енергії та приймати зважені рішення щодо оптимальної роботи інженерної системи.

На рисунку 1.4 показано діаграму поточної архітектури «розумної» системи управління енергією та взаємодії між модулями зв'язку, серверною частиною, модулями аналізу та сенсорним рівнем.

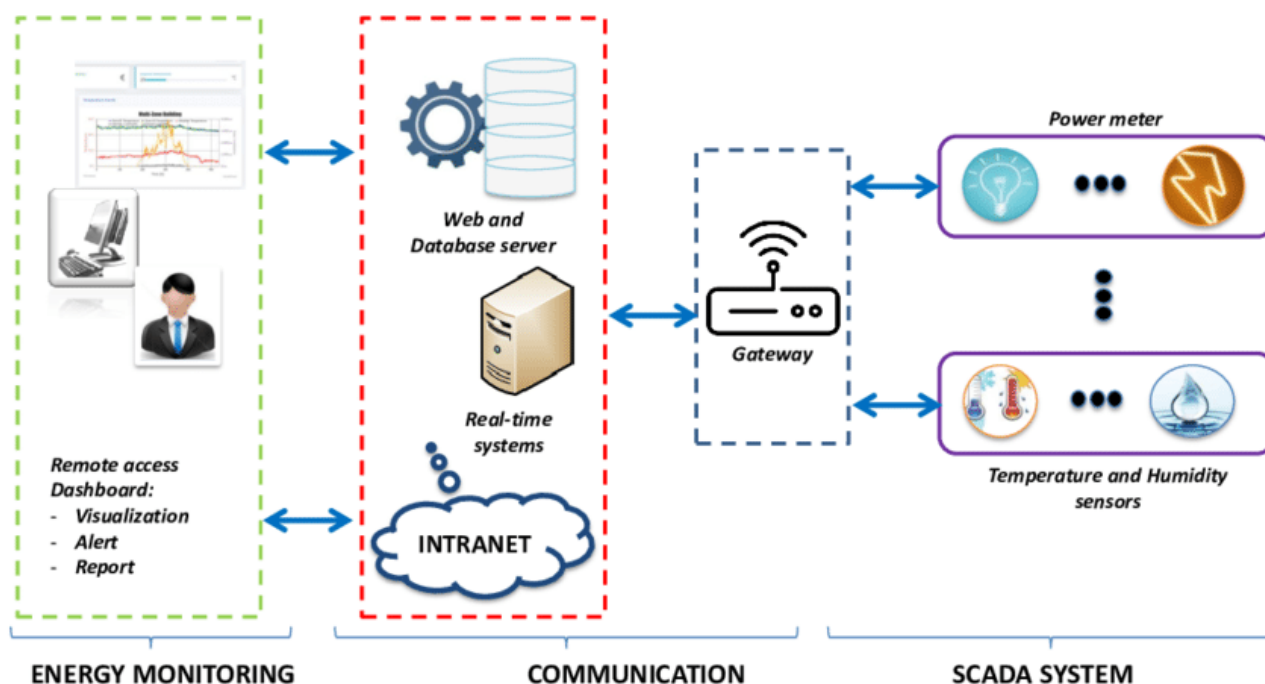


Рисунок 1.4 – Архітектура системи управління енергією розумних будівель [12]

1.4.2 Канали зв'язку та роль IoT-технологій в архітектурі систем

Рівень передачі даних є важливою частиною архітектури. Дротові канали,

зокрема Ethernet, забезпечують високу стабільність і швидкість обміну в традиційних рішеннях. Однак сучасні системи широко використовують бездротові рішення, такі як Wi-Fi, LoRaWAN і NB-IoT. Ці рішення дозволяють підключатися до важкодоступних і віддалених пристроїв без підключення кабелем.

Ці рішення роблять необхідним використання шлюзів IoT. Вони збирають дані з лічильників і датчиків і передають їх уніфікованому вигляді до центральної системи, виконуючи функцію універсального посередника між різними фізичними інтерфейсами та протоколами. Шлюзи Інтернету речей полегшують масштабування системи та дозволяють поступово включати нові пристрої без необхідності повного перебудови інфраструктури.

Питання включення застарілих приладів вимагає особливої уваги. У нинішніх міських адміністративних будівлях все ще можна знайти лічильники з портами RS-232 і RS-485. Вони можуть бути підключені до існуючих IP-мереж за допомогою пристроїв перетворення Ethernet RS-232/RS-485, які можуть передавати інформацію за протоколом TCP/IP як TCP-клієнт або TCP-сервер. Це робить передачу даних прозорою без зміни їх формату. Це дозволяє інтегрувати старе обладнання в сучасні мережеві архітектури, не замінюючи його повністю [13].

1.4.3 Значення правильної архітектури для муніципальних будівель

Питання архітектури для муніципальних будівель є економічним і технічним. Такі будівлі часто потребують постійної роботи, мають обмежене фінансування та потребують складної інженерної інфраструктури. Спрощена архітектура дозволяє впроваджувати систему моніторингу поетапно, не зупиняючи роботу об'єкта.

Поєднання дротових технологій, IoT-шлюзів, конвертерів інтерфейсів і бездротових каналів зв'язку (NB-IoT, LoRaWAN і Wi-Fi мережі) забезпечує

можливість застосування гнучкої архітектури в реальних умовах. Така система не тільки дозволяє контролювати використання енергії, але й створює основу для впровадження та автоматизації інтелектуальних алгоритмів управління.

Архітектура АСКОЕ, яка добре побудована, є основою ефективного енергоменеджменту та дає можливість підвищити енергоефективність муніципальних будівель без значних витрат на повну заміну обладнання.

1.5 Нормативно-правова база України та міжнародні стандарти (Закон України «Про енергетичну ефективність», ISO 50006, КМУ №1140)

В Україні існує широка система законодавства та нормативних актів, щоб визначити базовий рівень енергоспоживання бюджетних будівель. Вони відповідають за розробку державної політики щодо енергоефективності, управління енергією та контролю використання енергії. Мета цієї нормативної бази полягає в тому, щоб створити ефективні інструменти для спостереження, аналізу та вдосконалення систем споживання енергії в установах, що фінансуються з державного або місцевого бюджету, що дозволяє зменшити витрати на енергоресурси та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21 жовтня 2021 року №1818-ІХ є основним документом у цій галузі [14]. Його прийняття є значним кроком у дотриманні вимог Директиви 2012/27/ЄС Європейського парламенту та Ради щодо енергоефективності в українському законодавстві. Закон встановлює основні принципи державної політики щодо енергозбереження та зобов'язує органи влади, місцеві органи самоврядування та суб'єкти господарювання економно використовувати енергію. Відповідно до його положень державні та місцеві органи повинні впроваджувати системи управління енергією та постійно спостерігати за використанням енергії в підпорядкованих будівлях. Оскільки це забезпечує накопичення точних даних і можливість їх аналітичного опрацювання, це створює основу для визначення базового рівня енергоспоживання.

Постанова Кабінету Міністрів №1460 від 14 грудня 2023 року «Про затвердження Методики визначення базового рівня енергетичної ефективності» регулює безпосередній процес визначення базового рівня [15]. Ця стаття запропонувала єдиний підхід до оцінки використання енергії в будівлях бюджетної сфери. Він встановлює вихідну точку для оцінки ефективності заходів щодо економії енергії та створює основу для роботи державної системи моніторингу енергії. Мета методики полягає в тому, щоб створити єдині правила для визначення базового рівня споживання енергії, враховуючи кліматичні, експлуатаційні, функціональні та конструктивні фактори. Її використання гарантує порівнянність результатів, достовірність показників і можливість контролювати ефективність використання енергоресурсів з одного місця. Базовий рівень, згідно з постановою, визначається на основі даних за останні три повні календарні роки. Наступним кроком показники нормалізуються відповідно до кліматичних умов, використовуючи градусо-дні опалювального періоду, і також вони враховують режим роботи та призначення будівлі. Отже, базовий рівень енергоспоживання – це середній нормалізований показник, який показує типове споживання енергії в стандартних умовах експлуатації. Методика передбачає, що для розрахунків використовуються лише надійні та систематизовані дані, підтвержені приладами обліку. Кожен вид енергоносія, включаючи електроенергію, теплову енергію, природний газ, паливо та інші, має свої власні обчислення. Показники надаються як абсолютними значеннями (кВт год/рік, Гкал/рік), так і питомими значеннями (кВт год/м² або кВт год/учня). Базовий рівень має бути перероблений у випадку реконструкції, капітального ремонту або зміни функції будівлі. Методика №1460 є національним аналогом стандарту ISO 50006 [16], який визначає порядок формування енергетичних базових рівнів (EnB) і показників енергетичної ефективності (EnPI). Базовий рівень використовується в міжнародній практиці як модель, яка показує зв'язки між внутрішніми та зовнішніми факторами, а не як фіксоване число. Український підхід наголошує на уніфікації розрахунків, щоб забезпечити надійний державний нагляд і звітність.

У процесі гармонізації з міжнародною практикою в Україні також впроваджено стандарти ДСТУ ISO 50006:2021 «Енергетичний менеджмент. Вимірювання енергетичних показників ефективності та визначення базового рівня енергоефективності» і ДСТУ ISO 50001:2019 «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо використання». Модель постійного вдосконалення PDCA, показана на рисунку 1.5, для застосування фундаментальних принципів у будівництві систем енергоменеджменту дотримується формату «плануй, роби, перевіряй і дій». Визначення базової лінії розглядається як головний елемент аналізу динаміки енергоефективності. Стандарти сприяють інтеграції національних підходів до міжнародних практик і сприяють сертифікації за ISO.



Рисунок 1.5 – Цикл управління Демінга (PDCA) [17]

У цьому випадку Методика №1460 і ISO 50006 взаємопов'язані. Первинний є обов'язковим для бюджетного сектору та забезпечує єдину систему державного контролю, тоді як другий надає більшу аналітичну гнучкість і деталізацію. З іншого боку, ISO 50006 передбачає врахування всіх факторів впливу, таких як температура, кількість користувачів, години роботи, обсяг послуг тощо. З іншого боку, українська методика зосереджується на аспектах екологічної та функціональної безпеки. Поєднання обох методів дає можливість отримати повну

картину енергоспоживання та точнішу оцінку ефективності модернізаційних заходів. Крім того, наступні галузеві стандарти використовуються для практичного застосування методики. Серед них ДБН В.2.6-31:2022 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель», який задає нормативні показники питомого споживання енергії [18] та ДСТУ Б В.2.2-39:2016, який регулює проведення енергетичного аудиту та визначення базового рівня енергоспоживання [19].

Національна нормативно-правова база для визначення основного рівня споживання енергії в Україні є комплексною та узгодженою з міжнародними стандартами. Її мета полягає в тому, щоб створити прозору систему обліку та аналізу використання енергії в бюджетних будівлях. Її впровадження не тільки гарантує виконання державної політики щодо енергоефективності, але й сприяє ефективному управлінню споживанням енергії, скороченню викидів парникових газів, підвищенню фінансової дисципліни при витратах бюджетних коштів і сталому розвитку муніципальної інфраструктури.

1.6 Підходи до побудови базового рівня енергоспоживання та індикаторів енергоефективності (EnB, EnPI)

1.6.1 Загальні положення

Енергоефективність у бюджетній сфері України відіграє вирішальну роль у європейській інтеграції та впровадженні системи енергоменеджменту з вимогами ISO 50001. Енергія в муніципальних будівлях, таких як школи та заклади охорони здоров'я, а також адміністративні будівлі, споживає багато енергії. Ефективне використання енергії має значні економічні та суспільні наслідки, оскільки кожна заощаджена гігакалорія забезпечує додаткову енергію для розвитку громади.

BRE, що означає базовий рівень споживання енергії, є фундаментальним компонентом кожної системи енергоменеджменту. Іншими словами, це стосується середнього споживання енергії об'єктом, коли він працює в стабільних

умовах.

1.6.2 Сутність та мета визначення базового рівня енергоспоживання

Базове споживання енергії, також відоме як BRE, відноситься до показника середнього споживання енергії будівлею протягом стандартного періоду експлуатації в нормальних кліматичних умовах. Цей інструмент використовується для підготовки бюджету, оскільки він надає засоби для управління витратами на енергію, можливості енергозбереження, а також оцінку ініціатив з енергоменеджменту, спрямованих на підвищення енергоефективності. Крім того, він забезпечує основу для управління енергією щодо вимірювання споживання енергії та оцінки ефективності.

1.6.3 Методика визначення базового рівня згідно з постановою КМУ №1140

Методологія встановлює базовий рівень енергоспоживання для бюджетних будівель в Україні; він встановлює стандарт для визначення базового рівня споживання енергії будівлями, що належать державі чи муніципалітетам, що відіграє важливу роль у реалізації політики енергоефективності України в бюджетних установах. Методологія описує процеси збору, перевірки, обробки та використання даних про енергоспоживання в будівлях бюджетних установ. Основною метою цієї методології є надання надійних, порівнянних та систематичних даних для оцінки енергозбереження, витрат на енергію та реалізації енергетичної політики на рівні громади та держави.

Базовий рівень енергоспоживання визначається на основі фактичних даних за три останні повні календарні роки, що передують року обчислення. Кліматичні умови, режим роботи, функціональне призначення будівлі, опалювана площа, кількість користувачів та інші параметри повинні враховуватися, коли йдеться про зміну споживання енергії. Для отримання точних результатів проводиться перевірка достовірності даних, нормалізація даних і приведення даних до

порівнюваних умов.

Базовий рівень енергоспоживання визначається на основі аналізу даних, що відображає нормальне середнє значення енергоспоживання в стабільному режимі роботи. Розраховані дані можуть бути показані як загальне споживання енергії, так і в окремих значеннях для певної площі та об'єму будівлі. Цей результат буде зберігатися в системі енергомоніторингу, де будуть проводитися подальші розрахунки енергозбереження, а також оцінка ефективності енергозберігаючих методів. Крім того, за цим методом можна врахувати зміну базової лінії внаслідок реконструкції, модернізації, зміну функціонального призначення, а також інші суттєві зміни, що впливають на використання енергії.

Методика №1140 надає єдиний підхід до оцінювання споживання енергії в бюджетному секторі, підвищує точність моніторингу енергоспоживання та створює надійну основу для планування заходів з підвищення енергоефективності. Вона відповідає міжнародним стандартам ISO 50001 та ISO 50006, що робить її важливою частиною національної системи управління енергетикою.

1.6.4 Методологія для встановлення базової лінії для споживання енергії з використанням ISO 50006

Одним із ключових документів у сімействі стандартів ISO 50000 є «ISO 50006:2021, Системи енергоменеджменту – Вимірювання енергетичної ефективності за допомогою енергетичних базових ліній (EnB) та показників енергетичної ефективності (EnPI)», який описує методологію, якої слід дотримуватися для вимірювання енергетичної ефективності. Цей стандарт використовується в рамках систем енергетичного менеджменту, розроблених відповідно до ISO 50001, і пропонує єдиний підхід до встановлення, документування та оновлення базових рівнів енергоспоживання (EnB) і показників енергетичної ефективності (EnPI).

Згідно з правилами ISO 50006, базовий рівень енергоспоживання (EnB) розглядається як аналітична модель, що показує, як енергоспоживання об'єкта залежить від багатьох впливових факторів, а не як фіксована величина. Температура зовнішнього повітря, тривалість опалювального періоду, площа будівлі, кількість користувачів, час роботи обладнання, обсяг наданих послуг тощо можуть входити до цієї категорії факторів.

1.6.4.1 Спрощений підхід

У найпростішій ситуації базовий рівень енергоспоживання можна визначити як середнє фактичне споживання енергії протягом певного періоду часу, яке характеризується стабільними умовами експлуатації.

EnB можна визначити в спрощеному вигляді так:

$$EnB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i, \quad (1.1)$$

де E_i – фактичне споживання енергії у i -му році;

n – кількість років, що враховуються при розрахунку.

Коли зміни у внутрішніх або зовнішніх умовах незначні та не мають значного впливу на рівень споживання енергії, цей метод використовується.

1.6.4.2 Модельний підхід

ISO 50006 рекомендує модельний підхід, також відомий як регресія, у ситуаціях, коли змінні, що впливають, є фактором споживання енергії. Це полегшує встановлення функціонального зв'язку між використанням енергії та ключовими параметрами. Для визначення базової лінії використовується формула множинної регресії:

$$E = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n, \quad (1.2)$$

де E – представляє споживання енергії;

X_1, X_2, X_n – є незалежними змінними, які можуть бути кліматичними, експлуатаційними та структурними факторами;

a, b_1, b_2, b_n – коефіцієнти регресійної моделі, визначені за результатами статистичного аналізу даних спостережень.

Ця модель прогнозує значення очікуваного використання енергії, яке називається EnB , для набору робочих умов, а також оцінку відмінностей між фактичним використанням і прогнозами для проектів енергоефективності.

1.6.4.3 Визначення змін у споживанні енергії

Економія енергії визначається шляхом порівняння розрахункового споживання енергії з фактичним споживанням енергії:

$$\Delta E = EnB - E_{\text{факт}}, \quad (1.3)$$

де EnB – представляє енергію, яка буде споживана відповідно до базової лінії;

$E_{\text{факт}}$ – представляє фактичну енергію, спожиту під час виконання дій.

Це значення є ключовим показником ефективності енергозберігаючих проектів.

1.6.4.4 Індикатори енергоефективності (EnPI)

ISO 50006 пропонує використовувати індикатори енергоефективності, які можна використовувати для перехресного порівняння різних об'єктів або періодів. Ці EnPI визначаються таким чином:

$$EnPI = \frac{E}{A}, \quad (1.4)$$

де E – означає загальне та/або скориговане споживання енергії;

A – символізує опалювальну площу, кількість користувачів, вироблений об'єм.

Таким чином, EnPI дозволяє відстежувати динаміку енергоефективності в часі та проводити порівняльний аналіз об'єктів різного типу та розміру.

1.6.4.5 Коригування базових рівнів

Крім того, у випадку, якщо відбуваються значні зміни у функціонуванні об'єкта, такі як реконструкція, впровадження нових технологій, розширення площі або зміна кліматичних умов, стандарт передбачає зміну або оновлення основного рівня енергоспоживання. Таке коригування гарантує достовірність порівнянь і дозволяє продовжувати використовувати енергетичний аналіз.

Висновки до розділу 1

Огляд, представлений у першому розділі, підтверджує важливість інтелектуальних систем моніторингу енергоспоживання у зв'язку із зростаючими вимогами до енергоефективності, характерними для муніципальної інфраструктури. Значна частка енергоспоживання, застарілість та зростання експлуатаційних витрат у будівельному секторі України підтверджують необхідність переходу від традиційних ручних систем управління до автоматизованих та інтелектуальних рішень для збору та обробки даних про енергоспоживання.

Сучасні технології, що аналізуються, а саме: ASEM, SCADA/BACS, IoT та Smart Metering здатні забезпечити миттєвий доступ до даних, автоматичне виявлення невідповідностей, поєднання кліматичних та експлуатаційних змінних, а також прогнози щодо енергоспоживання. Усі ці фактори формують технічну основу для підвищення статусу муніципальних будівель до «розумних», що означає проактивне управління енергією замість реактивного підходу. У всьому світі було помічено, що впровадження цих технологій призводить до скорочення

енергоспоживання на 10–70 %, що відіграє істотну роль для бюджетного сектору.

Зокрема, актуальність стосується архітектури автоматизованих систем моніторингу, які базуються на багаторівневій структурі з використанням гібридних дротових і бездротових комунікацій. Це, зокрема, полегшує модернізацію цих будівель, інтегруючи старі лічильники в більш сучасну систему. Це є більш вигідним з фінансової точки зору, оскільки в Україні ресурси для модернізації можуть бути обмеженими.

Аналіз української системи регулювання та міжнародних стандартів (ISO 50001, ISO 50006) показує, що перед впровадженням системи енергоменеджменту необхідно мати базові показники енергоспоживання та енергоефективності.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЛІЦЕЮ №6

2.1 Загальна інформація про будівлю ліцею №6

Будівля комунального закладу була зведена у 1983 році відповідно до проектних стандартів, які діяли під час масового будівництва закладів загальної середньої освіти. Будівля має три поверхи. Планування будівлі має форму літери П, що є досить поширеним у школах, з класами, розташованими вздовж коридорів. У будівлі є опалювальне сховище. Під поверхом розташоване підвальне приміщення без опалення, де знаходяться інженерні мережі. Також будівля має покриття і значні площі зовнішніх огорожувальних конструкцій. Все це визначає її енергетичні характеристики. Функціонування будівлі передбачає щоденне перебування великої кількості учнів і працівників, що впливає на режим роботи інженерних систем і рівень споживання енергії.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд Харківського ліцею №6

У зв'язку з тим, що об'єкт розташований у І кліматичній зоні, яка характеризується низькою розрахунковою температурою зовнішнього повітря та

тривалим опалювальним періодом, є значні вимоги до ефективності теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій. У зв'язку з великою площею та об'ємом будівлі споживається багато тепла, що вимагає подальшого аналізу енергоефективності.

Енергоспоживання будівлі підключено до міської системи відстеження енергоспоживання, що дозволяє контролювати, скільки енергії вона насправді споживає. Це створює базу даних, необхідну для обробки цифр щодо енергоспоживання та енергоефективності в наступних розділах.

Таблиця 2.1 містить основні техніко-експлуатаційні параметри будівлі.

Таблиця 2.1 – Основні параметри об'єкта дослідження

Показник	Значення
Рік будівництва	1983
Вид будівлі	Заклад освіти (загальна середня освіта)
Поверховість	3
Сукупна площа будівлі	8 580 м ²
Площа, що підлягає опаленню	6 762 м ²
Об'єм, що підлягає опаленню	22 992 м ³
Загальна кількість осіб	782 осіб
Відповідність кліматичній зоні згідно з ДБН [18]	I
Розрахункова температура зовнішнього повітря	-23 °C
Тривалість періоду опалення	179 діб

Основні вимоги до експлуатації будівлі, які впливають на її теплові характеристики, визначаються зазначеними характеристиками. Додатковий аналіз конструктивних елементів зовнішніх огорожувальних конструкцій та впливу цих елементів на загальні тепловтрати будівлі наведено в розділі 2.2.

2.2 Аналіз огорожувальних конструкцій та теплотехнічних характеристик будівлі

Огорожувальні елементи теплової оболонки ліцею №6 були побудовані за старими методами, які не відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

У підвалі вікна є старими та мають високий коефіцієнт теплопередачі. Стіни виготовлені з силікатних цеглин, що не були додатково ізолювані, а стеля та підлога підвалу виготовлені з залізобетонних плит, що мають значні теплові втрати. У зв'язку з тим, що оболонка будівлі є основним джерелом втрат тепла під час опалювального сезону, оцінка її теплового аналізу є критично важливою для визначення загальної енергоефективності будівлі.

Площі основних елементів оболонки та фактичні коефіцієнти теплопередачі k були розраховані на основі даних енергетичного аудиту. Відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель», наведені також значення k_n , які є нормативними [18]. Було також розраховано приблизні тепловтрати кожного елемента. У таблиці 2.2 наведено підсумок усіх результатів.

Таблиця 2.2 – Характеристика зовнішніх огорожень ліцею

Елемент конструкції	Площа, м ²	Матеріал	Товщина, м	Коефіцієнт теплопередачі k , Вт/(м ² ·К)	Нормативне значення k_n , Вт/(м ² ·К)	Розрахункові тепловтрати Q , Вт
Стіни зовнішні	2371	Силікатна цегла	0,51	1,34	0,35	66 682
Вікна	1405	Дерев'яні рами, одинарне скління	–	2,84	1,05	83 646
Двері	31	Металеві, дерев'яні	–	2,36	1,50	1 536
Дах	2856	Залізобетон без утеплення	0,22	0,55	0,17	62 204
Підлога над підвалом	2856	Залізобетон	0,22	0,50	0,45	29 988

Коефіцієнт теплопередачі для кожного типу огорожувальної конструкції будівлі не тільки не відповідає нормам, але й значно перевищує їх. Для таких будівель, це є нормальним явищем. Найбільшими джерелами тепловтрат є вікна та зовнішні стіни, але значний внесок робить і оболонка будівлі, оскільки плоскі дахи без утеплення зазвичай мають низькі коефіцієнти теплопередачі.

Для демонстрації результатів, для прикладу, було розраховано

тепловтрати покриття будівлі. Згідно з енергоаудиторським звітом, площа даху становить $F_{\text{дах}} = 2856 \text{ м}^2$, а коефіцієнт теплопередачі – $k = 0,55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Мінімумально допустиме значення опору теплопередачі неопалюваного горища гуртожитку відповідно до [18] враховуючи, що місто Харків розташоване в температурній зоні I: $R_{\text{min}} = 6 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$, виконаємо наступну перевірку:

$$R_{\text{дах}} = \frac{1}{0,55} = 1,82 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\text{дах}} = 1,19 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} < R_{\text{min}} = 6 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Виходячи з отриманих результатів видно, що значення термічного опору даху не відповідає нормам. Тому, теплозахисні властивості покрівлі незадовільні, і вимагають впровадження енергозберігаючих засобів щодо збільшення їх опору теплопередачі.

Теплові втрати, які проникають через огорожені конструкції, такі як вікна, стіни, підлогу, стелю та зовнішні двері, можна визначити за формулою згідно з [20]:

$$Q_i = \sum \frac{1}{R_0} F_i (t_{\text{вн}} - t_{\text{зв}}) (1 + \sum \beta) n_i, \quad (2.1)$$

де K_i – коефіцієнт теплопередачі зовнішніх огорожень;

F_i – площа поверхні огорожувальної конструкції;

$t_{\text{вн}}$ – розрахункова температура внутрішнього повітря, яка залежить від призначення та місця розташування будівлі. Для адміністративної будівлі: $t_{\text{вн}} = 21 \text{ °C}$ [20];

$t_{\text{зовн}} = t_{\text{р.о.}}$ – розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування опалення. Для м. Києва: $t_{\text{р.о.}} = -23 \text{ °C}$ [18];

n – коефіцієнт, який враховує зменшення розрахункової різниці температури, яка залежить від положення зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції по відношенню до зовнішнього повітря;

$\Sigma \beta$ – додаткові теплові втрати. В цьому розрахунку будуть враховані лише додаткові теплові втрати через огорожувальні конструкції, які залежать від того, як будівля розташована відносно сторін світу. Значення залежить від місця розташування об'єкта. Північна сторона має 10%, східна та західна сторони 5%, а південна сторона має 0%.

Втрати тепла безпосередньо через дах визначаються згідно формули (2.1):

$$Q_{\text{дах}} = 0,55 \cdot (2856 \cdot (21 - (-23)) \cdot 1) \cdot 0,9 = 62204 \text{ Вт.}$$

Розрахунки свідчать про те, що дах втрачає орієнтовно 62 кВт тепла. Це результат відсутності ізоляції та великої площі огорожувальної поверхні, що призводить до передачі тепла. Ізоляція даху значно знижує втрати тепла.

2.3 Аналіз систем тепlopостачання, вентиляції та гарячого водopостачання

Ліцей №6 має систему опалення, яка підключена до централізованої теплової мережі і працює на водяній основі, з теплообмінником, що забезпечує циркуляцію теплоносія. Теплоносій подається з температурою 115/70 – 95/70 °С, що забезпечує достатнє теплонавантаження протягом усього періоду опалення. Внутрішня система опалення складається зі сталевих труб і радіаторів, які встановлювалися протягом багатьох років, тому фактичний теплообмін у різних приміщеннях може відрізнитися, створюючи баланс між різними приміщеннями. Температура повітря в класах 18-22 °С була нижчою, ніж у коридорах, що свідчить про нерівномірний розподіл теплоносія. Для часткового регулювання встановлені термостатичні клапани, але система потребує повного гідравлічного балансування для зменшення температурних перепадів і зниження споживання

теплової енергії.

У будівлі є вертикальні вентиляційні канали, а також періодичне провітрювання через вікна та фрамуги. Без витяжної вентиляції та механічної подачі повітря швидкість повітряного потоку дорівнює 1,17 од/год. Погода має значний вплив на інтенсивність вентиляції, таким чином: взимку вона знижується, щоб уникнути надмірної втрати тепла, а влітку вона підвищується, оскільки вентиляція активізується.

Електричні котли працюють як система гарячого водопостачання, яка подає воду з температурою приблизно 55 °С до кухонь і санітарних приміщень. Загальне споживання гарячої води варіюється від 900 до 950 літрів на годину, залежно від того, як працює об'єкт. У години пікового навантаження обладнання для нагрівання води споживає значно більше електроенергії, незважаючи на те, що його загальний енергетичний баланс досить низький.

2.4 Аналіз електропостачання та системи освітлення

Електропостачання ліцею № 6 забезпечується ПАТ «Харківобленерго» через зовнішній кабельний ввід та внутрішній розподільний пункт. Це забезпечує електропостачання всього навчального та адміністративного приміщення. Споживання електроенергії реєструється за допомогою електrolічильника NIK2301 FN3, дані з якого автоматично надходять до системи обліку енергії. Структура споживання електроенергії представлена переважно освітленням, комп'ютерним обладнанням, обладнанням для харчування та іншими допоміжними електроприладами. Система освітлення складається переважно з люмінесцентних ламп та ламп розжарювання, які є застарілими, оскільки вони мають низький коефіцієнт корисної дії та високі втрати енергії.

Структура споживання електроенергії є однією з характеристик системи електропостачання. Загалом будівля використовує 198 кВт електроенергії, з яких 12 кВт використовується для освітлення, а решта 186 кВт використовується для

інших технологічних та побутових потреб. Система освітлення є технічно застарілою, але вона може бути дуже енергоефективною, незважаючи на те, що вона споживає найменшу кількість енергії.

Для пояснення розподілу споживання електроенергії, у ліцеї, використовується діаграма Санкея, як показано на рисунку 2.2 нижче. Яка допомагає ефективно аналізувати відносну значимість структури споживання електроенергії та визначати області, що потребують додаткового вдосконалення мережі електропостачання.

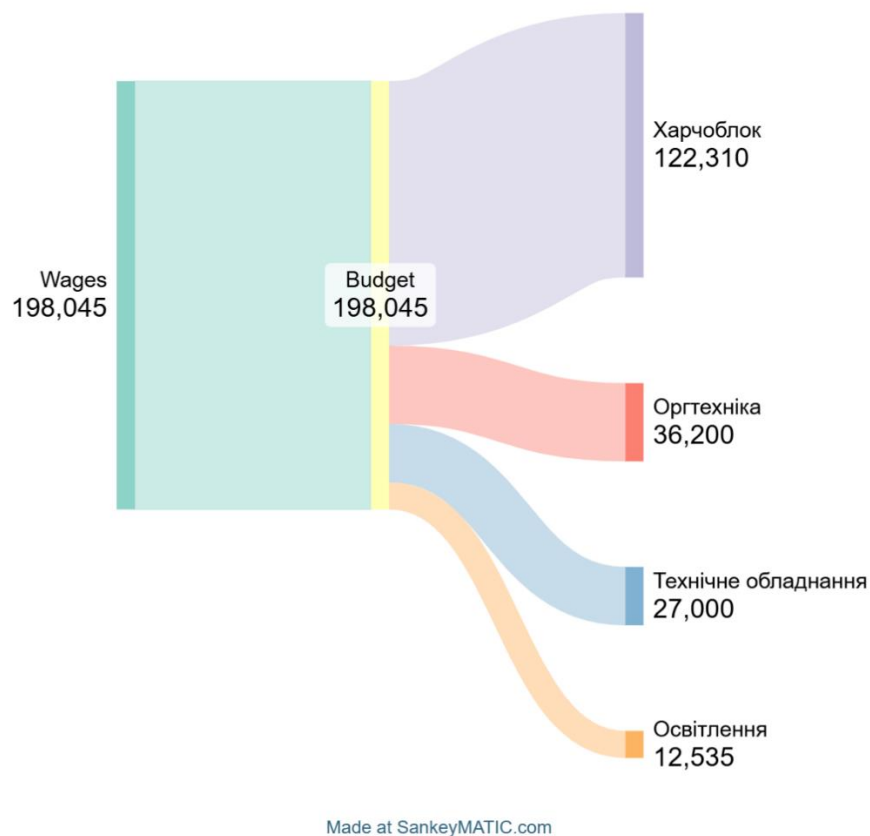


Рисунок 2.2 – Діаграма Санкея розподілу електроспоживання Ліцею №6

2.5 Дані енергоспоживання за 2021–2023 роки: тенденції, аномалії, сезонність

Ліцей №6 споживає електроенергію для освітлення класів та інших допоміжних приміщень, живлення енергоємного обладнання, такого як

комп'ютери, офісна техніка та побутові прилади. Він також використовує водонагрівачі з високим споживанням енергії серед інших допоміжних інженерних систем. У зв'язку з відсутністю енергоємних процесів на об'єктах попит на електроенергію змінюється лише сезонно та залежно від режиму роботи об'єкта. Для вивчення попиту на електроенергію в аналізі будуть використані дані про щомісячне споживання електроенергії об'єктом за три календарні роки (2021, 2022 та 2023). Розглянуті дані, що представлені в таблиці 2.3 допомагають зрозуміти структуру попиту на електроенергію з урахуванням сезонних змін і діяльності об'єкта.

Таблиця 2.3 – Щомісячне споживання електроенергії ліцеєм у 2021–2023 роках

№	Період	Споживання енергії		
		кВт·год	кВт·год	кВт·год
		2021	2022	2023
1	Січень	5 258	8 792	5 225
2	Лютий	9 055	8 290	4 316
3	Березень	8 679	7 237	3 906
4	Квітень	6 338	7 469	3 581
5	Травень	5 700	5 917	2 041
6	Червень	2 423	632	398
7	Липень	396	514	572
8	Серпень	752	4 399	427
9	Вересень	7 336	1 566	811
10	Жовтень	7 600	2 661	3 860
11	Листопад	8 855	3 661	5 331
12	Грудень	9 505	4 775	6 089
Сумарне споживання		71 897	55 913	36 557

Рисунок 2.3 показує графіку щомісячного споживання електроенергії протягом цих років.

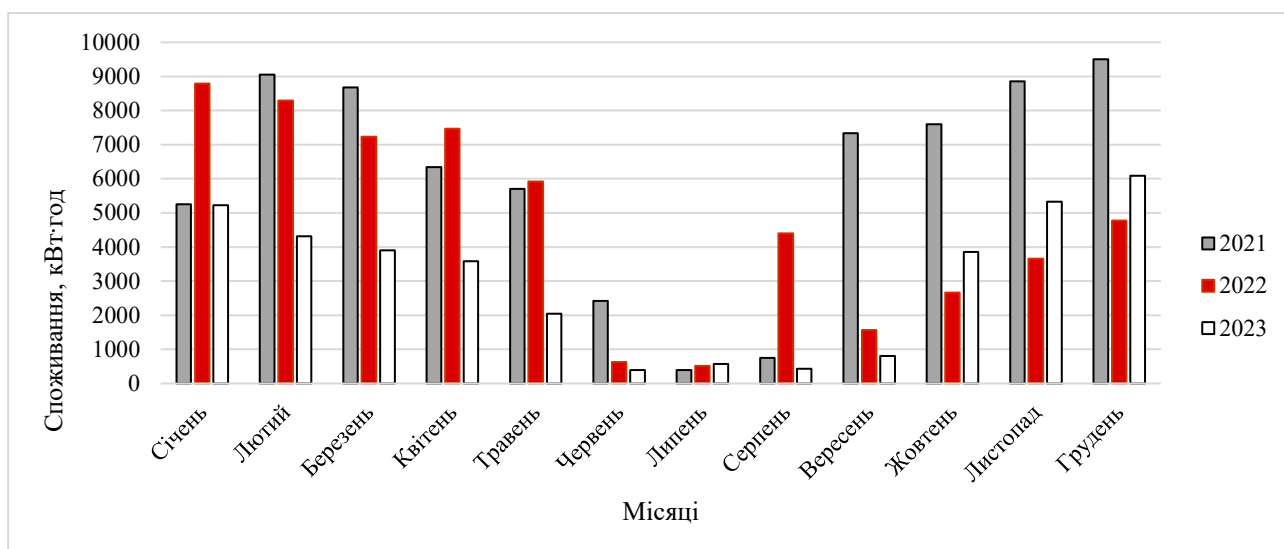


Рисунок 2.3 – Динаміка щомісячного споживання електроенергії ліцеєм з 2021 по 2023 рік

Графік показує кількість електроенергії, споживаної будівлею з 2021 по 2023 рік, щоб визначити сезонні особливості роботи закладу. У січні, лютому, березні та грудні заклад використовує цей ресурс на максимальних рівнях через посилений процес опалення. У весняний і літній періоди заклад споживає менше електроенергії. З травня по серпень спостерігається найнижче споживання електроенергії, пов'язане зі зменшенням використання класів під час канікул. Восени, з жовтня по грудень, енергоресурс використовується на вищих рівнях через повернення учнів та зниження температури, що пов'язано з нормальним навчальним процесом, який зумовлює сезонне коливання споживання електроенергії.

Основою теплового балансу ліцею є використання теплової енергії, і це в основному стосується опалення приміщень. Крім того, теплове навантаження, що створюється для постачання гарячої води, залишається менш важливим, оскільки в основному забезпечується місцевими електричними котлами, тому не відіграє домінуючої ролі.

Дані про споживання теплової енергії в середньому за місяць за період 2021-2023 рр., отримані за допомогою системи ASEM та даних енергоаудиту,

дозволяють відстежувати сезонні коливання, відхилення даних про споживання теплової енергії від нормального рівня та вплив погодних умов на рівень споживання теплової енергії. Таблиця 2.4 містить інформацію про щомісячне теплоспоживання будівлі ліцею.

Таблиця 2.4 – Щомісячне споживання теплової енергії в ліцеї у 2021–2023 роках

№	Період	Споживання енергії		
		Гкал	Гкал	Гкал
		2021	2022	2023
1	Січень	128,564	131,248	114,87
2	Лютий	142,509	88,379	96,285
3	Березень	122,116	73,77	68,328
4	Квітень	4,748	0	0
5	Травень	0	0	0
6	Червень	0	0	0
7	Липень	0	0	0
8	Серпень	0	0	0
9	Вересень	0	0	0
10	Жовтень	11,532	0	0
11	Листопад	96,105	65,548	72,298
12	Грудень	125,001	92,561	113,576
Сумарне споживання		630,58	451,51	465,36

Щомісячне споживання теплової енергії змінювалося протягом цих років, як показано на рисунку 2.4.

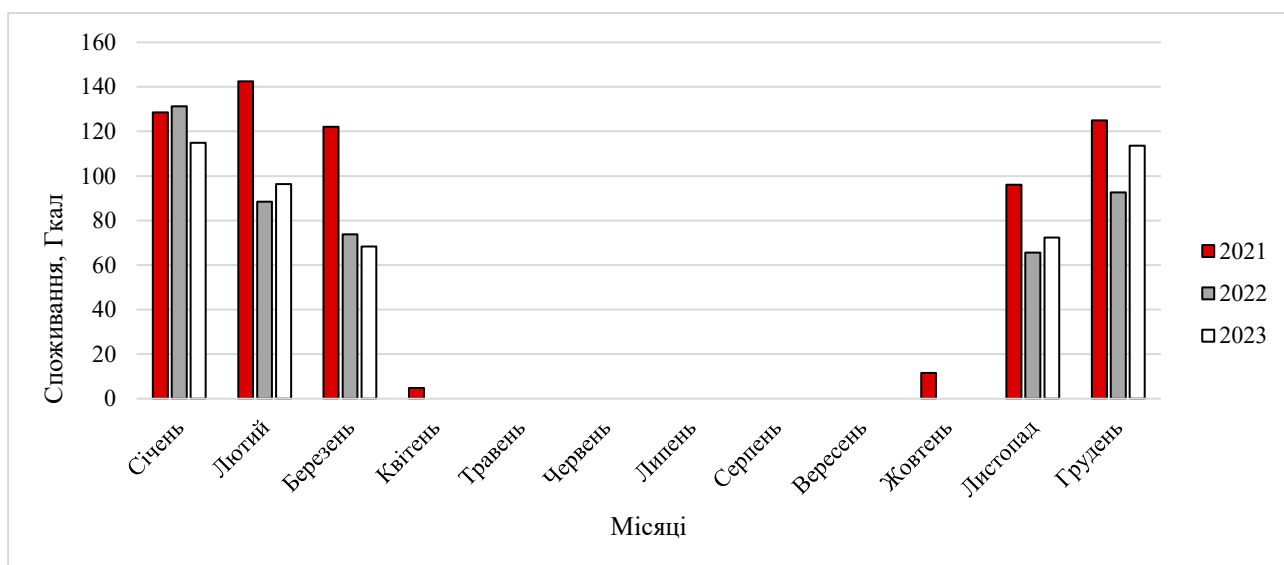


Рисунок 2.4 – Динаміка щомісячного споживання теплової енергії ліцеєм у 2021–2023 роках

Наступний графік показує, як змінювався попит на теплову енергію для ліцею з 2021 по 2023 рік. Отже, в січні, лютому, листопаді, грудні та березні заклад відчуває найбільший попит на тепло. Це періоди, які також називають опалювальним періодом. У період з квітня по жовтень попит на продукцію знижується, оскільки в цих місяцях будівля не потребує опалення.

Система водопостачання ліцею є важливою частиною інженерної інфраструктури будівлі, яка задовольняє санітарні, гігієнічні, побутові та технологічні потреби учнів. Оскільки надмірне використання води призводить до збільшення витрат на опалення, економія води має важливе економічне значення. Таблиця 2.5 містить інформацію про щомісячне водопостачання в будівлі ліцею.

Таблиця 2.5 – Щомісячне споживання води ліцеєм у 2021–2023 роках

№	Період	Споживання енергії		
		м ³	м ³	м ³
		2021	2022	2023
1	Січень	47	105	34
2	Лютий	157	104	24

Продовження таблиці 2.5

3	Березень	155	50	37
4	Квітень	55	54	49
5	Травень	114	52	48
6	Червень	78	28	31
7	Липень	13	22	30
8	Серпень	44	55	40
9	Вересень	146	35	54
10	Жовтень	79	23	59
11	Листопад	124	28	59
12	Грудень	150	33	48
Сумарне споживання		1 162	589	513

Щомісячне споживання води змінювалося протягом цих років, як показано на рисунку 2.5.

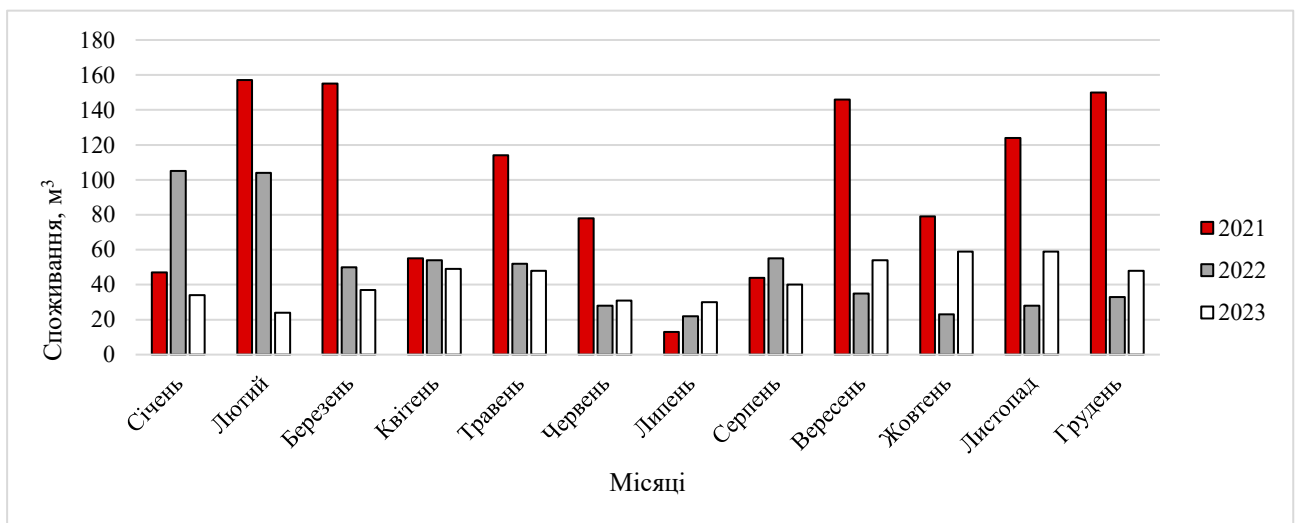


Рисунок 2.5 – Динаміка щомісячного споживання води ліцеєм за період 2021-2023 рр.

Згідно з діаграмою, яка показує зміни в споживанні води з 2021 по 2023 рік, видно, що попит на воду має чіткий періодичний характер: він зростає в літній період, коли ліцей працює повністю, і значно знижується під час літніх канікул і теплих сезонів. Однак дані за вересень свідчать про поступове зростання, що вказує на відновлення освітньої діяльності. Нарешті, попит на воду значно

знижується між 2022 і 2023 роками порівняно з 2021 роком, ймовірно, через поширення процесів електронного навчання, евакуацію та зменшення експлуатації будівлі.

2.6 Опис наявної АСЕМ Ліцею №6 та її функціональні можливості

Опис існуючої системи енергетичного моніторингу в ліцеї № 6 та її функціональних можливостей Система енергетичного моніторингу є важливим елементом енергетичного менеджменту в громадських будівлях сучасності. По-перше, її основним завданням є забезпечення постійного моніторингу енергоспоживання, виявлення неефективного використання енергії, встановлення даних про потенціал енергозбереження та формування основи для прийняття рішень щодо енергозбереження, розроблених з метою підвищення енергоефективності.

Вимірювання енергії є важливим інструментом для забезпечення впровадження енергоефективності відповідно до українського законодавства «Про енергоефективність» та Методики базового енергоспоживання бюджетних будівель, затвердженої наказом №1140. Вимірювання енергії надає точну інформацію про споживання енергії та полегшує порівняння на основі базового рівня, забезпечуючи контроль за роботою інженерних систем.

У ліцей АСЕМ пропонує автоматичний збір, передачу та обробку даних про споживання тепла, електроенергії та води. Хоча ця система відрізняється від інтелектуальної системи, що буде описано пізніше, відсутністю таких функцій, як нормалізація даних, аналіз базового рівня та автоматичне виявлення аномалій, така конфігурація покращує аналіз енергоспоживання, оскільки дозволяє накопичувати всю цю інформацію для аналізу енергоменеджером.

2.6.1 Типи лічильників та датчиків

Ліцей має кілька пристроїв для контролю споживання енергії, що дозволяє

вести повний облік основних видів енергії. Лічильники тепла та електроенергії підключені до АСЕМ за допомогою відповідних інтерфейсів. Це дозволяє автоматично збирати та обробляти дані в базі даних. У випадках, коли лічильник споживання води або гарячої води не має імпульсного виходу або частина обробки здійснюється вручну, використовується ручне введення інформації в систему.

Датчики температури встановлені в трубопроводах і всередині приміщень для виявлення теплових умов в класах і коридорах. Вони дозволяють контролювати функціонування системи опалення, підтримувати комфортний мікроклімат всередині будівлі та виявляти відхилення від стандартних параметрів. Ці датчики можна використовувати для планування коригувальних заходів і оцінки ефективності постачання теплової енергії.

АСЕМ може збирати детальні дані про споживання енергії та теплові характеристики завдяки різноманітності типів пристроїв. Це є основою для планування, аналізу та прийняття енергоефективних рішень. Перелік основних вимірювальних приладів, їх доступність і методи передачі даних до системи АСЕМ містяться в таблиці 2.6, яку можна знайти нижче. Це полегшує оцінку ступеня автоматизації інформації та повноти енергетичного балансу будівлі.

Таблиця 2.6 – Система обліку основних енергоресурсів об'єкту дослідження

Ресурс	Прилад обліку	Наявність	Передача даних в АСЕМ
Теплова енергія	СВТУ-10М №7242	Так	Автоматична
Електроенергія	NIK2301 FH3 (2 шт.)	Так	Автоматична
Холодна вода	ЛЛ-32х	Так	Ручне зчитування
Гаряча вода	За обсягом споживання бойлерів	Частково	Ручне зчитування

2.6.2 Аналіз добового профілю споживання електроенергії

Було проведено аналіз профілю навантаження, щоб визначити характер

використання електроенергії Харківського ліцею. Це дослідження використовує автоматизовану систему обліку енергії закладу. Наступні графіки показують споживання електроенергії об'єктом влітку (15 липня) і навесні (23 квітня), як показано на рис. 2.6 і 2.7. У цьому аналізі враховувалися звичайні робочі дні, щоб виключити коливання в робочих циклах і погоді.

У літній день (рис. 2.6) нічний попит є низьким, з рівнем споживання 0,3-0,5 кВт·год з 00:00 до 06:00, головним чином через роботу систем охоронного освітлення та аварійного освітлення. Попит зростає о 07:00 і досягає піку о 11:00 з рівнем понад 3,0 кВт·год через активне використання освітлення, комп'ютерів та систем кондиціонування, що функціонують у школах. Попит різко падає до мінімуму після 18:00.

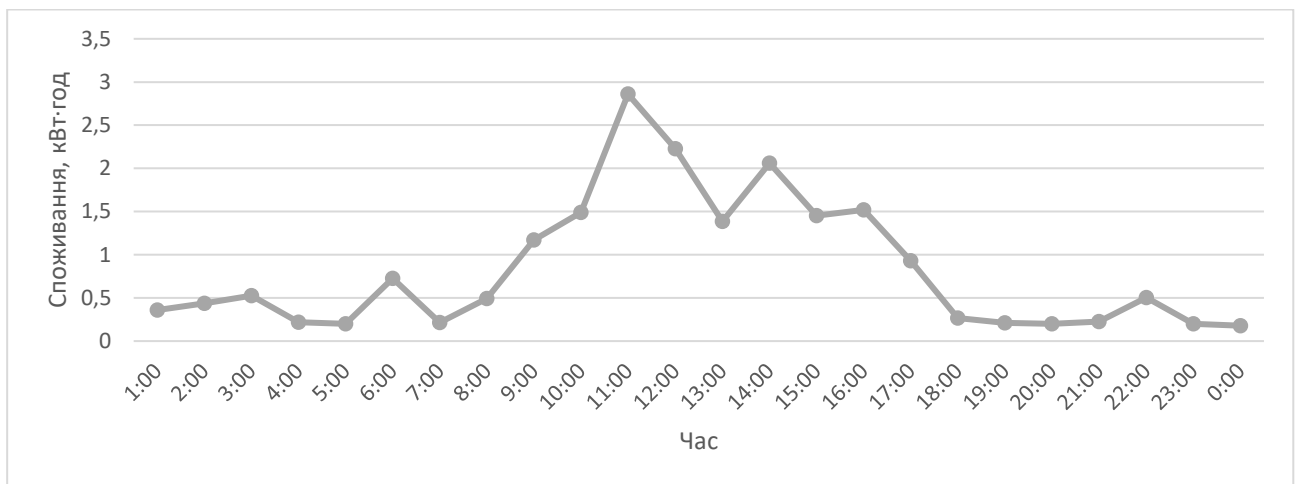


Рисунок 2.6 – Споживання електричної енергії за добу 15 липня

У весняний день (рис. 2.7) передбачається добовий графік із двома основними піками споживання, в середньому 3 кВт/год, о 11:00 та 15:00. Пікове споживання відповідає використанню електроприладів у класах та їдальні. Після закінчення шкільних занять спостерігається поступове зниження споживання.

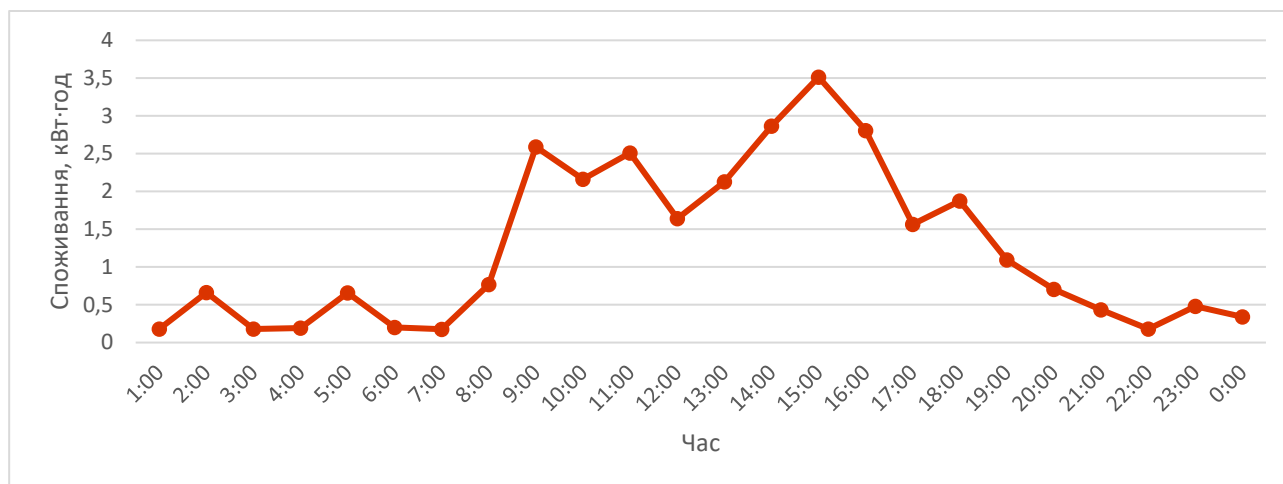


Рисунок 2.7 – Споживання електричної енергії за добу 23 квітня

Підсумовуючи, ліцей демонструє типову структуру споживання в навчальних закладах, коли найбільше споживання електроенергії припадає на робочий час (08:00–17:00) і є дуже низьким у нічні години. Влітку піковий попит спостерігається в денні години через роботу систем кондиціонування, а навесні спостерігається рівномірна структура споживання.

2.6.3 Обмеження та недоліки АСЕМ (відсутність інтелектуальних модулів)

Система АСЕМ, що використовується в ліцеї, добре функціонує в автоматизації збору даних про споживання тепла, електроенергії та води, але має деякі недоліки. Основною проблемою цієї системи є відсутність інтелектуальних модулів, які можуть аналізувати дані та автоматично знаходити помилки в показниках споживання. Система не може оцінювати фактичні показники відносно стандартного споживання, стандартизувати дані та самостійно оцінювати ефективність інженерних систем.

Таким чином, аналіз виконується технічним персоналом або енергетичним менеджером, а стандартні відхилення визначаються вручну для планування стратегій енергозбереження. Немає алгоритмів для негайного реагування на непередбачені відхилення, такі як піковий попит і несправності обладнання. Крім того, автоматизація деяких процесів, таких як облік гарячої та холодної води,

може призвести до ризику отримання неправильних даних через ручне зчитування, що ускладнює визначення точного енергетичного балансу будівлі.

Черговим недоліком є відсутність інтерфейсів, які підтримують інтеграцію з зовнішніми джерелами даних, такими як датчики присутності, метеостанції та інтелектуальні термостати. У сучасних інтелектуальних системах моніторингу енергоспоживання ці модулі дають змогу краще прогнозувати навантаження та оптимізувати системи опалення, вентиляції та освітлення. Існуюча АСЕМ виконує основні функції збору та представлення даних, але це підкреслює, що для більш ефективного аналізу, порівняння зі стандартами та управління енергоресурсами потрібна інтелектуальна система моніторингу.

2.7 Впроваджені заходи з енергоефективності

У ліцеї було впроваджено низку технічних та організаційних заходів, щоб збільшити енергоефективність, покращити роботу інженерних систем і створити кращий мікроклімат.

Енергозберігаючі світлодіодні лампи були замінені традиційними лампами розжарювання та люмінесцентними в класах, коридорах і допоміжних приміщеннях. Заміна лампи зменшила споживання електроенергії на 45–55%, покращила рівномірність освітлення відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018 [21] і збільшила термін експлуатації ламп у 5-6 разів. Крім того, в деяких приміщеннях є датчики руху та освітлення, які вимикають джерела світла, коли вони не використовуються або коли в приміщенні достатньо денного світла.

Для підвищення теплової енергоефективності було проведено гідравлічне балансування внутрішньої системи опалення з метою рівномірного розподілу теплоносія по поверхах і приміщеннях. Термостатичні клапани радіаторів дозволяють змінювати температуру в приміщеннях залежно від фактичних потреб, що зменшує середнє споживання теплової енергії на 8-12 % без негативного впливу на комфорт. Ведуться підготовчі роботи для автоматичного регулювання надходження теплоносія залежно від погодних умов.

Також було проведено часткову теплоізоляцію фасаду за допомогою плит мінеральної вати товщиною 100 мм з декоративним покриттям. Віконні блоки були замінені на енергоефективні склопакети з коефіцієнтом теплопередачі 0,9-1,1 Вт/(м²·К). Що слугувало причиною зменшення втрат через вікна приблизно на 30%, що призвело до зниження загального споживання енергії на опалення на 7-10%. Також покращився акустичний комфорт та стійкість до конденсації на внутрішніх поверхнях.

У будівлі встановлено автоматизовану систему відстеження енергоспоживання, яка щомісяця реєструє споживання електроенергії, тепла та води. Система використовується для зберігання інформації в централізованій базі даних, друку графіків споживання, виявлення витоків або надмірного споживання. Таким чином, можна постійно контролювати енергоспоживання, вимірювати ефективність споживання або розглядати майбутні інвестиції в енергетичну модернізацію.

Висновки до розділу 2

Аналіз енергоспоживання будівлі ліцею №6 показує велику залежність від надійного функціонування систем опалення та електропостачання. За весь період спостережень виявлені виражені сезонні коливання використання теплової енергії та характерні добові криві електричного навантаження, які залежали від графіка навчального процесу, кількості мешканців та режиму роботи інженерних систем. Очевидно, що на споживання енергії суттєво впливають зовнішні фактори, такі як погодні умови, зокрема температура зовнішнього повітря та наявність опалювального сезону, а також внутрішні фактори, такі як графіки роботи на об'єктах, використання енергії та стан інженерного обладнання. Аналіз поведінки енергоспоживання за 2021-2023 роки підтвердив наявність нерівномірності навантажень, що спричиняє труднощі оцінки ефективності енергоспоживання без додаткового аналітичного забезпечення.

Оцінка ефективності автоматизованої системи моніторингу використання

енергоресурсів показала грамотний збір, обробку та представлення даних обліку споживання енергії, але виявила недоліки в ретельному аналізі, індексації оцінки та своєчасній індикації відхилень у режимі функціонування інженерних систем, що обмежує можливість прийняття рішень щодо управління використанням енергії на оперативному рівні. Однак можливості оперативного управління енергоспоживанням обмежені відсутністю в наявній АСЕМ інструментів прогнозування, автоматичного виявлення відхилень і аналітичної підтримки. Це свідчить про те, що інтелектуальна система моніторингу енергії, яка забезпечує більш детальний аналіз даних і підвищує ефективність роботи інженерних систем будівлі, є хорошою ідеєю.

3 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ

3.1 Загальна концепція інтелектуальної системи енергомоніторингу

У сучасних умовах експлуатації муніципальних будівель моніторинг енергоспоживання вимагає більшого, ніж просто відстеження показників лічильників. Прийняття рішень щодо енергоменеджменту вимагає здатності швидко аналізувати дані, порівнювати дані з попередніми періодами, враховувати вплив зовнішніх факторів і знаходити закономірності. Самі по собі фактичні дані є просто записом поточного стану.

Зараз система АСЕМ, яка встановлена на досліджуваному об'єкті, ліцею №6 забезпечує збір даних та їх відображення у вигляді графіків і таблиць. Однак оскільки система не оцінює енергоефективність, базові рівні споживання та не прогнозує майбутнє споживання, ці дані залишаються пасивними. Тому це сприяло створенню інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM). ISEM є логічним продовженням поточної АСЕМ і дозволяє перейти від пасивного контролю до активного управління споживанням енергії.

Запропонована інтелектуальна система розглядає роботу з енергетичними даними як безперервний процес, який включає повний цикл обробки інформації, починаючи від автоматичного отримання сигналів від лічильників і закінчуючи виробленням висновків і пропозицій, які можуть бути використані енергоменеджером громади або адміністрацією об'єкта. Інтелектуальні системи включають методи статистичної обробки, аналіз часових рядів та алгоритми машинного навчання, що відрізняє їх від традиційних систем моніторингу. Це дозволяє перетворити необроблені дані в інструмент управління, який може створювати важливі показники енергоефективності, самостійно визначати основні показники споживання та прогнозувати динаміку майбутнього.

Розроблена структура системи гарантує, що процес збору, обробки та

аналізу даних організовано відповідно до цих вимог. Архітектура гарантує масштабованість і надійність системи, розділяючи функції збору, підготовки, обробки, аналізу та візуалізації даних.

Структура системи представлена наступним чином:

1. перший рівень датчиків і лічильників. Первинний потік даних складається з електролічильників, теплотлічильників, датчиків температури, датчиків витрат і модулів обліку споживання гарячої та холодної води. Кожен із цих пристроїв постійно збирає інформацію про стан будівлі. Дані найбільш схильні до помилок або технічних несправностей на цьому етапі, тому важливо переконатися, що вони передаються правильно та синхронізуються з сервером системи;

2. дані передаються з пристроїв на центральний сервер на другий рівень – рівень комунікації. Розширення системи без включення в інфраструктуру будівлі можливо за допомогою дротових протоколів (Modbus RTU/TCP, M-Bus) і бездротових рішень;

3. третій рівень – це обробка даних на серверному рівні. Центральний ядро системи містить значні кількості даних у вигляді історичних часових рядів. Попередня обробка даних проводиться тут, включаючи агрегацію показників, перетворення формату та фільтрацію неправильних значень. Надійна структура бази даних необхідна для точного виконання аналітичних завдань;

4. модуль аналізу (аналітичний модуль) є четвертим рівнем. Він складає інтелектуальну систему. Матеріальні моделі використовуються для оцінки енергоефективності, відстеження закономірностей, визначення залежностей між енергоспоживанням і факторами, що на нього впливають, виявлення відхилень від початкових значень і прогнозування динаміки в майбутньому. Аналітична робота зосереджена на створенні базових рівнів споживання та ключових показників енергоефективності (EnB, EnPI), прогнозуванні майбутніх значень, аналізі поточних даних і пошуку аномальних режимів;

5. п'ятий рівень включає візуалізацію та звітність. Відображає результати

аналізу в форматі, який зручний для використання, наприклад веб-панель або програмне забезпечення з таблицями, графіками, діаграмами та текстовими поясненнями. Система автоматично виділяє внутрішні сповіщення, прогнози на найближчі дні або тижні, відхилення від базового рівня та пропозиції щодо підвищення продуктивності обладнання.

Основні функціональні компоненти системи:

- лічильники та датчики, які контролюють температуру, воду, тепло, електроенергію та витрати;
- протоколи зв'язку включають Modbus, M-Bus, Ethernet і бездротові технології;
- зберігання та обробка часових рядів на сервері;
- модулі аналізу, включаючи регресію, прогнозування, створення базових показників і виявлення аномалій;
- інтерфейс для візуалізації та автоматизованої звітності.

Рисунок 3.1 показує основні етапи інтелектуальної системи моніторингу енергії: датчики, комунікація, сервер обробки, аналітика та візуалізація. Стрілки показують зв'язки між рівнями та напрямом потоку даних.

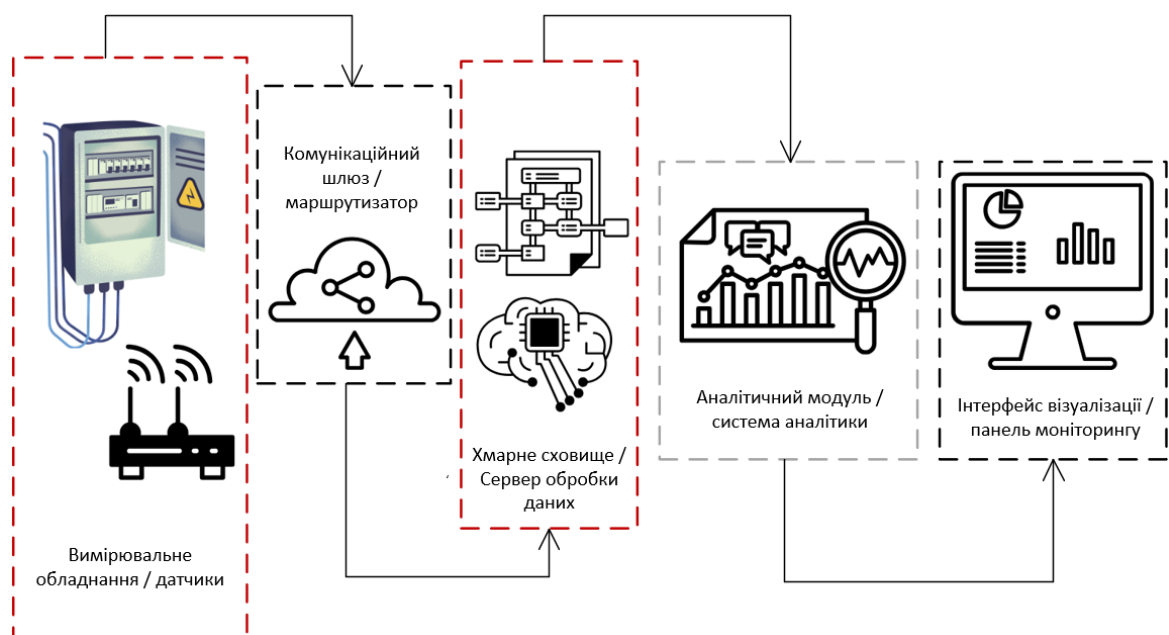


Рисунок 3.1 – Структуру інтелектуальної системи моніторингу енергії

3.2 Аналіз та технічна оцінка існуючої АСЕМ Ліцею №6

3.2.1 Архітектура встановленої АСЕМ Ліцею №6

Автоматизована система моніторингу енергії, встановлена в ліцеї № 6, має дворівневу архітектуру, яка поєднує використання приладів для вимірювання з рівнем комунікації та логіки, що включає контролер Soberry В. Це дозволяє централізовано обробляти дані про використання енергії, а також формувати єдину базу даних, до якої має доступ енергетичний менеджер громади.

Починаючи з першого рівня, який має відповідну назву «рівень вимірювання», система складається з різних типів систем вимірювання: тепла, електроенергії, води та температури. Ліцей №6 використовує тепломір SVTU-10M, який підключений до контролера Soberry В через з'єднання RS-232. Традиційно для промислової передачі даних цей метод підключення використовується [22]. Він надає точні дані про такі параметри, як температуру подачі/повернення та дані споживання.

Електрочильник NIK2301 FH3 підключається через протокол інтерфейсу RS-485 Modbus RTU і вимірює кількість електроенергії. Протокол Modbus є одним із найвідоміших протоколів передачі даних. Для забезпечення ефективної передачі даних на великій відстані цей протокол може підтримувати до 247 пристроїв на одній шині [23].

Вимірювання холодної води здійснюється за допомогою механічних лічильників води LL-32x з базовою конфігурацією і без імпульсного або цифрового виходу. Тому, незважаючи на те, що в системі використовується перетворювач M-Bus, лічильники води не зможуть передавати дані безпосередньо на контролер Soberry В. Ця особлива конфігурація означає, що лічильники води LL-32x не підтримують жодного цифрового протоколу, а отже, дані доведеться записувати вручну, і вони слугуватимуть лише додатковим елементом енергетичного балансу будівлі, навіть якщо будівля вже використовувала систему обліку до впровадження системи моніторингу енергії.

Крім вимірювальних приладів, контролер Soberry B також взаємодіє з датчиками температури, що дозволяє переглядати температуру всередині приміщення та в мережі тепlopостачання. Використання цих датчиків допомагає зрозуміти роботу системи опалення, наявність температурних диспропорцій та непродуктивних тепловтрат. Логічна блок-схема системи АСЕМ показана на рисунку 3.2. На малюнку пояснюється загальна взаємодія між вимірювальними приладами та контролером Soberry B. Також видно, що центральний контролер, який виконує функцію концентратора, отримує всі дані від приладів вимірювання тепла, електроенергії та температури. Він об'єднує інформацію в один потік, який потім надсилається через Інтернет на сервер енергоменеджменту громади, що сприяє створенню єдиної інформаційної структури, яка дозволяє інтегрувати пристрої з безліччю протоколів та інтерфейсів.

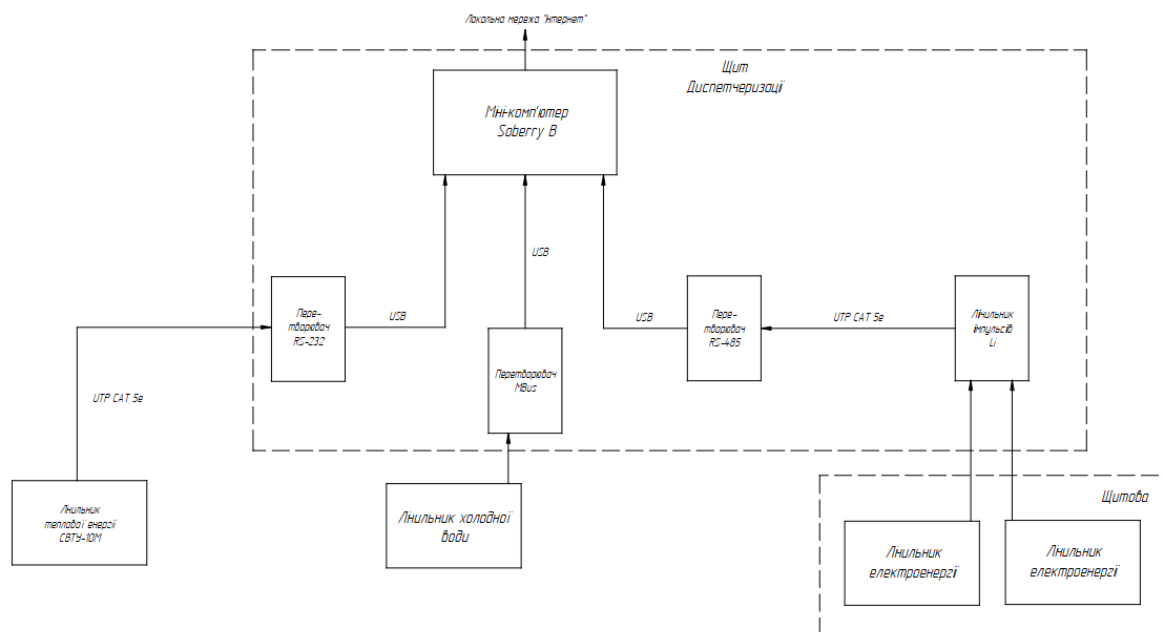


Рисунок 3.2 – Схема системи моніторингу енергоефективності ліцею №6

Контролер Soberry B має інтерфейси USB, RS-232, RS-485 і M-Bus, що робить його достатньо гнучким для інтеграції різноманітного обладнання. Внутрішній буфер Soberry B дозволяє швидко зберегти дані, що гарантує, що інформація зберігається навіть під час нетривалих перебоїв у зв'язку або електропостачанні. Цей метод надійності системи в реальних умовах і знижує

ризик втрати даних.

Поточна система АСЕМ в Ліцеї №6 збирає та передає інформацію про споживання енергії в єдиному місці . Щоденні та щомісячні профілі споживання створюють основу для подальшої аналітичної обробки. Тим не менш, система АСЕМ призначена для документування і не має здатності проводити автоматизований аналіз, прогнозування чи виявлення аномалій.

Детальна фізична структура підключень, кабельні траси та компонування обладнання у щиті диспетчеризації розглядається у підрозділі 3.2.2, де подано схему з'єднань та підключень зовнішніх проводок системи (рисунок 3.3).

3.2.2 Канали збору та передачі даних у АСЕМ Ліцею №6

Структура каналів передачі даних має вирішальне значення для діяльності АСЕМ ліцею №6, оскільки безпека потоку вимірювальних даних, які є життєво важливими для сервера центрального енергоменеджменту громади, залежить від правильної фізичної структури підключення обладнання. Він розроблений таким чином, щоб вимірювальні пристрої та контролер Soberry В могли ефективно обмінюватися даними. Саме це і мінімізує втрату даних у разі непередбачуваного збою або несправності деталей.

Диспетчерська панель ЩД1 є центром для всієї фізичної інфраструктури. Цей ЩД1 складається з компонентів, лише для внутрішньої комунікаційної мережі, таких як інтерфейсні перетворювачі, стабілізовані джерела живлення, розподільні термінали, джерела безперебійного живлення та інші. Фактично ЩД1 передає весь цифровий і аналоговий сигнал від вимірювальних приладів до контролера Soberry В.

Схема підключення вимірювального обладнання від лічильників до комунікаційних інтерфейсів на панелі рівнів показана на рисунку 3.3. Це показує не тільки порядок підключення кабелів, але й логіку розділення каналів, необхідну для передачі даних.

1.0. Це дозволяє контролеру Soberry B і основним мережевим компонентам працювати під час короткочасних перебоїв у постачанні електроенергії. Це додатково забезпечує безперебійний збір даних під час роботи аварійного джерела живлення, що сприяє збереженню цільності даних.

Етап налагодження відбувається після відновлення та прокладання маршрутів кабельних мереж. На цьому етапі надійність шляхів передачі сигналу, визначення інтерфейсу та тестування функціональності контролера Soberry B будуть забезпечені. Крім того, кожен пристрій буде зареєстрований у системі моніторингу енергії. Також будуть визначені технічні параметри, тарифи та права доступу до енергоменеджера. Це означає важливий крок, спрямований на забезпечення надійності передачі даних і, таким чином, створення автентичних звітів про споживання.

Дані передаються на центральний сервер через мережеві інтерфейси Ethernet і GSM/GPRS, щоб підтримувати функціональність навіть без підключення до Інтернету. Зазначені вище шляхи також використовуються для передачі інформації, необхідної для функціональності та стабільності АСЕМ, а також для своєчасності даних. Крім того, система може отримувати дані про споживання без втручання людини щодня, щотижня або щомісяця.

Систему АСЕМ у ліцеї №6 можна оптимізувати за допомогою складної системи взаємозв'язку, як показано на рисунку 3.3. Можливість оновлення системи, щоб підтримувати додаткові сенсорні інтерфейси, полегшить різноманітність інтерфейсів і можливості розробки додаткових інтерфейсів для різних пристроїв. У наступних розділах буде представлено порівняння поточного стану системи АСЕМ та запропонованої інтелектуальної системи ISEM, щоб оцінити можливість модернізації до більш високого рівня автоматизації.

3.2.3 Аналіз обмежень існуючої системи та необхідність переходу до інтелектуальної ISEM

У поточній системі є обмеження. На підставі перевірки функціональності

АСЕМ, яка, як уже зазначалося, зараз встановлена в ліцеї №6, можна побачити, що, незважаючи на елементарну можливість керування енергією, існують обмеження в самій системі, які непридатні для інтелектуального керування. Слід зазначити, що наявна АСЕМ фіксує інформацію, а потім передає її на сервер. Аналіз і виявлення проводяться вручну.

Для кращого розуміння, нижче в таблиці 3.1 наведено порівняльне представлення деяких основних відмінностей між поточною системою АСЕМ та інтелектуальною системою моніторингу енергії.

Таблиця 3.1 – Порівняння функціональних можливостей АСЕМ та ISEM

Критерій	Існуюча АСЕМ Ліцею №6	Проектована ISEM
Частота збору даних	1 раз на годину (є можливість налаштування частішого збору)	5 хв - 1 год, залежно від типу приладу
Типи даних	Тепло, електроенергія, частково вода, мікроклімат	Тепло, електрика, вода, газ, мікроклімат (t°, RH, CO ₂), стан обладнання
Підтримка інтерфейсів	RS-232, RS-485, M-Bus (базове використання)	RS-232/485, M-Bus, MQTT, Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT, ZigBee
Передача даних	На сервер у форматі історичних значень	Потоки даних у режимі реального часу + хмарний аналіз
Наявність аналітики	Відсутня; аналіз виконує енергоменеджер вручну	Автоматична аналітика, машинне навчання, прогнозування
Виявлення аномалій	Немає	Автоматичні сповіщення про відхилення, аварії, перевитрати
Прогнозування споживання	Відсутнє	Моделі на основі часових рядів, MLP, LSTM, ARIMA
Поля для введення даних	Частина даних вводиться вручну (наприклад, холодна вода)	100% автоматизований збір, мінімум ручного втручання
Візуалізація	Статичні графіки на сервері громади	Динамічні панелі, інтерактивні графіки, теплові карти
Можливість інтеграції	Обмежена	Повна інтеграція з IoT-сенсорами, будівельною автоматикою БАС
Реакція системи	Реагування здійснюється людиною	Автоматичне реагування (рекомендації, оптимізація, сценарії)
Масштабованість	Технічно обмежена	Легко масштабована для різних типів будівель

АСЕМ ліцею №6 надає можливості автоматизованого збору даних із вимірювальних і сенсорних компонентів, а також базові можливості візуалізації за допомогою графіків і таблиць. Система також підтримує різні частоти опитувань і здатна, з технічної точки зору, отримувати дані частіше, ніж щогодини, якщо це

необхідно. Тим не менш, зберігається 60-хвилинний період збору даних, який може бути задовільним для загального спостереження, але не настільки для детального аналізу чи короткочасних змін.

Дані, отримані АСЕМ, автоматично надсилаються та зберігаються на сервері клієнта через інтернет-портал, що дозволяє переглядати дані, представлені в інтерактивних таблицях, історичних графіках та профілях споживання. Однак слід зазначити, що наведений інтерфейс є суто інформаційним, і автоматична обробка, аналіз результатів і визначення причинно-наслідкових зв'язків між різними параметрами не здійснюються. Для прикладу, він не може визначити будь-який зв'язок між температурою повітря, CO₂ та параметрами споживання енергії, незважаючи на те, що ці зв'язки є значущими для оцінки енергоефективності вентиляції та опалення. Система також показує обмеження щодо відхилень обробки. АСЕМ не має автоматичних процедур попередження, пов'язаних із ненормальними режимами роботи, перевищенням витрат і аварійними процесами. Виявлення відхилень відбувається виключно на стороні користувача. Відсутність автоматичного аналізу та прогнозування робить систему залежною від людського фактора, що знижує оперативність прийняття рішень.

Порівняльний аналіз функцій (табл. 3.1) показує, що проєктована інтелектуальна система енергомоніторингу має перейти від простого відображення даних до їх комплексної обробки: аналізу тенденцій, автоматичного виявлення аномалій, прогнозування та формування рекомендацій. У поєднанні з підвищеною частотою збору даних та можливістю інтеграції додаткових сенсорів це дозволить використовувати енергетичні ресурси більш ефективно і забезпечить якісно новий рівень енергоменеджменту.

3.3 Архітектура інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM)

У цьому підрозділі йдеться про реалізацію п'ятирівневої архітектури ISEM надається уявлення про логіку потоків даних між підсистемами, структури пакетів

і часових рядів, вибір протоколів та платформ для зберігання й обробки даних, а також визначення каналу даних для підготовки даних модулів аналізу та вихідних інтерфейсів. Це допоможе здійснити перехід між концептуальним підходом, наданим у розділі 3.1, 3.2 та існуючим АСЕМ до практичної реалізації ISEM

3.3.1 Логічна та функціональна схема обміну даними

У випадку досліджуваної інтегрованої системи управління датчиками та енергією (ISEM) логіка обміну даними виглядає наступним чином: «джерело → шлюз → сервер → аналітика → інтерфейс». Кожен компонент виконує певну функцію в життєвому циклі обробленої інформації. Такий порядок полегшує перевірку попередніх даних, зменшує втрати інформації та допомагає скласти однорідний ряд в аналітичних блоках. На практиці це працює таким чином:

1. пристрій/прилад (електролічильник, теплолічильник, датчик температури або CO₂) формує вихідні дані індикаторів і передає їх на локальний шлюз або мережу;

2. локальний шлюз діє як проміжна ланка: він виконує перетворення протоколу (наприклад, RS-485 → TCP), забезпечує буферизацію даних з метою подолання перебоїв у зв'язку та, зрештою, надсилає організовані повідомлення даних на сервер за допомогою легковагових протоколів IoT (наприклад, MQTT) або REST API/WebSocket. Це типово для мережі IoT загалом, яка має підтримувати як застарілі пристрої, так і нові датчики [24];

3. формат повідомлення, яким обмінюються між шлюзом і сервером у системі ISEM, має стандартну структуру, згідно з якою запис містить позначку часу (UTC), ідентифікатор пристрою, тип параметра, відповідне значення, одиницю вимірювання та поле позначки якості даних (quality_flag). Це дозволяє серверу негайно розпізнавати дані, незалежно від того, чи це відфільтровані чи буферизовані дані, чи необроблені дані;

4. у передачі даних ISEM рекомендований інтервал передачі критичних параметрів, таких як споживання енергії, показники мікроклімату та CO₂,

становить п'ять хвилин, тоді як для інших пристроїв, яким не потрібна висока швидкість передачі, рекомендований інтервал передачі становить шістдесят хвилин;

5. після отримання дані піддаються перевірці з точки зору позначки часу, одиниць вимірювання та наявності порушень, що призводять до присвоєння оцінки якості та призводить до позначення даних або відхилення. Потім дані класифікуються як «необроблені» або «очищені/зведені», з часовими рядами, які мають п'ятихвилинну або погодинну роздільну здатність;

6. для підвищення надійності локальні шлюзи ISEM використовують системи буферизації. Наприклад, якщо відбувається тимчасова втрата зв'язку між сервером і локальним шлюзом ISEM, він зберігає дані локально. Ці дані пізніше синхронізуються з сервером, коли з'єднання буде відновлено. Це важливо для надійності, коли йдеться про моніторинг.

3.3.2 Рівень датчиків і вузлів обліку: вимоги до даних і частота збору

Перший рівень архітектури включає в себе всі пристрої, які встановлені всередині будівлі, такі як лічильники електроенергії, теплолічильники, витратоміри, датчики температури, датчики вологості, датчики CO₂ і датчики мікроклімату. Прилади надають первинні дані, і точність даних впливає на достовірність результатів.

Для системи ISEM дуже важливо, щоб дані, що передаються для кожного приладу, були послідовними. Основні вимоги до цих інструментів:

- кожен запис повинен мати час вимірювання;
- значення мають бути надані у відповідних одиницях (кВт·год, °C, тощо);
- пристрій повинен мати унікальний ідентифікатор;
- дані повинні передаватись з інтервалами, які відповідають можливостям пристрою та вимогам аналізу.

Система використовуватиме п'ятихвилинний часовий інтервал, коли мова йде про параметри, які швидко змінюються, важливі для цілей моніторингу, а

саме температура, CO₂, навантаження електромережі. Для інших параметрів, які не змінюються з дуже великою швидкістю, щогодинний запис їх не вважатиметься неадекватним.

3.3.3 Рівень зв'язку: протоколи та шлюзи

Набори протоколів використовуються для з'єднання різних типів пристроїв залежно від їхніх властивостей. Для «звичайних» лічильників (електрика, опалення) використовуються промислові комунікації типу Modbus RTU/Modbus TCP. У випадку пристроїв із послідовними інтерфейсами (включаючи RS-485) перетворення сигналу може здійснюватися за допомогою шлюзів, які «спілкуються» через TCP/IP із централізованим сервером.

Для лічильників витрати, тепла та води, а також інших пристроїв з інтерфейсом M-Bus (або «Wired M-Bus») ці рішення можна використовувати, особливо якщо такі пристрої вже налаштовані в системах обліку витрат. Для «нових» датчиків IoT (для температури, CO₂, датчиків потоку тощо) найкраще підходять «зручні для IoT» протоколи IoT: MQTT, HTTP, WebSocket, зокрема для мікроконтролерів (і мікрокомп'ютерів), таких як ESP32, Raspberry Pi. Наприклад, MQTT це популярний для енергоменеджмент-систем, що використовують open-source стек, забезпечує надійну доставку даних і підтримку стрімінгу [25].

У випадках, коли датчики розташовані у віддалених або складнодоступних зонах (наприклад, технічні приміщення, підвали, окремі корпуси), або коли потрібна низька енергоспоживаність може використовуватися бездротова передача даних через LPWAN-технології (наприклад, LoRaWAN, NB-IoT) або інші подібні стандарти. Гібридна архітектура, яка включає LPWAN, MQTT і абстрактний шар нормалізації даних, є рекомендованим підходом у дослідженнях, які досліджували споживання енергії будівель [26]. Ця стратегія заснована на використанні локального буферного сховища в самих шлюзах, що дозволяє шлюзам тимчасово кешувати отримані дані протягом днів або навіть годин у разі втрати з'єднання, а потім синхронізувати дані назад із сервером, коли з'єднання

буде відновлено. Це гарантує цілісність вимірювань, що є важливим задля забезпечення енергоефективності в сучасних мережах IoT, по причині того, що саме це допомагає уникнути втрати отриманих даних. В підсумку, комунікаційний рівень ISEM дозволяє системі бути динамічно сумісною як з традиційними лічильниками енергії, так і з датчиками Інтернету речей (IoT).

3.3.4 Обробка часових рядів на рівні сервера

ISEM використовує спеціальні бази даних для зберігання та обробки великих обсягів даних. Однією з основних альтернатив є TimescaleDB, розширення PostgreSQL, оптимізоване для високопродуктивного збору, зберігання та агрегації часових рядів даних.

Наступні функції, що реалізуються архітектурно на серверному рівні ISEM:

1. збір: отримання даних через MQTT (або REST API/WebSocket) і зберігання в TSDB;
2. попередня обробка: перевірка правильності даних, включаючи часові мітки, одиниці виміру, формат і, можливо, перевірка якості (наприклад, `quality_flag`);
3. агрегація: виведення рядів з інтервалами 5 хвилин, щогодини та щодня, із зберіганням необроблених та агрегованих даних залежно від вимог до аналізу;
4. інтерфейс доступу до даних: REST API/ WebSocket для підтримки аналітичних модулів або фронтенд-додатків, що полегшують запити даних, оновлення в режимі реального часу та просту інтеграцію із зовнішніми сервісами.

3.3.5 Потік даних (Data-pipeline): обробка, очищення, нормалізація, підготовка до аналітики/машинного навчання

В ISEM потік даних реалізований як серія етапів, які обробляють дані від необроблених показників до «чистих», нормалізованих, агрегованих або готових до машинного навчання форм:

1. перший етап має назву прийом: потік даних від шлюзів або API

передається до брокера/сервера, де він реєструється в базі даних;

2. валідація, тобто перевірка структури пакета: наявність timestamp, device_id, коректних одиниць, значень у допустимих межах тощо; при потребі – маркування записів (наприклад, quality_flag) або відкидання явно некоректних;

3. робота з відсутніми значеннями/випадками: для невеликих відсутніх значень, наприклад менше 10 хвилин, можна розглянути інтерполяцію, а для більших значень можна використовувати фільтри медіани/MAD для очищення даних для аналізу/машинного навчання;

4. наступний етап називається нормалізація/масштабування: дані нормалізуються, щоб зробити їх придатними для алгоритмічної обробки (машинне навчання тощо) за допомогою методів масштабування, таких як мінімакс-масштабування, z-оцінка тощо, які підходять для алгоритму.

Формула min–max нормалізації [27]:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3.1)$$

де x – початкове значення;

x' – нормалізоване значення.

5. формування тимчасових вікон (time windows). Для моделей на основі послідовностей (таких як LSTM, ARIMA) послідовності формуються наступним чином: $X = \{x_{t-n}, \dots, x_t\}$;

6. пакет/черга обробки. Аналітичні/ML-завдання отримують дані пакетами, обробляють їх, генерують результати, які потім або зберігаються в базі даних, або надсилаються до інструменту звітності/візуалізації;

Це забезпечує механізм для роботи з потоковими (онлайн) даними для оповіщення в режимі реального часу, виявлення аномалій і реагування, а також з історичними даними для навчання моделей, визначення тенденцій і прогнозування.

3.3.6 Інтеграція аналітичних модулів та API для взаємодії

Аналітичні або ML-модулі в ISEM можна реалізувати як окремі сервіси (контейнери, мікросервіси), що комунікують із сервером через стандартні API – REST або WebSocket. Це дає змогу фронтенду або зовнішнім системам (наприклад, міська платформа енергоменеджменту) одразу отримувати результати: прогнози, зони невизначеності, базові рівні, відхилення, аномалії тощо, і відображати їх у вигляді графіків, звітів, повідомлень.

Для розробки API зазвичай використовуються сучасні веб-фреймворки (такі як FastAPI на платформах Python), а також загальні бібліотеки ML/статистики (включаючи, наприклад, scikit-learn, statsmodels, TensorFlow, PyTorch тощо), які забезпечують високий рівень масштабованості та полегшують розробку/оновлення систем за допомогою модуляризації, API, а також контейнерів ML, що не обов'язково вимагає повного рефакторингу системи.

3.4 Архітектура інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM)

У попередньому підрозділі було розглянуто архітектуру інфраструктури та потоку даних ISEM. У цьому підрозділі йдеться про математичні модулі, які працюють на базі інфраструктури для підтримки інтелектуальної обробки отриманих часових рядів.

Аналітичний модуль є центральною частиною ISEM, який приймає необроблені часові ряди та формує форматовані дані, які менеджери (енергоменеджери) можуть використовувати для прийняття рішень. На відміну від звичайних систем, що використовуються для управління енергією, аналітичний модуль забезпечує аналіз, який виконується не тільки на архівах, але й на постійній основі в таких областях: прогнози, базові показники та ключові показники ефективності. Архітектура модуля поєднує статистичний аналіз,

математичне моделювання та моделі машинного навчання. Хоча різні компоненти використовуються для різних цілей, вони пов'язані між собою як єдиний обчислювальний конвеєр (конвеєр даних).

3.4.1 Модуль для формування базових рівнів енергоспоживання (EnB)

Модуль EnB визначає «нормальний» рівень споживання для конкретної споруди. Задля отримання подібного значення енергоспоживання, яке фільтрує вплив коливань температури, споживання теплової енергії виражається на основі градусо-днів опалення (HDD), що є загальноприйнятим статистичним показником, який накопичує різницю між еталонною температурою та середньою добовою температурою повітря на вулиці в дні, коли необхідне опалення.

Розрахунок HDD виконується за допомогою наступної формули

$$HDD = \sum_{i=1}^n (t_{\text{баз}} - t_{\text{сер}}), \quad (3.2)$$

де $t_{\text{баз}}$ – базова температура (для України становить $+18^{\circ}\text{C}$);

$t_{\text{сер}}$ – середньодобова температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$;

n – кількість днів у місяці, коли $t_{\text{сер}} < t_{\text{баз}}$.

Значення HDD зростають із зниженням температури повітря на вулиці, що означає зростання попиту на теплову енергію для підтримання температури в приміщенні. Крім того, в регресійному аналізі HDD допомагає в правильній нормалізації даних відповідно до стандарту ISO 50006, щоб уникнути розбіжностей у температурах протягом певного місяця.

Хоча модуль EnB здатний автоматизувати базове рішення на основі HDD, це дослідження також включає регресійний аналіз, який було проведено зовні в MS Excel. Це має подвійну мету: (1) перевірка структури моделі та статистичної значущості взаємозв'язку між кількістю спожитого тепла та кліматичними факторами, (2) дослідження впливу кожної змінної окремо, що дозволяє краще

зрозуміти формування $E_{пВ}$, а не просто розглядати його як «чорний ящик».

Для встановлення зв'язку між енергоспоживанням будівлі та кліматичними умовами використовується лінійна регресійна залежність:

$$E = a + a_1 \cdot HDD + a_2 \cdot N_{дїб}, \quad (3.3)$$

де a, a_1, a_2 – коефіцієнти регресії;

HDD – градусо-добы опалення, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{доба}$ [28];

$N_{дїб}$ – кількість опалювальних дїб у n -му місяці;

E – споживання теплової енергії об'єктом за місяць, Гкал.

На рисунку 3.4 показано регресійний аналіз залежності споживання теплової енергії від градусо-днів опалення. Розрахунок коефіцієнтів здійснено методом найменших квадратів у середовищі MS Excel за допомогою інструмента «Аналіз даних → Регресія».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	SUMMARY OUTPUT								
2									
3	Regression Statistics								
4	Multiple R	0,964950306							
5	R Square	0,931129094							
6	Adjusted R Square	0,915824448							
7	Standard Error	14,43107							
8	Observations	12							
9									
10	ANOVA								
11		df	SS	MS	F	Significance F			
12	Regression	2	25340,41214	12670,21	60,83963668	5,9042E-06			
13	Residual	9	1874,302031	208,2558					
14	Total	11	27214,71417						
15									
16		Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
17	Intercept	-14,68421111	6,556873231	-2,23951	0,051884404	-29,51688885	0,14846664	-29,51688885	0,14846664
18	HDD	0,286211696	0,045333028	6,313536	0,000138737	0,183661263	0,38876213	0,183661263	0,38876213
19	К-сть опалювальних дїб	-1,469291849	0,71556903	-2,05332	0,070235497	-3,088021455	0,149437758	-3,088021455	0,149437758

Рисунок 3.4 – Результати регресійного аналізу залежності споживання теплової енергії від градусо-дїб опалення у MS Excel

Отримано наступні результати, які вказують на високий ступінь взаємозв'язку між двома змінними, з $R^2 = 0,93$, що означає, що 93% варіації

енергоспоживання пояснюється змінами погодних умов.

Рівняння регресії виражається як:

$$E = (-14,682) + 0,286 \cdot HDD + (-1,469) \cdot N_{дiб}.$$

Обидва коефіцієнти (a_1, a_2) є значущими при значенні Р менше 0,05, що доводить надійність результату (P-value <0,05, що підтверджує достовірність моделі). З кожним збільшенням HDD на одну одиницю середнє збільшення споживання енергії становить 0,286 Гкал.

На рисунку 3.5 представлено порівняння фактичного та прогнозованого місячного споживання теплової енергії за результатами регресійного аналізу, виконаного в MS Excel.

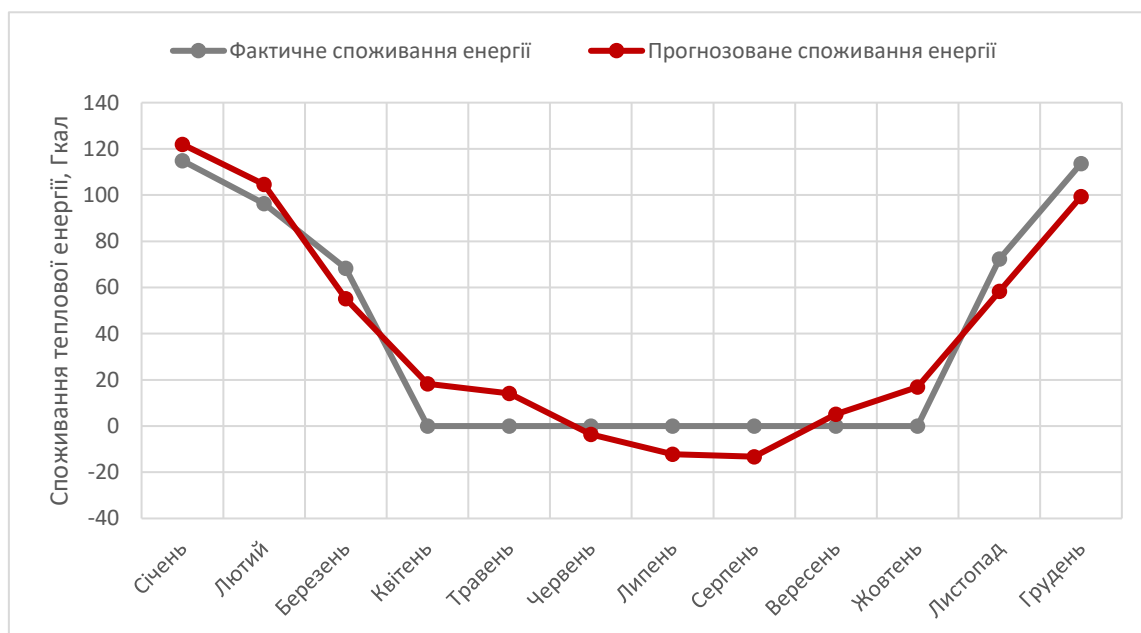


Рисунок 3.5 – Порівняння фактичного та розрахункового споживання теплової енергії за результатами регресійного аналізу у MS Excel

Сірий колір показує фактичне споживання енергії, а червоний показує прогнозоване споживання енергії, що свідчить про те, що моделі є достатніми.

Також, графік показує, що у січні, лютому та грудні є дні, коли споживається багато енергії. Коли погода тепла, споживання енергії знижується в періоди без опалення. Підсумовуючи, регресія, розроблена вручну, використовується не тільки для перевірки ефективності системи EnB, але й для підтвердження того, що визначена модель дійсно відображає поведінку конкретної будівлі, що в свою чергу робить подальші розрахунки EnPI та аналіз відхилень набагато більш обґрунтованими..

Модель EnB допомагає енергоменеджерам об'єктів оцінити ефективність систем опалення, виявити ділянки, де відбувається економія енергії або надмірні витрати, а згодом нормалізувати споживання енергії з урахуванням кліматичних умов та експлуатаційного стану будівлі. Застосування HDD разом з регресійним аналізом забезпечує надійну перевірку фактичної ефективності порівняно з базовою, що є основою для подальшого проектування EnPI і, як наслідок, прогнозування споживання енергії.

З іншого боку, базове значення щодо споживання електроенергії може бути оцінене за допомогою нормативної Методики за постановою КМУ №1140 з урахуванням конкретних показників, а також щомісячної кількості днів.

3.4.2 Модуль формування ключових показників ефективності (EnPI)

Модуль показників енергоефективності (EnPI) розраховує основні показники енергоспоживання на основі фактичних значень з розділу 3.4.1, що в свою чергу допомагає вимірювати енергоефективність, визначати економію та надмірні витрати, а також аналізувати поточну поведінку щодо витрат. Різниця між фактичним споживанням енергії та базовим значенням визначається за такою формулою:

$$\Delta Q = Q_{\text{факт.}} - Q_{\text{б.}}, \quad (3.4)$$

де $Q_{\text{факт.}}$ – фактичне споживання енергії;

$Q_{\text{б.}}$ – базовий рівень енергоспоживання, сформований модулем EnB.

Відносна похибка, обчислена у відсотках, використовується для оцінки ступеня похибки, яка визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{Q_{\text{факт.}} - Q_{\text{б.}}}{Q_{\text{б.}}} \times 100\%, \quad (3.5)$$

Показники питомого енергоспоживання розраховуються, в даному випадку, за площею будівлі:

$$EnPI = \frac{Q}{S}, \quad (3.6)$$

де Q – споживання енергії;

S – опалювальна площа будівлі (м^2).

Базове споживання електричної енергії розраховується, як зазначено в Методології №1140, за формулою:

$$W_{\text{б.ел.річ}} = \sum_{i=1}^n \frac{W_{\text{ел.міс}}}{m_{\text{міс}}} \times k_e \times \sum_{i=1}^n m_{\text{міс}}, \quad (3.7)$$

де $m_{\text{міс}}$ – кількість днів у тих місяцях протягом яких відбувалось споживання електричної енергії;

n – кількість місяців, які розглядаються;

k_e – коефіцієнт, який враховує інші фактори впливу на споживання електричної енергії (приймається в межах від 0,8 до 1,2).

Базовий рівень енергоефективності розраховується як середнє значення базового рівня річного споживання електроенергії за трирічний період, що виражається формулою:

$$BR_{\text{ел}} = \frac{\sum_{j=1}^3 W_{\text{б.ел.річ.}j}}{3}, \quad (3.8)$$

Розглянуті вище рівняння дозволяють автоматично генерувати EnPI для всіх

типів енергії, аналізувати відхилення фактичного споживання енергії від базового рівня, а також оцінювати ефективність енергоменеджменту. Всі рівняння включені в модуль EnPI з графічним відображенням на веб-інтерфейсі системи ISEM.

3.4.3 Модуль виявлення аномалій (Anomaly Detection)

Модуль виявлення аномалій швидко ідентифікує відхилення у функціонуванні енергетичної інфраструктури будівлі, такої як опалення, водопостачання або електропостачання. Він допомагає виявляти витoki, приховані витoki, несправне обладнання, неправильні показання лічильників, а також аномалії у функціонуванні електромережі котельні. Для короточасних аномалій використовується статистичний критерій за формулою Z-score [29]:

$$z = \frac{x_i - \mu}{\delta}, \quad (3.9)$$

де x_i – конкретне вимірне значення енергоспоживання або іншого параметра на момент i (наприклад, показник лічильника у певну годину/день);

μ – середнє значення вибірки;

δ – стандартне відхилення.

Значення вважаються аномальними, якщо $|z| > 3$.

Для аномалій, що існують протягом більш тривалих періодів, використовується ковзне вікно з медіанним абсолютним відхиленням (MAD):

$$z_{win} = \frac{x_i - median(X)}{MAD}, \quad (3.10)$$

де X – набір всіх значень за розглянутий період (наприклад, усі покази лічильників за місяць);

$median(X)$ – медіана всіх значень X , іншими словами – «центральне»

значення ряду, яке менш чутливе до викидів, ніж середнє;

MAD – медіана абсолютного відхилення, яка є мірою типового абсолютного відхилення від медіани.

Система надає автоматичні повідомлення про нетипові піки споживання електроенергії, раптове збільшення споживання гарячої води, зниження температури подачі, а також невідповідності в подачі та поверненні теплоносія. Завдяки зв'язку з EnB та EnPI, енергетичний менеджер отримує інформацію не тільки про реальне споживання енергії, але й про потенційні проблеми, що дозволяє йому швидко реагувати в екстрених ситуаціях та оптимізувати споживання енергії в усьому будинку.

3.4.4 Модуль прогнозування енергоспоживання

Компонент ISEM, що відповідає за прогнозування енергоспоживання, використовує статистичні моделі в поєднанні з моделями ML для складання точних короткострокових/довгострокових прогнозів енергоспоживання. Він враховує минуле споживання енергії, зовнішні фактори (погода, години роботи) та використання компонента формування базового рівня (EnB).

Для лінійного компонента енергоспоживання використовується модель ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), яка враховує тенденції, сезонність та регулярні цикли. Формула ARIMA (p,d,q) виглядає так [30]:

$$y_t = c + \varphi_1 y_{t-1} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_p \epsilon_{t-p} + \epsilon_t, \quad (3.11)$$

де y_t – споживання у момент часу t ;

φ – авторегресійні коефіцієнти;

θ – коефіцієнти ковзного середнього;

ϵ_t – випадкова помилка.

Нелінійні коливання, спричинені раптовими змінами температури, піковими навантаженнями або станами обладнання, моделюються за допомогою нейронної мережі LSTM (Long Short-Term Memory) [30]:

$$c_t = f_t \cdot c_{t-1} + i_t \cdot \tilde{c}_t, \quad (3.12)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh c_t, \quad (3.13)$$

де c_t – стан комірки;

h_t – вихід;

f_t, i_t, o_t – гейт-контролі мережі.

Гібридна модель ARIMA-LSTM інтегрує обидва методи, де ARIMA використовується для прогнозування лінійної частини, а LSTM фіксує нелінійні залишки:

$$r_t = y_t - \hat{y}_t^{ARIMA}, \quad (3.14)$$

$$\hat{y}_t = \hat{y}_t^{ARIMA} + \hat{r}_t^{LSTM}, \quad (3.15)$$

де \hat{r}_t^{LSTM} – прогноз залишків / нелінійної частини.

Формування гібридної моделі прогнозування енергоспоживання, що поєднує класичну модель ARIMA з новітніми моделями LSTM, показано на рисунку 3.3.

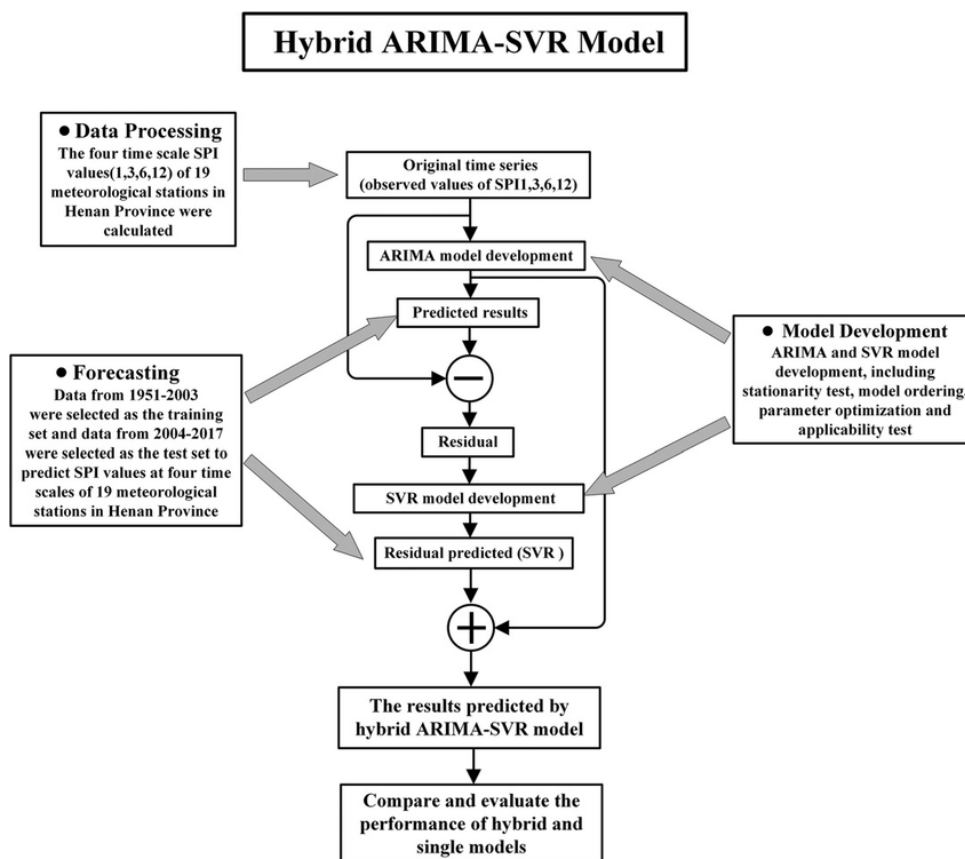


Рисунок 3.6 – Гібридна модель ARIMA-LSTM для прогнозування енергоспоживання [31]

Нижче показано процес моделювання відповідно до рисунку 3.6:

- обробка даних (Data Processing), на цьому етапі здійснюється підготовка часових рядів, нормалізація, агрегація та визначення основних показників енергоспоживання (EnB, EnPI) на основі ISO 50006 та Постанови КМУ №1140;
- моделювання ARIMA, здійснює прогнозування домінуючої тенденції з урахуванням лінійних залежностей та сезонності;
- розрахунок залишків (Residual), на цьому етапі оцінка похибки моделей ARIMA, яка далі обробляється LSTM для нелінійного аналізу;
- моделювання LST яке зосереджується на обробці залишків для підвищення точності прогнозу;
- об'єднання результатів, є етапом об'єднання результатів моделей ARIMA з моделями LSTM для отримання точного прогнозу;
- оцінка та порівняння, оцінюється ефективність прогнозів, перевіряється

точність даних для енергоменеджера.

У порівнянні з традиційними методами використання цього гібридного підходу прогнозування енергоспоживання є більш точним. Це важливий компонент для оптимізації використання ресурсів у муніципальних будівлях. Прогнозування енергоспоживання надає вхідні дані для модулів EnPI, а також пропозиції для аналітичних висновків, графіків і попереджувальних повідомлень для енергоменеджерів.

3.4.5 Модуль рекомендацій та прийняття рішень

Модуль, що розглядається відповідає за аналіз результатів компонентів системи ISEM. Ця частина може аналізувати аномалії, результати прогнозування, відхилення фактичних значень від базових показників (EnB) і погодні умови. Модуль здатний надавати рекомендації, наприклад, у випадках ймовірного перегріву, коли температура подачі висока порівняно з попитом у періоди низького споживання, ймовірного витoku гарячої води на основі високого споживання в нічні години та високого споживання енергії вентиляцією в понаднормові години.

3.4.6 Модуль візуалізації та звітності

Модуль візуалізації, звітності та графічного інтерфейсу користувача забезпечує чітку графічну ілюстрацію даних, отриманих з усіх математичних компонентів ISEM, що забезпечується використанням сучасного програмного забезпечення, такого як Grafana, D3.js та внутрішні веб-панелі. Графічний інтерфейс користувача полегшує спостереження в режимі реального часу за фактичними та прогнозованими рядами споживання енергії. Це можна зробити, об'єднуючи фактичні значення з прогнозованими для виявлення розбіжностей, створюючи теплові карти для оцінки споживання енергії та створюючи автоматичну звітність у форматі PDF для управління та енергоменеджменту. Графіки та теплові карти показують надмірні витрати, нерегулярні пікові періоди

та нерегулярну роботу обладнання, що допомагає оптимізувати прозорість енергоспоживання.

3.5 Безпека та надійність функціонування ISEM

Набір криптографічних рішень, аутентифікація пристроїв і архітектурні рішення гарантують надійне функціонування інтелектуальної системи вимірювання енергії ISEM. Ці рішення забезпечують захист, цілісність і доступність даних. Transport Layer Security (TLS), а саме версія 1.3, використовується для шифрування комунікацій, що надходять від пристроїв до шлюзів в системі ISEM під час комунікації через протокол MQTT. Це пов'язано з тим, що комунікації, які надсилаються через MQTT, вважаються незашифрованими, тому використовується рішення TLS, яке здатне забезпечити шифрування каналу, а також аутентифікацію однорангових пристроїв під час з'єднання [32].

В ISEM кожен підключений пристрій має окремий криптографічний ідентифікатор, такий як сертифікат, який відповідає апаратній ідентичності пристрою і використовується для аутентифікації пристроїв проти потенційних несанкціонованих підключень сторонніх пристроїв в системі, а також підроблених пристроїв. Для підвищення стійкості до мережових збоїв шлюзи, що використовуються в системі ISEM, попередньо оснащені буфером, який тимчасово зберігає вимірювання, які пізніше синхронізуються з центральним сервером після відновлення мережевого з'єднання, забезпечуючи безперебійну підтримку вимірювань навіть у випадках мережових збоїв, що є типовим для систем IoT. Серверна частина ISEM налаштована на забезпечення високої доступності, для чого використовується реплікація бази даних з відповідним механізмом журналу транзакцій, який ефективно надає копії баз даних в інших резервних вузлах для полегшення швидкого перезапуску системи в разі критичної відмови. Ця система налаштована в рамках найсучасніших систем SaaS/IoT, які базуються на забезпеченні цілісності та доступності великих обсягів комунікацій.

Аналітичні послуги ISEM, а також її функціональні компоненти працюють у контейнерному середовищі, що сприяє покращенню сегрегації послуг, легкому оновленню компонентів, а також стабільній роботі компонентів навіть у разі виникнення програмних патологій в інфраструктурі IoT, яка налаштована на основі сучасних найкращих практик.

В підсумку, саме поєднання шифрування транспортного рівня (TLS), автентифікації пристроїв, локальної буферизації даних і реплікації серверної частини забезпечує високий рівень безпеки, надійності та доступності ISEM для цілодобового моніторингу енергоспоживання [33].

3.6 Інтеграція інтелектуальної системи моніторингу енергії (ISEM) з існуючою системою АСЕМ у ліцеї №6

Інтеграція розробленої інтелектуальної системи моніторингу енергії ISEM з системою АСЕМ ліцею №6 має на меті перехід від збору даних до створення комплексної платформи для аналізу та прогнозування енергії. Хоча система АСЕМ гарантує точний і стабільний збір первинних даних, вона надає лише можливості інтерпретації та візуалізації даних. На основі результатів, отриманих у розділі 3.2, було забезпечено апаратну сумісність ISEM з АСЕМ, що вимагає модернізації лише в частині передачі, обробки та інтерпретації даних.

3.6.1 Загальні принципи інтеграції

Інтеграція використовує модель, яка ефективно розподіляє функціональні обов'язки між оригінальною АСЕМ та ISEM. АСЕМ продовжуватиме використовуватися як платформа збору даних без змін у функціонуванні датчиків, лічильників та контролера Soberry В. Кожна нова функція буде інтегрована в платформу обробки та аналізу даних, що включає серверні модулі ISEM та його аналітичний блок. Принцип інтеграції, що лежить в основі всього цього, є таким:

Існуючі лічильники та датчики → контролер Soberry В → комунікаційний шлюз ISEM → сервер ISEM → аналітичні модулі → веб-інтерфейс.

Отже, оскільки фізична структура будівлі не змінюється, це означає, що в результаті цієї інтеграції не буде потрібно проводити нові або інші зчитування лічильників.

3.6.2 Стан апаратної частини та можливості повторного використання

Багатофункціональне обладнання АСЕМ відповідає сучасним вимогам цифрового моніторингу даних про енергетику. Датчики потужності та опалення передають дані у форматі Modbus RTU/TCP, який відповідає офіційній специфікації протоколу застосування Modbus [33]. Водолічильники оснащені перетворювачами M-Bus. Датчики температури та мікроклімату контролера Soberry В можна підключити до аналогових і 1-Wire інтерфейсів за допомогою стандартних цифрових вхідних портів.

Очевидно, що така конфігурація означає, що не потрібно купувати апаратне забезпечення; скоріше, необхідно інтегрувати зчитування параметрів і переконатися, що отримані значення є правильними. Це робиться шляхом налаштування адресних книг, прийняття загальних форматів даних та перевірки паспортних коефіцієнтів. Після чого дані можна передавати до ISEM у стандартизованому форматі.

3.6.3 Рівень комунікації та роль інтеграційного шлюзу

Налаштування загального проміжного шлюзу для обробки всіх даних у загальному форматі є одним із найважливіших етапів цього процесу інтеграції. Нинішній АСЕМ використовує різні способи передачі даних від різних пристроїв, що іноді призводить до неповноти даних або необхідності ручної обробки показників. Цей шлюз вирішує цю проблему, обробляючи пакети з систем комунікації Modbus, M-Bus та інших, перетворюючи їх на стандартизований цифровий формат, а потім передаючи їх на сервер ISEM.

Оскільки MQTT 5.0 розроблений для систем з частими та короткими повідомленнями та широко використовується в інфраструктурах Інтернету речей,

його слід використовувати для передавання даних [34].

Шлюз використовує власну буферизацію, щоб запобігти «діркам» у часових рядах у випадку втрати зв'язку. У результаті покази тимчасово зберігаються, але пізніше передаються на сервер. Цей крок гарантує стабільний потік даних до ISEM, що дозволяє надати дані для моделювання та аналізу.

3.6.4 Інтеграція аналітичних модулів, з акцентом на гібридну модель ARIMA–LSTM

Інтеграція включає впровадження модулів аналітики та прогнозування. Метод ARIMA-LSTM, описаний у розділі 3.4.4, лежить в основі прогнозування енергоспоживання. Цей метод було обрано, оскільки він інтегрує функції ARIMA та LSTM для прогнозування енергоспоживання. ARIMA буде корисним для прогнозування енергоспоживання та охоплення лінійних тенденцій, сезонних та споживчих моделей опалення. Мережа Long Short Term Memory Network буде зосереджена на нелінійних аспектах та короткострокових коливаннях, пов'язаних зі споживанням енергії в школах.

Характеристики передачі даних ASEM поєднують передбачувані закономірності, такі як нічне зниження навантаження, та нерегулярні стрибки, спричинені системами вентиляції та насосними системами, а також втручанням людини. Як наслідок, комбінований метод дає прогнози, які є значно точнішими порівняно з окремими техніками. Дійсно, він відповідає сучасним напрямкам досліджень у галузі прогнозування енергоспоживання, для яких ARIMA-LSTM демонструє високу точність з даними зі змішаними властивостями.

Підхід ARIMA–LSTM інтегрований в ISEM, і завдяки цьому інтегрована система стає незамінним інструментом для інтелектуального аналізу. Вона не тільки може прогнозувати майбутні значення, але й буде здатна покращити виявлення аномалій, а також надавати рекомендації щодо оптимізації роботи енергетичної системи. Усі прогнози, а також значення, розраховані для відхилень, будуть відображатися на онлайн-платформі ISEM, і їх може оцінювати

енергоменеджер

3.6.5 Міграція історичних даних

Оскільки побудова базових рівнів споживання (EnB) вимагає аналізу попередніх періодів, важливо було перенести історичні дані в ISEM. Показники у Ліцеї №6 зберігалися у внутрішніх таблицях АСЕМ. Деякі значення потребували відновлення через ручне введення.

На етапі міграції відбувається структуризація даних, очищення від помилок і відновлення пропусків за допомогою інтерполяції. Теплові дані нормалізуються через показник HDD відповідно до європейських рекомендацій щодо розрахунку градусо-діб. Після цього формується базовий рівень споживання та індикатори ефективності такі як EnB і EnPI згідно з ISO 50006 [16].

3.6.6 Інтеграція аналітики та взаємодія з веб-інтерфейсом

Після інтеграції ISEM забезпечує повний цикл обробки даних, який варіюється від отримання значень до надання рекомендацій. На відміну від АСЕМ, який здатний лише будувати графіки на основі фактичних значень, ISEM надає нормалізовані значення, графіки прогнозування, сповіщення про аномалії та повідомлення з рекомендаціями щодо оптимізації.

Результати обчислювальної частини, такі як прогнози, відхилення та базові значення, доступні у вебінтерфейсі через REST API та WebSocket, який відповідає сучасним енергетичним рішенням, які підкреслюють інтерактивний аналіз. Тому ISEM надає інформаційний інтерфейс, який допомагає приймати рішення на основі аналітичних, а не інтуїтивно зрозумілих моделей.

3.6.7 Підсумкова інтеграційна схема АСЕМ та ISEM

Описана тут структура узагальненої інтеграції зосереджена на взаємозв'язку, що існує між існуючою системою АСЕМ у ліцеї №6 та інтелектуальною системою ISEM. Це зображено на рисунку 3.6, який описує, як

системи ASEM і ISEM працюють разом як єдина інтегрована система, де роль ASEM полягає в тому, щоб надавати стабільні дані, а роль ISEM – інтелектуальний аналіз і прогнозування.

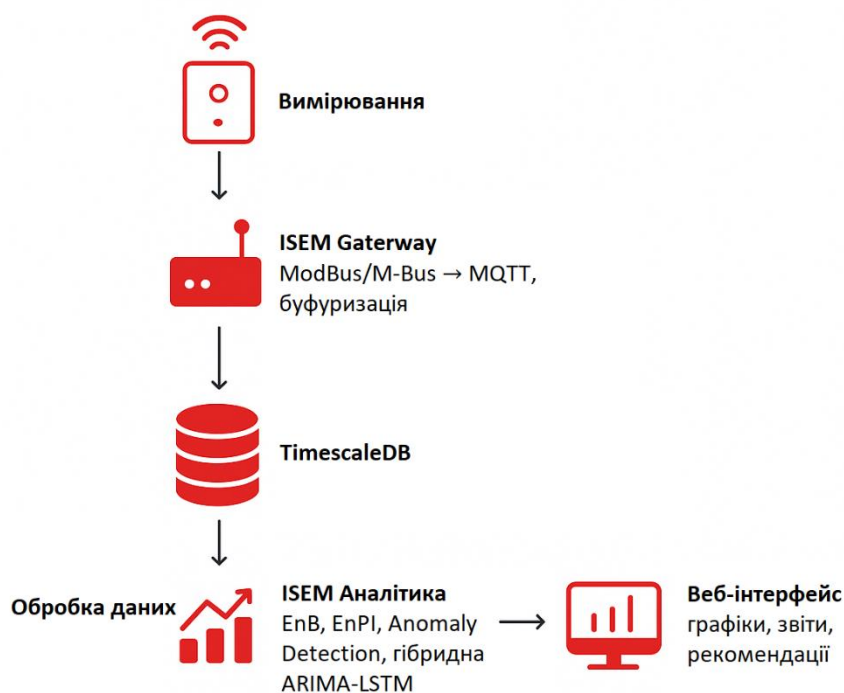


Рисунок 3.6 – Узагальнена схема інтеграції ASEM та ISEM у Ліцеї №6

Інтеграційна модель має п'ять рівнів. Перший рівень включає використання датчиків ASEM, які надають дані, які передаються через Modbus, M-Bus і RS-485. Другий рівень включає агрегацію, буфер і передачу даних у межах шлюзу ISEM. Третій рівень включає зберігання оброблених даних із обробкою та очищенням, яке виконується за допомогою TimescaleDB. Четвертий рівень включає спрямування оброблених даних до моделей EnB, EnPI, аномалій і моделей ARIMA-LSTM. П'ятий рівень надає результати, які ретранслюються на веб-портал, який діє як енергоменеджер.

3.7 Технічні характеристики обладнання інтелектуальної системи енергомоніторингу

Особливості технічної реалізації системи ISEM базуються на

вимірювальних приладах, комунікаційних шлюзах та серверному обладнанні, що відповідає нормативним документам на електровимірювальні засоби, автоматизовані системи збору даних, а також технології IoT. А на вибір параметрів обладнання, в свою чергу уже впливає сумісність з існуючим АСЕМ ліцею №6 та рекомендації стандартів.

На першому рівні розглядаються лічильники електроенергії, тепла та води. Обладнання, яке використовує ліцей №6, сумісне з протоколом Modbus RTU/Modbus TCP. Використання протоколу Modbus є виправданим з технологічної точки зору, оскільки він найчастіше використовується у муніципальному середовищі, і він відповідає офіційній специфікації Modbus Application Protocol v1.1b [33]. Підключення лічильників води здійснюється через M-Bus, що забезпечує надійну передачу даних навіть на великій відстані та підтримує багатоканальні конструкції. Датчики температури, вологості та CO₂ використовують цифрові датчики з похибками вимірювання, указаними в таких інтервалах: +/-0,2°–0,4°C, +/-2%–3% відповідно, що відповідає специфікаціям датчиків, які зазвичай використовуються в системах контролю мікроклімату, таких як датчики навколишнього середовища Sensirion або Bosch.

Другим важливим елементом є комунікаційний шлюз ISEM. Шлюзи з процесорами ARM Cortex-A7/A53, які підтримують від 512 до 1024 МБ оперативної пам'яті, схожі на загальні характеристики промислового IoT-хаба (наприклад, Teltonika, Robustel, UniPi). Цей тип обладнання підходить для систем збору даних вимірювання енергії, які потребують стабільного цілодобового процесу опитування, але не вимагають високої обчислювальної потужності. Буферне рішення з періодом зберігання від 48 до 72 годин є достатнім для додатків IoT у разі втрати безперервності зв'язку. Шлюз виконує Modbus/M-Bus до MQTT, додає часові мітки та надсилає його на сервер через зашифроване з'єднання TLS 1.2/1.3, яке відповідає стандартам кібербезпеки.

Серверне середовище ISEM базується на ОС Linux (Ubuntu Server, Debian), що забезпечує високу доступність. Крім того, специфікація апаратної системи з 4–

8 ядерним процесором, 8–16 ГБ оперативної пам'яті та SSD на 120–250 ГБ забезпечує адекватну підтримку для обробки великих потоків TS, як рекомендовано TimescaleDB. База даних PostgreSQL разом із TimescaleDB забезпечує надійну інфраструктуру бази даних завдяки оптимізованій продуктивності в Інтернеті речей, вбудованій підтримці стиснення даних та ефективності.

Висновки до розділу 3

включення до Розділу 3

У цьому розділі описано концепцію інтелектуальної системи енергомоніторингу (ISEM) для ліцею № 6, визначено основні функціональні можливості. Аналіз існуючої автоматизованої системи енергомоніторингу (АСЕМ) показав, що система здатна лише до автоматизованої обробки та відображення даних, але не має функціональних можливостей нормалізації показників, визначення фундаментальних порогів енергоспоживання, показників ефективності, а також автоматизованого виявлення аномалій. Це послужило основою для визначення вимог до нової інтелектуальної системи.

У роботі пропонується багаторівнева архітектура ISEM, яка включає сенсорний і вимірювальний рівень, комунікаційний шлюз, централізоване сховище даних, модуль аналізу та веб-інтерфейс. Описано методи інтеграції з існуючою АСЕМ, які свідчать про відсутність необхідності заміни існуючих облікових засобів. Особлива увага приділяється підготовці структурованих часових рядів даних.

Аналітичний модуль використовує методи попередньої обробки даних, визначення рівня базового енергоспоживання (EnB), оцінки показників ефективності (EnPI), а також системи прогнозування на основі моделей ARIMA-LSTM. Описано структуру модуля, призначеного для автоматичного виявлення аномалій і відхилень, що дозволяє легко ідентифікувати нестандартні режими роботи інженерних систем.

Представлено підхід до розробки інтерфейсу користувача, який допомагає візуалізувати профілі енергоспоживання, динамічні графіки, звіти про аномальні значення та показники аналізу. Те, як відбувається взаємодія між компонентами системи, допомагає аналізувати дані, порівнювати їх із нормами та розробляти рекомендації для енергоменеджерів.

Запропонована структура ISEM по суті є основою для переходу від пасивного процесу моніторингу, що практикується в рамках існуючої АСЕМ, до інтелектуального аналізу споживання енергії за допомогою математичного моделювання, механізмів виявлення аномалій і систем підтримки прийняття рішень.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Ідея проекту

Стартап-проект має на меті створити універсальну платформу для відстеження, оцінки, прогнозування та оптимізації енергоспоживання муніципальних будівель. Це не просто «ще одна АСЕМ». Це передова система, яка вдосконалює існуючу автоматизовану систему на досліджуваному об'єкті (в даному випадку, Харківському ліцеї №6) за допомогою механізмів, яких наразі недостатньо: прогнозування, аналітика, виявлення аномалій, математичне моделювання та пропозиції щодо енергозбереження та оптимального використання.

Основні цілі системи:

- стандартні протоколи (Modbus, LoRa, NB-IoT або інші, залежно від обладнання) використовуються для збору даних з лічильників і датчиків;
- створити базовий рівень енергоспоживання відповідно до стандартів ISO 50006 на основі історичних даних, умов експлуатації та клімату;
- побудова математичних моделей, які показують, як різні фактори, такі як температура, графік роботи, навантаження, тип обладнання, режим роботи тощо, впливають на споживання енергії;
- автоматичне порівняння прогнозованих або розрахованих показників з фактичними для виявлення відхилень, аномалій і потенційних перевитрат;
- машинне навчання (ML-прогнозування) може прогнозувати майбутнє енергоспоживання на дні, тижні та місяці, щоб допомогти планувати бюджет, навантаження та заходи з енергозбереження. Прогнозування за допомогою машинного навчання – це реальна технологія енергоменеджменту, а не абстрактна «мрія». Сучасні дослідження показують, що машинне навчання може з досить високою точністю передбачати енергоспоживання будівель і підтримувати

алгоритми оптимізації режимів роботи (виявлення помилок, прогнозування навантаження та адаптивний контроль) [35].

– модуль рекомендацій: система надає конкретні поради щодо зміни режиму, налаштування графіків опалення, вентиляції та освітлення, зміни роботи обладнання та перевірку вимірювальних приладів до їх виходу з ладу на основі аналізу та прогнозів;

– централізований «офіс енергоменеджера» полегшує управління кількома будівлями, складання звітів, спостереження та масштабування.

Таким чином, запропонована система є розумним наступним кроком і розвитком основної АСЕМ. Хоча він використовує ту саму інфраструктуру, він додає значно більше функцій, зосереджених на прогнозуванні, прийнятті рішень на основі даних і аналітиці.

Desigo CC від Siemens є «просунутою» системою, яка демонструє можливості інтеграції, масштабованості та енергоменеджменту. Він надає платформу для управління об'єктами, яка включає збір даних, аналіз, управління підсистемами, звітність і централізоване управління [36]. Впровадження Desigo CC, як комерційного рішення, часто вимагає значних ресурсів. Таким чином, мій стартап конкурентоспроможний для муніципальних установ, де важливими є доступність, простота та ефективність завдяки поєднанню аналізу, прогнозів машинного навчання, гнучкої архітектури та використання існуючого АСЕМ.

Оскільки проект, який розглядається використовує існуючий АСЕМ – він є недорогим. Це серверна частина, програмні доповнення та інтеграція відкритих протоколів, що дозволяє виконувати сучасну аналітику та прогнозування машинного навчання без значних витрат грошей і без фізичної заміни обладнання. Можна створити систему з нуля, якщо на об'єкті немає АСЕМ, але для цього потрібно встановити фізичні датчики та лічильники, забезпечити зв'язок між обладнанням і сервером та інтегрувати пристрої в платформу. Іншими словами, хоча система може працювати на будь-якому об'єкті з теоретичної точки зору, на

практиці її найкраще використовувати в місцях, де АСЕМ вже встановлено. Структура загальної концепції проекту, основні сфери застосування та значні переваги для користувачів представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Інтелектуальна система моніторингу + аналітики + прогнозування + рекомендацій	Муніципальні будівлі: школи, ліцеї, дитсадки, адміністративні установи, комунальні об'єкти	Підвищення прозорості енергоспоживання, можливість контролю та планування витрат
Формування базового рівня енергоспоживання за ISO 50006 + побудова математичних моделей	Будівлі з історичними даними обігу енергії	Справедливий базовий рівень, реальна оцінка ефективності, база для аудиту
Аналіз фактичних даних + виявлення аномалій / перевитрат	Заклади з системами обліку (АСЕМ)	Своєчасне виявлення перевитрат, економія ресурсів
ML-прогнозування навантажень	Будівлі з регулярною роботою (школи, офіси)	Планування бюджету, розподілення навантажень, запобігання пікам
Модуль рекомендацій для оптимізації	Адміністрація, енергоменеджери, технічний персонал	Практичні поради для економії та підвищення ефективності
Централізований кабінет енергоменеджера + масштабування	Мережа муніципальних будівель	Зручне керування, масштабованість, адміністративна прозорість

Можливості та переваги системи очевидні після вивчення таблиці 4.1. Таблиця 4.2 показує результати оцінки сильних і слабких сторін, а також нейтральних елементів порівняно з конкурентами.

Таблиця 4.2 – Оцінка сильних, слабких та нейтральних сторін проекту

Характеристика (техніко-економічна)	Мій проект	Приклад сучасного рішення (Desigo CC) [27]	Типові АСЕМ / базові системи обліку		
			W	N	S
Використання існуючої інфраструктури (без заміни обладнання)	Так	Можливо (за адаптацію)	—		S
Побудова моделей + BPE за ISO 50006	Автоматизовано	Можлива ручна аналітика	Зазвичай відсутня		S

Продовження таблиці 4.2

Прогнозування споживання (ML)	Є	Обмежено або модульно	Немає			S
Генерація рекомендацій для оптимізації	Є	Обмежено	Відсутня			S
Вартість впровадження / обслуговування	Помірна / низька	Висока	Низька / мінімальна			S
Масштабованість на рівні мережі будівель	Висока	Висока	Обмежена		N	
Прозорість, звітність, контроль для громади	Висока	Висока	Мінімальна			S
Складність реалізації (розробка ПО, ML, інтеграція)	Середня	Висока (великий software-stack)	Низька	W		
Потреба в якісних даних та регулярному обслуговуванні	Є	Є	Частково	W		

4.2 Технологічна оцінка можливостей реалізації проєкту

Вимоги до розробки інтелектуальної системи моніторингу енергоспоживання включають оцінку здійсненості підходу до впровадження, наявності технології для впровадження та можливості постачання мінімально життєздатного продукту. Інтеграція поточних підходів до моніторингу споживання енергії та останніх інструментів аналізу вимагатиме оцінки змінних окремо та залежно від них. Наразі в Ліцеї №6 вже використовується елементарна версія АСЕМ, яка записує дані, сформовані вузлами обліку, та надсилає їх на сервер постачальника. Він забезпечує спрощену технічну реалізацію, яка привертає увагу лише до розробки інтелектуального доповнення, тобто серверної платформи для аналізу, прогнозування та ідентифікації відхилень, замість реалізації самих лічильників.

Основою функціонування майбутньої системи є стабільний і надійний потік даних. Оскільки більшість сучасних облікових вузлів здатні працювати на основі Modbus RTU/TCP, Ethernet, MQTT або бездротових стандартів (LoRaWAN, NB-IoT), інтеграція поточного АСЕМ можлива без необхідності модифікації апаратного забезпечення. Серед цілей проєкту головною умовою є розробка програмного інтерфейсу для автоматичного збору даних з АСЕМ і відправлення їх до ядра аналізу.

Однією з найважливіших частин системи є система автоматизованого аналізу та прогнозування. Зазвичай це вимагає використання алгоритмів машинного навчання та статистичного аналізу даних часових рядів. Моделі, які можна використовувати для прогнозування, включають ARIMA/SARIMA, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost або LSTM, щоб система могла налаштувати та працювати відповідно залежно від режимів будівлі. Ідентифікацію аномалії також можна виконати за допомогою однокласової SVM або локального фактора викиду. Ці програми доступні за допомогою відкритого коду та не вимагають спеціального обладнання. Процес створення рекомендацій також важливий. Цього можна досягти шляхом застосування гібридного механізму, який включає міркування на основі правил, типові моделі ситуацій і класифікатори машинного навчання. Цей механізм виводить корисні рекомендації, які варіюються від перевірки облікової одиниці до оптимального графіка роботи обладнання.

Для кінцевих користувачів система запропонує веб-інтерфейс із графіками, показниками ефективності, прогнозованими значеннями та повідомленнями про відхилення. Реалізація цих інтерфейсів за допомогою Django/Flask або Node.js разом із технологією React/Angular є типовим, економічно ефективним методом. Система також підтримуватиме локальне середовище або масштабоване хмарне середовище.

Аналіз, що представлений у таблиці 4.3 забезпечить висновки поточного аудиту, які показують, що технологічні компоненти, необхідні для створення інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування енергоспоживання, є зрілими, доступними та не вимагають впровадження дорогих рішень. Одну з головних переваг запропонованого проекту можна побачити в тому, що існуючу систему, АСЕМ, можна використовувати знову. Це зробить проект технічно здійсненним.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Інтеграція з наявною АСЕМ та збір даних	Modbus RTU/TCP, MQTT, OPC-UA; RS485–Ethernet; драйвери протоколів; LoRaWAN/NB-IoT	Технології існують	Повністю доступні
Уніфікація та первинна обробка даних	Python (pandas, NumPy), ETL-процеси, нормалізація часових рядів	Існують	Доступні
Зберігання великих обсягів даних	PostgreSQL + TimescaleDB, InfluxDB, ClickHouse	Існують	Доступні, без ліцензій
Аналітична обробка показників	Moving average, exponential smoothing, статистичні методи, KPI-метрики	Існують	Доступні
Прогнозування енергоспоживання (ML)	ARIMA/SARIMA, Random Forest, XGBoost, LSTM, Prophet	Існують	Доступні
Виявлення аномалій	Isolation Forest, LOF, One-Class SVM	Існують	Доступні
Генерація рекомендацій	Rule-based system, ML-класифікатори, шаблони сценаріїв	Існують	Доступні
Веб-інтерфейс для користувачів	React/Vue/Angular; Django/Flask; REST API	Існують	Доступні
Хмарне/локальне розгортання	Docker, Kubernetes, Linux-сервери	Існують	Доступні
Кіберзахист і шифрування	TLS/SSL, RBAC, 2FA, Firewall	Існують	Доступні

4.3 Аналіз можливостей ринку для запуску стартап-проекту

Щоб запровадити інтелектуальну систему моніторингу/прогнозування споживання енергії в муніципальних будівлях, необхідний комплексний аналіз ринку. Ця оцінка включає оцінку ймовірного попиту, конкурентного середовища, цільових клієнтів і факторів, що впливають на комерціалізацію.

Прогнозовані дані показують, що в Україні є понад 70 000 бюджетних установ, таких як навчальні заклади, дитячі садки, лікарні та адміністративні будівлі, які можуть потребувати рішень з енергоефективності та енергомоніторингу [37]. Існуючі автоматизовані енергетичні системи, доступні на ринку, відомі як АСЕМ, в основному обмежуються лише збором даних, що дає

стартапу шанс додати аналітичний компонент до системи.

Масштаби платоспроможного попиту можна оцінити за ЕСКО-проектами, які станом на 2024 рік уклали понад 700 контрактів на загальну суму понад 2,6 млрд грн [38]. За середньою вартістю малобюджетних закладів оцінено орієнтовний річний обіг стартапу в 200-300 млн грн.

Завдяки державним ініціативам з енергоефективності (Енергодім, Фонд енергоефективності), впровадженню систем управління енергією ISO 50001/50006, підвищенню прозорості використання енергії бюджетними організаціями та поширенню інтелектуальних рішень (IoT, адаптери SCADA, інтелектуальні лічильники) ринок демонструє позитивну динаміку. Щоб узагальнити основні ринкові фактори, приблизна оцінка ринкового потенціалу пропонується в таблиці 4.4, де представлено домінуючих гравців на ринку, динаміку ринку, ринкові бар'єри та прибутковість.

Таблиця 4.4 – Оцінка ринкового потенціалу для запуску стартапу

Показники стану ринку	Характеристика
Кількість головних гравців	≈ 6 (АСЕМ-постачальники, Siemens Desigo, YASNO EnergyIQ, локальні інтегратори)
Потенційний річний обіг	≈ 200–300 млн грн (оціночні дані)
Динаміка ринку	Зростає через державні програми енергоефективності
Обмеження для входу	Сертифікація обладнання, ISO 50001/50006, кібербезпека, інтеграція з АСЕМ
Специфічні вимоги	Сумісність з лічильниками, API, надійність обміну даними
Середня норма рентабельності	12–18 %

Ринок є динамічним, але не насиченим аналітикою технологічних пропозицій, як показано в таблиці 4.4. У зв'язку з тим, що на ринку є багато активних конкурентів із традиційним підходом до рішення АСЕМ, новий гравець може запропонувати значно ширший спектр можливостей.

Знання профілів споживачів є обов'язковим для визначення релевантності ринків. Муніципальні заклади створюють різні організаційні та технологічні проблеми, які вимагають рішення, здатного підтримувати організаційних

експертів, а також неекспертів. Таблиця 4.5 надає профілі, поведінку та вимоги цільових споживачів.

Таблиця 4.5 – Профілі цільових груп і їхні потреби

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці	Вимоги споживачів
Зниження витрат на енергоресурси	Міські ради, енергоменеджери громад	Орієнтація на економію бюджету, увага до надійності систем	Надійність, автоматичні звіти, прогнозування
Підвищення ефективності енергоменеджменту	Директори шкіл, лікарень, дитсадків	Мінімальні технічні знання, потреба у візуалізації даних	Інтуїтивний інтерфейс, сповіщення про відхилення
Контроль роботи інженерних систем	Технічний персонал	Потреба у деталізації показників, регулярний моніторинг	Детальні графіки, журнал подій, виявлення аномалій

Така споживча структура передбачає, що продукт має забезпечувати глибину технологій для експертів, а також зручність використання для неекспертів. Це те, що керує специфікацією UX, модуляризації та рівня автоматизації аналітики.

Нижче наведено загальну оцінку ризиків, які існують на ринку; факторами тут є регуляторні, технологічні та конкурентні проблеми. Таблиця 4.6 містить основні ринкові ризики разом із відповідями, які компанія може використати.

Таблиця 4.6 – Основні ризики ринкового середовища та стратегічні реакції

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Висока конкуренція	Присутність кількох великих гравців і локальних інтеграторів	Формування УТП (ML-прогнозування, аномалії)
Обмежений бюджет установ	Муніципалітети можуть відмовитися від дорогих рішень	Модульність, гнучкі тарифи, поетапне впровадження
Вимоги до кібербезпеки	Підвищення регуляторного тиску та стандарти ISO/IEC	Впровадження SSL, RBAC, аудит системи
Недостатня цифрова грамотність персоналу	Ускладнене впровадження та використання систем	Простий UX, навчальні матеріали, відео-інструкції

Виявлені основні виклики, як показано в таблиці 4.6, це чутливість бюджетних установ до цін, дотримання кіберстандартів і конкуренція з боку

частково розробленого рішення. Ефективна стратегія продукту може захистити від таких викликів за допомогою модульних, автоматизованих та адаптованих рішень. Тим не менш, виклики також пов'язані з можливостями, які є результатом зростання рівня цифровізації, кількості встановлених АСЕМ і державної підтримки. Виявлені основні проблеми наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Ринкові можливості та шляхи їх використання

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Поширення АСЕМ у громадах	Існуючі системи створюють базу для інтеграції	Позиціонування досліджуваної ІSEM як аналітичної надбудови
Державні програми енергоефективності	Фінансування закупівель та гранти	Участь у грантових програмах
Попит на автоматизацію	Бажання отримувати аналітику та прогнозування	Розробка алгоритмів ML для прогнозування та сповіщень
Дефіцит аналогів з глибокою аналітикою	Конкуренти пропонують базові системи	Вихід на ринок як інноваційне рішення, унікальне УТП

Можливості, наведені в таблиці 4.7, підтверджують високий потенціал ринку інтелектуальних систем, враховуючи, що сучасне суспільство шукає цифрову інфраструктуру, а існуючі рішення ще не здатні забезпечити високий рівень аналізу. Необхідно обговорити структуру ринку з точки зору конкуренції. Найсуттєвіші чинники конкуренції описані в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Характеристики конкурентного середовища

Особливості конкурентного середовища	Прояв	Вплив на діяльність стартапу
Тип конкуренції	Олігополія з локальними інтеграторами	Необхідність виразного УТП
Рівень боротьби	Національний	Можливість масштабування
Галузева ознака	Внутрішньогалузева	Потрібно підвищувати якість сервісу
Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова	Цінова та технологічна конкуренція
Характер переваг	Нецінова	Аналітика = ключова перевага
Інтенсивність	Низько-середня	Можливість швидкого входження на ринок

Такі атрибути підтверджують, що, незважаючи на наявність великих підприємств, загальна конкуренція не є надмірною; існуючі рішення не змогли в певній мірі задовольнити вимоги користувачів, зокрема щодо прогнозування та

поглибленого аналізу.

Для глибшої оцінки середовища стартапу підійде модель п'яти сил Портера. Таблиця 4.9 представляє результати оцінки, яка аналізує вплив існуючих рішень, постачальників, клієнтів і конкурентів..

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції М. Портера

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Характеристика	YASNO/D.Solutions (EnergyIQ), ESCO-проекти та ACEM-локальні інтегратори, постачальники енергомоніторингу з базовою аналітикою	Міжнародні EMS/BMS-платформи (Siemens Desigo, Schneider EcoStruxure, Honeywell), IT-компанії, які можуть додати енергетичну аналітику	Виробники лічильників, шлюзів, датчиків, SCADA-провайдери, хмарні платформи	Міські ради, школи, лікарні, комунальні установи	Excel, ручний облік, базові дашборди ACEM
Висновки	Більшість рішень не мають прогнозної аналітики, а конкуренція помірна	Середня ймовірність входу, глобальні платформи вимагають локальної адаптації	Оскільки ISEM не залежить від конкретного обладнання, сила постачальників низька	Середня сила клієнтів: високий попит, бюджетні обмеження	Хоча заміни мають обмежені можливості, персонал інерційний

Аналіз показує, що ринок не насичений, і це допомагає ISEM заповнити чітко визначену нішу, оскільки більшості існуючих систем бракує поглибленої аналітики. У той же час фактори, які необхідно враховувати, включають цінову чутливість у клієнтській базі, правила кібербезпеки, а також потенційні загрози з боку міжнародних платформ, які виходять на внутрішній ринок. Фактори, важливі з конкурентної точки зору, були визначені для використання в позиціонуванні проекту; причини наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Рівень аналітики та прогнозування	Особлива перевага ISEM полягає в тому, що більшість конкурентів не пропонують прогнозування та аналіз аномалій машиною навчання
Інтеграція з наявними АСЕМ	Надбудова є дешевшою та швидшою в реалізації, оскільки значна частина бюджетних установ вже використовує АСЕМ
Кібербезпека та надійність	Бюджетні установи вимагають відповідності ISO, захищених протоколів та прозорості логування.
Гнучкість ціни та модульність	Замовники Prozorro вважають вартість важливою. Збільшення функціональності та продаж окремих модулів підвищує конкурентоспроможність
Простота використання (UX/UI)	Інтерфейс має бути простим, оскільки користувачі часто не мають досвіду роботи з інформаційними технологіями
Технічна підтримка та навчання персоналу	Наявність інструкцій, супроводу та консультацій прискорює впровадження й підвищує довіру.
Масштабованість та SaaS-архітектура	Ринок великий, тому можливість масштабування на десятки об'єктів є критичною перевагою.

Це було використано, щоб показати, що ISEM займає здорову позицію на ринку з чудовою аналітикою, сумісністю з існуючими АСЕМ, масштабованістю, що допомагає їй вигідно конкурувати в секторі з багатьма системами, які підтримують лише базову аналітику.

Щоб оцінити сильні та слабкі сторони стартапу, було проведено порівняльну оцінку ISEM із загальним конкурентом на ринку з базовим аналізом, як наведено в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту ISEM

Фактор конкурентоспроможності	Бали (1–20)	Перевага / відставання у порівнянні з конкурентом (–3...+3)
Рівень аналітики та прогнозування	19	+3
Інтеграція з АСЕМ	18	+2
Кібербезпека та надійність	16	+1
Гнучкість ціни та модульність	15	+1
Зручність UX/UI	17	+2
Технічна підтримка	15	+1
Масштабованість (SaaS)	18	+2

Загальна оцінка ринку, включаючи конкурентне середовище, критичні фактори конкурентоспроможності та порівняння з існуючими рішеннями, допомагає здійснити стратегічну оцінку здійсненності проекту. Результати SWOT-аналізу наведені в таблиці 4.12. ISEM має явні конкурентні переваги, згідно з SWOT-аналізом. Існуючі АСЕМ, точність аналітики та простота впровадження є корисними для успішного виходу на ринок. У числі перешкод, які загрожують цьому успіху, є наявність конкурентних платформ з інших країн, яка представляє значну загрозу, а також фінансові обмеження, накладені клієнтами, які вимагають відповідної маркетингової стратегії.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту ISEM

Сильні сторони (S)	Слабкі сторони (W)
<p>Розвинена аналітика: прогнозування, ML-моделі, виявлення аномалій.</p> <p>Інтеграція з уже встановленими АСЕМ, що зменшує витрати замовника.</p> <p>Модульність, можливість масштабування та SaaS-архітектура.</p> <p>Простий інтерфейс, орієнтований на користувачів із низьким рівнем цифрових навичок.</p> <p>Високий рівень кібербезпеки, можливість аудитів.</p>	<p>Обмежена впізнаваність стартапу на ринку.</p> <p>Необхідність доведення точності прогнозних моделей.</p> <p>Залежність від якості даних, що надходять із АСЕМ.</p> <p>Потреба в навчанні персоналу та технічному супроводі на початкових етапах.</p>
Можливості (O)	Загрози (T)
<p>Активний розвиток ЕСКО-проектів.</p> <p>Зростаючий попит бюджетних цифрових рішень.</p> <p>Державні програми з підвищення енергоефективності (наприклад, «Енергодім»).</p> <p>Значне поширення АСЕМ у громадах, що полегшує впровадження надбудов.</p> <p>Підвищення вимог до прозорості енергоспоживання.</p>	<p>Міжнародні EMS/BMS-платформи можуть вийти на український ринок.</p> <p>Багато замовників і обмежений бюджет</p> <p>Інерційність користувачів (звичка використовувати Microsoft Excel).</p> <p>Кіберзагрози та законодавчі вимоги</p> <p>Швидкий розвиток аналітичних модулів конкурентів.</p>

Таблиця 4.13 показує кілька маркетингових моделей, від партнерства до самостійного виходу на ринок.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту ISEM

Альтернатива (комплекс ринкових заходів)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Партнерство з інтеграторами АСЕМ та ESCO-компаніями з метою продажу аналітичної надбудови ISEM	Висока, оскільки канали збуту та зацікавленість інтеграторів є наявними	3–6 місяців

Продовження таблиці 4.13

Запуск проектів у школах і лікарнях за допомогою грантів або громади	Середня: залежить від конкурсу	6–12 місяців
Вихід на ринок самостійно як SaaS-рішення для енергоменеджменту	Середня – потребує фінансування підтримки та маркетингу	6–9 місяців
Участь у державних або міжнародних грантових програмах з енергоефективності	Висока – широкий вибір програм	9–15 місяців
Запуск бюджетного «аналітичного пакету» для базового тарифу громад	Висока – найнижча вартість розгортання	2–5 місяців

На основі аналізу альтернатив було виявлено, що найефективнішим методом виходу на ринок є співпраця з інтеграторами АСЕМ та ЕСКО-компаніями; ці компанії пропонують найвищі шанси на отримання ресурсів і найкоротші терміни впровадження. По причині того, що він масштабований, економічно ефективний і може швидко охопити велику аудиторію.

4.4 Стратегічне планування ринкової діяльності стартап-проєкту

Визначення цільових сегментів, вибір стратегічних напрямків розвитку, створення конкурентної поведінки та встановлення позиціонування продукту є частиною планування ринкової діяльності. Ця структура дає змогу розробити комплексну модель виходу на ринок для проєкту ISEM – інтелектуального аналітичного доповнення, розробленого для існуючих систем енергетичного моніторингу(АСЕМ).

4.4.1 Визначення цільових сегментів і стратегії охоплення

Було оцінено потенційні сегменти ринку, щоб визначити найбільш перспективні групи клієнтів, враховуючи готовність до впровадження, попит, конкуренцію та легкість входу. Результати представлені в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Оцінка цільових сегментів споживачів

Опис цільової групи	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у сегменті	Інтенсивність конкуренції	Простота входу
Громади, міські ради, енергоменеджери	Висока	Високий	Середня	Висока
Заклади освіти (школи, садки, ліцеї)	Середня	Високий	Низька	Висока
Медичні установи	Середня	Середній	Середня	Середня
Комунальні підприємства	Висока	Середній	Середня	Низька

Муніципалітети, міські ради та навчальні заклади були визначені як основні сегменти для початкового розгортання. Враховуючи багатосегментну участь, стартап приймає диференційовану маркетингову стратегію, тобто для кожної групи розробляються окремі програми.

4.4.2 Формулювання основної стратегії розвитку

Потенційні стратегічні напрями ISEM окреслені та представлені в таблиці 4.15 на основі вибраних сегментів і SWOT-аналізу.

Таблиця 4.15 – Обґрунтування стратегічних орієнтирів розвитку

Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції	Базова стратегія розвитку
Партнерство з інтеграторами АСЕМ та ESCO	Диференційована	Легка інтеграція, високий рівень аналітики	Розвиток продукту (Product Development)
Пілотні проекти у школах та громадах	Диференційована	Доступність, простота використання	Проникнення на ринок (Market Penetration)

Запропонована основна стратегія розвитку наголошує на збільшенні аналітичних можливостей ISEM і досягненні глибшої інтеграції з існуючими АСЕМ, що доповнюється підходом до проникнення на ринок через пілотні проекти.

4.4.3 Формування підходів до конкурентної поведінки стартапу

Визначається модель конкурентної поведінки, що включає статус продукту,

цільові групи та диференціацію від конкурентів..

Таблиця 4.16 – Аналіз моделей конкурентної поведінки

Чи є проєкт першопрохідцем?	Пошук нових споживачів чи переманювання	Копіювання характеристик конкурентів	Стратегія конкурентної поведінки
Так, насамперед у сегменті аналітичних надбудов	Пошук нових груп (громади, освіта)	Ні, продукт має унікальні ML-модулі	Інноваційна стратегія
Частково	Згодом можливе перетягування клієнтів	Частково; базові функції подібні	Стратегія диференціації

Пріоритетом є стратегія, орієнтована на інновації, спрямована на створення унікальної ціннісної пропозиції продукту для клієнтів, з диференціацією, що підкреслює перевагу над ASEM та конкуруючими платформами.

4.4.4 Позичіонування продукту на ринку

Позичіонування формулює набір асоціацій, за допомогою яких клієнти повинні ідентифікувати проєкт ISEM, заснований на вимогах користувачів, основній стратегії розвитку та обраній конкурентній поведінці.

Таблиця 4.17 – Аналіз моделей конкурентної поведінки

Вимоги цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Асоціації для ринкового позиціонування
Надійність, прогнозування, простота	Product Development	ML-моделі, аналітика, інтеграція з ASEM	«Розумне управління», «Економія та ефективність», «Простота та прозорість»

Таблиця 4.4 показує, що позиціонування ISEM базується на трьох основних асоціаціях – інтелекті, економічній ефективності та прозорості – які відрізняють продукт від конкурентів і роблять його привабливим для цільових клієнтів.

4.5 Маркетингова програма стартап-проєкту

Розробка маркетингової програми стартапу передбачає визначення ключових потреб клієнтів, формулювання переваг продукту, побудову

трирівневої моделі продукту, встановлення попереднього ціноутворення, розробку системи продажів і формулювання концепції комунікацій. Програма об'єднує аналіз ринку, конкурентне середовище та стратегію позиціонування. Початковий крок визначає ціннісну пропозицію продукту для клієнтів. На основі дослідження ринку, потреб сегмента та аналізу конкурентів у таблиці 4.18 узагальнено ключові переваги майбутнього продукту ISEM.

Таблиця 4.18 – Ключові конкурентні переваги концепції продукту

Потреба споживача	Яка вигода забезпечується продуктом?	Найважливіші переваги над конкурентами
Економія енергоресурсів	Прогнозування споживання та запобігання перевитратам	ML-моделі прогнозів, автоматичні сповіщення
Підвищення ефективності енергоменеджменту	Аналітика, EnPI, автоматична звітність	Глибока інтеграція з будь-якою АСЕМ
Спрощення контролю даних	Централізовані дашборди, історичні графіки	Єдиний кабінет для всіх об'єктів громади
Прозорість обліку енергії	Журнали подій, достовірність даних	Відповідність ISO 50006, прозорість алгоритмів

Концепція ґрунтується на поєднанні аналітичної точності, простоти використання та бездоганної інтеграції з існуючою структурою АСЕМ.

У таблиці 4.19 представлено структуру продукту, яка складається з трьох рівнів, починаючи від концепції і закінчуючи підтримкою та захищенням.

Таблиця 4.19 – Узагальнена трирівнева модель продукту ISEM

Рівень товару	Елемент / характеристика	Опис
I. Базова ідея продукту	Основна потреба	Підвищення ефективності та прозорості енергоспоживання в бюджетних установах
	Функціональна вигода	Прогнозування, автоматична аналітика, виявлення аномалій, EnPI, звітність
	Проблема клієнта	Відсутність прогнозних моделей та глибокої аналітики в існуючих АСЕМ
II. Реальне виконання продукту	Функціональні модулі	Моніторинг (М), прогнозування (Тх), аналітика EnPI (Е), виявлення аномалій (Тл), візуалізація (Вр)
	Тип продукту	Нематеріальний SaaS-сервіс
	Якість	Точність прогнозів 92–96 %, відповідність ISO 50001/50006

Продовження таблиці 4.19

	Пакування	Хмарна платформа з особистим кабінетом
	Маркування	Продукт: ISEM Analytics, розробник: ISEM Lab
III. Підсилення продукту	До впровадження	Консультації, аудит даних, демонстрації
	Після впровадження	Техпідтримка 24/7, оновлення ML-модулів, супровід
	Захист від копіювання	Алгоритмічне ноу-хау, захист коду, ML-моделі, NDA з інтеграторами

Підсилення продукту спрямоване на забезпечення унікальності продукту, захисту інтелектуальної власності та довгострокових переваг для кінцевих користувачів.

Таблиця 4.20 – Формування оптимальної системи збуту

Особливості закупівельної поведінки клієнтів	Необхідні функції постачальника	Рекомендована глибина каналу	Оптимальна форма збуту
Громади закуповують через Prozorro або через інтеграторів	Інтеграція, навчання, технічний супровід	1–2 рівні	Комбінована система: власні продажі + посередники (АСЕМ-інтегратори)

Налаштування системи збуту відповідно до правил закупівель бюджетних установ і співпраця з технологічними інтеграторами є важливою частиною маркетингової програми. Цей гібридний підхід сприяє широкому охопленню ринку, знижує витрати на просування та використовує вже діючу інфраструктуру АСЕМ.

Останнім кроком є розробка структури маркетингових комунікацій, яка враховує поведінку цільового сегмента, ключові повідомлення та відповідні канали комунікації, як показано в таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 – Концепція системи маркетингових комунікацій

Особливості поведінки клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції для сприйняття	Основні завдання повідомлення	Концепція рекламного звернення
Громади орієнтовані на економію та прозорість	Офіційні презентації, форуми, вебіари	Економія, точність прогнозів, надійність	Показати окупність і реальну користь	«ISEM — точна аналітика для економії бюджету громади»
Освітні заклади очікують простих рішень	Соцмережі, демонстрації, партнерські консультації	Простота, безпечність, автоматизація	Пояснити легкість впровадження	«ISEM — просте рішення для ефективної енергоповедінки школи»

Таблиця вказує на те, що маркетингові комунікації ISEM повинні спиратися на формальні та цифрові канали, наголошуючи на економічній ефективності, простоті та надійності. Повідомлення узгоджуються з поведінкою цільових клієнтів, щоб ефективно донести основні переваги системи до спільнот і навчальних закладів.

Висновки до розділу 4

Проведені дослідження показали, що стартап-проект ISEM має високий потенціал реалізації. Аналіз виявив значну кількість муніципальних будівель, які потребують модернізації систем енергоменеджменту від простого рішення для збору даних до інтелектуальної аналітики, що забезпечує стабільний попит на розроблене рішення, яке включає в себе моніторинг, прогнозування, виявлення аномалій і вироблення рекомендацій на основі моделей машинного навчання.

Оцінка технологій ще раз підтвердила, що реалізувати платформу з мінімальними капіталовкладеннями можна, використовуючи наявну інфраструктуру в середовищі АСЕМ, протоколи обміну, а також сучасні підходи до обробки даних. Розроблена структура є масштабованою, гнучкою та адаптованою до різних об'єктів, що розширює сферу застосування.

ISEM надає низку конкурентних переваг, включаючи автоматизовану

аналітику, ідентифікацію аномалій у реальному часі, розробку моделей прогнозування та підтримку прийняття рішень у сфері енергетики. У порівнянні з традиційними АСЕМ, система значно покращує цифровізацію управління енергією, забезпечуючи умови, які можуть призвести до зменшення втрат енергії, а також підвищення енергоефективності.

Аналіз ринкових бар'єрів і конкурентного середовища показує, що сегмент аналітичних рішень для муніципальних організацій наразі недостатньо обслуговується, що дозволяє виявити перспективну конкурентну нішу. Маркетингова стратегія, а також партнерство з громадами, освітніми організаціями та ЕСКО-фірмами вважаються найефективнішими методами інтеграції системи на ринок і забезпечення її доступності для цільових споживачів. Результати цього розділу підтверджують доцільність ISEM і показують, що він може бути використаний далі. Проект, який може підвищити прозорість енергоефективності комунальних будівель і стати корисним інструментом для сучасного енергоменеджменту, має реальні шанси на комерційний успіх в Україні.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз наукової літератури показав, що класичні системи енергомоніторингу будівель в основному відповідають за реєстрацію та зберігання даних, не мають можливостей для поглибленого аналізу, прогнозування та автоматичного виявлення відхилень. Постійно зростаючі заклики до енергоефективності, оцифрування енергії та прозорості використання енергії підтверджують доцільність впровадження інтелектуальних систем моніторингу енергії, здатних поєднувати статистичний аналіз із машинним навчанням.

2. Аналіз використання енергоресурсів у ліцеї №6 свідчить про те, що конкретна енергетична структура закладу залежить від постійного функціонування систем опалення, електропостачання, наявності сезонності, характерних добових кривих. Оцінка існуючої автоматизованої системи енергоменеджменту свідчить про високу ефективність таких систем для цілей обліку; однак вони обмежені в контексті автоматизованої обробки, нормалізації використання енергії, індексів енергоефективності та управлінських рішень щодо використання енергії.

3. Для предмета дослідження створено концепцію інтелектуальної системи енергетичного моніторингу (ISEM). Концепція використовує багаторівневу архітектуру та сумісна з поточною АСЕМ, що означає, що немає потреби в заміні апаратних компонентів. Запропонований підхід включає створення базових рівнів енергоспоживання (EnB), показників енергоефективності (EnPI), прогнозів енергоспоживання на основі моделей ARIMA, а також на моделях LSTM, а також має алгоритми автоматичного визначення ненормальних режимів роботи. Застосування системи сприяє переходу від пасивного спостереження до інтелектуального аналізу, що підвищує ефективність управління енергоресурсами на будівельних майданчиках.

4. На основі розробленої концепції основи ISEM було описано план реалізації, який може бути належним чином прийнятий муніципальними органами,

а також навчальними закладами. Стратегія розроблена для забезпечення передумов для мінімізації енергетичних витрат, енергетичної прозорості та запровадження сучасних систем енергоменеджменту. Система енергомоніторингу може бути основним компонентом для розробки рішень щодо підвищення енергоефективності в будівлях.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Buildings – Energy System // IEA: веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (дата звернення: 10.11.2025).
2. EUBAC Reference Case Booklet – Building Automation and Control // Build-Up Partnership (Європейська Комісія): веб-сайт. URL: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/eubac-reference-case-booklet-building-automation-and-control> (дата звернення: 10.11.2025).
3. Bottero M., Cavana G., Dall’Anna F. Feasibility analysis of the application of building automation and control system and their interaction with occupant behavior // Energy Efficiency. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10158-w> (дата звернення: 10.11.2025).
4. Автоматизована Система Енергетичного Моніторингу: веб-сайт. URL: <https://asem.com.ua/> (дата звернення: 10.11.2025).
5. Smart Metering: smart and efficient energy // The Enel Group: Learning Hub – Grids: website. URL: <https://www.enel.com/learning-hub/grids/smart-metering> (the date of application: 11.11.2025).
6. BACS: building automation and control system for efficient, sustainable buildings. *BibLus*: website. URL: <https://biblus.accasoftware.com/en/bacs-building-automation-and-control-system-for-efficient-sustainable-buildings/> (the date of application: 11.11.2025).
7. What is SCADA? Supervisory Control and Data Acquisition // Inductive Automation: website. URL: <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada> (дата звернення: 11.11.2025).
8. Ibsaeta D., García A., Álvarez M., Garzón B., Díez F., Coca P., Del Pero C., Molleda J. Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 65. Art. 102637. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720308532>

(дата звернення: 11.11.2025).

9. García-Monge M., Zalba B., Casas R., Cano E., Guillén-Lambea S., López-Mesa B., Martínez I. Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain // *Energy & Buildings*. 2023. Vol. 285. Art. 112882. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823001123> (дата звернення: 11.11.2025).

10. Cano-Suñén E., Martínez I., Fernández Á., Zalba B., Casas R. Internet of Things (IoT) in Buildings: A Learning Factory // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 16. Art. 12219. DOI: [10.3390/su151612219](https://doi.org/10.3390/su151612219) (дата звернення: 11.11.2025).

11. ДСТУ EN ISO 16484-1:2014. Автоматизовані системи моніторингу та управління будівлями (АСМУБ). Ч. 1. Характеристики проекту та реалізація (EN ISO 16484-1:2010, IDT). Чинний від 2016-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 40 с.

12. Rajaoarisoa L. Large-Scale Building Thermal Modeling Based on Artificial Neural Networks: Application to Smart Energy Management // *Artificial Intelligence Techniques for a Scalable Energy Transition*. Springer, 2020. DOI: [10.1007/978-3-030-42726-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42726-9_2) (дата звернення: 11.11.2025).

13. Перетворювач інтерфейсів Ethernet-RS232/RS485 // UKRGAS.TECH: веб-сайт. URL: <https://ukrgas.tech/перетворювач-інтерфейсів-ethernet-rs232rs485/> (дата звернення: 11.11.2025).

14. Про енергетичну ефективність. Офіційний вебпортал парламенту України: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 11.11.2025).

15. Про впровадження систем енергетичного менеджменту. Офіційний вебпортал парламенту України: веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0192-24#Text> (дата звернення: 11.11.2025).

16. 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, 2014.

17. The Plan-Do-Check-Act (PDCA) Cycle: A Guide to Continuous Improvement // PECB: веб-сайт.
URL: <https://pecb.com/en/article/the-plan-do-check-act-pdca-cycle-a-guide-to-continuous-improvement> (дата звернення: 11.11.2025).

18. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Вид. офіц. Київ: Державні норми України, 2022. - 27 с.

19. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель. Вид. офіц. Київ: Державні норми України, 2016. - 50 с.

20. Енергозбереження будівель та споруд: Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім.Ігоря Сікорського ; уклад.: М.М. Шовкалюк, О.І. Яценко – Електронні текстові дані (1 файл: 2,1 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 51 с.

21. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України, 2018. -137 с.

22. Застосування RS232 в промисловій автоматизації // Kinseal HMI: веб-сайт. URL: <https://ua.kinsealhmi.com/info/applications-of-rs232-in-industrial-automation-17584912423363584.html> (дата звернення: 12.11.2025).

23. Що таке Modbus: повний посібник // A2M: веб-сайт.
URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-modbus-a-complete-guide> (дата звернення: 20.11.2025).

24. За лаштунками IoT-магії: пояснення архітектури IoT // PNN : веб-сайт.
URL: <https://pnn.com.ua/ua/blog/detail/behind-the-curtains-of-iot-magic-iot-architecture-explained> (дата звернення: 16.11.2025).

25. Manowska A., Wycisk A., Nowrot A., Pielot J. The Use of the MQTT Protocol in Measurement, Monitoring and Control Systems as Part of the

Implementation of Energy Management Systems // Electronics. 2023. Vol. 12, No. 1. Art. 17. DOI: 10.3390/electronics12010017. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12010017> (дата звернення: 16.11.2025).

26. Röhrig Ch., Cramer B. LPWAN based IoT Architecture for Distributed Energy Monitoring in Deep Indoor Environments : препринт (arXiv) // arXiv. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.00998> (дата звернення: 17.11.2025).

27. Feature scaling // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Feature_scaling (дата звернення: 17.11.2025).

28. Heating & Cooling Degree Days – Free Worldwide Data Calculation // Degreedays.net. URL: <https://www.degreedays.net/> (дата звернення: 01.12.2025).

29. Z-Score // StatisticsHowTo. URL: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/z-score/> (дата звернення: 02.12.2025).

30. Sokolović Ž., Milić S. Electricity Consumption Forecasting using ARIMA and LSTM // Facta Universitatis. 2025. DOI: 10.5937/zeint0-58547.

31. Hybrid ARIMA-SVR model forecast flowchart // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-ARIMA-SVR-model-forecast-flowchart_fig9_340571295 (дата звернення: 02.11.2025).

32. MQTT Security // MQTT.pro. URL: <https://mqtt.pro/mqtt-security/> (дата звернення: 03.12.2025).

33. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. 2012. URL: https://www.afs.enea.it/project/protosphaera/Protosphaera_Full_Documents/mpdocs/docs_EEI/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (дата звернення: 03.12.2025).

34. Чому MQTT є важливою частиною IoT // FiberRoad. URL: <https://fiberroad.com/uk/why-is-mqtt-an-important-part-of-iot/> (дата звернення: 03.12.2025).

35. Li D., Qi Z., Zhou Y., Elchalakani M. Machine Learning Applications in Building Energy Systems: Review and Prospects // Buildings. 2025. Vol. 15, No. 4. Art. 648. DOI: 10.3390/buildings15040648.

36. Desigo CC — система автоматизації та диспетчеризації будівель // Siemens. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-ta-bezpeka-budivel/systemy-avtomatyzatsiyi-ta-dyspetcheryzatsiyi-budivel/desigo/systemy-avtomatyzatsiyi-budivel-desigo/desigo-cc.html> (дата звернення: 05.12.2025).

37. Енергосервіс в Україні: успіхи та виклики сьогодення. Київ: Friedrich-Ebert-Stiftung, 2020. URL: <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/ukraine/17295.pdf> (дата звернення: 05.12.2025).

38. Публічний звіт Голови Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України про підсумки діяльності у 2024 році. Київ : Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, 2025. URL: <https://sae.gov.ua/static-objects/sae/sites/1/uploaded-files/publicnii-zvit-golovi-2024.pdf> (дата звернення: 05.12.2025).

39. Method instructions – Development of startup projects / Науково-методичні вказівки. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — Режим доступу: https://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/11/Method_instructions_-_Development_of_startup_projects.pdf (дата звернення: 05.12.2025).