

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

ЛУНДЯК ІЛЛЯ ВІКТОРОВИЧ

УДК 620.9:697:681.5

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Оптимізація гібридної системи енергозабезпечення громади в гірській місцевості з використанням даних IoT- моніторингу для підвищення енергетичної безпеки

Енергетичний менеджмент

(назва освітньої програми)

141 Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Лундяк І.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Максим`юк Сергій Орестович доктор філософії

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

к.т.н. доцент Цих В.С.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти – магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка»

Освітньо-професійна програма - «Енергетичний Менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Зав. Кефедри інформаційно-вимірювальних
технологій та енергетичного менеджменту**

Цих В.С.

« ____ » _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Лундяку Іллі Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Оптимізація гібридної системи енергозабезпечення громади в гірській місцевості з використанням даних IoT-моніторингу для підвищення енергетичної безпеки»

керівник роботи Максим`юк Сергій Орестович доктор філософії,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “14” листопада 2025 р. № 719/7

2. Строк подання студентом роботи - « 22» грудня 2025р

3. Вихідні дані до роботи: Дані інструментального енергетичного аудиту та аналіз споживання Ясінянської тг

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; Розділ 1 Теоретико-методологічні засади забезпечення енергетичної безпеки гірських територіальних громад; Розділ 2 Діагностика поточного стану енергоспоживання та моделювання типового об'єкту (ЗДО с. Кваси); Розділ 3 Розробка гібридної системи енергозабезпечення з інтелектуальним керуванням для об'єкта в гірській місцевості; Розділ 4 Техніко-економічне обґрунтування та комплексна оцінка ефективності впровадження гібридної системи; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	доцент Яворський А.В.		
Перевірка на плагіат	доцент Миндюк В.Д.		

7. Дата видачі завдання: 14 листопада 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.11.25р.	
2	Розділ 1. Теоретико-методологічні засади забезпечення енергетичної безпеки гірських територіальних громад.	17.11.25р.	
3	Розділ 2. Діагностика поточного стану енергоспоживання та моделювання типового об'єкту (ЗДО с. Кваси).	28.11.25р.	
4	Розділ 3. Розробка гібридної системи енергозабезпечення з інтелектуальним керуванням для об'єкта в гірській місцевості.	08.12.25р.	
5	Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування та комплексна оцінка ефективності впровадження гібридної системи. Висновки.	15.12.25р.	

Студент

(підпис)

Лундяк І.В

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Максим`юк С.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить 114 сторінок, 27 рисунків, 6 таблиць, 19 джерел, 2 додатків.

Розробка та дослідження гібридної системи енергозабезпечення з інтелектуальним керуванням для об'єкта в гірській місцевості.

Об'єктом магістерської роботи є процеси ефективного теплопостачання об'єктів соціальної інфраструктури в гірській місцевості на основі гібридних технологій генерації та акумуляції енергії.

В ході виконання магістерської роботи проаналізовано проблематику енергозабезпечення гірських громад в умовах слабких електромереж та відсутності газу. Доведено неефективність існуючих моноресурсних систем опалення. Розроблено структуру гібридної системи, що поєднує твердопаливний котел, геліотермальну та фотоелектричну установки з центральним теплоакумулятором.

Створено та обгрунтовано архітектуру системи керування на базі IoT-контролера. Розроблено адаптивні алгоритми, що забезпечують пріоритетне використання відновлюваної енергії та активують електромережу лише як аварійний резерв. Розрахунки показали, що впровадження системи знижує пікове навантаження на електромережу в 156 разів та скорочує витрати на паливо на 50%.

ГІБРИДНА ЕНЕРГОСИСТЕМА, ІОТ-КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ТЕПЛОАКУМУЛЯЦІЯ, ТВЕРДЕ ПАЛИВО.

ABSTRACT

Master's work contains 114 pages, 27 figures, 6 tables, 19 sources, 2 annexes.

Development and research of a hybrid energy supply system with intelligent control for a facility in a mountainous area.

The object of the master's thesis is the processes of efficient heat supply for social infrastructure facilities in mountainous areas based on hybrid energy generation and storage technologies.

During the master's work, the problems of energy supply in mountain communities with weak power grids and lack of gas were analyzed. The inefficiency of existing mono-resource heating systems was proven. A hybrid system structure combining a solid fuel boiler, solar thermal and photovoltaic plants with a central thermal energy storage was developed.

The architecture of a control system based on an IoT controller was created and substantiated. Adaptive algorithms were developed to ensure priority use of renewable energy and activate the power grid only as an emergency reserve.. Calculations showed that the system implementation reduces the peak load on the power grid by 156 times and cuts fuel costs by 50%.

HYBRID ENERGY SYSTEM, IOT CONTROL, ENERGY EFFICIENCY, RENEWABLE ENERGY SOURCES, THERMAL ENERGY STORAGE, SOLID FUEL.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГІРСЬКИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД	13
1.1. Концептуалізація поняття енергетичної безпеки в умовах децентралізації та специфіки гірського регіону.....	13
1.2. Класифікація та аналіз сучасних підходів до систем енергозабезпечення громад в гірській місцевості.....	16
1.3. Аналіз особливостей та ключової проблематики енергозабезпечення Ясінянської територіальної громади.....	18
1.4. Інформаційно-вимірювальні системи на базі IoT як інструмент енергоменеджменту громад.....	20
1.5. Вибір і обґрунтування напрямків досліджень.....	21
РОЗДІЛ 2. ДІАГНОСТИКА ПОТОЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО ОБ'ЄКТУ ДЛЯ ГРОМАДИ В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ	23
2.1. Комплексний аналіз споживання електричної енергії та оцінка надійності розподільчих мереж.....	24
2.2. Інфраструктурні обмеження газопостачання громади.....	26
2.3. Аналіз сфери тепlopостачання та аспекти ефективності використання біомаси.....	27
2.4. Інвентаризація та комплексний енергетичний аудит муніципального фонду будівель.....	29
2.5. Узагальнення характеристик та виділення типового об'єкта громадської забудови в гірській місцевості.....	33

2.5.1. Теплотехнічний аналіз огорожувальних конструкцій та розрахунок трансмісійних втрат.....	35
2.6. Стратегічне моделювання енергетичної територіальної громади на основі SWOT-аналізу.....	39
Висновки до розділу 2.....	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ ОБ'ЄКТА В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ.....	44
3.1. Аналітичний огляд проблематики та концептуалізація гібридної системи.....	45
3.1.1. Порівняльний аналіз архітектур та обґрунтування вибору конфігурації системи.....	45
3.1.2. Обґрунтування та розрахунок структури гібридної системи енергозабезпечення для пілотного об'єкта.....	46
3.1.3. Математичне моделювання теплового балансу та обґрунтування ємності системи акумуляції.....	49
3.2. Проектування архітектури інформаційно-вимірювальної системи.....	53
3.2.1. Аналіз вимог до обчислювального ядра в умовах стохастичного енергопостачання.....	54
3.2.2. Архітектурні переваги та технологія мікроконтролера PIC24FJ128GA705.....	57
3.2.3. Апаратна безпека як фундамент надійності системи.....	57
3.2.4. Комунікаційна підсистема на базі WINC1510.....	58
3.3. Синтез алгоритмічного забезпечення та стратегії керування енергопотокami.....	60

3.3.1. Трансформація стратегії керування в умовах відсутності пільгових тарифів.....	61
3.3.2. Алгоритмізація процесів та логіка прийняття рішень.....	64
3.3.3. Алгоритм керування енергетичними потоками.....	65
3.3.4. Порівняльний аналіз критичних сценаріїв навантаження на розподільчу електромережу.....	67
3.3.5. Схема інтеграції IoT-модуля та параметри оцінки.....	70
3.4. Програмна реалізація та візуалізація даних моніторингу.....	74
3.4.1. Обґрунтування вибору архітектури передачі даних (MQTT vs HTTP)....	74
3.4.2. Хмарна інтеграція, кіберзахист каналу та роль апаратної криптографії ...	77
3.4.3. Серверна агрегація даних, алгоритми аналітичної обробки та візуалізація.....	79
3.5. Комплексне дослідження, верифікація та оцінка надійності гібридної кіберфізичної системи.....	82
3.5.1. Розробка методології та математичної моделі натурно-імітаційного моделювання (NIL).....	82
3.5.2. Розрахунок ефективності енергозбереження в умовах «Острівного режиму».....	85
3.6. Розрахунок часового резервування.....	86
3.7. Нормативно-правова відповідність та стандартизація рішень у сфері енергоменеджменту.....	87
Висновки до розділу 3.....	89
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ.....	90
4.1. Методологічні основи економічної оцінки енергоефективних проєктів у муніципальному секторі.....	90

4.2. Деталізована оцінка натуральної та грошової економії енергоресурсів.....	92
4.2.1. Розрахунок споживання палива у Базовому сценарії (Класична система).....	93
4.2.2. Розрахунок споживання палива у Проектному сценарії (Гібридна система).....	94
4.3. Структура та обсяг необхідних капітальних інвестицій (CAPEX).....	96
4.4. Формування чистого операційного грошового потоку та оцінка ефекту від ІоТ.....	100
4.5. Оцінка інтегральних показників економічної ефективності.....	103
Висновки до розділу 4.....	106
ВИСНОВКИ	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
ДОДАТКИ	110

ВСТУП

Актуальність роботи

Сьогодні енергоресурси стають все дорожчими, а їхні запаси вичерпуються. Це змушує шукати способи їх економії та розумного використання. Україна зараз гостро відчуває цю проблему через високі ціни на енергоносії та виклики для енергетичної безпеки. Тому стратегічно важливо підвищувати енергоефективність, особливо в бюджетній сфері, впроваджуючи нові технології та підходи до управління енергією.

На даний момент системи опалення шкіл та садків у гірських районах є застарілими і не можуть забезпечити надійне та економне теплопостачання відповідно до сучасних потреб.

Під час експлуатації цих систем фахівці стикаються з низкою серйозних перешкод, а саме:

- Використання лише одного виду палива (дров) у старих котлах є неефективним, оскільки значна частина тепла втрачається, а в повітря викидається багато шкідливих речовин;

- Відсутня можливість швидко реагувати на різкі зміни погоди в горах при ручному керуванні, через що приміщення часто перегріваються, і паливо витрачається даремно;

- Складно поєднати роботу різних джерел енергії (наприклад, дров'яного котла, сонячних колекторів та електромережі) в одну надійну систему без сучасної автоматики.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у вирішенні практичної задачі в галузі муніципальної енергетики – покращення систем теплопостачання соціальних об'єктів у горах шляхом створення гібридних систем, що використовують відновлювану енергію та розумне керування через (IoT) модуль.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючий стан та проблеми з енергозабезпеченням громад у гірських районах;
- визначити найкращий склад обладнання для гібридної системи (котел на біомасі, сонячні колектори, теплоаккумулятор);
- розробити модель роботи системи та схему її інтелектуального керування за допомогою датчиків та контролерів (IoT);
- обґрунтувати алгоритми автоматичного керування, щоб система сама адаптувалася до погоди та економила ресурси;
- провести техніко-економічний аналіз, щоб довести вигідність використання такої системи на прикладі реального об'єкта.

Об'єктом дослідження є процеси виробництва, накопичення та використання тепла в закладах соціальної сфери, що розташовані в складних умовах гірської місцевості.

Предметом досліджень є гібридні системи теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії та способи керування ними з використанням сучасних інтернет-технологій (IoT).

Методи дослідження

У роботі використано сучасні методики енергетичного аудиту, методи аналізу даних за допомогою Excel та бенчмаркінгу, теплотехнічні розрахунки для підбору обладнання, методи автоматичного керування для створення алгоритмів роботи системи, а також методи економічного аналізу для оцінки вигідності проєкту.

Наукова новизна одержаних результатів магістерської роботи визначається такими положеннями:

- Удосконалено алгоритм функціонування та підхід до формування конфігурації гібридної системи теплопостачання бюджетного об'єкта гірської громади шляхом поєднання керованого джерела на біомасі, сонячних підсистем та централізованої теплоаккумуляції з використанням

IoT-контролера як елемента інтелектуального керування системою, що, на відміну від моноресурсних/електроорієнтованих рішень, забезпечує суттєве зменшення пікового електричного навантаження та паливних витрат.

- Отримав подальший розвиток підхід до оперативного управління енергоспоживанням системи теплопостачання на основі цифрових даних (погодні параметри, температурні режими, стан теплоаккумуляції) шляхом формування правил пріоритезації джерел тепла та керування зарядом/розрядом теплоаккумулятора, що підвищує енергоефективність і стійкість роботи системи в умовах швидкозмінної погоди гірських регіонів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці реального інженерного рішення для модернізації опалення закладу дошкільної освіти в с. Кваси. Це рішення дозволяє енергоменеджеру здійснювати контроль стану і температури котельні в стані реального часу та провести суттєву економію за рахунок правильного використання ресурсів. Запропонований підхід можна застосувати і в інших подібних закладах гірських громад.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГІРСЬКИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

1.1. Концептуалізація поняття енергетичної безпеки в умовах децентралізації та специфіки гірського регіону

Сьогодні, на фоні постійних загроз та змін на ринку енергоносіїв, розуміння того, що таке енергетична безпека, суттєво змінилося. Раніше це поняття стосувалося переважно рівня держави — чи вистачить країні вугілля та газу на зиму. Тепер же воно стало конкретним питанням виживання для кожної окремої громади. Стара система, коли все керувалося виключно з центру, більше не гарантує стабільності. Якщо в національній енергосистемі виникають проблеми, надійність електропостачання в маленькому гірському селі залежить вже не стільки від Києва, скільки від стану місцевих мереж та готовності громади до аварійних ситуацій.

Вразливість локальної інфраструктури стала очевидною. Якщо взимку через негоду або обстріли вийде з ладу єдина лінія електропередач або зламається котел у сільській школі, це стає катастрофою місцевого масштабу. Для жителів високогір'я це означає не просто тимчасові незручності, а реальну загрозу здоров'ю та зупинку роботи соціальних закладів. Тому сьогодні енергетична безпека зміщується у площину практичних рішень: чи здатна громада самостійно забезпечити теплом лікарню та садочок, коли зникає зовнішнє електропостачання або неможливо підвезти паливо.

Ці зміни посилюються реформою децентралізації. Громади отримали право та обов'язок управляти своїми школами та лікарнями, але часто не мають для цього сучасних технічних засобів. У гірських районах ситуація ще складніша через природні умови. Важкодоступна місцевість, старі електромережі, суворі

зими та часті буревії роблять гірські села особливо вразливими. Тут енергобезпека — це не питання економії грошей, а питання безперервності життя.

Сучасний підхід до вирішення цих проблем полягає не в тому, щоб будувати нові гігантські електростанції, а в тому, щоб зробити місцеві системи гнучкими та стійкими. Система має бути такою, щоб при виході з ладу одного елемента (наприклад, відключення світла) вона продовжувала працювати за рахунок іншого. Громада повинна перетворитися зі звичайного споживача на господаря, який контролює та керує своїм енергоспоживанням.

Найбільшою помилкою в таких умовах є залежність від чогось одного. Багато гірських громад історично покладаються тільки на дрова або тільки на одну лінію електропередач. Це створює величезні ризики. Якщо дорогу замете снігом і дрова не привезуть, або якщо вітер обірве дроти — система зупиниться. Тому надійність сьогодні забезпечується поєднанням різних джерел енергії (так звані гібридні системи).

Отже, енергетична безпека гірської громади — це такий стан її господарства, коли жителі та соціальні заклади гарантовано отримують тепло і світло незалежно від погоди, аварій на великих магістралях чи стрибків цін на паливо. Досягти цього можна лише шляхом впровадження сучасних технологій, які дозволяють комбінувати різні джерела енергії та розумно ними керувати.

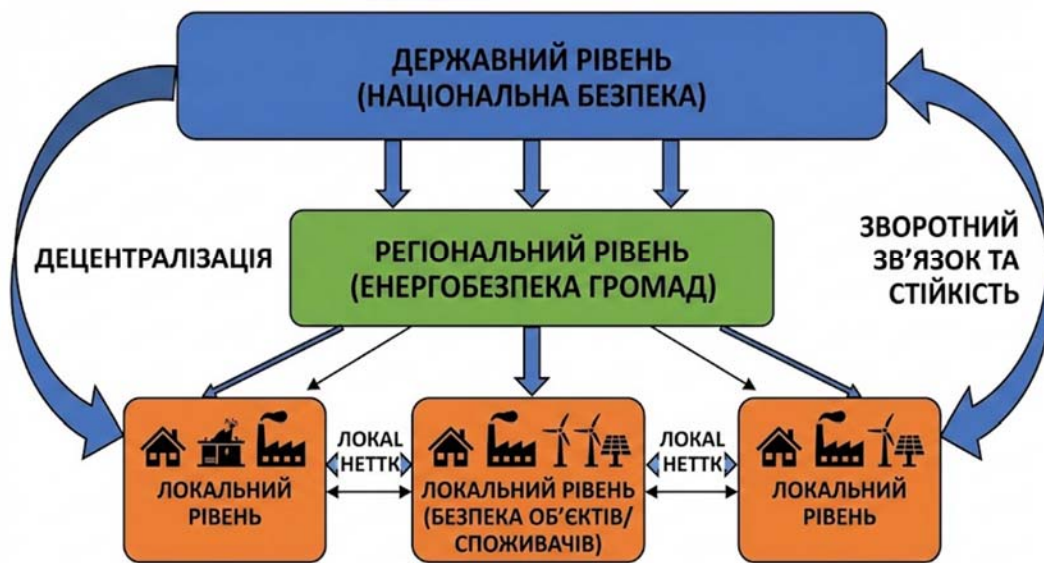


Рисунок 1.1 Ієрархічна модель енергетичної безпеки в умовах децентралізації: взаємозалежність рівнів від національного до об'єктового

Фундаментальною теоретико-методологічною основою для моделювання сучасної енергобезпеки на рівні територіальної громади є концепція «Енергетичної трилеми» [1], яка постулює необхідність знаходження складної динамічної рівноваги між трьома часто суперечливими векторами розвитку. Перший вектор — енергетична безпека — у контексті гірської громади охоплює фізичну надійність інфраструктури генерації та розподілу, здатність системи протистояти екстремальним погодним явищам та, що найважливіше, швидко відновлювати функціональність після аварійних ситуацій (резильєнтність), що вимагає диверсифікації джерел та створення можливостей для роботи в «острівному режимі» [2]. Другий вектор — енергетична рівність та доступність — визначає економічну спроможність споживачів оплачувати енергетичні послуги. В умовах, коли бюджетні установи сплачують за електроенергію за повним комерційним тарифом без доступу до пільгових нічних коефіцієнтів, цей показник стає критичним індикатором фінансової спроможності громади

утримувати соціальну інфраструктуру без шкоди для інших напрямків розвитку. Третій вимір — екологічна стійкість — передбачає мінімізацію негативного антропогенного впливу на унікальне довкілля Карпат шляхом декарбонізації та переходу до високоефективних технологій використання місцевих відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Для гірських громад України баланс цієї трилеми є історично порушеним через об'єктивні географічні та інфраструктурні чинники, що посилюється критичною залежністю від одного домінуючого джерела енергії.

1.2. Класифікація та аналіз сучасних підходів до систем енергозабезпечення громад в гірській місцевості

Забезпечення надійності та економічної ефективності енергопостачання в екстремальних умовах гірської місцевості вимагає науково обґрунтованого підходу до вибору архітектури інженерних систем, які мають бути глибоко адаптовані до локальних кліматичних, ресурсних та, особливо, тарифних обмежень. Системний аналіз існуючих технологічних укладів дозволяє виділити три основні групи систем, порівняльна оцінка яких є критичною для вибору стратегії модернізації. Першу групу складають традиційні моноджерельні системи на викопному паливі, застосування яких у гірських регіонах наштовхується на непереборні бар'єри, насамперед через повну відсутність централізованого газопостачання у високогірних населених пунктах, що виключає використання найбільш зручного та автоматизованого газового опалення. Другу групу формують моноджерельні системи на місцевій біомасі, які, попри доступність ресурсу, мають суттєві термодинамічні та експлуатаційні вади. Застарілі твердопаливні котли з ручним завантаженням характеризуються високою тепловою інерційністю та нездатністю до швидкої модуляції потужності у відповідь на зміну погодних умов, що призводить до значних перегрівів

приміщень і нерациональних втрат енергії, а також до різкого падіння ККД та зростання викидів при роботі в перехідних режимах.

Третю, найбільш перспективну групу в контексті сталого розвитку, складають гібридні системи енергозабезпечення (Hybrid Renewable Energy Systems - HRES), які представляють собою складні інженерні комплекси, що інтегрують різноманітні джерела енергії під єдиним керуванням з обов'язковою підсистемою акумуляції.

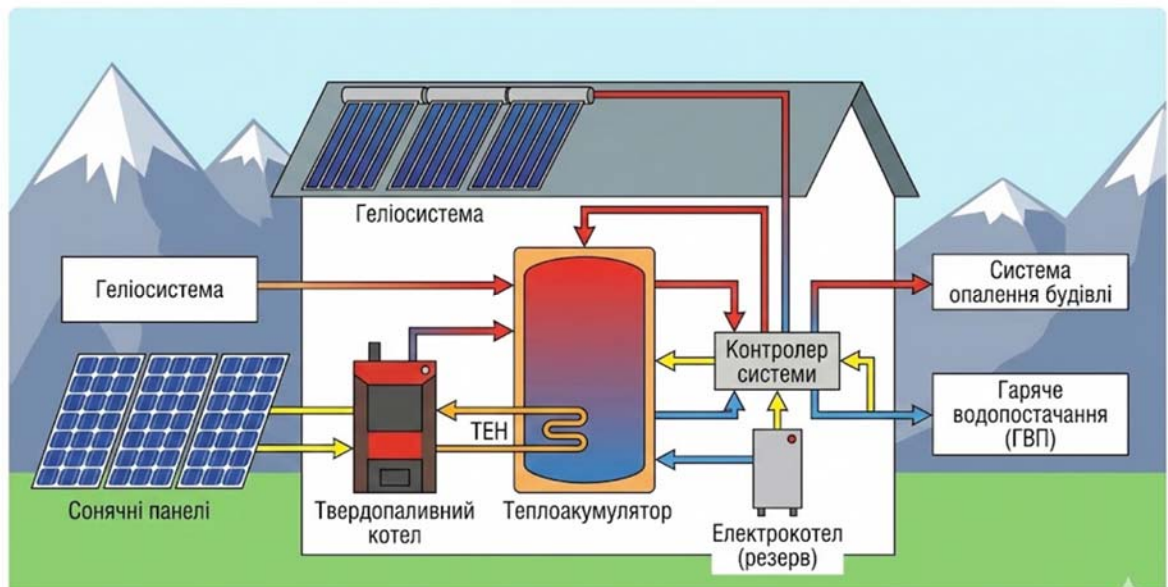


Рисунок 1.2. Концептуальна структурна схема гібридної системи енергозабезпечення для гірських умов, що включає твердопаливний котел, сонячні панелі, геліосистему, електрокотел (резерв) та теплоакумулятор.

Типова конфігурація HRES для гірської місцевості, враховуючи високу вартість електроенергії для юридичних осіб, базується на поєднанні керованого джерела на місцевому ресурсі (сучасний твердопаливний котел) зі стохастичними відновлюваними джерелами (наприклад, геліоколекторами та сонячними панелями) для заміщення частини навантаження. Критичною особливістю такої архітектури в умовах єдиного високого тарифу є роль

зовнішньої електромережі, яка використовується не як базове джерело, а виключно як джерело гарантованого аварійного резервного живлення для автоматики, насосів та захисту системи від замерзання в критичних ситуаціях. Безальтернативним елементом ефективної гібридної системи є підсистема теплової акумуляції, що виконує роль енергетичного демпфера, дозволяючи інерційному котлу працювати в оптимальному номінальному режимі, скидаючи надлишок тепла в буфер для подальшого дозованого використання системою опалення відповідно до поточних потреб будівлі.

1.3. Аналіз особливостей та ключової проблематики енергозабезпечення Ясінянської територіальної громади

Для розробки та обґрунтування параметрів ефективної системи енергозабезпечення в якості репрезентативного об'єкта дослідження обрано Ясінянську територіальну громаду (ТГ) в Рахівському районі Закарпатської області, яка стикається з повним спектром вищезгаданих проблем. На основі детального аналізу звітної документації та даних польових досліджень виділено критичні структурні фактори, що формують енергетичний профіль об'єкта. Визначальним інфраструктурним обмеженням є повна відсутність централізованої газотранспортної системи, зумовлена складним рельєфом та сейсмічними умовами. Як наслідок, енергетичний баланс громади має яскраво виражену історично сформовану деформацію в бік біомаси: тверде паливо займає абсолютно домінуючу позицію, складаючи понад 77% від загального обсягу споживання первинної енергії комунальним сектором, що створює значні логістичні ризики у зимовий період через можливе блокування доступу до віддалених об'єктів.

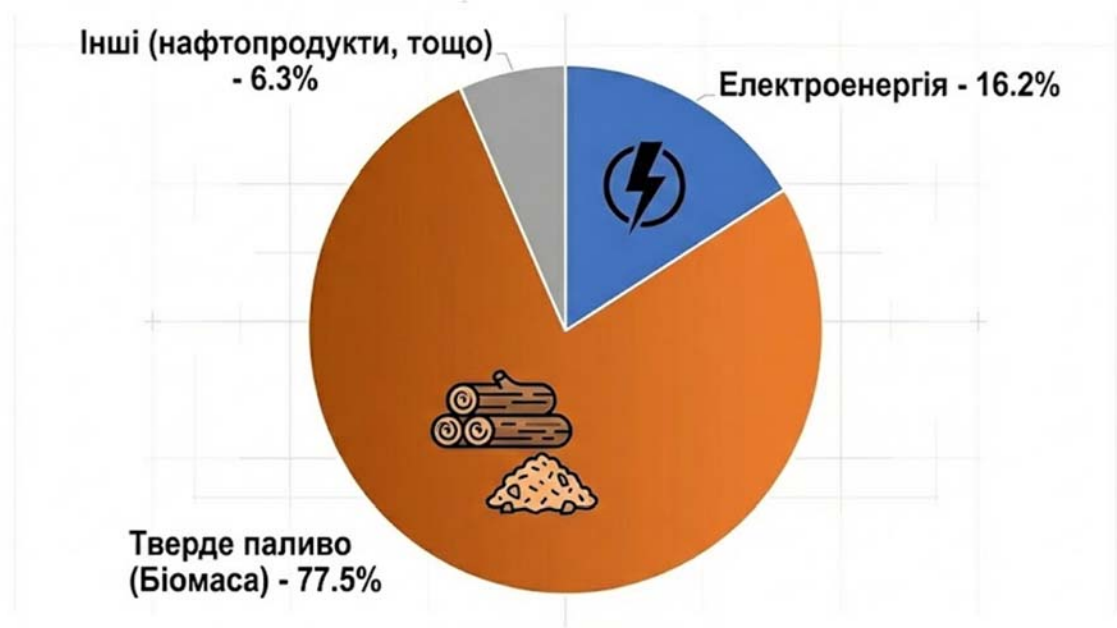


Рисунок 1.3. Діаграма структури споживання первинних енергоресурсів бюджетними установами Ясінянської ТГ, що демонструє критичну залежність від твердого палива (біомаси)

Ситуація ускладнюється станом електромереж та тарифними обмеженнями. Локальні розподільчі мережі характеризуються значною зношеністю та низькою надійністю під час негоди, при цьому бюджетні установи сплачують за електроенергію за єдиним високим комерційним тарифом без можливості використання пільгових "нічних" коефіцієнтів, що робить використання електроопалення економічно нерентабельним навіть для акумуляції тепла, залишаючи йому роль виключно дорогого аварійного резерву. Додатковим критичним фактором є вкрай низька енергоефективність муніципального фонду будівель, підтверджена проведенням бенчмаркінгом. Порівняння здійснювалося з нормативними значеннями енергопотреби, затвердженими ДБН 2.6-31 та наказ Мінрегіону від 11.07.2018 № 169 «Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель [3]

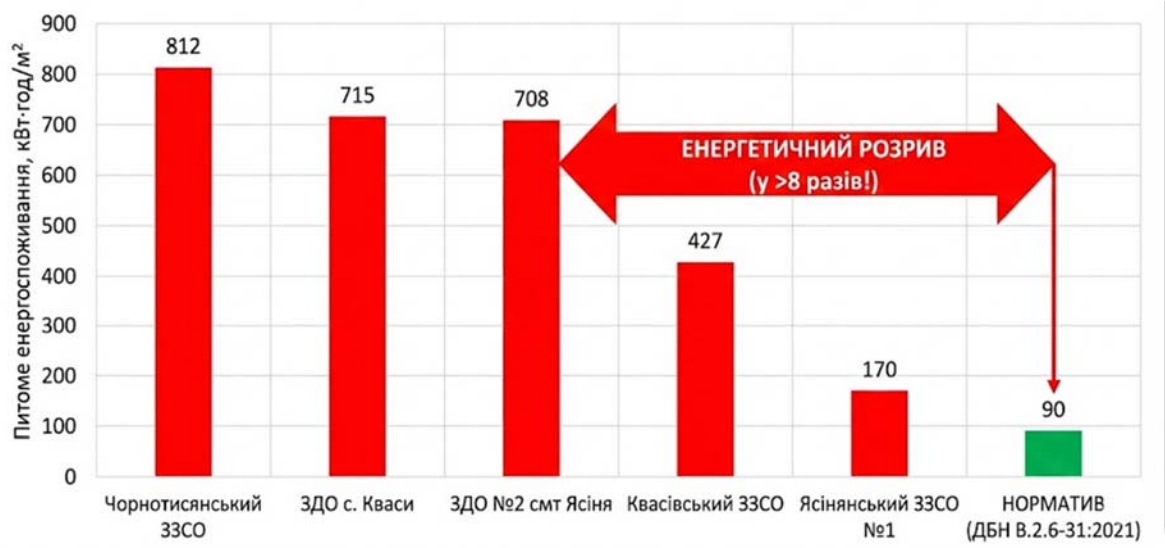


Рисунок 1.4. Порівняльний аналіз питомого енергоспоживання (кВт·год/м²) закладів освіти громади відносно нормативних показників, що ілюструє значний "енергетичний розрив"

Емпіричні дані демонструють аномально високі показники питомого споживання теплової енергії, які в окремих випадках майже вдесятеро перевищують сучасні нормативи. Такий стан речей є прямим доказом не лише незадовільних теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, але й, перш за все, повної відсутності системи автоматичного регулювання подачі тепла, що призводить до колосальних непродуктивних перевитрат коштовних енергоресурсів.

1.4. Інформаційно-вимірювальні системи на базі IoT як інструмент енергоменеджменту громад

Сучасна парадигма енергоменеджменту вимагає переходу від дискретного контролю до безперервного IoT-моніторингу, що є критичним в умовах стохастичного клімату високогір'я. Впровадження кіберфізичних систем

дозволяє об'єднати процеси генерації та споживання в єдиний цифровий контур, вирішуючи складні експлуатаційні проблеми, недосяжні для традиційної модернізації обладнання.

Першочерговою функцією IoT є забезпечення ситуаційної обізнаності в умовах ускладненої логістики. Дистанційна передача телеметрії перетворює локальні котельні на активні вузли мережі, дозволяючи миттєво виявляти аварійні стани. Це надає персоналу необхідний час для реагування до моменту критичного замерзання системи, що неможливо гарантувати виключно фізичними обходами.

Стратегічним завданням цифровізації є нівелювання теплової інерційності твердопаливних котлів через інтелектуальне погодозалежне керування. IoT-контролер, аналізуючи метеопрогнози та динаміку внутрішніх температур, прецизійно керує виконавчими механізмами, усуваючи хронічні «перетопи» будівлі. Крім того, система виступає енергетичним арбітром для гібридних установок: алгоритм автоматично надає пріоритет безкоштовній геліоенергії та біомасі, використовуючи дорогу електроенергію з мережі виключно як аварійний резерв для гарантування живучості об'єкта.

1.5 Вибір і обґрунтування напрямків досліджень

Аналіз проблеми засвідчив, що для забезпечення надійного та економічного теплопостачання закладу дошкільної освіти в гірській місцевості, в умовах слабких електромереж, найперспективнішим напрямком є впровадження гібридних систем енергозабезпечення. Такі системи мають базуватися на комплексному використанні відновлюваних джерел енергії (біомаси та сонця) з обов'язковим застосуванням теплової акумуляції, залишаючи за електроенергією виключно функцію резерву. Ефективне функціонування такої

багатокомпонентної системи потребує інтелектуального керування на базі технологій Internet of Things (IoT).

Виходячи з цього, основною метою роботи є підвищення енергоефективності та надійності системи тепlopостачання об'єкта шляхом розробки та дослідження гібридної системи під управлінням IoT-контролера.

Обраний напрямок досліджень полягає у створенні та комплексному аналізі гібридної системи тепlopостачання на базі відновлюваних джерел енергії. Основний фокус роботи зосереджено на розробці інтелектуального керування за допомогою IoT-контролера, верифікації адаптивних алгоритмів методом моделювання та техніко-економічному обґрунтуванні ефективності запропонованого рішення.

РОЗДІЛ 2

ДІАГНОСТИКА ПОТОЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО ОБ'ЄКТУ ДЛЯ ГРОМАДИ В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ

Стратегічне планування сталого розвитку адміністративно-територіальних одиниць в умовах децентралізації та глобальних кліматичних викликів вимагає переходу від дискретних, часто хаотичних заходів з термомодернізації до системного управління енергетичними потоками. Фундаментальним інструментом такого управління виступає Паливно-Енергетичний Баланс (ПЕБ), який у рамках даного магістерського дослідження інтерпретується не просто як статистичний звіт, а як комплексна матриця, що відображає кількісну та якісну відповідність між надходженням первинних енергоресурсів, їх трансформацією, розподілом та кінцевим споживанням у межах визначеної території.

Специфіка об'єкта дослідження — Ясінянської територіальної громади — накладає суттєві обмеження на застосування стандартних методологій енергетичного аудиту, розроблених для урбанізованих рівнинних територій з розвиненою інфраструктурою. Гірський ландшафт тут виступає не лише як пасивний географічний фактор, а як активний термодинамічний та логістичний детермінант, що формує архітектуру інженерних мереж, складність ланцюгів постачання палива та екстремальні режими експлуатації будівель. Висотна поясність, підвищена вітрова активність в ущелинах та триваліший опалювальний період кардинально змінюють структуру енергоспоживання порівняно із середніми показниками по країні.

У зв'язку з цим, методологія побудови ПЕБ у даній роботі базується на синтезі підходів «top-down» (аналіз макропоказників від операторів систем розподілу) та «bottom-up» (агрегація даних інструментальних вимірювань на рівні кінцевих споживачів), адаптованих до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018

«Системи енергетичного менеджменту». Математична модель енергетичного балансу громади (E_{total}) може бути представлена як сума потоків енергії від різних джерел, скоригована на коефіцієнти ефективності трансформації та транспортування:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot Q_i^r \cdot \eta_{trans_i} \cdot \eta_{use_i}) \quad (2.1)$$

де:

V_i — фізичний обсяг споживання i -го виду енергоресурсу в натуральних одиницях (м³, кВт·год, тонни, складометри);

Q_i^r — нижча теплотворна здатність i -го енергоресурсу (для переведення натуральних одиниць в універсальні енергетичні — ГДж або кВт·год);

η_{trans_i} — коефіцієнт ефективності транспортування ресурсу, що враховує втрати в мережах (наприклад, втрати в ЛЕП або теплотрасах);

η_{use_i} — коефіцієнт корисної дії (ККД) кінцевого використання ресурсу (ефективність котлів, двигунів, освітлювальних приладів).

Такий комплексний підхід дозволяє не просто констатувати обсяги споживання, а й ідентифікувати конкретні етапи технологічного ланцюга, на яких відбуваються найбільші енергетичні втрати (втрати якості енергії). Це є критично важливим для розробки цільових технічних рішень, що будуть запропоновані у наступних розділах.

2.1 Комплексний аналіз споживання електричної енергії та оцінка надійності розподільчих мереж

Електрична енергія в енергобалансі гірської громади займає унікальну позицію. Хоча її частка становить лише близько 16%, вона виконує функцію «нервової системи» інфраструктури. Від надійності електропостачання залежить

робота критичних вузлів: циркуляційних насосів котелень (без яких зупиняється теплопостачання), медичного обладнання, систем зв'язку та безпеки. Тому в гірських умовах надійність електромережі є синонімом життєдіяльності громади.

Головним викликом для Ясінянської ТГ є не дефіцит генерації, а проблеми розподілу. Топологія місцевих мереж 0,4–10 кВ має яскраво виражений радіальний (тупиковий) характер. На відміну від кільцевих схем рівнинних міст, тут відсутні резервні шляхи живлення. Пошкодження магістральної лінії через негоду (падіння дерев, налипання снігу) призводить до тривалого знеструмлення цілих районів. Час відновлення (MTTR) визначається складністю фізичного доїзду аварійних бригад у важкодоступну місцевість, що взимку може тривати кілька діб.

Аналіз структури споживання бюджетними установами (Таблиця 2.1) демонструє значну диспропорцію та виділяє основних споживачів.

Таблиця 2.1. Структура та динаміка річного споживання електричної енергії

Категорія споживачів	Кількість об'єктів	Річне споживання, тис. кВт·год	Частка, %	Середнє на об'єкт, тис. кВт·год	Характер основного навантаження
Заклади загальної середньої освіти (ЗЗСО)	14	548,76	60.0%	39,20	Освітлення, комп'ютери, циркуляційні насоси, вентиляція
Заклади дошкільної освіти (ЗДО)	6	182,92	20.0%	30,48	Харчоблоки (плити), бойлери, пральні машини
Заклади охорони здоров'я	4	91,46	10.0%	22,86	Діагностичне обладнання, холодильні

Категорія споживачів	Кількість об'єктів	Річне споживання, тис. кВт·год	Частка, %	Середнє на об'єкт, тис. кВт·год	Характер основного навантаження
					установки, життєзабезпечення
Адмінбудівлі та інше	10	91,46	10.0%	9,15	Офісна техніка, сервери, вуличне освітлення
РАЗОМ	34	914,60	100%	-	

Проблема сезонної нерівномірності та падіння напруги

Аналіз графіків навантаження виявив чітку кореляцію: взимку споживання зростає на 40–60%. Це зумовлено скороченням світлового дня та, що критично, масовим використанням локальних електричних обігрівачів у періоди сильних морозів, коли старі котельні не справляються.

Таке перевантаження довгих сільських ліній призводить до критичного падіння напруги, що описується законом Ома для ділянки кола:

$$\Delta U = \frac{P \cdot L}{\gamma \cdot S \cdot U_{\text{ном}}} \quad (2.2)$$

де: P — потужність навантаження, L — довжина лінії, γ — провідність матеріалу, S — переріз проводу.

На практиці напруга у віддалених закладах падає до 170–180 В. Це не лише порушує роботу електроніки, а й є згубним для електродвигунів (насосів): при зниженні напруги вони споживають більший струм для збереження потужності, що веде до перегріву обмоток та аварій.

2.2. Інфраструктурні обмеження газопостачання громади

Визначальною особливістю енергетичного профілю громади є повна відсутність природного газу. Це зумовлено не випадковістю, а жорсткими фізико-географічними факторами, які роблять газифікацію технічно надскладною та економічно нерентабельною.

Основні бар'єри газифікації:

1. Геоморфологія та рельєф: Складний ландшафт вимагає будівництва численних інженерних споруд — переходів через гірські річки, вантових мостів через ущелини та тунелів, що кратно збільшує вартість будівництва.

2. Геологічні ризики: Сейсмічна активність (зона Вранча) та ризик зсувів вимагають використання труб спеціального класу міцності та сейсмостійкої арматури.

3. Економічна демографія: Низька щільність населення та розкиданість домогосподарств призводять до того, що питомі витрати на підключення одного абонента перевищують межі окупності.

Ця ситуація має двоїстий вплив. З одного боку, комунальний сектор позбавлений доступу до зручного та автоматизованого джерела тепла. З іншого — історична відсутність газу унеможливила критичну залежність від імпорту палива. Це створило безальтернативні умови для розвитку локальної біоенергетики, що базується на місцевому відновлюваному ресурсі (деревині), що є стратегічною перевагою для енергетичної безпеки.

2.3. Аналіз сфери теплопостачання та аспекти ефективності використання біомаси

В умовах відсутності газопостачання система теплозабезпечення Ясінянської ТГ сформувалася як жорстка моноресурсна модель. Тверда біомаса покриває понад 77% сукупних потреб громади в первинній енергії, а річне споживання

перевищує 27 тисяч тонн. Однак кількісне домінування нівелюється низькою ефективністю використання ресурсу.

Ключовою проблемою є використання свіжозрубаної деревини через відсутність інфраструктури для сушіння. Інструментальні заміри фіксують відносну вологість палива на рівні $W \approx 40 - 50\%$. Це критично впливає на термодинаміку спалювання, оскільки нижча теплотворна здатність робочого палива (Q_p^r) лінійно знижується зі зростанням вологості (формула Д.І. Менделєєва)[3]:

$$Q_p^r = Q_{dry} \cdot \frac{100-W}{100} - 0.0244 \cdot W \quad (2.3)$$

де Q_{dry} — теплотворна здатність абсолютно сухої деревини ($\sim 18-19$ МДж/кг); $0.0244 \cdot W$ — втрати енергії на випаровування води (прихована теплота пароутворення).

Наслідком спалювання вологого палива є значні енергетичні втрати на фазовий перехід води в пару, зниження температури в ядрі горіння та хімічний недопал (утворення CO і сажі замість CO₂). Сажа діє як теплоізолятор, а кислотний конденсат прискорює корозію обладнання. Експлуатаційний моніторинг підтвердив, що реальний ККД котлів у таких умовах падає до 40–50%.

Додатковим ризиком є логістична вразливість: залежність від фізичної доставки великих обсягів палива робить систему чутливою до погодних умов високогір'я (снігопади, зсуви), що вимагає утримання значних страхових запасів. Вирішення цих структурних проблем можливе лише шляхом переходу до гібридних систем з інтелектуальним керуванням, які компенсують недоліки спалювання біомаси.

2.4 Інвентаризація та комплексний енергетичний аудит муніципального фонду будівель

Наступним логічним та необхідним етапом дослідження, після формування загального макроекономічного енергетичного балансу громади, стала детальна інвентаризація та аудит об'єктів комунальної власності. У методологічному плані цей процес вийшов далеко за межі стандартної бухгалтерської звірки активів і трансформувався у повномасштабний інженерний скринінг технічного стану огорожувальних конструкцій будівель, їхніх інженерних мереж та режимів експлуатації.

Муніципальний фонд будівель Ясінянської територіальної громади, що налічує 34 основні об'єкти, є гетерогенною (неоднорідною) системою, яку, однак, можна чітко розділити на окремі групи за критеріями функціонального призначення, архітектурно-планувальних рішень, віку забудови та режимів енергоспоживання.

1. Група ЗЗСО (Заклади загальної середньої освіти). Ця категорія є найбільш вагомою за площею та обсягами споживання. Вона характеризується специфічним переривчастим (інтермітуючим) циклом експлуатації, синхронізованим з навчальним процесом (робота в будні дні, зниження навантаження вночі, у вихідні та під час канікул). Наявність приміщень великого об'єму та висоти (спортивні зали, актові зали, рекреації) створює значні труднощі для забезпечення рівномірного прогріву інерційними радіаторними системами опалення та призводить до значної температурної стратифікації повітря по висоті.

2. Група ЗДО (Заклади дошкільної освіти). Це стратегічно важливий сегмент споживачів, який висуває найжорсткіші нормативні вимоги до параметрів мікроклімату. Згідно з санітарними нормами, температура повітря в ігрових кімнатах та спальнях повинна безперервно

підтримуватися в діапазоні $+20...+22^{\circ}\text{C}$, а поверхня підлоги має бути теплою. Необхідність цілодобового та щоденного підтримання високих температур робить ЗДО найбільш енергоємними об'єктами в розрахунку на одиницю площі та вимагає особливо надійної системи теплопостачання.

Для забезпечення коректності порівняльного аналізу енергоефективності різних будівель та нівелювання масштабного фактору (суттєвої різниці у загальних площах), у роботі було імплементовано метод енергетичного бенчмаркінгу (порівняльного аналізу з еталонами). Ключовим індикатором енергетичної ефективності обрано питома річне енергоспоживання на опалення (Energy Performance Indicator — EnPI), виражене у $\text{кВт}\cdot\text{год}$ теплової енергії, витраченої на обігрів одного квадратного метра опалювальної площі будівлі за один опалювальний сезон ($\text{кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$). Розрахунок цього показника базувався на верифікованих даних фактичного споживання твердого палива за останні три опалювальні сезони, перерахованих в енергетичні одиниці з урахуванням фактичної теплотворної здатності деревини місцевих порід. Як база для порівняння використовувалися сучасні нормативні вимоги ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» для громадських будівель при їх термомодернізації (базовий рівень $\approx 90 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$ для I кліматичної зони).

Результати бенчмаркінгу для ключових об'єктів освіти представлені в Таблиці 2.2 та візуалізовані на Рисунку 2.2.

Таблиця 2.2 Результати бенчмаркінгу енергоефективності ключових закладів освіти Ясінянської ТГ (ранжування за спаданням питомої енергоємності)

№ з/п	Найменування закладу	Рік введення в експлуатацію	Опалювальна площа, м ²	Середньорічне споживання палива (дрова), складометрів	Розрахункове питоме споживання, кВт·год/(м ² ·рік)	Відхилення від базового нормативу (90 кВт·год/м ²), %
1	Чорнотисянський ЗЗСО (корпус початкової школи)	1965	380,5	215,0	812,0	+802%
2	Заклад дошкільної освіти (ЗДО) с. Кваси	1975	420,0	210,0	715,0	+694%
3	ЗДО №2 смт Ясіня	1972	450,2	222,0	708,0	+686%
4	Квасівський ЗЗСО І-ІІІ ст. (основний корпус)	1975	1 115,0	331,0	427,1	+374%
5	Ясінянський ЗЗСО №1 (новий корпус)	1988	2 100,0	248,0	170,0	+88%
-	Сучасна енергоефективна будівля (норматив ДБН)	-	-	-	90,0	0% (база)

Аналіз емпіричних даних, представлених у Таблиці 2.2 та на Рисунку 2.2, дозволяє констатувати наявність глибокої системної кризи енергоефективності в муніципальному секторі громади. Показники питомого споживання для більшості старих будівель (особливо невеликих садків та початкових шкіл) знаходяться на рівні 700–800 кВт·год/(м²·рік). Це значення є не просто високим,

а аномальним і катастрофічним, перевищуючи сучасні українські та європейські норми енергозбереження майже в 7-8 разів (на 700-800%).

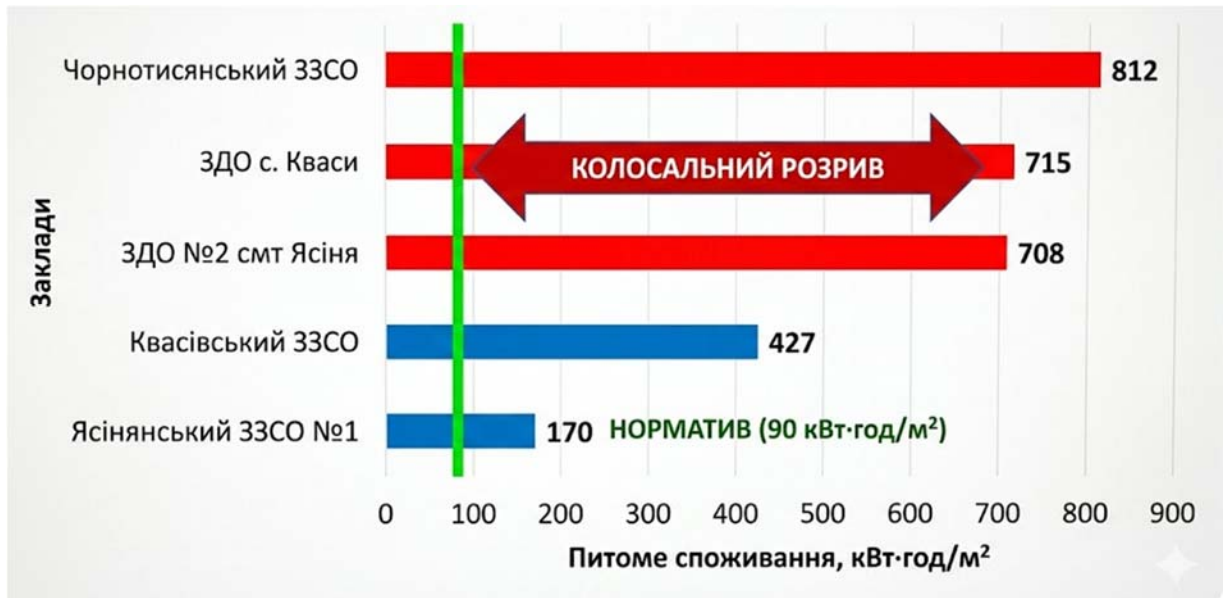


Рисунок 2.2. Гістограма рейтингу питомої енергоємності об'єктів освіти Ясінянської ТГ

Такий колосальний розрив неможливо пояснити виключно поважним віком будівель або суворістю гірського клімату. Він є наслідком синергетичної дії комплексу деструктивних факторів:

1. Критично низький термічний опір огорожувальних конструкцій: Стіни з повнотілої цегли або каменю без утеплення, старі дерев'яні вікна та холодні перекриття фактично перетворюють будівлі на «енергетичні сита», які миттєво втрачають тепло.

2. Відсутність засобів регулювання: Відсутність гідравлічного балансування системи опалення, термостатичних клапанів на радіаторах та погодозалежної автоматики в котельнях призводить до хронічних перегрівів (явище «перетопу»). Щоб забезпечити тепло в найхолодніших кутових кімнатах, кочегари змушені перегрівати всю будівлю, в результаті

чого в інших приміщеннях температура піднімається до $+26...+28^{\circ}\text{C}$, а надлишок тепла просто випускається через відкриті квартирки.

3. Низька ефективність генерації: Як було показано вище, застарілі котли, що працюють на вологому паливі в режимах тління, мають реальний ККД не вище 50%, тобто половина палива витрачається марно.

2.5 Узагальнення характеристика та виділення типового об'єкта громадської забудови в гірській місцевості

З метою розробки уніфікованого, науково обґрунтованого інженерного рішення, придатного до подальшого тиражування (масштабування) на інші проблемні об'єкти інфраструктури громади, було здійснено відбір репрезентативного типового об'єкта. Методологія вибору базувалася не на випадковому підході, а на результатах попереднього кластерного аналізу муніципального фонду будівель.

Серед проаналізованого масиву будівель, для проведення поглибленої інструментальної діагностики, теплотехнічного моделювання та розробки демонстраційного проєкту модернізації (що є предметом Розділів 3 та 4 даної роботи), було обґрунтовано обрано Заклад дошкільної освіти (ЗДО) села Кваси.

Вибір саме цього об'єкта детермінований наступними критеріями репрезентативності та технічної доцільності:

- Критерій критичної енергоємності. З розрахунковим питомим споживанням теплової енергії на рівні $715 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$, дана будівля є яскравим представником кластера найбільш енергонеефективних об'єктів громади (клас енергоефективності «G»). Вона акумулює в собі повний спектр характерних проблем: низький термічний опір огорожувальних конструкцій, фізично та морально застаріле генеруюче обладнання, відсутність засобів автоматичного регулювання. Вирішення комплексу проблем на цьому об'єкті

дозволить сформувати універсальний алгоритм (дорожню карту) для модернізації аналогічних будівель.

- Критерій жорсткості експлуатаційного режиму. На відміну від закладів загальної середньої освіти, де допустиме застосування глибокого зниження температури у нічний час та вихідні дні (режим "очікування"), дошкільний заклад вимагає стабільного підтримання комфортних температур ($t_{\text{вн}} \geq 21^{\circ}\text{C}$) та температури поверхні підлоги. Такий детермінований профіль навантаження робить об'єкт ідеальним полігоном для тестування систем прецизійного автоматичного керування, оскільки будь-які відхилення мікроклімату будуть миттєво фіксуватися.

- Критерій архітектурної типовості. Будівля має характерні для гірського регіону об'ємно-планувальні та конструктивні рішення періоду 1970-х років (цегляна кладка, шатровий дах, стрічковий фундамент). Успішна валідація проєкту на цьому об'єкті дозволить мультиплікувати розроблене інженерне рішення без суттєвих змін у проєктній документації для інших об'єктів.

Як об'єкт дослідження обрано типову будівлю закладу дошкільної освіти (ЗДО), розташовану в гірській місцевості Карпатського регіону. Будівля, зведена у 80-х роках минулого століття, характеризується незадовільним станом огорожувальних конструкцій, теплотехнічні показники яких суттєво поступають сучасним нормативним вимогам. На момент початку дослідження теплозабезпечення об'єкта здійснюється за допомогою моновалентної системи прямого електричного опалення. Такий підхід в умовах суворого клімату та високих тарифів на електроенергію для бюджетних установ призводить до критично високих експлуатаційних витрат та створює надмірне навантаження на локальну розподільчу мережу. Зведені характеристики поточного енергетичного профілю будівлі, які є базовими вихідними даними для подальшого розрахунку параметрів компонентів гібридної системи, наведено в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Базові характеристики енергоспоживання та стану будівлі ЗДО

Параметр	Значення / Опис
Тип будівлі	Заклад дошкільної освіти, 2 поверхи
Рік будівництва	1985 (типовий радянський проєкт)
Опалювальна площа	~650 м ²
Стан огорожувальних конструкцій	Стіни: цегла 510 мм, без утеплення ($R \approx 0.78(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$) Вікна: дерев'яні рами, подвійне скління ($R \approx 0.38(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$)
Існуюче джерело теплопостачання	Електричні котли/конвектори (моновалентна система)
Режим роботи системи опалення	Сезонний (жовтень – квітень), 24/7 під час опалювального сезону для підтримання санітарних норм
Характеристика теплових втрат	Високі, значно перевищують нормативні значення через відсутність термомодернізації
Вплив на зовнішні мережі	Критичне навантаження на електричну мережу в години пікового споживання тепла



Рисунок 2.3. Загальний вигляд обраного типового громадського об'єкту

2.5.1 Теплотехнічний аналіз огорожувальних конструкцій та розрахунок трансмісійних втрат

Для переведення емпіричного розуміння проблеми високої енергоємності у площину точних інженерних даних, необхідних для математичного моделювання, було проведено розрахунок фактичних теплотехнічних характеристик теплового контуру будівлі. Основна частка теплових втрат будівлі — це трансмісійні втрати (Q_{tr}), що відбуваються через зовнішні огорожувальні конструкції внаслідок різниці температур (градієнта) між внутрішнім та зовнішнім середовищем. Інтенсивність цього процесу зворотно пропорційна фактичному приведену опору теплопередачі конструкції (R_{Σ}).

Розрахунок фактичного опору теплопередачі для багат шарових конструкцій виконано згідно з вимогами ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» [4] за формулою:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_{вн}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{зов}}, \quad \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (2.4)$$

де: $\alpha_{вн}$ — коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огороження (для стін $\alpha_{вн} = 8.7 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$);

$\alpha_{зов}$ — коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні (для зимових умов I кліматичної зони $\alpha_{зов} = 23 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$);

δ_i — товщина i -го шару матеріалу (м);

λ_i — розрахунковий коефіцієнт теплопровідності матеріалу в умовах експлуатації ($\text{Вт}/(m \cdot K)$).

Аналіз теплофізичних характеристик основних елементів:

4. Зовнішні стіни: Конструктив виконано з повнотілої керамічної цегли на цементно-піщаному розчині. Товщина кладки складає 510 мм (кладка у дві цегли). Із внутрішньої та зовнішньої сторони нанесено шар вапняно-піщаної штукатурки товщиною по 20 мм.

$$\circ \lambda_{цегла} = 0.81 \text{ Вт}/(m \cdot K); \lambda_{штук} = 0.70 \text{ Вт}/(m \cdot K).$$

- Розрахунковий опір: $R_{\text{факт}} \approx 0.78 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

- Нормативна вимога: Для I температурної зони України $R_{\text{min}} = 3.30 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

- Висновок: Фактичний опір стін у 4.2 рази нижчий за мінімально допустимий норматив. Стіни є основним каналом тепловтрат, працюючи як теплообмінник із навколишнім середовищем.

5. Горищне перекриття: Виконане із залізобетонних ребристих плит товщиною 220 мм. Утеплення реалізовано історичним шаром шлакової засипки (відходи спалювання вугілля) товщиною 100-150 мм, що з часом зазнала ущільнення та деградації теплоізоляційних властивостей.

- Розрахунковий опір: $R_{\text{факт}} \approx 0.65 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

- Нормативна вимога: $R_{\text{min}} = 4.95 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

- Висновок: Дефіцит теплоізоляції складає 7.6 рази. Враховуючи конвективний характер теплопереносу всередині приміщення (тепле повітря піднімається вгору), це є критичним недоліком.

6. Світлопрозорі конструкції (Вікна): На об'єкті проведено фрагментарну заміну заповнення віконних прорізів на металопластикові блоки з двокамерними склопакетами.

- Розрахунковий опір: $R_{\text{факт}} \approx 0.75 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

- Висновок: Відповідає мінімальним вимогам ДБН.

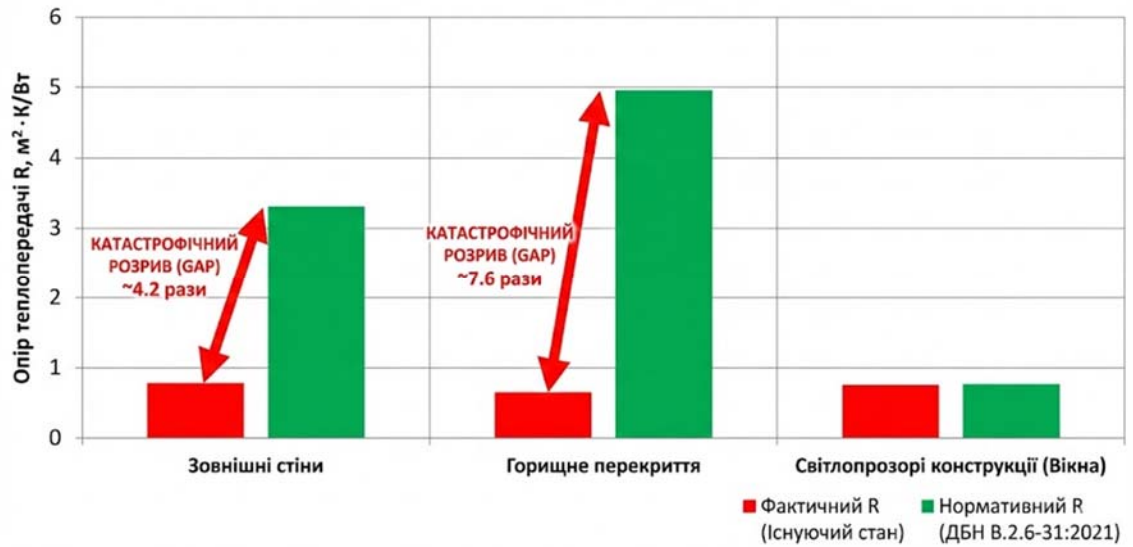


Рисунок 2.4 Стовпчикова діаграма порівняння фактичного та нормативного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. Візуалізація демонструє катастрофічний розрив між існуючим станом (червоні стовпці) та вимогами сучасних норм (зелені стовпці), особливо для горищного покриття та стін.

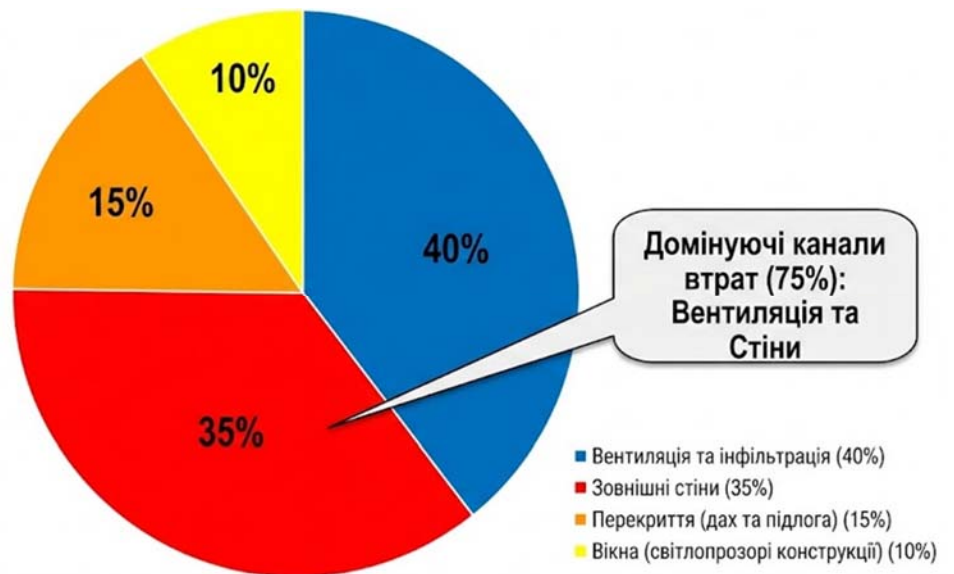


Рисунок 2.5 Структурна діаграма розподілу теплових втрат будівлі ЗДО с. Кваси при піковому навантаженні. Діаграма ілюструє, що попри заміну вікон (внесок ~10%), лівова частка втрат припадає на вентиляцію/інфільтрацію (~40%) та зовнішні стіни (~35%).

2.6. Стратегічне моделювання енергетичної територіальної громади на основі SWOT-аналізу

Перехід від діагностики проблем, виявлених під час енергоаудиту пілотного об'єкта, до розробки довгострокової стратегії модернізації вимагає комплексного підходу. В умовах обмежених ресурсів та зовнішньої нестабільності інженерні рішення повинні бути інтегровані в ширший соціально-економічний та кліматичний контекст регіону.

У дослідженні застосовано SWOT-аналіз не як статичну матрицю, а як динамічний інструмент моделювання. Його завдання — виявити протиріччя між внутрішнім станом енергосистеми (ендогенні фактори) та впливом зовнішнього середовища (екзогенні фактори). Ключовий акцент зроблено на специфіці жорсткого тарифного регулювання електроенергетики для бюджету та унікальному положенні високогірної громади.

Систематизовані фактори, що визначають стратегічний ландшафт, наведено у Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Матриця стратегічного аналізу (SWOT) енергетичного потенціалу громади

Фактори впливу	Позитивні (Сприяють цілям енергоефективності)	Негативні (Створюють ризики)
Внутрішні (Ендогенні)	<p>Сильні сторони (Strengths):</p> <p>1. Автохтонна ресурсна база: Значні запаси місцевої деревної біомаси, що гарантує базову автономність.</p>	<p>Слабкі сторони (Weaknesses):</p> <p>1. Критична моноресурсна залежність: Домінування твердого палива (77%) при відсутності газу створює логістичні вразливості.</p>

Фактори впливу	Позитивні (Сприяють цілям енергоефективності)	Негативні (Створюють ризики)
	<p>2. Високий геліопотенціал високогір'я: Підвищена ефективність геліосистем взимку через прозорість атмосфери та ефект альbedo.</p> <p>3. Компактність інфраструктури: Передумови для локальних мікромереж.</p>	<p>2. Технологічна відсталість: Застарілі технології прямого спалювання з ручним керуванням та висока інерція систем.</p> <p>3. Катастрофічний стан будівель: Наднизький клас енергоефективності огорожувальних конструкцій.</p>
Зовнішні (Екзогенні)	<p>Можливості (Opportunities):</p> <p>1. Технологічний трансфер: Доступність рішень Індустрії 4.0 (IoT, акумуляція, силова електроніка).</p> <p>2. Фінансові інструменти: Грантові програми донорів, сфокусовані на "зеленій" енергетиці.</p> <p>3. Розвиток розподіленої генерації: Законодавче сприяння локальним потужностям.</p>	<p>Загрози (Threats):</p> <p>1. Жорстка тарифна політика: Високий комерційний тариф на електроенергію та відсутність нічного тарифу для бюджету.</p> <p>2. Кліматичні ризики: Висока суворість клімату та екстремальні погодні явища у горах.</p> <p>3. Системні блекауті: Пряма загроза фізичного руйнування (розморожування) водяних систем опалення.</p>

Аналіз демонструє, що потужний внутрішній потенціал громади використовується неефективно. Фундаментальним активом є наявність місцевої деревної біомаси та унікальний геліопотенціал високогір'я. Домінування місцевого ресурсу ілюструє діаграма на Рис. 2.9.

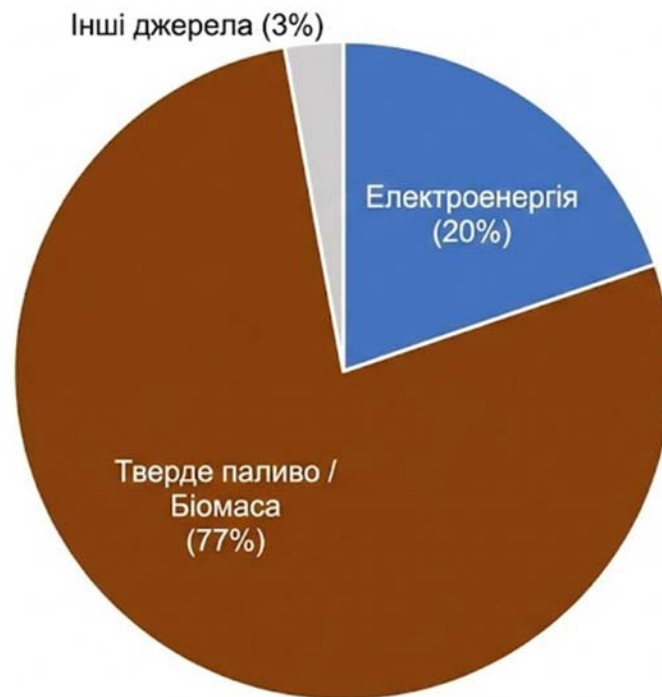


Рисунок 2.6. Діаграма структури первинного енергоспоживання бюджетними установами громади

На діаграмі показано домінуючу частку твердого палива/біомаси (~77%) у загальному енергобалансі. Це візуалізує тезу про моноресурсну залежність, яка є одночасно і сильною (автономність), і слабкою (логістичні ризики) стороною.

Однак цей потенціал нівелюється критичними слабкостями: технологічною відсталістю систем з ручним керуванням та катастрофічним станом будівель. Найбільшою зовнішньою загрозою є відсутність «нічного» тарифу на електроенергію для бюджетних установ, що робить економічно неможливими класичні схеми електроопалення.

Стратегічний синтез полягає у пошуку оптимальних комбінацій факторів.

Найбільш продуктивним є вектор, спрямований на використання зовнішніх можливостей для компенсації внутрішніх слабкостей (W-O) — «Стратегія технологічної компенсації». Вона полягає у інтеграції рішень Індустрії 4.0

(теплова акумуляція, IoT-керування) в існуючу інфраструктуру. Головна ідея — розв'язати проблему інерційності котлів шляхом розділення процесів генерації та споживання тепла у часі, перетворивши доступний, але "складний" місцевий ресурс на якісну та керовану послугу.

Візуалізація логіки вибору стратегії наведена на стратегічній карті (Рис. 2.10).



Рисунок 2.7. Стратегічна карта SWOT-аналізу

Схема візуалізує перехресні зв'язки та обґрунтовує вибір «Стратегії технологічної компенсації» (вектор W-O), яка нівелює внутрішні слабкі сторони за рахунок використання зовнішніх технологічних можливостей.

Проведений аналіз дозволяє сформулювати безальтернативну концепцію модернізації. Визначальним обмеженням є відсутність нічного тарифу на електроенергію. Це означає, що електроенергія в системі повинна розглядатися виключно як дорогий ресурс для аварійного резервування та живлення автоматики.

Тому єдиною валідною стратегією є створення гібридних систем, де базове навантаження покривається за рахунок ефективного використання місцевої

біомаси через теплоаккумуляцію та інтелектуальне керування. Саме цей підхід покладено в основу інженерних розробок наступного розділу.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано розробку та технічне обґрунтування принципової схеми гібридної системи теплопостачання для закладу дошкільної освіти в гірській місцевості. Ключовим проєктним рішенням обрано топологію з центральним вузлом акумуляції тепла, що дозволяє ефективно інтегрувати джерела енергії різної фізичної природи та стохастичного характеру.

На основі аналізу потреб об'єкта визначено оптимальну конфігурацію основного обладнання: твердопаливний котел потужністю 70 кВт як джерело базової генерації, комбіновану систему використання сонячної енергії (геліоколектори та фотоелектричні панелі, що живлять ТЕН безпосередньо в баку-акумуляторі), а також електродкотел потужністю 30 кВт, який виконує функцію критичного резерву для підтримки чергового режиму опалення під час канікул або аварійних ситуацій.

Обґрунтовано необхідність застосування каскаду теплоаккумуляторів загальним об'ємом 6000 л для узгодження графіків виробництва та споживання тепла. Запропонована схема з погодозалежним регулюванням контуру споживача забезпечує необхідний рівень надійності, енергоефективності та живучості системи в складних умовах експлуатації і слугує основою для подальшої розробки системи автоматизації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ ОБ'ЄКТА В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ

Результати дослідження енергетичного аудиту та діагностики балансів, проведені у попередніх розділах, дозволили виявити фундаментальну системну проблему функціонування енергетичного сектору гірських територіальних громад. На прикладі репрезентативного об'єкта — Закладу дошкільної освіти (ЗДО) с. Кваси — було математично підтверджено існування критичного «розриву ефективності». Емпіричні дані свідчать, що фактичне споживання твердого палива об'єктом перевищує його теоретичні термодинамічні потреби у 4–5 разів навіть у періоди пікових зимових навантажень. Глибинний аналіз показав, що низький експлуатаційний ККД системи зумовлений термодинамічною недосконалістю процесу прямого спалювання біомаси в інерційних котлах без буферних ємностей. Неможливість ефективної модуляції потужності в перехідних режимах, у поєднанні з відсутністю автоматизованої реакції на динамічні зміни гірського клімату, призводить до хронічних перегрівів приміщень та значних непродуктивних втрат ексергії.

У даному розділі вирішується основне науково-прикладне завдання роботи: розробка архітектури, інженерне обґрунтування параметрів основного силового обладнання та синтез алгоритмів керування гібридної системи енергозабезпечення (HRES) [5]. Метою розробки є створення масштабованого інженерного рішення, здатного ліквідувати виявлений «розрив ефективності» шляхом синергетичної інтеграції керованих джерел на місцевому паливі, стохастичних відновлюваних джерел (сонце) та резервного електроживлення у єдиний енергетичний комплекс із централізованою тепловою акумуляцією під управлінням адаптивної IoT-системи.

3.1. Аналітичний огляд проблематики та концептуалізація гібридної системи

3.1.1. Порівняльний аналіз архітектур та обґрунтування вибору конфігурації системи

Вибір оптимальної конфігурації енергозабезпечення об'єкта соціальної інфраструктури в складних кліматичних умовах базується на комплексному аналізі альтернативних рішень, який доводить переваги гібридного підходу. Розглядаючи існуючі опції, варіант системи виключно на електрокотлах, попри привабливість низьких капітальних інвестицій та повної автоматизації, визнано ризикованим. Головними недоліками є значні експлуатаційні витрати через комерційні тарифи та загроза розморожування системи при зимових обривах ліній електропередач. Використання дизель-генераторів обмежене виключно аварійними ситуаціями через надвисоку собівартість виробленої енергії та складну гірську логістику палива. Впровадження теплових насосів або вітрогенераторів відхиляється через кліматичні обмеження регіону: критичне падіння коефіцієнта ефективності перетворення тепла при екстремальних морозах та недостатній вітровий потенціал. Широко розповсюджені класичні твердопаливні котельні без буферних ємностей, хоч і забезпечують автономність, демонструють низьку термодинамічну ефективність (ККД 40–50%) через роботу в режимі тління та високі викиди.

На противагу моноджерельним рішенням, найбільш раціональним є впровадження запропонованої гібридної енергосистеми, що інтегрує твердопаливний котел, фотоелектричні панелі, електрорезерв та масивний теплоакумулятор під управлінням інтелектуального контролера. У такій конфігурації теплоакумулятор виступає універсальним енергетичним буфером, дозволяючи основному котлу працювати в номінальному режимі з

максимальною ефективністю. Критичну надійність забезпечує інтегрований електрокотел, який виконує функцію гарантованого резервування: у разі відсутності персоналу або палива система автоматично переходить у черговий режим захисту від замерзання, підтримуючи температуру теплоносія для збереження інженерних мереж. Паралельно реалізовано алгоритм пріоритетного використання власної генерації, де надлишки електроенергії від сонячних панелей не віддаються в зовнішню мережу, а автоматично перенаправляються на електричні нагрівачі акумулятора, трансформуючись у корисне тепло. Таким чином, структура системи перетворюється на єдиний кіберфізичний комплекс, де інтелектуальна автоматика адаптивно керує потоками енергії від різномірних джерел до споживача.

3.1.2. Обґрунтування та розрахунок структури гібридної системи енергозабезпечення для пілотного об'єкта

Розпочинаючи проектування системи енергозабезпечення для об'єкта в складних умовах гірської місцевості, необхідно враховувати специфічні обмеження, які формують унікальну матрицю вимог до надійності та автономності. Для ізольованої гірської школи чи дитячого садка в зимовий період тривале відключення електроенергії може стати передвісником техногенної катастрофи — замерзання системи опалення та руйнування трубопроводів. Це зумовлено низькою тепловою інерцією будівель та швидким вихолодженням теплоносія в умовах низьких температур (-20°C і нижче).

Схема енергозабезпечення Закладу дошкільної освіти села Кваси базується на архітектурі з центральним вузлом акумуляції, що є критично важливим технічним рішенням з огляду на специфіку компактної, але енергоємної будівлі з опалювальним об'ємом $V_{op} \approx 1800 \text{ м}^3$.

1. Розрахунок базової генерації (Твердопаливний котел). Основним джерелом базової генерації виступає твердопаливний котел, розрахований на покриття критичних тепловтрат будівлі. Його робота у режимі номінальної продуктивності спрямована на форсовану зарядку теплоаккумулятора. Розрахункове теплове навантаження об'єкта (з урахуванням базового утеплення) приймається $Q_{bud} = 50$ кВт. Для забезпечення режиму швидкої зарядки аккумулятора потужність котла обирається з коефіцієнтом запасу $k = 1.4$: $Q_{kot} = 50 \cdot 1.4 = 70$ кВт. Приймається до встановлення піролізний котел потужністю 70 кВт.

2. Інтеграція відновлюваної генерації (Сонячна система). Паралельно до гідравлічного контуру твердопаливного агрегату схема передбачає інтеграцію системи використання сонячної енергії. Вона реалізується через комбінацію геліоколекторів та встановлення фотоелектричних панелей (PV). Фотоелектричні панелі за допомогою електричних проводів живлять блок ТЕНів, розташований безпосередньо у нижній частині теплоаккумулятора. Такий підхід здійснює пряме перетворення сонячної інсоляції в теплову енергію, акумулюючи її в баку. Для покриття базових потреб ГВП (близько 800 л/добу) та підтримки опалення в міжсезоння розрахункова теплова потужність сонячного поля має становити: $Q_{solar} = \frac{Q_{GVP} + 0.3 \cdot Q_{op}}{\tau_{sun}} \approx 15$ кВт. Де τ_{sun} – середня тривалість сонячного сьйва (прийнято 6 годин). Приймається встановлення поля сонячних панелей та колекторів відповідної сумарної потужності.

3. Резервна генерація (Електрокотел). Третім вектором енергозабезпечення є керована комутація із зовнішньою електромережею для догріву теплоносія. Враховуючи високу вартість електроенергії, електрокотел використовується виключно як аварійний резерв для запобігання замерзанню (підтримання $T_{vn} = +5^{\circ}\text{C} \dots + 10^{\circ}\text{C}$). Необхідна для цього потужність становить

близько 50-60% від номінальної: $Q_{el} = 0.6 \cdot 50 = 30$ кВт. Приймається електричний котел потужністю 30 кВт.

4. Розрахунок Центрального вузла акумуляції (Теплоаккумулятор). Центральним елементом топології виступає тепловий акумулятор, який виконує функцію гідравлічного розв'язувача між нестабільними контурами генерації та інерційним контуром споживання. Об'єм бака розраховується виходячи з необхідності акумулювати енергію одного повного завантаження дров у котел 70 кВт. Об'єм топки $V_{top} = 0.25$ м³. Маса дров $m_{drov} = 0.25 \cdot 450 = 112.5$ кг. Енергія закладки $Q_{zakl} = 112.5 \cdot 3.5 \cdot 0.85 \approx 335$ кВт · год. Необхідний об'єм води для акумуляції цієї енергії при $\Delta T = 45^\circ\text{C}$ (нагрів від 40°C до 85°C): $V_{ta} = \frac{335 \cdot 860}{45} \approx 6400$ л. Приймається встановлення каскаду з трьох теплоаккумуляторів по 2000 л кожен (загальний об'єм 6000 л). У нижній зоні акумулятора монтується ТЕН, підключений дротами до фотоелектричних панелей. Для моніторингу стану заряду та ступеня стратифікації теплоносія всередині баків на різних рівнях (верх, середина, низ) встановлюються занурювальні датчики температури.

5. Оптимізація контуру споживача. Відбір тепла з буферної ємності для потреб опалення здійснюється через автоматизований змішувальний вузол з погодозалежним керуванням. Система автоматично розраховує та подає в радіатори теплоносії мінімально необхідної температури відповідно до опалювальної кривої (наприклад, при 0°C на вулиці подача становить 45°C , а не 70°C). Це запобігає перегріву приміщень, забезпечує максимальне охолодження «зворотки» (що підвищує ефективність сонячного контуру та ємність бака) та суттєво подовжує час автономної роботи системи від накопиченого запасу енергії.

Така конфігурація «Твердопаливний котел + Сонце (PV+геліо) + Електрорезерв → Теплоаккумулятор → Споживач» створює необхідний резерв потужності та гнучкості для компенсації складних умов експлуатації об'єкта.

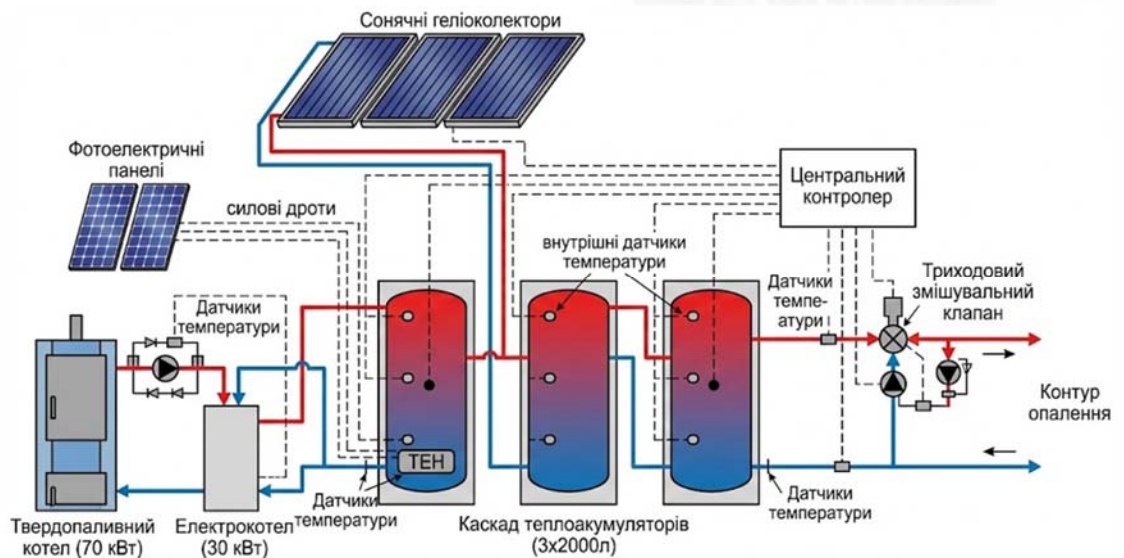


Рисунок 3.1. Принципова теплогідравлічна схема гібридної котельні ЗДО с. Кваси

На схемі зображено: Твердопаливний котел (70 кВт), Електрокотел (30 кВт), Сонячні геліоколектори, Фотоелектричні панелі з силовими дротами до ТЕНа, ТЕН у нижній частині теплоаккумулятора, Каскад теплоаккумуляторів (3x2000л) з інтегрованими внутрішніми датчиками температури на різних рівнях, Насосні групи, Триходовий змішувальний клапан контуру опалення, Датчики температури, Центральний контролер.]

3.1.3. Математичне моделювання теплового балансу та обґрунтування ємності системи акумуляції

Для переходу від концептуального проектування архітектури до інженерних розрахунків параметрів системи необхідно провести детальне математичне

моделювання теплового балансу об'єкта. В умовах гірської місцевості, де амплітуда добових коливань температури зовнішнього повітря може досягати 20–25°C, функція теплового навантаження будівлі ($Q_{load}(\tau)$) має виражений динамічний характер.

У загальному вигляді миттєве теплове навантаження будівлі в момент часу τ визначається як сума трансмісійної та вентиляційної складових: $Q_{load}(\tau) = Q_{tr}(\tau) + Q_{vent}(\tau)$

Трансмісійна складова, що враховує теплопровідність огорожувальних конструкцій, описується рівнянням: $Q_{tr}(\tau) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot F_i \cdot (t_{in}(\tau) - t_{out}(\tau))$ де:

- K_i — приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента огороження, Вт/(м²·К), що є оберненою величиною до термічного опору ($K_i = 1/R_i$);
- F_i — площа поверхні i -го елемента, м²;
- $t_{in}(\tau)$ — внутрішня температура в приміщенні, °С, яка має підтримуватися на заданому рівні (наприклад, +21°C вдень, +16°C вночі);
- $t_{out}(\tau)$ — температура зовнішнього повітря, °С, що є стохастичною функцією часу.

Оскільки зовнішня температура $t_{out}(\tau)$ є змінною величиною, теплове навантаження постійно флюктує протягом доби. Для ілюстрації цього процесу було проведено моделювання добового теплового навантаження пілотного об'єкта для характерного зимового дня (Рис. 3.2).

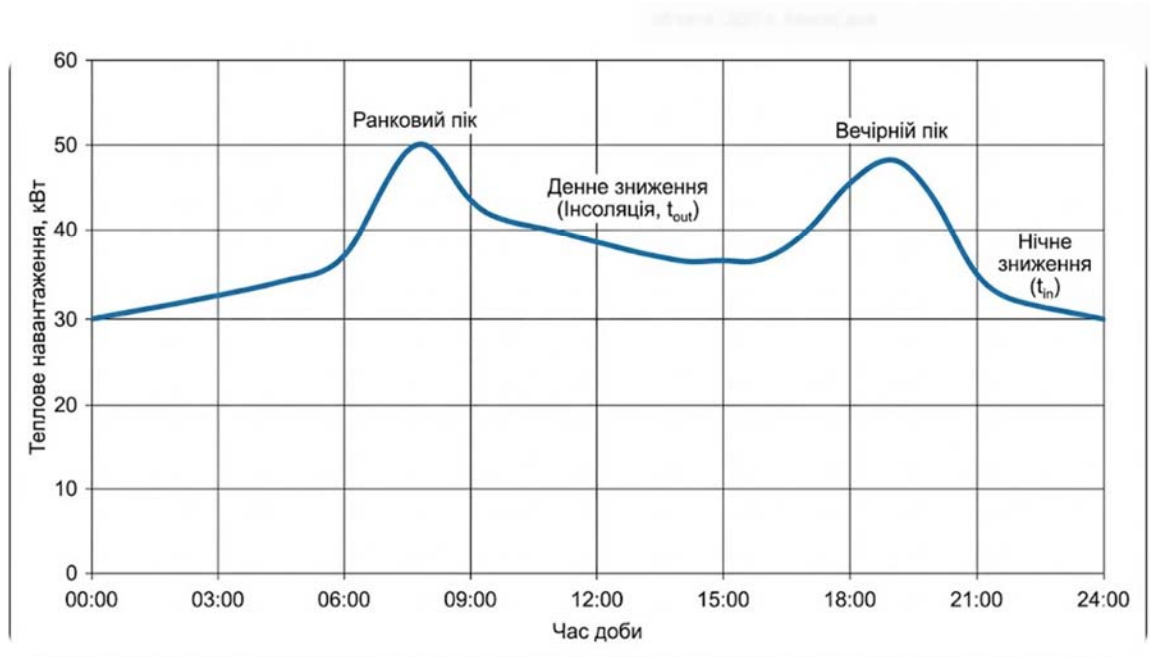


Рисунок 3.2 Модель добового графіку теплового навантаження пілотного об'єкта (ЗДО с. Кваси) для зимового періоду

На графіку: вісь X — Час доби (00:00 - 24:00), вісь Y — Теплове навантаження, кВт. Крива показує пік навантаження вранці та ввечері (близько 45-50 кВт), зниження вдень (через інсоляцію та підвищення t_{out}) та вночі (через зниження уставки t_{in}).

Ключовим завданням при проектуванні гібридної системи, особливо в умовах неможливості використання нічного тарифу для масової зарядки, є розрахунок необхідної ємності теплового акумулятора (TES). Акумулятор повинен виконувати функцію «енергетичного моста» [6] між дискретними процесами генерації (топка котла, сонячний день) та безперервним споживанням.

Енергетична місткість (ентальпія) резервуара (E_{TES}) залежить від трьох фундаментальних факторів: фізичного об'єму теплоносія, його питомої теплоємності та ефективного робочого температурного діапазону. Математично це виражається формулою:

$$E_{TES} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (3.1)$$

де V — активний об'єм теплоаккумулятора, м³;

ρ — густина теплоносія (води), ≈ 985 кг/м³ при робочій температурі;

c_p — питома ізобарна теплоємність води, 4.187 кДж/(кг·К) або 1.163 Вт·год/(кг·К);

T_{max} — максимальна температура заряду бака, обмежена температурою кипіння та ефективністю котла (приймаємо 85°С);

T_{min} — мінімально допустима температура подачі в систему опалення, за якої ще забезпечується ефективна тепловіддача радіаторів для покриття поточних втрат (залежить від погоди, приймаємо середнє значення для розрахунку автономності 45°С).

Фундаментальна умова енергетичної безпеки та ефективності полягає в тому, що запасена в акумуляторі енергія (E_{TES}) повинна повністю покривати інтегральні сумарні тепловтрати будівлі протягом заданого періоду автономності (τ_{aut}), коли генерація відсутня (наприклад, у нічний час між топками котла).

$$E_{TES} \geq \int_0^{\tau_{aut}} Q_{load}(\tau) d\tau$$

Проведемо оціночний розрахунок для нашого пілотного об'єкта із середньозимовим навантаженням близько 35 кВт. Для забезпечення восьмигодинної автономної роботи (наприклад, з 22:00 до 06:00) необхідний запас енергії становить: $E_{req} = Q_{avg} \cdot \tau_{aut} = 35 \text{ кВт} \cdot 8 \text{ год} = 280 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Розрахуємо необхідний об'єм води для акумуляції цієї енергії при робочому перепаді температур $\Delta T = T_{max} - T_{min} = 85 - 45 = 40^\circ\text{C}$: $V_{req} = \frac{E_{req}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} =$

$$\frac{280000 \text{ Вт} \cdot \text{год}}{985 \text{ кг/м}^3 \cdot 1.163 \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 40\text{К}} = \frac{280000}{45810} \approx 6.1 \text{ м}^3$$

Розрахунок показує, що навіть для оптимізованої будівлі необхідний об'єм теплоаккумулятора становить понад 6 кубічних метрів (6000 літрів). Для типового навчального закладу в гірській місцевості з піковим навантаженням близько 150 кВт (якщо не проводити термомодернізацію) цей об'єм зріс би пропорційно до 25–30 кубічних метрів. Інсталяція ємностей такого розміру в існуючих технічних приміщеннях (підвалах, котельнях) часто є технічно неможливою через габарити або економічно недоцільною через високу вартість резервуарів, їх теплоізоляції та монтажу.

Цей факт фундаментально обґрунтовує необхідність переходу від стратегії пасивного накопичення «на всі випадки життя» до стратегії активного інтелектуального керування. Система не повинна покладатися лише на фізичний об'єм води. Необхідне впровадження предиктивних (прогностичних) алгоритмів. Контролер повинен аналізувати швидкість падіння температури теплоносія (dT/dt) у різних шарах бака, зіставляти її з прогнозом погоди та графіком роботи закладу. Це дозволяє прогнозувати дефіцит енергії на кілька годин наперед та завчасно генерувати попереджувальні сигнали для персоналу (наприклад, «Необхідно завантажити котел через 2 години») або оптимізувати відбір тепла, знижуючи температуру в приміщеннях до мінімально допустимої у неробочий час. Саме потреба в реалізації таких складних, багатокритеріальних сценаріїв керування в реальному часі диктує жорсткі вимоги до обчислювального ядра системи, яке має бути значно функціональнішим за звичайний термостат чи погодозалежний регулятор.

3.2 Проектування архітектури інформаційно-вимірювальної системи

3.2.1 Аналіз вимог до обчислювального ядра в умовах стохастичного енергопостачання

Переходячи до етапу синтезу системи керування, дослідження стикається з фундаментальною інженерною дилемою, характерною для IoT-пристроїв, що інтегруються в критичні енергетичні мережі. З одного боку, реалізація сучасних адаптивних алгоритмів керування, які передбачають предиктивну аналітику, обробку значних масивів даних та надійний криптографічний захист, вимагає високих обчислювальних потужностей. З іншого боку, специфіка об'єкта в гірській місцевості — а саме, висока ймовірність тривалих аварійних відключень зовнішньої електромережі в зимовий період — накладає жорсткі обмеження на власне енергоспоживання контролера, який повинен зберігати працездатність від резервного джерела живлення (ДБЖ).

Аналіз типових рішень на базі одноплатних мікрокомп'ютерів (MPU) під управлінням операційних систем високого рівня (наприклад, Linux-embedded) [7] показує, що їхнє базове енергоспоживання в режимі очікування часто перевищує 200–300 мА [8]. У контексті стабільного офісного середовища це значення є нехтуваним. Однак, в умовах автономної роботи під час зимового блекауту, таке споживання стає критичним паразитичним навантаженням. За добу такий пристрій споживає близько 5–7 А·год ємності акумулятора, що може призвести до повного розряду джерела живлення системи моніторингу ще до того, як буде відновлено основне електропостачання. Втрата керуваності в такій ситуації є неприпустимою, оскільки персонал втрачає контроль над критичним параметром — температурою теплоносія, що створює ризик замерзання системи та колосальних матеріальних збитків.

Виходячи з цього аналізу, було сформульовано науково-технічну вимогу до апаратної платформи: вона повинна базуватися на енергоефективній архітектурі

мікроконтролерів (MCU), а не мікропроцесорів (MPU), і підтримувати спеціалізовані апаратні режими екстремального енергозбереження. Після проведення порівняльного аналізу доступних рішень, вибір було зупинено на інтегрованій апаратній платформі PIC-IoT WG Development Board від компанії Microchip.

Цей вибір базується на синергетичному поєднанні трьох компонентів, кожен з яких закриває критичний вектор загроз:

1. Енергетична стійкість: Забезпечується 16-бітним мікроконтролером PIC24FJ128GA705 з технологією XLP.
2. Кіберфізична безпека: Забезпечується спеціалізованим криптографічним співпроцесором АТЕСС608А.
3. Комунаційна автономність: Забезпечується «розумним» мережевим контролером WINC1510 з технологією розвантаження мережі.

Розглянемо обґрунтування вибору кожного з цих компонентів детальніше.

3.2.2. Архітектурні переваги та технологія мікроконтролера PIC24FJ128GA705

Центральним обчислювальним ядром системи обрано 16-бітний мікроконтролер PIC24FJ128GA705. Його внутрішня організація базується на модифікованій Гарвардській архітектурі. На відміну від традиційної фон-нейманівської архітектури, де інструкції та дані передаються по одній шині, створюючи «вузьке горлечко» продуктивності, дана архітектура використовує фізично розділені шини та пам'ять для програм (Flash) та даних (SRAM). Це дозволяє здійснювати вибірку інструкції та операнда за один машинний цикл, що забезпечує високу детермінованість виконання коду. Для систем реального часу, якою є система керування опаленням, передбачуваність часу реакції на критичну

подію (наприклад, аварійне перевищення температури котла) є визначальною характеристикою.

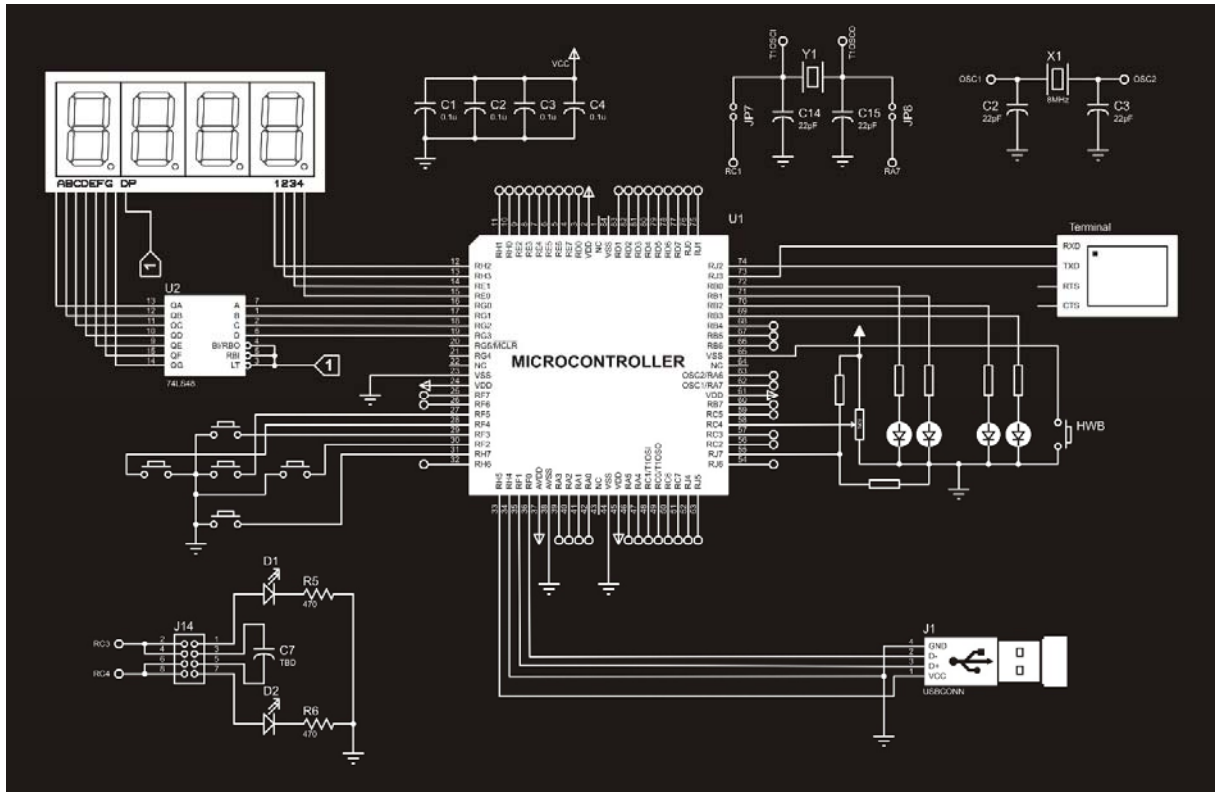


Рисунок 3.3 Вигляд принципової схеми мікроконтролера PIC24FJ128GA705

Головним аргументом на користь цього чіпа є реалізація технології eXtreme Low Power (XLP) [9]. Це комплекс інженерних рішень на рівні напівпровідникового кристала, спрямованих на мінімізацію струмів витoku. Згідно з технічною документацією та верифікаційними лабораторними вимірюваннями, струм споживання PIC24FJ128GA705 у режимі глибокого сну (Deep Sleep) становить типово 45 нА (наноампер) при температурі 25°C. Для порівняння, струм саморозряду звичайної літійової батарейки типу CR2032 часто перевищує 100–200 нА. Це означає, що власне споживання контролера в режимі очікування є меншим за природні втрати в самому елементі живлення.

З точки зору енергетичного балансу, система керування стає «енергетично прозорою». В умовах «острівного» режиму роботи, коли кожен ват енергії від резервного джерела є критичним, така економія дозволяє перерозподілити енергетичний бюджет на користь виконавчих механізмів (сервоприводів клапанів) або засобів зв'язку, значно підвищуючи загальну живучість системи.

Додатковою перевагою є використання периферії, незалежної від ядра (Core Independent Peripherals — CIP), зокрема, модуля прямого доступу до пам'яті (DMA). Це дозволяє налаштувати автоматизовані ланцюжки подій (наприклад: «Таймер → Запуск АЦП → Запис результату вимірювання в ОЗП») без участі центрального процесора. Ядро прокидається лише тоді, коли накопичено повний буфер даних для аналітичної обробки, що дозволяє тримати обчислювальне ядро у вимкненому стані до 99% часу роботи пристрою.

3.2.3. Апаратна безпека як фундамент надійності системи

У сучасному дискурсі щодо Інтернету речей (IoT) питання кібербезпеки часто розглядається як вторинне і обмежується програмним шифруванням каналу зв'язку. Проте, коли мова йде про управління системою життєзабезпечення громадської будівлі (школи, дитячого садка), кібербезпека трансформується у фізичну безпеку об'єкта. Злам системи керування опаленням зловмисниками може призвести до диверсій: штучного створення аварійних ситуацій, перегріву котлів або виведення з ладу теплоакумулятора.

Тому інтеграція в систему спеціалізованого криптографічного співпроцесора АТЕСС608А (CryptoAuthentication™) розглядається в даній роботі не як опція, а як обов'язковий елемент архітектури, що формує наукову новизну запропонованого підходу до безпеки муніципальної інфраструктури.

Більшість мікроконтролерів зберігають приватні ключі шифрування у звичайній флеш-пам'яті програм. Це створює критичну вразливість: при

фізичному доступі до пристрою (а обладнання котелень зазвичай має низький рівень фізичного захисту) зловмисник може використати програматор для зчитування прошивки («дампу пам'яті») і вилучення ключів. Отримавши ключі, він може емулювати роботу пристрою, надсилаючи фальшиві дані, або перехопити керування.

Чіп АТЕСС608А вирішує цю проблему шляхом створення апаратного кореня довіри (Hardware Root of Trust). Приватні ключі генеруються всередині самого захищеного чіпа за допомогою генератора випадкових чисел високої ентропії (TRNG) і зберігаються в захищеній зоні EEPROM. Конструкція чіпа передбачає активний металевий екран над кристалом та механізми захисту від атак по бічних каналах, зокрема від диференціального аналізу споживання енергії (DPA) [10].

У розробленій системі цей модуль виконує дві критичні функції:

- Автентифікація пристрою - хмарна платформа (наприклад, Google Cloud IoT Core) отримує криптографічне підтвердження, що дані надходять саме від авторизованого контролера, а не від підробленого пристрою.
- Безпечне завантаження - при старті системи контролер перевіряє цілісність власної прошивки, використовуючи цифровий підпис, що унеможливує запуск модифікованого зловмисного коду.

3.2.4. Комунікаційна підсистема на базі WINC1510

Третім фундаментальним стовпом забезпечення надійності та стабільності розробленої системи є архітектурна організація каналу передачі даних. Вибір спеціалізованого модуля WINC1510 для забезпечення бездротового зв'язку Wi-Fi був обумовлений необхідністю стратегічного розвантаження основного обчислювального ядра від рутинних мережеских завдань. Ця інженерна концепція, відома як Network Offloading [11], передбачає перенесення всіх

ресурсомістких операцій, пов'язаних з підтримкою стеку протоколів TCP/IP та шифруванням TLS 1.2, на окремий периферійний мережевий контролер з власним вбудованим мікропроцесором.



Рисунок 3.4 Процес роботи з розробленою системою керування на базі платформи PIC-ІоТ WG

Спроба покласти виконання цих високонавантажених мережових завдань безпосередньо на основний мікроконтролер PIC24, який керує фізичними процесами теплогенерації в реальному часі, призвела б до двох критичних негативних наслідків:

Катастрофічне зростання енергоспоживання: Центральний процесор втратив би можливість переходити в енергоефективні режими сну, оскільки був би змушений постійно обробляти мережовий трафік.

Зниження надійності керування. У моменти пікового мережового навантаження (наприклад, при генерації складних криптографічних ключів для TLS-сесії) процесор міг би бути заблокований, що створює ризик пропуску критичних сигналів від датчиків безпеки котла.

Взаємодія між основним контролером PIC24 та модулем WINC1510 здійснюється через високошвидкісний інтерфейс SPI, через який передається виключно корисне навантаження (телеметрія та команди) [11], тоді як вся службова «важка» робота виконується всередині WINC1510. Такий розподіл обов'язків дозволяє досягти високої відмовостійкості: навіть у випадку критичного збою мережової інфраструктури (наприклад, DoS-атаки на роутер), основний контролер PIC24 продовжить у детермінованому режимі керувати котлом, забезпечуючи фізичну безпеку об'єкта, а мережовий модуль автономно намагатиметься відновити з'єднання.

3.3. Синтез алгоритмічного забезпечення та стратегії керування енергопотоками

Розробка апаратної частини гібридної системи, що включає твердопаливні котли, теплоакумулятори та насосні групи, створює лише необхідний фізичний базис для підвищення енергоефективності об'єкта. Однак, як продемонстрував аналіз попередніх розділів, проста модернізація обладнання без зміни підходів до

регулювання не здатна повністю ліквідувати «енергетичний розрив». Реалізація закладеного технічного потенціалу можлива виключно через впровадження інтелектуальної кіберфізичної системи керування, здатної приймати оптимальні рішення в умовах невизначеності.

Складність інженерної задачі полягає в необхідності узгодженого керування гетерогенними джерелами енергії, які мають принципово різну фізичну природу. Система повинна об'єднати стохастичну генерацію, характерну для сонячних колекторів, дискретну керовану генерацію твердопаливних котлів та гарантоване, але вартісне живлення від електромережі. Ключовим викликом при цьому стає те, що перелічені джерела мають діаметрально протилежну вартість генерації та різну часову доступність, що в нових економічних умовах є визначальним фактором для експлуатаційних витрат бюджетної установи.

3.3.1. Трансформація стратегії керування в умовах відсутності пільгових тарифів

Традиційні підходи до автоматизації систем опалення, що базуються на найпростішій релейній логіці та використанні бінарних термостатів, є категорично неприйнятними для вибраного типового об'єкта ЗДО с. Кваси. Такі системи оперують єдиним критерієм — поточною температурою теплоносія, повністю ігноруючи вартість енергоресурсу, прогноз його доступності та теплову інерцію будівлі. В умовах, коли бюджетна установа сплачує повну комерційну вартість електроенергії цілодобово без застосування нічних коефіцієнтів, реактивна модель керування призведе до критичних фінансових наслідків. Наприклад, автоматичне вмикання потужного електродвигуна одразу при падінні температури в буферній ємності, без аналізу альтернатив, спричинить миттєве вичерпання лімітів фінансування закладу.

Наукова новизна розробленого алгоритмічного забезпечення полягає у переході від застарілої моделі теплопостачання до проактивної адаптивної стратегії пріоритетів. Задача системи керування формулюється як задача динамічної оптимізації, де головною метою є задоволення поточного попиту будівлі на теплову енергію $Q_{dem}(t)$ шляхом використання такої комбінації джерел, яка забезпечує мінімальну сумарну вартість генерації C_{total} . Математично цільову функцію керування можна представити у вигляді інтеграла суми вартостей кожного енергоносія на проміжку часу, що прагне до мінімуму:

$$C_{total} = \int_0^T (P_{sol}(t) \cdot c_{sol} + P_{bio}(t) \cdot c_{bio} + P_{el}(t) \cdot c_{el}) dt \rightarrow \min \quad (3.2)$$

де P_{sol} , P_{bio} , P_{el} — це миттєва потужність сонячної, біопаливної та електричної генерації відповідно, а коефіцієнти c відображають граничну вартість кожного виду енергії. Для практичної реалізації цієї функції вводиться жорстка ієрархія джерел енергії (, що базується на критерії граничної вартості і реалізується через три рівні пріоритетності.

Найвищий пріоритет (№1) у розробленій стратегії надається стохастичній відновлюваній генерації, тобто енергії Сонця. Оскільки гранична вартість цієї енергії наближається до нуля ($c_{sol} \approx 0$), система налаштована на повну "утилізацію" (harvesting) кожної доступної кіловат-години сонячного тепла. Алгоритм працює за принципом диференціального керування: циркуляційний насос геліоконтур активується, коли температура на колекторі перевищує температуру в нижній точці теплоакумулятора на величину гістерезису (зазвичай 5-7°C). Весь надлишок енергії, незалежно від поточних потреб будівлі, акумулюється в буферній ємності (TES).

Базовий пріоритет (№2) відводиться керованій генерації на місцевому паливі (біомасі). Вартість цієї енергії є низькою і складається з ціни дров та оплати праці

персоналу. Це джерело є основним для покриття дефіциту енергії в періоди відсутності сонця. Особливість керування на цьому рівні полягає у взаємодії типу "Human-in-the-loop" [12] : оскільки завантаження палива здійснюється вручну, контролер виконує функцію інтелектуального асистента. Аналізуючи ступінь заряду акумулятора, система завчасно повідомляє оператора через світлову сигналізацію або мобільний додаток про необхідність розпалу котла, запобігаючи вихолодженню системи.



Рисунок 3.5 Ієрархія пріоритетів джерел енергії в гібридній системі.

Аварійний пріоритет (№3) присвоєно генерації з електромережі. Через надвисоку вартість енергії за комерційним тарифом, використання цього джерела в штатному режимі опалення суворо заборонено програмним алгоритмом. Електричний нагрів активується автоматично виключно як запобіжник у форс-мажорних обставинах — таких як відсутність палива, непередбачувана відсутність персоналу або поломка основного твердопаливного котла. Система

вмикає електророзподіл лише тоді, коли температура теплоносія падає до критичної межі (наприклад, $+10^{\circ}\text{C}$), забезпечуючи режим "Anti-frost" для захисту інженерних мереж від руйнування.

В основі піраміди — безкоштовна сонячна енергія, в середині — дешева біомаса, на вершині — дорога електроенергія (використовується найменше).

3.3.2. Алгоритмізація процесів та логіка прийняття рішень

Для програмної імплементації описаної стратегії було розроблено детальний алгоритм керування енергетичними потоками. Центральним елементом логіки є поняття "Енергетичного стану системи" [13], яке визначається не локальною температурою в одній точці, а повною ентальпією (запасом енергії) у всьому каскаді теплоаккумуляторів. Контролер циклічно, з періодом дискретизації $T_s = 10 \dots 30$ секунд, опитує масив датчиків і виконує розгалужений сценарій керування, який можна розділити на три паралельні алгоритмічні потоки.

Перший потік відповідає за керування контуром генерації, тобто за наповнення теплоаккумулятора енергією. Контролер у безперервному режимі порівнює температуру сонячного колектора (T_{col}) та температуру в нижній частині бака (T_{tes_low}). Насос геліосистеми вмикається за умовою перевищення температурного порогу $\Delta T_{on} = 7^{\circ}\text{C}$ і вимикається при зменшенні різниці до $\Delta T_{off} = 3^{\circ}\text{C}$. Такий гістерезис необхідний для запобігання частому тактуванню насоса в умовах змінної хмарності, що продовжує ресурс обладнання.

Другий потік реалізує керування контуром споживання (Discharging Loop), відповідаючи за комфорт у приміщеннях та економію акумульованого тепла. Принциповою відмінністю від старої системи є відмова від прямої подачі перегрітого теплоносія в радіатори. Натомість контролер керує положенням триходового змішувального клапана за пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом. Цільова температура подачі (T_{target}) динамічно

розраховується за опалювальною кривою (Heating Curve) залежно від поточної зовнішньої температури (T_{out}): $T_{target} = f(T_{out}, K_{curve})$. Це дозволяє відбирати з бака-акумулятора рівно ту кількість енергії, яку втрачає будівля в конкретний момент часу, повністю ліквідуючи явище "перетопів".

Третій потік забезпечує моніторинг безпеки та балансу. Він безперервно аналізує критичні параметри системи. Якщо температура теплоносія падає нижче аварійної уставки $+10^{\circ}\text{C}$, що свідчить про вичерпання заряду акумулятора та неможливість роботи твердопаливної частини, алгоритм примусово активує групу безпеки: вмикається електродотел та генерується тривожне GSM-сповіщення для відповідального персоналу.

Для візуалізації логічних зв'язків та послідовності дій розроблено блок-схему алгоритму, наведену на рисунку 3.6

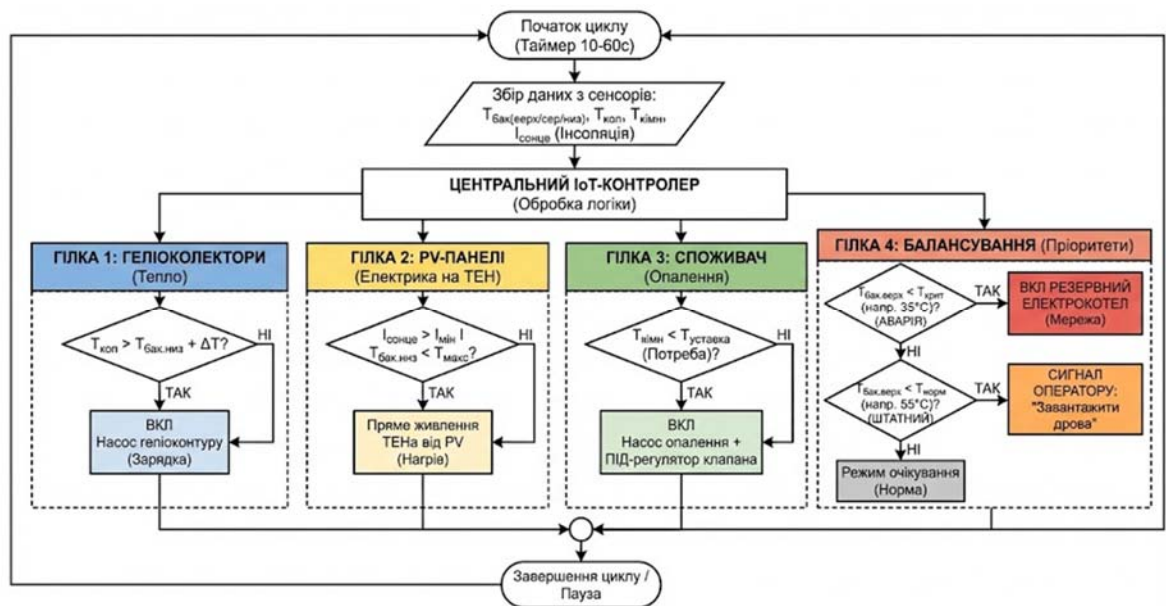


Рисунок 3.6 Блок-схема алгоритму керування енергетичними потоками гібридної системи

3.3.3 Алгоритм керування енергетичними потоками

Реалізація обраної стратегії здійснюється центральним IoT-контролером через виконання циклічного алгоритму керування енергопотоками. Головна функція алгоритму — керувати процесами зарядки (від джерел генерації) та розрядки (на споживача) центрального теплоаккумулятора (TES), підтримуючи його «рівень заряду» в оптимальному діапазоні.

Рівень заряду TES оцінюється інтегрально за показами трьох цифрових датчиків температури, розташованих вертикально по висоті бака: у верхній зоні (T_{top}), середній (T_{mid}) та нижній (T_{bot}), а також за даними датчика сонячної інсоляції (I_{sun}), що визначає потенціал генерації фотоелектричних панелей.

Нижче наведено опис логіки та принципову блок-схему алгоритму, що демонструє процес прийняття рішень щодо відбору та віддачі енергії.

Опис логіки схеми для візуалізації:

Центральний блок "IoT-КОНТРОЛЕР (Моніторинг стану TES, Погоди та Інсоляції)" циклічно опитує датчики. Від нього йдуть чотири функціональні гілки прийняття рішень:

Гілка 1: Контур Геліоколекторів (Теплова зарядка).

- Умова: «Чи $T_{kol} > T_{bot} + \Delta T$?».
- Дія (якщо ТАК): «ВКЛ Насос геліоконтур».
- Результат: Теплова енергія транспортується від сонячних колекторів у нижню частину бака через теплообмінник, підвищуючи загальну ентальпію системи.

Гілка 2: Контур PV-нагріву (Електрична сонячна зарядка).

- Умова: «Чи $I_{sun} > I_{min}$ (достатня інсоляція) і $T_{bot} < T_{max}$?».
- Дія (якщо ТАК): «ВКЛ Комутацію сонячних панелей на ТЕН».
- Результат: Електрична енергія від фотоелектричних панелей напряму живить ТЕН у нижній зоні акумулятора, забезпечуючи догрів води навіть при непрацюючому насосі геліосистеми.

Гілка 3: Контур Споживача (Розрядка).

- Умова: «Чи $T_{\text{kimn}} < T_{\text{set}}$ (є потреба в теплі)?».
- Дія (якщо ТАК): «ВКЛ Насос опалення + ПД-регулювання триходового клапана».
- Результат: Енергія дозовано відбирається з верхньої частини бака і подається в будівлю згідно з погодозалежним графіком.

Гілка 4: Контур Генерації (Балансування та Резерв). Це складна логічна умова з пріоритетами джерел:

- Під-умова А (Аварійна): «Чи $T_{\text{top}} < T_{\text{crit}}$ (наприклад, 35°C) І T_{room} падає критично?».
- Дія (якщо ТАК): «АВАРІЯ! ВКЛ Резервний Електрокотел».
- Результат: Використання дорогої електроенергії з мережі для швидкого порятунку системи від замерзання та підтримки мінімальної температури.
- Під-умова Б (Штатна): «Чи $T_{\text{top}} < T_{\text{min}}$ (наприклад, 55°C) І прогноз сонячної активності негативний?».
- Дія (якщо ТАК): «СИГНАЛ ОПЕРАТОРУ: Розпалити твердопаливний котел».
- Результат: Коли котел розпалено, дешева енергія від біомаси заряджає бак до максимальної ємності.

Цей алгоритм гарантує економічну ефективність: система програмно блокує використання дорогої мережевої електроенергії, доки існує термодинамічна можливість отримати тепло від сонця (через колектори або PV-панелі) або є часовий запас для планового розпалювання дров'яного котла.

3.3.4. Порівняльний аналіз критичних сценаріїв навантаження на розподільчу електромережу

Впровадження розробленої гібридної системи енергозабезпечення виходить за межі локальної теплотехнічної модернізації, ініціюючи докорінну трансформацію профілю електричного споживання будівлі закладу дошкільної освіти (ЗДО). Даний аспект набуває критичної ваги в контексті експлуатації об'єкта в гірській місцевості, де інфраструктура розподільчих мереж 0,4 кВ характеризується високим повним опором (імпедансом), недостатнім перерізом провідників та обмеженою потужністю трансформаторних підстанцій. Для кількісної верифікації ефективності запропонованих рішень доцільно провести порівняльний аналіз двох полярних сценаріїв енергозабезпечення в умовах пікових навантажень.

Сценарій №1: «Традиційний» (Моновалентне електроопалення). Цей сценарій моделює ситуацію повної відмови від твердого палива, де для покриття розрахункових тепловтрат будівлі, що становлять 50 кВт, використовується група електричних котлів. Критичною особливістю даного режиму є те, що в період температурного мінімуму (найхолодніша п'ятиденка опалювального сезону) коефіцієнт одночасності роботи нагрівальних елементів наближається до одиниці ($K_{sim} \rightarrow 1$). Це формує на ввіді будівлі постійне активне навантаження $P_{load} \approx 50$ кВт. Для типової сільської мережі такий режим є передаварійним, оскільки призводить до глибоких просядок напруги, перегріву контактних з'єднань та, як наслідок, спрацювання захисної автоматики на трансформаторній підстанції, що загрожує повним знеструмленням об'єкта та прилеглих домогосподарств.

Сценарій №2: «Гібридний» (Інтегрована система з власною генерацією). Запропонована концепція змінює парадигму енергоспоживання: електрична енергія переходить зі статусу основного джерела генерації тепла в статус допоміжного ресурсу для живлення систем циркуляції та керування. Сумарне енергоспоживання системи формується як сукупність потужностей периферійного обладнання: циркуляційного насоса твердопаливного котла (0,09

кВт), насоса сонячного контуру (0,06 кВт), високоефективного частотного насоса контуру опалення (0,15 кВт) та автоматики керування (0,02 кВт).

Принциповою відмінністю модернізованої схеми є інтеграція фотоелектричного модуля (PV-панелі), що забезпечує енергетичну автономність критичних вузлів. Баланс потужності в цьому випадку описується рівнянням:

$$P_{\Sigma} = \sum P_{\text{pump}} + P_{\text{control}} - P_{\text{PV(gen)}} \quad (3.3)$$

Підставляючи розрахункові значення, отримуємо, що сумарне споживання критичної інфраструктури становить 0,32 кВт. Враховуючи генерацію PV-модуля у світлий час доби (0,4 ... 0,5 кВт), результуюче навантаження на зовнішню мережу стає нульовим або від'ємним (надлишок енергії акумулюється в ДБЖ).

Візуалізація диспропорції навантажень наведена на порівняльній діаграмі (Рис. 3.7). Графік демонструє не лише кількісне зменшення споживання, а й якісну зміну вектора енергообміну.

На діаграмі зіставлено пікове навантаження традиційної системи (червоний стовпець, +50 кВт) та баланс гібридної системи (зелений стовпець споживання +0,32 кВт проти жовтого стовпця генерації PV -0,45 кВт), що ілюструє досягнення енергетичної нейтральності.

Для оцінки ефективності модернізації введено коефіцієнт розвантаження електричної мережі (K_{relief}), що визначається як відношення необхідної потужності в традиційному сценарії до споживання в гібридному:

$$K_{\text{relief}} = \frac{P_{\text{trad}}}{P_{\text{hybrid}}} = \frac{50}{0,32} \approx 156$$



Рисунок 3.7 Порівняльна діаграма балансу електричної потужності в критичних сценаріях

Отриманий результат свідчить про зниження навантаження на зовнішню мережу в 156 разів. Важливо зазначити, що резервний електродвигун потужністю 30 кВт, фізично наявний у схемі, програмно виключений зі штатного алгоритму роботи та заблокований контролером. Його активація передбачена виключно як аварійний захід (anti-freeze protection), тому його номінал не враховується при розрахунку приєднаної потужності для повсякденної експлуатації. Такий підхід гарантує стійкість системи опалення навіть в умовах жорсткого дефіциту пропускну здатності електромереж.

3.3.5. Схема інтеграції IoT-модуля та параметри оцінки

Фізична реалізація розроблених адаптивних алгоритмів керування вимагає побудови розгалуженої кіберфізичної системи, що об'єднує сенсорний рівень (збір даних), рівень прийняття рішень (обчислювальне ядро) та рівень виконання

(актуатори). Центральний IoT-модуль виступає "мозком" цієї системи, перетворюючи безперервний потік фізичних параметрів від об'єкта на цифрові дані, на основі яких приймаються керуючі рішення в реальному часі.

Принцип роботи алгоритму керування, блок-схема якого була розглянута в попередніх підрозділах, базується на циклічному опитуванні станів системи та паралельній обробці трьох логічних гілок [14]. У кожному циклі контролер спочатку зчитує всі температурні показники. Потім, у гілці керування геліосистемою, він реалізує диференціальний алгоритм: порівнює температуру колектора з температурою низу бака-акумулятора. Якщо різниця перевищує встановлений гістерезис (наприклад, $\Delta T > 7^\circ\text{C}$), вмикається насос для переносу тепла; якщо різниця падає нижче порогу відключення (наприклад, $\Delta T < 3^\circ\text{C}$), насос зупиняється. Це дозволяє "знімати" тепло навіть при низькій сонячній активності, уникаючи енергетично невігідних режимів роботи. У гілці контуру споживача реалізовано ПД-регулювання: контролер аналізує відхилення поточної температури в приміщенні від заданої уставки та, залежно від зовнішньої температури, розраховує необхідну температуру подачі теплоносія, подаючи відповідний сигнал на сервопривід триходового змішувального клапана. Це забезпечує точну відповідність генерації тепла поточним потребам будівлі. Третя гілка — балансування та безпека — відповідає за стратегічні рішення: вона моніторить рівень заряду теплоакумулятора (за температурами верху та середини бака). При зниженні заряду до попереджувального рівня генерується сигнал оператору для розпалу твердопаливного котла (використання дешевого ресурсу). Лише у випадку критичного падіння температури (загроза замерзання) алгоритм автоматично активує дороге аварійне електроопалення.

На рис. 3.8 представлена структурна схема інтеграції IoT-контролера в інженерну систему котельні, що відображає потоки інформації та сигналів.

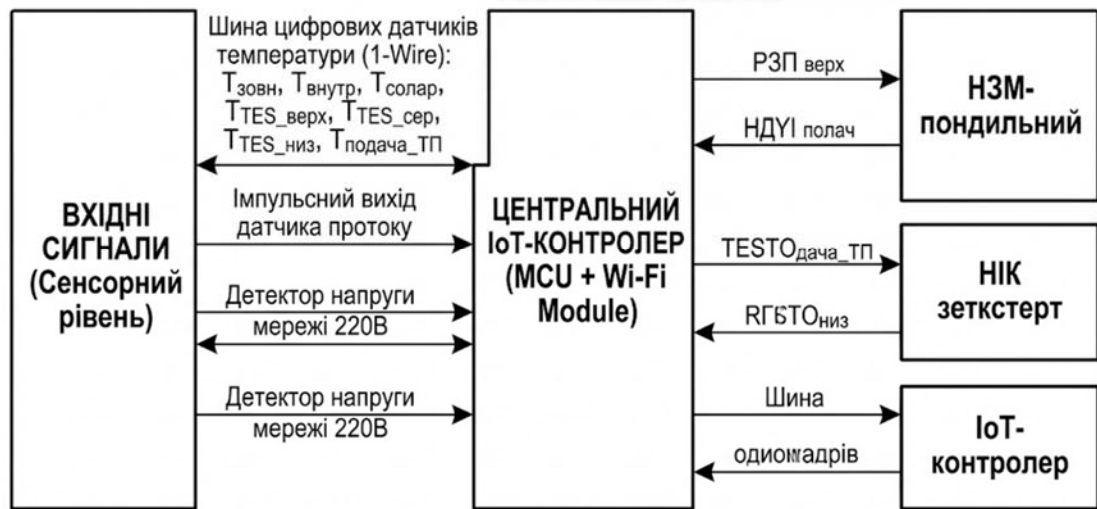


Рисунок 3.8 Структурна схема підключення IoT-контролера до елементів гібридної системи

Опис схеми: Центральним елементом є прямокутник "ЦЕНТРАЛЬНИЙ IoT-КОНТРОЛЕР (MCU + Wi-Fi Module)". Зліва до нього надходять сигнали від блоку "ВХІДНІ СИГНАЛИ (Сенсорний рівень)":

Шина цифрових датчиків температури (наприклад, на базі DS18B20, протокол 1-Wire): T_{outdoor} (зовнішня), T_{indoor} (внутрішня референтна), T_{solar} (на виході колектора), $T_{\text{boiler_supply}}$ (подача ТП котла), а також група датчиків стратифікації бака: $T_{\text{TES}}^{\text{high}}$ (верх), $T_{\text{TES}}^{\text{mid}}$ (середина), $T_{\text{TES}}^{\text{low}}$ (низ).

Імпульсний вихід датчика протоку теплоносія (для функції теплолічильника).

Дискретний вхід детектора наявності напруги в мережі 220В (для фіксації блекаутів). Справа від контролера відходять керуючі впливи до блоку "ВИХІДНІ СИГНАЛИ (Виконавчий рівень)":

Блок проміжних реле (для комутації індуктивних навантажень малої потужності): Насос ТП котла, Насос геліосистеми, Насос контуру опалення.

Силовий контактор: Керування групами ТЕНів аварійного електрокотла.

Аналоговий вихід (0-10В) або ШІМ-сигнал: Керування кутом повороту сервопривода триходового змішувального клапана. Вгору від контролера йде двонаправлена стрілка "Канал зв'язку (Wi-Fi/MQTT) ↔ Хмарна платформа / АРМ Оператора".]

У процесі функціонування програмне забезпечення контролера здійснює безперервну оцінку та обробку трьох ключових груп параметрів, що визначають стан об'єкта:

Перша група — Параметри стану (State Parameters). Це миттєві значення температур у всіх контрольних точках гідравлічної схеми та приміщень. На їх основі реалізується базова порогова логіка: приймаються миттєві рішення про вмикання або вимикання циркуляційних насосів, фіксується досягнення цільових температур.

Друга група — Параметри динаміки (Rate Parameters). Це розрахункові величини, що є першими похідними температур за часом (швидкість зміни). Контролер обчислює швидкість охолодження або нагріву теплоаккумулятора (dT_{TES}/dt) та швидкість зміни температури в приміщенні (dT_{indoor}/dt). Ці параметри є критично важливими для реалізації предиктивного (прогнозуючого) керування: вони дозволяють системі передбачити дефіцит тепла ще до того, як температура в приміщенні суттєво впаде, і завчасно активувати джерела генерації, компенсуючи інерційність системи опалення.

Третя група — Параметри безпеки. Це набір критичних граничних умов, вихід за межі яких ініціює безумовну активацію аварійних протоколів, незалежно від економічних критеріїв. До них належать наближення температури теплоносія до точки замерзання (наприклад, $T < 5^{\circ}\text{C}$), перегрів котла або бака вище допустимих меж ($T > 95^{\circ}\text{C}$), а також фізична відсутність електроживлення в мережі. Обробка цих параметрів має найвищий пріоритет в алгоритмі керування для забезпечення живучості обладнання.

3.4. Програмна реалізація та візуалізація даних моніторингу

У контексті глобальної цифровізації енергетичного сектору та переходу до парадигми «Індустрії 4.0», розробка локального контролера керування опаленням перестає бути тривіальною задачею створення ізольованого embedded-пристрою. Вона трансформується у комплексний процес синтезу повноцінної Кіберфізичної Системи та (CPS) . У рамках даної магістерської роботи CPS розглядається як глибоке, синергетичне поєднання обчислювальних ресурсів, передових мережевих технологій та реальних фізичних процесів генерації, акумуляції й розподілу теплової енергії.

На відміну від класичних систем телеметрії (IoT), де інтернет використовується переважно як пасивний канал для одностороннього моніторингу стану, у розробленій CPS програмні алгоритми здійснюють проактивне, двонаправлене керування фізичною динамікою системи в режимі реального часу. Контур керування фактично замикається через глобальну мережу, де хмарна аналітика впливає на роботу виконавчих механізмів (клапанів, насосів). Ключовим науково-інженерним викликом тут стає забезпечення когерентності (часової та логічної узгодженості) інформаційних потоків у кіберпросторі та інерційних термодинамічних реакцій обладнання у фізичному світі, особливо в умовах жорстких обмежень ресурсів каналів зв'язку та автономного енергоживлення в гірській місцевості.

3.4.1. Обґрунтування вибору архітектури передачі даних на основі аналізу переваг протоколів MQTT та HTTP

Інтеграція віддаленого критичного об'єкта в горах у глобальну мережу Інтернет ставить перед дослідником нетривіальну задачу вибору оптимального комунікаційного протоколу верхнього рівня. Канали зв'язку в такій місцевості

(часто це лише 2G/GPRS або нестабільний сигнал LTE на межі зони покриття) характеризуються вкрай низькою пропускнуою здатністю, високими затримками передачі пакетів (latency) та частими спонтанними розривами з'єднання.

Традиційний для веб-розробки та багатьох IoT-рішень протокол HTTP (REST API) [15], що працює за синхронною клієнт-серверною схемою «запит-відповідь», був підданий детальному порівняльному аналізу і в результаті відхилений як неефективний та ненадійний для даного класу задач. Проблема HTTP полягає в його значній «ваговитості» (protocol overhead). Протокол є текстовим, і кожен запит на передачу навіть одного байта корисних даних (payload, наприклад, значення температури «20») вимагає передачі сотень байтів службових заголовків (User-Agent, Content-Type, Authorization тощо). Крім того, HTTP не підтримує постійного з'єднання в тому сенсі, який потрібен для систем реального часу: кожен новий цикл передачі телеметрії часто вимагає встановлення нової TCP/TLS-сесії (процедура «рукостискання» — handshake), що супроводжується значними витратами трафіку, часу та обчислювальних ресурсів контролера. Для автономного пристрою, що в аварійному режимі живиться від резервного акумулятора, постійне «підняття» радіомодему для передачі важких пакетів є неприпустимою витратою енергії.

Натомість, у роботі науково обґрунтовано та імплементовано використання протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Цей протокол був спеціально розроблений для роботи в умовах обмежених ресурсів, ненадійних мереж та високої вартості трафіку (спочатку — для супутникового моніторингу нафтопроводів). MQTT працює за асинхронною подієво-орієнтованою моделлю «публікація-підписка» (Publish/Subscribe) через центральний вузол — Брокер повідомлень.

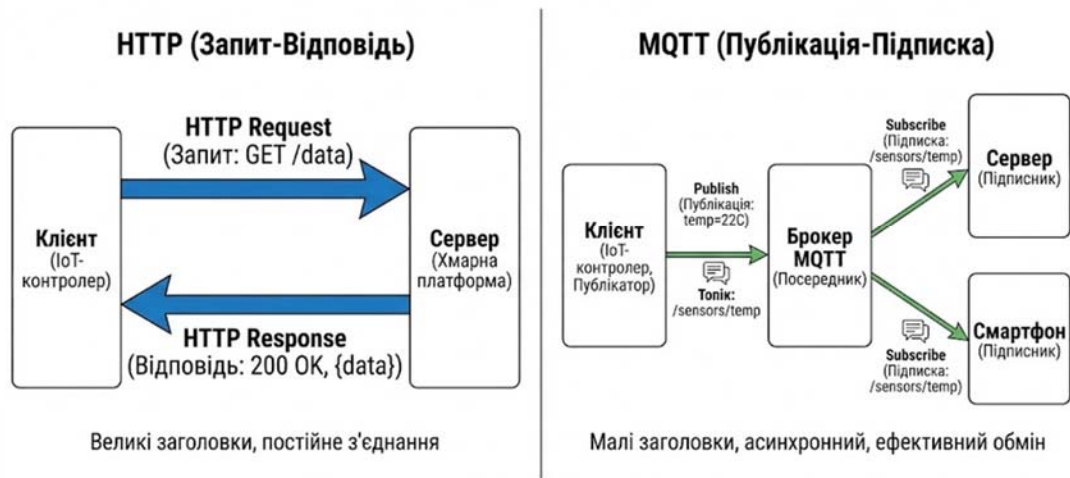


Рис. 3.9. Порівняння моделей комунікації HTTP (Запит-Відповідь) та MQTT (Публікація-Підписка)

На схемі HTTP показано прямий зв'язок Клієнт-Сервер з товстими стрілками (заголовки). На схемі MQTT показано Клієнта (Контролер), Брокера (посередник) та Підписників (Сервер, Смартфон), де контролер публікує дані в топик, а брокер розсилає їх підписникам. Стрілки тонкі (мінімум заголовків).

Переваги впровадження MQTT для гірської CPS є системними:

1. Мінімізація трафіку. Заголовок пакету керування MQTT може становити всього 2 байти. Використання бінарного формату замість текстового знижує споживання трафіку на 80-90% порівняно з HTTP, що дозволяє системі стабільно працювати навіть на швидкостях GPRS (кілька кілобіт на секунду).

2. Гарантована доставка. Критичним аспектом для системи безпеки є поняття Якості Обслуговування. Протокол дозволяє задавати рівень гарантій для кожного повідомлення. Використання рівня QoS 1 («At least once») або QoS 2 («Exactly once») гарантує, що критичне повідомлення про аварію (наприклад, «ALERT: Перегрів котла > 95°C») буде доставлено

брокеру, навіть якщо з'єднання розірветься в момент відправки. Контролер зберігатиме пакет у внутрішньому буфері і повторюватиме спроби доти, доки не отримає підтвердження (PUBACK) від брокера. HTTP такої вбудованої логіки не має.

3. Утримані повідомлення. Функція дозволяє брокеру зберігати останнє відоме значення для кожного топіка (параметра). Коли енергоменеджер відкриває дашборд на смартфоні, він миттєво бачить актуальний стан системи, не чекаючи, поки контролер прокинеться і надішле новий пакет даних.

4. Заповіт. Механізм, що дозволяє брокеру автоматично повідомити інших учасників системи про некоректне відключення контролера (наприклад, через втрату живлення або зв'язку), що критично для діагностики аварій.

3.4.2. Хмарна інтеграція, кіберзахист каналу та роль апаратної криптографії

Передача чутливих даних про стан критичної інфраструктури та, особливо, команд керування нею через публічні мережі вимагає безкомпромісного підходу до кібербезпеки. Використання саморобних серверів або відкритих MQTT-брокерів без шифрування несе неприйнятні ризики перехоплення керування зловмисниками (наприклад, дистанційне вимкнення опалення взимку або зміна уставок температури) та атак типу «людина посередині» (MITM). Тому для обробки даних було обрано використання професійної хмарної платформи рівня Enterprise — Google Cloud Platform (компонент IoT Core) [15]. Цей вибір продиктований вимогами до високої доступності (SLA > 99.9%), масштабованості (можливість підключити сотні об'єктів без зміни архітектури)

та відповідності міжнародним стандартам інформаційної безпеки (ISO 27001, SOC 2).

Архітектура безпеки в даній роботі принципово відходить від традиційних симетричних паролів чи API-ключів. Інтеграція контролера з хмарою відбувається через механізм взаємної автентифікації (mTLS) на основі асиметричної криптографії та цифрових сертифікатів стандарту X.509.

Проте, програмна реалізація криптографічних алгоритмів (наприклад, ECDSA) та зберігання приватних ключів у звичайній флеш-пам'яті мікроконтролера загального призначення створює критичну вразливість: ключі можуть бути вилучені при фізичному доступі до пристрою через налагоджувальні інтерфейси (JTAG/SWD) або шляхом аналізу енергоспоживання.

Тому в розробленій системі було застосовано апаратний підхід до безпеки: механізм захищеного з'єднання та автентифікації базується на використанні спеціалізованого криптографічного співпроцесора, а саме чіпа Microchip ATECC608A.

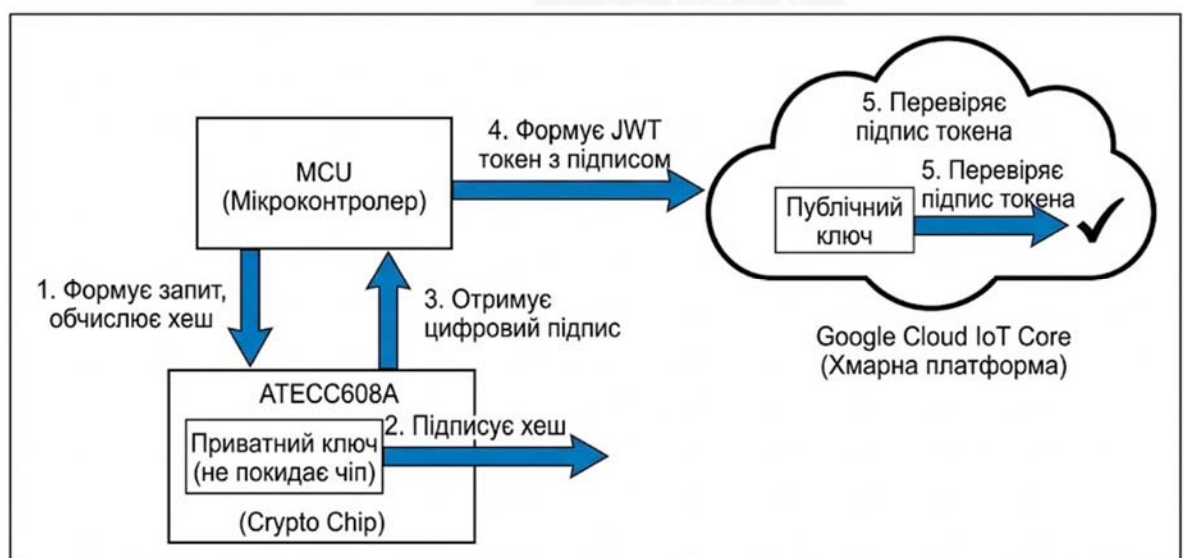


Рис. 3.10. Процес безпечної апаратної автентифікації контролера в Google Cloud IoT Core з використанням ATECC608A

Схема показує MCU, Crypto Chip, і Cloud. MCU формує запит -> відправляє хеш в Crypto Chip -> Crypto Chip підписує хеш приватним ключем (який не покидає чіп) -> MCU отримує підпис і формує JWT токен -> відправляє токен в Cloud. Cloud перевіряє підпис публічним ключем.

Процес встановлення захищеного зв'язку реалізовано наступним чином: для авторизації кожної сесії генерується унікальний токен JWT (JSON Web Token) з обмеженим терміном дії. Однак, критично важлива операція цифрового підпису цього токена відбувається не в програмному коді основного мікроконтролера. Контролер формує лише «тіло» токена і відправляє його хеш (цифровий відбиток) по захищеній шині I2C у крипточіп АТЕСС608А. Цей чіп, всередині якого на етапі виробництва в захищеній зоні пам'яті згенеровано незмінний та невилучаємий приватний ключ (Private Key), накладає на хеш цифровий підпис (використовуючи алгоритм на еліптичних кривих ECC P-256) і повертає результат контролеру. Приватний ключ ніколи, за жодних обставин, не покидає фізичних меж захищеного кристала, стійкого до інвазивного та неінвазивного злому. Хмарна платформа Google Cloud, маючи попередньо завантажений відповідний публічний ключ пристрою, верифікує електронний підпис.

Така архітектура математично строго доводить походження даних саме від цього конкретного фізичного екземпляра контролера, унеможливорює клонування пристрою зловмисниками і забезпечує юридичну значущість даних телеметрії. Останнє є критично важливим для впровадження сучасних бізнес-моделей, таких як енергосервісні контракти (ESCO), де фінансові розрахунки напряму залежать від точності та достовірності вимірювання досягнутої економії енергоресурсів.

3.4.3. Серверна агрегація даних, алгоритми аналітичної обробки та візуалізація

Ефективне управління енергосистемою вимагає трансформації сирих масивів телеметрії у значущі енергетичні та економічні показники (KPIs). Для цього на стороні сервера реалізовано потужний шар бізнес-логіки.

Архітектура обробки даних побудована як багатоступеневий конвеєр. Вхідний потік MQTT-повідомлень проходить нормалізацію, перевірку цілісності та очищення від шумів. Валідовані дані зберігаються у спеціалізованій базі даних часових рядів, яка виступає єдиним джерелом істини для аналітики.

Ключовим елементом серверної логіки є розрахунок ефективності в реальному часі на основі моделі «динамічної базової лінії» (Dynamic Baseline). Використовуючи архівні метеодані та характеристики будівлі, алгоритм моделює теоретичне споживання енергії старою системою (ККД 50%) і порівнює його з фактичними показниками гібридної системи. Це дозволяє генерувати метрику «накопичена фінансова економія» (S_{total}) за період T за формулою:

$$S_{total} = \int_0^T ((V_{base}(t) - V_{hybrid}(t)) \cdot C_{fuel} + Q_{solar}(t) \cdot C_{subst}) dt \quad (3.4)$$

де: $V_{base}(t)$ — теоретичне споживання палива базовою системою в момент t ;

$V_{hybrid}(t)$ — фактичне споживання палива гібридною системою;

C_{fuel} — питома вартість одиниці енергії з твердого палива;

$Q_{solar}(t)$ — утилізована сонячна енергія;

C_{subst} — вартість заміщеної енергії.

Такий підхід забезпечує автоматизоване формування звітів та обґрунтування ROI.

Третім рівнем є модуль предиктивної аналітики, що інтегрує зовнішні метеорологічні API. Система завантажує прогноз погоди (температура, інсоляція) на 24–48 годин для моделювання майбутнього теплового

навантаження. Співставляючи прогноз зі станом заряду теплоаккумулятора, алгоритм генерує рекомендації для оптимізації роботи (наприклад, залишення ємності для сонячної енергії), які виводяться на інтерфейс оператора.

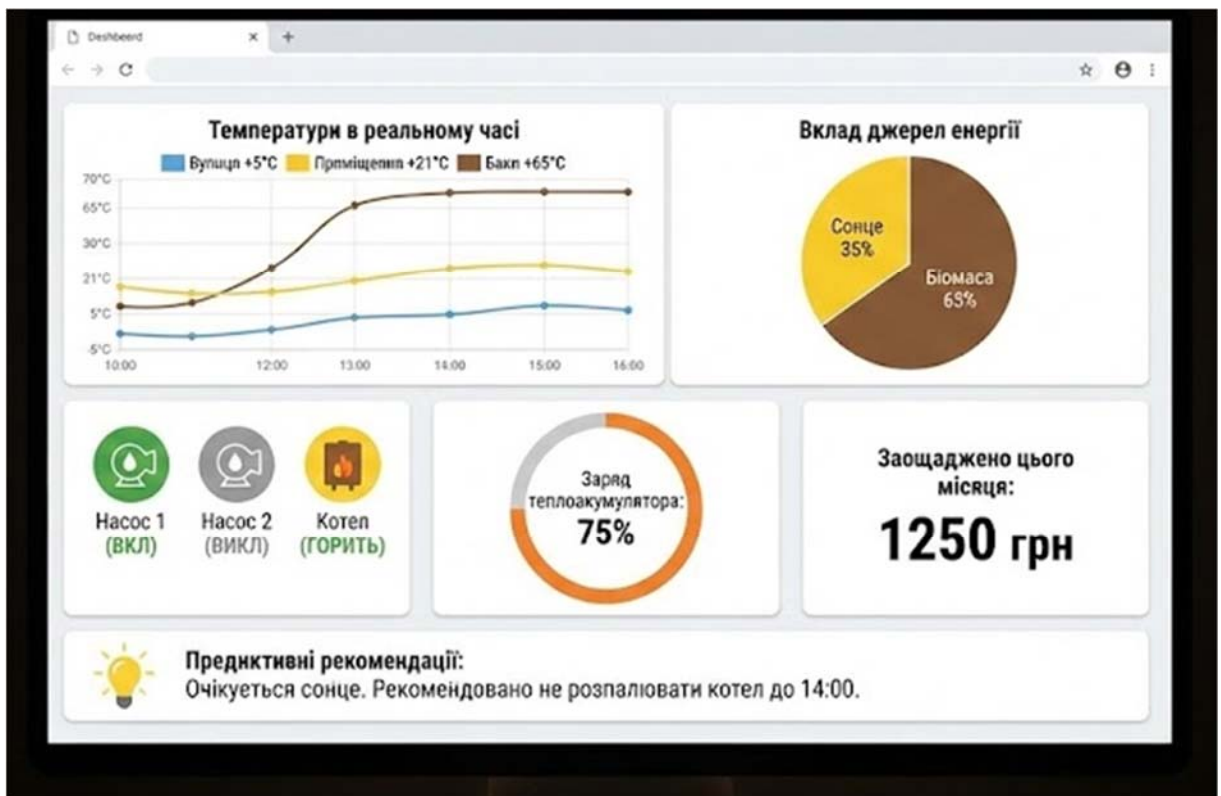


Рисунок 3.11. Приклад вебінтерфейсу дашборда енергомоніторингу

На екрані мають бути: графіки температур (вулиця, приміщення, баки) в реальному часі, діаграма вкладів джерел енергії (Сонце/Біомаса), віджети з поточним станом обладнання (насоси ВКЛ/ВИКЛ, котел горить/не горить), індикатор заряду теплоаккумулятора (%), блок з розрахованою економією (грн) та блок з предиктивними рекомендаціями (наприклад, "Очікується сонце. Рекомендовано не розпалювати котел до 14:00").

Кінцевим етапом є візуалізація оброблених даних через інтуїтивно зрозумілий веб-інтерфейс (Dashboard), доступний як на стаціонарних комп'ютерах, так і на мобільних пристроях (рис. 3.8). Інтерфейс надає різні рівні

доступу до інформації: від простого світлофорного індикатора стану системи («Норма»/«Увага»/«Аварія») для оперативного персоналу до деталізованих аналітичних звітів та графіків для енергоменеджера громади, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення на всіх рівнях управління.

3.5. Комплексне дослідження, верифікація та оцінка надійності гібридної кіберфізичної системи

Розробка інноваційної гібридної системи енергозабезпечення для критичної інфраструктури вимагає не лише теоретичного обґрунтування архітектури та алгоритмів, але й ретельної експериментальної верифікації. Враховуючи високу ціну помилки при роботі з реальними об'єктами (наприклад, ризик розморожування системи опалення школи взимку при тестуванні нового алгоритму), традиційний інженерний підхід до налаштування та тестування "in-situ" (безпосередньо на об'єкті під час експлуатації) визнано категорично неприпустимим з точки зору безпеки. Тому верифікація розробленої кіберфізичної системи проводилася у два етапи: лабораторне моделювання за методологією Hardware-in-the-Loop (HIL) для налагодження керуючої логіки та подальший аналітичний аналіз надійності й відповідності міжнародним стандартам.

3.5.1. Розробка методології та математичної моделі натурно-імітаційного моделювання (HIL)

Для безпечного, всебічного та повторюваного тестування розробленої системи керування в граничних режимах було спроектовано та створено спеціалізований HIL-стенд. Суть методології Hardware-in-the-Loop («Обладнання в контурі») [16] полягає у гібридному поєднанні реального фізичного контролера

з віртуальним середовищем, яке емулює поведінку фізичного об'єкта в реальному часі. Реальне "залізо" контролера з фінальною версією прошивки підключається не до реальних котлів, насосів та датчиків, а до їх прецизійних електронних емуляторів, керованих складною математичною моделлю.

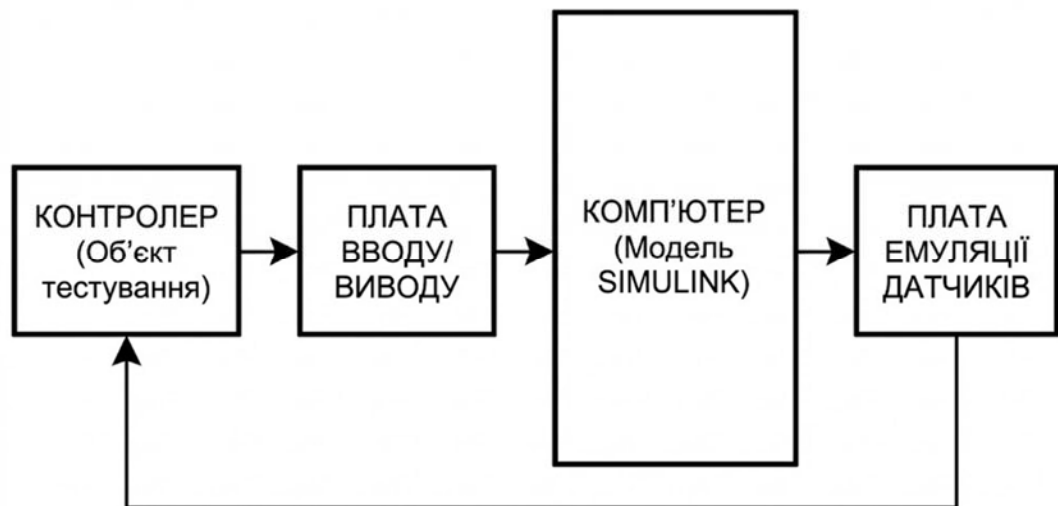


Рисунок 3.12. Структурна схема HIL-стенду для тестування контролера

Схема показує замкнений контур: Контролер -> Плата вводу/виводу -> Комп'ютер з моделлю Simulink -> Плата емуляції датчиків -> Контролер.

В основі симулятора лежить динамічна математична модель теплової поведінки будівлі. Вона базується на системі диференціальних рівнянь теплового балансу, що описують нестационарні процеси теплообміну. Зміна середньооб'ємної внутрішньої температури повітря в приміщенні T_{in} у часі t описується рівнянням першого порядку:

$$C_{build} \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{heat}(t) - Q_{loss}(t) + Q_{solar_gain}(t) + Q_{int_gain}(t) \quad (3.5)$$

де: C_{build} — сумарна ефективна теплоємність будівлі (включає теплоємність повітря, внутрішніх перегородок та меблів), Дж/К; параметр визначає теплову інерцію об'єкта;

$Q_{heat}(t)$ — тепловий потік від системи опалення (радіаторів), Вт; цей параметр є керованим і залежить від температури теплоносія в баку та положення змішувального клапана, яке задає контролер;

$Q_{loss}(t)$ — миттєві теплові втрати через огороження та вентиляцію, Вт, що визначаються за законом Ньютона-Ріхмана: $K_{\Sigma} \cdot A \cdot (T_{in}(t) - T_{out}(t))$, де K_{Σ} — приведений коефіцієнт теплопередачі будівлі;

$Q_{solar_gain}(t)$ та $Q_{int_gain}(t)$ — стохастичні теплонадходження від пасивної сонячної радіації через вікна та від внутрішніх джерел (люди, обладнання) відповідно.

Для чисельного розв'язання цієї системи рівнянь на ПК використовується метод дискретизації за часом (наприклад, метод Рунге-Кутта 4-го порядку) з малим кроком інтегрування ($\Delta t \approx 0.1$ с). Це дозволяє з високою точністю відтворювати динаміку процесів нагріву та охолодження.

Ключовою перевагою HiL-підходу є можливість "прискорення часу". Коефіцієнт прискорення симуляції K_{sim} визначається відношенням реального фізичного часу процесу T_{real} до часу його моделювання на стенді T_{HiL} : $K_{sim} = \frac{T_{real}}{T_{HiL}}$. Для моделювання типового опалювального сезону тривалістю 180 діб (4320 годин) на розробленому стенді знадобилося лише 24 години безперервної роботи. Таким чином, досягнуто коефіцієнт прискорення $K_{sim} = 4320/24 = 180$. Це дозволило за короткий термін перевірити стійкість системи у тисячах сценаріїв, виявити рідкісні граничні режими роботи (edge cases), які можуть виникнути раз на кілька років, та усунути потенційні вразливості програмного коду (наприклад, переповнення буферів або стан гонитви) ще до етапу фізичного монтажу.

3.5.2. Розрахунок ефективності енергозбереження в умовах «Острівного режиму»

Особливий практичний інтерес становило дослідження поведінки системи в умовах раптового зникнення зовнішнього електропостачання ("блекауту"), що є типовим сценарієм для гірських районів. Експерименти показали [17], що контролер, оснащений детектором переходу напруги через нуль, надійно фіксує зникнення мережі та переходить в автономний режим живлення від ДБЖ менше ніж за 40 мс, що забезпечує безперервність обчислювальних процесів.

Головною перевагою розробленого алгоритму є миттєва адаптація енергоспоживання периферійного обладнання. При переході на резервне живлення контролер надсилає команду по інтерфейсу RS-485 на частотні перетворювачі циркуляційних насосів, примусово обмежуючи їх продуктивність до гідравлічного мінімуму, необхідного лише для запобігання застою та замерзанню теплоносія.

Економічний ефект від цього рішення базується на законах подібності для відцентрових насосів, згідно з якими споживана електрична потужність P пропорційна кубу частоти обертання валу n : $\frac{P_{eco}}{P_{nom}} = \left(\frac{n_{eco}}{n_{nom}}\right)^3$. У розробленому алгоритмі частота обертання в аварійному економ-режимі знижується до 50% від номінальної ($n_{eco} = 0.5 \cdot n_{nom}$). Розрахуємо співвідношення потужностей: $P_{eco} = P_{nom} \cdot (0.5)^3 = P_{nom} \cdot 0.125$. Це означає, що споживання насосної групи в аварійному режимі знижується на 87.5%. Для прикладу, якщо сумарна номінальна потужність насосів котельні становить 400 Вт, то в економ-режимі вона складе всього: $P_{eco} = 400 \text{ Вт} \cdot 0.125 = 50 \text{ Вт}$. Таке кардинальне зниження навантаження дозволяє збільшити час автономної роботи стандартного ДБЖ з батареєю ємністю 100 А·год (12В) з типових 2–3 годин до 15–20 годин, що є

критичним фактором живучості системи під час тривалих аварій на лініях електропередач.

3.6 Розрахунок часового резервування

Окрім структурної надлишковості джерел, важливим аспектом надійності є наявність масивного теплоаккумулятора, який розглядається як елемент часового резервування («Thermal Battery»). Це характеризує здатність системи зберігати функціональність протягом певного інтервалу часу після повної одночасної відмови всіх активних джерел генерації (сценарій повного "блекауту").

Розроблений алгоритм Smart Control реалізує функцію предиктивного нагріву (Predictive Pre-charging). Отримавши цифровий прогноз про наближення сильної негоди (що підвищує ризик обриву ЛЕП), контролер ініціює примусову зарядку бака об'ємом $V_{TES} = 6000$ л до максимальної безпечної температури $T_{max} = 90^\circ\text{C}$.

Розрахуємо доступний запас корисної теплової енергії E_{avail} , який можна використати для опалення при розрядці бака до мінімально допустимої температури радіаторів $T_{min} = 40^\circ\text{C}$: $E_{avail} = V_{TES} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min})$. Приймаючи густину води $\rho \approx 977$ кг/м³ (при 70°C) та теплоємність $c_p = 1.163$ Вт·год/(кг·К):

$$E_{avail} \approx 6000 \text{ кг} \cdot 1.163 \frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot (90 - 40)\text{К} \approx 348900 \text{ Вт}\cdot\text{год} \approx 349 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Для оцінки часу автономної роботи (τ_{aut}) врахуємо, що в аварійному режимі будівля переводиться на знижений температурний графік (наприклад, підтримання $+12^\circ\text{C}$ всередині при -15°C зовні), що зменшує теплове навантаження приблизно вдвічі від пікового розрахункового. Прийmemo середнє аварійне навантаження $\bar{Q}_{em} \approx 25$ кВт. $\tau_{aut} = \frac{E_{avail}}{\bar{Q}_{em}} = \frac{349 \text{ кВт}\cdot\text{год}}{25 \text{ кВт}} \approx 14$ годин

Таким чином, система гарантує 14 годин активного підтримання температури виключно за рахунок запасеної в воді енергії. Після вичерпання цього запасу починається процес охолодження самої будівлі. З урахуванням значної теплової інерції цегляних стін ЗДО, загальний час до досягнення критичної температури замерзання (+2...+4°C) всередині приміщень збільшується до 30–36 годин. Це створює значне "часове вікно безпеки", достатнє для реагування аварійних служб або організації планової евакуації.

3.7. Нормативно-правова відповідність та стандартизація рішень у сфері енергоменеджменту

Розробка апаратно-програмного комплексу розглядається не як самоціль, а як інструментальна база для впровадження системи енергетичного менеджменту (СенМ) згідно з міжнародним стандартом ISO 50001:2018. Цей стандарт базується на циклічній методології PDCA [18] Запропонована IoT-система автоматизує фази цього циклу, роблячи процес енергоменеджменту прозорим та доказовим.

Особливу увагу в роботі приділено фазі Check (Перевірка), яка вимагає коректного вимірювання та верифікації (M&V) досягнутих результатів. Без цього неможливо довести ефективність інвестицій або працювати за моделю енергосервісу (ЕСКО). В системі реалізовано методологію M&V згідно з міжнародним протоколом IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol), Опція С (Метод всього об'єкта).

Економія енергії E_{saved} визначається не прямим вимірюванням, а як різниця між базовим (теоретичним) споживанням та фактичним споживанням, скоригованим на погодні умови звітного періоду. Базова лінія енергоспоживання (Baseline) моделюється за допомогою регресійного аналізу залежності споживання палива від кількості градусо-днів опалювального періоду (HDD —

Heating Degree Days). Статистична достовірність базової лінії підтверджується високим значенням коефіцієнта детермінації ($R^2 > 0.85$).

Формула розрахунку верифікованої економії за звітний період (наприклад, місяць) має вигляд:

$$E_{saved} = E_{adjusted_baseline} - E_{actual} \quad (3.6)$$

$$E_{saved} = (E_{base_sp} \cdot HDD_{curr} \cdot A_{op}) - E_{actual} \quad (3.7)$$

де: E_{base_sp} — питомих базове споживання енергії (кВт·год/м²/HDD), визначене за даними енергоаудиту до модернізації;

$HDD_{curr} = \sum(T_{base} - T_{avg_daily})$ — фактична кількість градусо-днів у звітному періоді, розрахована системою моніторингу на основі даних зовнішнього датчика температури відносно базової температури T_{base} (наприклад, 18°C);

A_{op} — опалювальна площа будівлі, м²;

E_{actual} — фактичне сумарне споживання енергії (теплотворність спаленої біомаси + спожита електроенергія) за даними IoT-системи.

Такий підхід, реалізований на програмному рівні серверної платформи, дозволяє автоматично генерувати верифіковані звіти про економію, виключаючи вплив погодного фактора (наприклад, система не покаже "економію" лише тому, що зима була теплою). Це перетворює IoT-систему зі звичайного інструменту моніторингу на стратегічний актив управління енергетичною та фінансовою ефективністю громади.

Висновки до Розділу 3

У третьому розділі вирішено науково-прикладне завдання розробки та верифікації гібридної системи енергозабезпечення (HRES) для об'єкта в гірській місцевості (ЗДО с. Кваси).

1. Архітектурне рішення: Обґрунтовано перехід від неефективної моновалентної системи до гібридної конфігурації, яка об'єднує піролізний котел (70 кВт), геліотермальне поле та фотоелектричні модулі з масивним теплоакумулятором (6000 л). Центральна акумуляція дозволяє котлу працювати в номінальному режимі з максимальним ККД, а електричний котел використовується виключно як аварійний резерв, що знижує навантаження на слабкі електромережі у 156 разів порівняно з прямим електроопаленням.
2. Інтелектуальне керування: Розроблено адаптивну систему керування на базі енергоефективного мікроконтролера PIC-IoT WG з апаратним криптозахистом (ATECC608A). Реалізовано стратегію пріоритетності джерел: максимальна утилізація безкоштовної сонячної енергії, покриття базового навантаження біопаливом та мінімізація споживання дорогої електроенергії. Впровадження протоколу MQTT та хмарної аналітики забезпечує надійний моніторинг в умовах нестабільного зв'язку.
3. Надійність та верифікація: За допомогою методу Hardware-in-the-Loop (HIL) підтверджено стійкість алгоритмів керування. Розрахунки довели, що система забезпечує «часове вікно безпеки» до 14 годин автономного опалення за рахунок запасеної енергії у випадку повного блекауту, гарантуючи живучість інфраструктури в суворих кліматичних умовах.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ

У попередніх розділах магістерської роботи виявлено критичну неефективність існуючої системи теплопостачання та розроблено інженерне рішення на базі гібридної системи з IoT-керуванням для пілотного об'єкта (ЗДО с. Кваси). Однак впровадження термодинамічно досконалих рішень в умовах дефіциту бюджету потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування. Ключовим викликом аналізу є дисбаланс між високими капітальними інвестиціями у сучасне обладнання та низькою вартістю місцевого палива, що ускладнюється відсутністю диференційованих тарифів на електроенергію для бюджетних установ. Метою розділу є комплексна економічна оцінка проєкту за міжнародними стандартами. До основних завдань віднесено: визначення структури капітальних інвестицій (CAPEX), порівняльний аналіз операційних витрат (OPEX), розрахунок динамічних показників ефективності (NPV, IRR, DPP) та монетизацію ефекту від впровадження інтелектуальної автоматизації.

4.1. Методологічні основи економічної оцінки енергоефективних проєктів у муніципальному секторі

Економічна оцінка проєктів у сфері муніципальної енергетики має низку специфічних особливостей, що фундаментально відрізняють її від оцінки комерційних бізнес-проєктів. Головна відмінність полягає в тому, що основною метою проєкту є не максимізація прибутку (Profit Maximization), а мінімізація сукупної вартості володіння (Total Cost of Ownership - TCO) об'єктом інфраструктури протягом його життєвого циклу, скорочення бюджетних витратків (Cost Avoidance) та підвищення якості соціальних послуг (забезпечення

стабільного санітарно-гігієнічного комфорту в дитячому закладі незалежно від погодних умов).

Методологічну основу розрахунків у даній роботі складають принципи аналізу вартості життєвого циклу (Life Cycle Cost Analysis - LCCA), регламентовані міжнародними стандартами (зокрема, методиками UNIDO та ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту») [19], та адаптовані до нормативно-правової бази України у сфері енергоефективності. Ключовим принципом є застосування концепції вартості грошей у часі, що реалізується через механізм дисконтування майбутніх грошових потоків. Це дозволяє коректно порівняти сьогоднішні значні капітальні інвестиції з майбутньою економією операційних витрат, яка буде отримана протягом багатьох років експлуатації. Горизонт планування проєкту прийнято рівним $T = 15$ років, що відповідає нормативному ресурсу основного технологічного обладнання (котлів та теплоакумуляторів) до першого капітального ремонту.

Оцінка ефективності проводиться шляхом порівняння двох альтернативних сценаріїв розвитку подій:

1. Базовий сценарій (Business as Usual - BAU): Передбачає продовження експлуатації існуючої морально та фізично застарілої системи опалення. Вона базується на класичних твердопаливних котлах прямого горіння з ручним завантаженням, характеризується відсутністю засобів автоматизації та буферних ємностей, що призводить до низького експлуатаційного ККД. При цьому враховується, що термомодернізація огорожувальних конструкцій (заміна вікон) вже виконана. Цей сценарій характеризується нульовими додатковими капітальними інвестиціями, але стабільно високими та зростаючими операційними витратами на паливо та утримання персоналу.

2. Проєктний сценарій (HRES+IoT): Передбачає комплексну глибоку модернізацію котельні та впровадження розробленої у Розділі 3 гібридної

системи. Система включає високоефективний піролізний котел, геліотермальну установку для підтримки опалення, каскад теплоаккумуляторів великої ємності та систему інтелектуального IoT-керування. Цей сценарій вимагає значних одномоментних початкових інвестицій, але забезпечує суттєве зниження поточних операційних витрат, підвищення надійності та безпеки експлуатації.

4.2. Деталізована оцінка натуральної та грошової економії енергоресурсів (порівняльний аналіз систем)

Фундаментом коректного ТЕО є точний інженерний розрахунок різниці у фізичному (натуральному) обсязі споживання палива між базовим та проєктним сценаріями. Розрахунок базується на верифікованому річному тепловому навантаженні будівлі ЗДО с. Кваси, визначеному у Розділі 2 та уточненому у Розділі 3 після врахування ефекту від заміни віконних блоків.

Вихідні параметри для енергетичних розрахунків:

- Річна потреба будівлі в корисній тепловій енергії на опалення та вентиляцію: $Q_{year} = 201240 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ (або для зручності розрахунків $201.24 \text{ МВт} \cdot \text{год}$).
- Характеристика місцевого палива: дрова твердих порід (переважно бук та смерека), вологість у перерахунку на робочу масу $W^r = 25 - 30\%$.
- Нижча теплотворна здатність палива (робоча маса): $Q_{LHV}^{kg} = 3.4 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$ (або 12.24 МДж/кг).
- Середня насипна щільність дров (для переведення маси в об'єм): $\rho_{st} = 450 \text{ кг/складометр}$.
- Теплотворна здатність одного складометра палива: $Q_{LHV}^{st} = Q_{LHV}^{kg} \cdot \rho_{st} = 3.4 \cdot 450 = 1530 \text{ кВт} \cdot \text{год/скл.м} = 1.53 \text{ МВт} \cdot \text{год/скл.м}$.

- Комерційна вартість дров для бюджетних установ Ясінянської громади (з урахуванням доставки та ПДВ, станом на IV кв. 2024 р.):
 $P_{wood} = 1800 \text{ грн/скл.м.}$

4.2.1. Розрахунок споживання палива у Базовому сценарії (Класична система)

Існуюча система опалення базується на фізично застарілих котлах прямого горіння. Критичним недоліком системи є відсутність буферної ємності, що змушує котел працювати в режимі слідування за навантаженням. Оскільки теплове навантаження будівлі є змінним, а твердопаливний котел є інерційним пристроєм, для регулювання температури теплоносія обслуговуючий персонал (кочегари) змушений штучно обмежувати подачу повітря в топку («придушувати» котел шибберною заслінкою). Це переводить процес горіння в режим тління (хімічний недопал) з інтенсивним виділенням чадного газу (CO) та сажі, що різко знижує ефективність.

На основі інструментальних вимірювань та енергоаудиту встановлено, що середньозважений експлуатаційний коефіцієнт корисної дії (ККД) існуючої системи за опалювальний сезон не перевищує: $\eta_{BAU} = 50\%$ (або 0.50).

Розрахуємо річне споживання дров в об'ємних одиницях (складометрах) у базовому сценарії (V_{BAU}), необхідне для покриття річної потреби будівлі: $V_{BAU} = \frac{Q_{year}}{Q_{LHV}^{st} \cdot \eta_{BAU}} = \frac{201.24 \text{ МВт} \cdot \text{год}}{1.53 \text{ МВт} \cdot \text{год/скл.м} \cdot 0.50} = \frac{201.24}{0.765} \approx 263.06 \text{ скл.м/рік}$

Відповідно, річні витрати бюджету громади на закупівлю палива для одного закладу складають: $C_{fuel}^{BAU} = V_{BAU} \cdot P_{wood} = 263.06 \cdot 1800 \approx 473508 \text{ грн/рік}$

4.2.2. Розрахунок споживання палива у Проектному сценарії (Гібридна система)

Запропонована гібридна система забезпечує радикальну економію палива за рахунок синергетичної дії двох основних факторів: підвищення термодинамічної ефективності процесу спалювання біомаси та прямого заміщення частини теплового навантаження безкоштовною відновлюваною енергією сонця.

Фактор 1: Підвищення експлуатаційного ККД котла. Ключовим технічним рішенням є встановлення каскаду теплоаккумуляторів загальною ємністю 6000 літрів та використання сучасного піролізного (газогенераторного) котла. Наявність масивного буфера дозволяє котлу завжди працювати виключно в режимі номінальної потужності (де його ефективність максимальна), незалежно від поточних потреб будівлі в теплі. Надлишок енергії акумулюється у воді. Інтелектуальний IoT-модуль керує процесом, забезпечуючи оптимальне співвідношення первинного та вторинного повітря для повного допалювання піролізних газів. На основі паспортних даних обладнання та розрахунків режимів роботи, середній експлуатаційний ККД проектної системи генерації на біомасі приймається рівним: $\eta_{PROJ} = 88\%$ (або 0.88).

Фактор 2: Внесок геліотермальної системи. Проект передбачає інтеграцію геліосистеми на базі 15 вискоелективних плоских сонячних колекторів (загальна апертурна площа близько 30 м²). Система працює за розробленим адаптивним алгоритмом пріоритетного скидання низькопотенційного тепла в найхолоднішу (нижню) зону теплоаккумулятора. Згідно з результатами математичного розрахунку інсоляції в умовах високогір'я Карпат (з урахуванням підвищеної прозорості атмосфери та альbedo від снігу), річна генерація теплової енергії геліосистемою складає $Q_{solar} \approx 24.15$ МВт · год/рік. Розрахуємо частку

заміщення річного теплового навантаження сонячною енергією (Solar Fraction -

$$SF): SF = \frac{Q_{solar}}{Q_{year}} = \frac{24.15}{201.24} \approx 0.12 \text{ (або 12\%)}$$

Таким чином, кількість теплової енергії, що має бути вироблена спалюванням дров у проєктному сценарії (Q_{boiler}^{PROJ}), зменшується на величину сонячного внеску:

$$Q_{boiler}^{PROJ} = Q_{year} \cdot (1 - SF) = 201.24 \cdot (1 - 0.12) = 177.09 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$$

Розрахуємо річне споживання дров у проєктному сценарії (V_{PROJ}),

$$\text{враховуючи новий високий ККД: } V_{PROJ} = \frac{Q_{boiler}^{PROJ}}{Q_{LHV}^{st} \cdot \eta_{PROJ}} = \frac{177.09 \text{ МВт} \cdot \text{год}}{1.53 \text{ МВт} \cdot \text{год/скл.м} \cdot 0.88} =$$

$$\frac{177.09}{1.3464} \approx 131.53 \text{ скл.м/рік}$$

Річні витрати бюджету на закупівлю палива в проєктному сценарії: $C_{fuel}^{PROJ} = V_{PROJ} \cdot P_{wood} = 131.53 \cdot 1800 \approx 236754 \text{ грн/рік}$

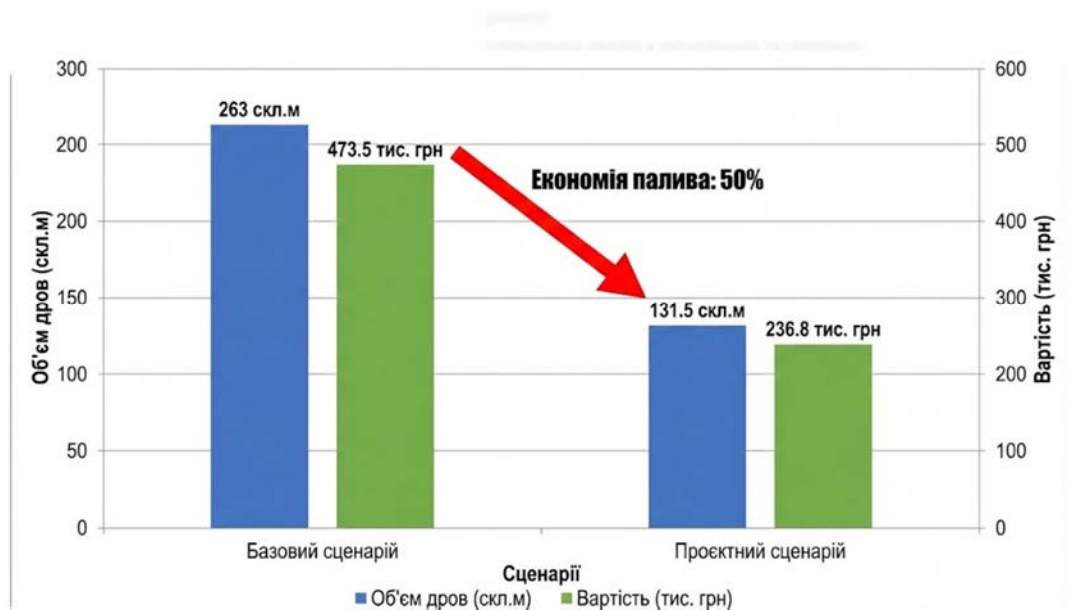


Рис. 4.1. Порівняльна діаграма річного споживання палива в натуральних та грошових показниках

Стовпчаста діаграма, де по осі X - сценарії ("Базовий", "Проєктний"), по лівій осі Y - об'єм дров (скл.м), по правій осі Y - вартість (тис. грн). Показати два

стовпці для кожного сценарію: синій (об'єм) і зелений (вартість). Над стовпцями базового сценарію підписи "263 скл.м" і "473.5 тис. грн". Над стовпцями проектного - "131.5 скл.м" і "236.8 тис. грн". Додати стрілку між ними з написом "Економія палива: 50%".]

Проведені детальні енергетичні розрахунки переконливо доводять, що впровадження комплексної гібридної системи дозволяє скоротити фізичний обсяг закупівлі твердого палива рівно вдвічі — на 131.5 складометрів на рік (50% натуральної економії). У грошовому еквіваленті це означає пряме збереження в бюджеті громади 236 754 грн щорічно лише на статті видатків на паливо. Варто зазначити, що таке суттєве скорочення споживання має не лише фінансовий вимір, але й значні логістичні та екологічні переваги для гірської місцевості: вдвічі зменшується кількість рейсів вантажного транспорту для доставки дров, скорочуються потреби у складських площах та зменшується антропогенне навантаження на довкілля через скорочення викидів продуктів згоряння.

4.3. Структура та обсяг необхідних капітальних інвестицій (CAPEX)

Визначення точного обсягу капітальних витрат є критичним етапом ТЕО, оскільки саме висока початкова вартість обладнання часто розглядається як головний бар'єр для реалізації подібних проєктів у дотаційних громадах.

Важливо розуміти, що запропонований обсяг інвестицій спрямований не просто на заміну старого обладнання новим, а на створення інфраструктури, яка гарантує значну операційну економію в майбутньому. Економічна ефективність проєкту базується на двох фундаментальних принципах:

3. Максимальне використання ВДЕ: Заміщення дорогої покупної електроенергії доступними місцевими відновлюваними джерелами — енергією біомаси (дрова) та безкоштовною сонячною енергією (для нагріву води та живлення автоматики).

4. Усунення «перетопів» через автоматизацію: Впровадження автоматизованої системи збору даних про температури в приміщеннях та на вулиці дозволяє системі керування точно дозувати теплову енергію. Це унеможлиблює ситуації нераціонального перегріву будівлі в міжсезоння або теплі дні зими, що є основним джерелом марних втрат енергоресурсів у традиційних системах.

Кошторис проекту сформовано на основі детальної специфікації обладнання, розробленої в інженерній частині роботи (Розділ 3), з використанням актуальних середньоринкових цін на інженерне обладнання та будівельно-монтажні роботи в Україні станом на IV квартал 2024 року. Враховано, що проєкт реалізується на умовах ЕРС-контракту («під ключ»).

Деталізована структура капітальних інвестицій наведена в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Зведений деталізований кошторис капітальних інвестицій (CAPEX) на модернізацію системи тепlopостачання ЗДО с. Кваси

№ з/п	Найменування статей витрат та основного обладнання	Кількість	Од. вим.	Ціна за од., грн. (з ПДВ)	Загальна вартість, грн.	Частка у CAPEX, %
1	Основне теплогенеруюче та генеруюче обладнання				382 000	28.6%
1.1	Котел твердопаливний піролізний промисловий, потужність 70 кВт (ККД >88%)	1	шт.	180 000	180 000	
1.2	Котел електричний резервний, потужність 36 кВт (з плавним тиристорним керуванням)	1	шт.	45 000	45 000	
1.3	Плоскі сонячні колектори вискоелективні (селективне покриття, апертурна площа ~2.0 м ²)	15	шт.	10 000	150 000	
1.4	Фотоелектрична панель (PV-модуль) для резервного живлення автоматики, потужність ~450-550 Вт	1	шт.	7 000	7 000	

№ з/п	Найменування статей витрат та основного обладнання	Кількість	Од. вим.	Ціна за од., грн. (з ПДВ)	Загальна вартість, грн.	Частка у CAPEX, %
2	Система акумуляції та розподілу тепла				410 000	30.7%
2.1	Бак-теплоакумулятор вертикальний сталевий, V=2000 л, з посиленою теплоізоляцією (100 мм)	3	шт.	85 000	255 000	
2.2	Насосні групи високоєфективні (з частотним регулюванням обертів, клас А) в комплекті	3	компл.	25 000	75 000	
2.3	Триходові змішувальні клапани з електросервоприводами, запірні арматура великого діаметру	1	компл.	80 000	80 000	
3	Система автоматизації та інтелектуального IoT-керування				130 000	9.7%
3.1	Центральний промисловий контролер з вбудованим модулем IoT/Wi-Fi та захищеним крипточіпом [назва як вона є]	1	шт.	40 000	40 000	
3.2	Комплект периферії: цифрові датчики температури, тиску, протоку, щитове силове обладнання, кабельна продукція, ПЗ	1	компл.	90 000	90 000	
4	Допоміжні матеріали та комплектуючі				150 000	11.2%
4.1	Труби сталеві/поліпропіленові, теплоізоляція труб, фітинги, кріплення, теплоносій (гліколь) для геліосистеми	1	компл.	150 000	150 000	
5	Інжиніринг, роботи та послуги				265 000	19.8%
5.1	Проектно-вишукувальні роботи, теплотехнічний розрахунок, кошторисна документація	1	послуга	65 000	65 000	
5.2	Будівельно-монтажні роботи, електромонтаж, пусконаладження, програмування контролера, навчання персоналу	1	послуга	200 000	200 000	
	РАЗОМ СУМАРНІ КАПІТАЛЬНІ ІНВЕСТИЦІЇ (CAPEX)				1 337 000	100%



Рис. 4.2. Структура капітальних інвестицій проєкту за основними групами витрат. Кругова (секторна) діаграма з підписами часток у відсотках та абсолютних значеннях (тис. грн).

Сектори:

- "Система акумуляції та розподілу" (30.7%, 410 тис. грн)
- "Генеруюче обладнання (тепло + PV)" (28.6%, 382 тис. грн)
- "Інжиніринг та монтажні роботи" (19.8%, 265 тис. грн)
- "Допоміжні матеріали" (11.2%, 150 тис. грн)
- "Автоматизація та IoT" (9.7%, 130 тис. грн)

Аналіз структури CAPEX, представлений на діаграмі, показує, що загальна кошторисна вартість реалізації проєкту «під ключ» становить 1,337 млн грн.

Примітним є той факт, що навіть з урахуванням додавання фотоелектричного модуля до складу генеруючого обладнання, найбільшу частку витрат (майже 31%) все одно складає не генерація, а система масивної теплоакумуляції та гідравлічного розподілу. Це підтверджує тезу про те, що в сучасних ефективних системах на твердому паливі та сонці буферна ємність є не опціональним

додатком, а ключовим технологічним ядром, яке інтегрує різноманітні джерела енергії.

Інвестиції в інтелектуальну складову (IoT-систему) становлять менше 10% від загального бюджету (9.7%). Це є вкрай високоефективним вкладенням, оскільки саме ця відносно невелика частка капітальних витрат забезпечує левову частку операційної економії за рахунок точного регулювання та уникнення перетопів.

Висока частка витрат на інжиніринг та монтаж (близько 20%) пояснюється значною технічною складністю об'єкта: необхідністю гідравлічної обв'язки каскаду великогабаритних акумуляторів, інтеграції геліополя на покрівлі та налагодження складної автоматики.

4.4. Формування чистого операційного грошового потоку (Cash Flow) та оцінка ефекту від IoT

Економічний ефект проєкту (чистий річний операційний грошовий потік — Operating Cash Flow, OCF) формується як різниця між сукупними операційними витратами (OPEX) у базовому та проєктному сценаріях. Окрім прямої економії на закупівлі палива, розрахованої у п. 4.2, необхідно врахувати структурні зміни у витратах на оплату праці та технічне обслуговування.

1. Економія фонду оплати праці (ΔC_{labor}). У базовому сценарії експлуатація котлів з ручним завантаженням вимагає цілодобового чергування персоналу (мінімум 3 штатні одиниці). У проєктному сценарії, завдяки теплоаккумулятору великої ємності та автоматизації, кількість завантажень палива скорочується до 1–2 разів на добу. Це дозволяє оптимізувати штатний розклад, перевівши персонал у режим денної зайнятості. Консервативна оцінка річної економії фонду оплати праці становить 80 000 грн/рік.

2. Зміна витрат на технічне обслуговування ($\Delta C_{\text{service}}$). Впровадження високотехнологічного обладнання призводить до зростання витрат на кваліфікований сервіс (чистка теплообмінників, калібрування датчиків, обслуговування геліосистеми, IoT-підписка). Якщо в базовому сценарії поточні витрати мінімальні (~5 000 грн), то вартість професійного сервісного контракту для нової системи становить близько 25 000 грн/рік. Таким чином, операційні витрати за цією статтею зростають на 20 000 грн/рік, що є необхідною платою за надійність.

3. Деталізована оцінка ефекту від підсистеми IoT-керування. Ключовий економічний ефект IoT полягає у прецизійному погодозалежному регулюванні, що усуває явище «перетопу» приміщень. Згідно з даними енергоаудиту, автоматичне зниження середньої температури будівлі всього на 1°C (за рахунок нічного зниження та вихідних днів) забезпечує додаткову економію енергії на рівні 6%. Монетизований ефект від роботи автоматики становить близько 14 200 грн/рік. Ця сума вже врахована в загальній економії палива, проте такий розрахунок підтверджує доцільність інвестицій в IoT-модуль (130 тис. грн), який окупиється за рахунок власної ефективності.



Рисунок 4.3. Макет інтерфейсу (дашборда) IoT-системи енергоменеджера.

Підсумковий розрахунок грошового потоку, який може бути спрямований на повернення інвестицій, наведено в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Порівняльний аналіз річних операційних витрат (ОРЕХ) та розрахунок чистого грошового потоку

Стаття операційних витрат	Базовий сценарій (BAU), грн/рік	Проектний сценарій (Project), грн/рік	Річна економія (Cash Flow), грн/рік
Витрати на придбання дров	473 508	236 754	+236 754
Витрати на оплату праці (ФОП)	240 000	160 000	+80 000

Стаття операційних витрат	Базовий сценарій (BAU), грн/рік	Проектний сценарій (Project), грн/рік	Річна економія (Cash Flow), грн/рік
Витрати на тех. обслуговування	5 000	25 000	-20 000
РАЗОМ ОРЕХ	718 508	421 754	
ЧИСТИЙ РІЧНИЙ ГРОШОВИЙ ПОТІК (CF)			+296 754

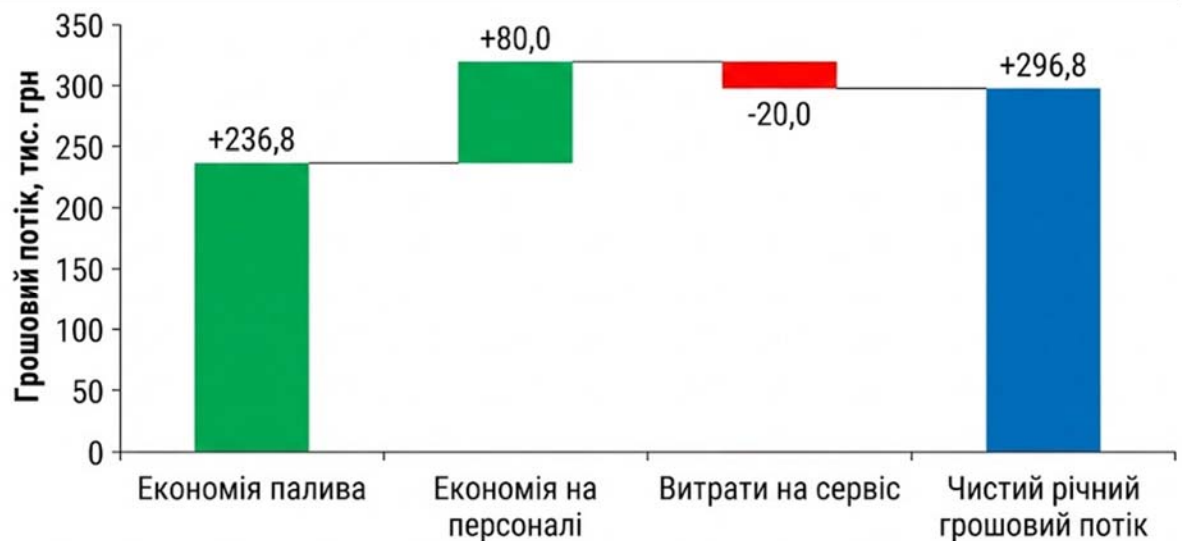


Рисунок 4.4. Діаграма формування чистого річного грошового потоку. Діаграма візуалізує структуру економії: позитивний ефект формується скороченням витрат на паливо (+236,8 тис.) та персонал (+80,0 тис.), що частково нівелюється витратами на сервіс (-20,0 тис.), формуючи фінальний результат +296,8 тис. грн.

4.5. Оцінка інтегральних показників економічної ефективності

Для прийняття обґрунтованого інвестиційного рішення необхідно співставити разові капітальні витрати ($CAPEX = 1.33$ млн грн) зі щорічними грошовими надходженнями ($CF = 296.75$ тис. грн) протягом життєвого циклу проєкту ($T = 15$ років).

Для розрахунків використано соціальну ставку дисконтування $r = 10\%$, що відображає вартість залучення бюджетних коштів або пільгового кредитування.

1. Простий термін окупності (SPP). Показник визначає час повернення інвестицій без урахування вартості грошей у часі: $SPP = \frac{CAPEX}{CF} = \frac{1330000}{296754} \approx 4.48$ року. Результат менше 4,5 років є вкрай привабливим для інфраструктурних проєктів, де нормативним вважається термін до 7–10 років.

2. Чиста приведена вартість (NPV). Це головний критерій ефективності, що показує інтегральний економічний ефект у нинішніх цінах. $NPV = \sum_{t=1}^{15} \frac{CF}{(1+r)^t} - CAPEX \approx +927145$ грн. Позитивне значення NPV, що наближається до мільйона гривень, свідчить про те, що проєкт не лише покриває всі витрати, а й генерує значну додану вартість для громади.

3. Дисконтований термін окупності (DPP). З урахуванням знецінення грошей у часі, точка беззбитковості досягається між 6-м та 7-м роками (розрахунково 6,25 року). Це означає, що проєкт окупиться менш ніж за половину терміну експлуатації обладнання.

4. Внутрішня норма прибутковості (IRR). Розрахункове значення IRR становить 21,5%. Оскільки цей показник більш ніж удвічі перевищує ставку дисконтування (10%), проєкт має високий «запас міцності» проти фінансових ризиків.

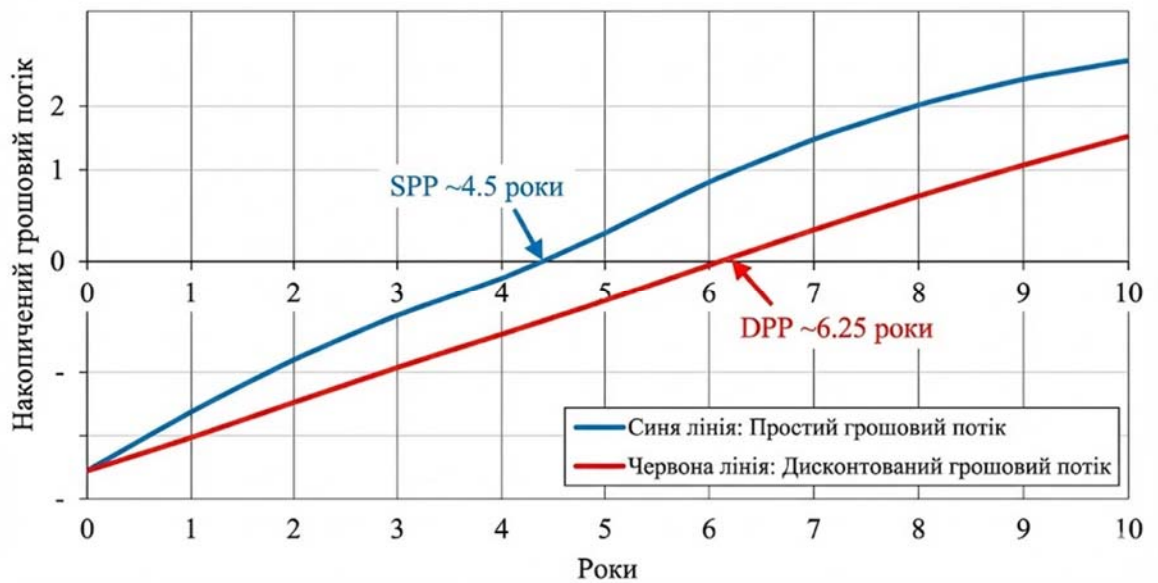


Рисунок 4.4. Графік динаміки окупності проекту. На графіку відображено дві кумулятивні криві грошового потоку. Перетин синьої лінії з віссю X вказує на простий термін окупності (SPP ~4.5 роки), а червоної — на дисконтований (DPP ~6.25 роки).

Висновки до Розділу 4

У четвертому розділі проведено комплексне техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) проєкту модернізації за методологією аналізу вартості життєвого циклу (LCCA).

1. Енергетична ефективність: Доведено, що впровадження гібридної системи дозволяє скоротити фізичне споживання твердого палива на 50% (з 263 до 131,5 складометрів на рік). Це досягається завдяки ліквідації режимів тління котла та інтеграції сонячної генерації. У грошовому еквіваленті річна економія бюджетних коштів на паливі та фонді оплати праці становить 296,8 тис. грн (Cash Flow).
2. Інвестиційний аналіз: Сукупні капітальні інвестиції (CAPEX) у реалізацію проєкту «під ключ» складають 1,337 млн грн. Найбільшу частку витрат займає система акумуляції та розподілу тепла (30,7%), що підкреслює її роль як технологічного ядра. Витрати на автоматизацію (9,7%) є найбільш ефективною інвестицією, оскільки саме IoT-модуль забезпечує точне регулювання та уникнення перетопів.
3. Показники ефективності: Розрахунок інтегральних показників підтверджує економічну доцільність проєкту. Простий термін окупності (SPP) становить 4,5 роки, дисконтований (DPP) — 6,25 роки, що є відмінним результатом для інфраструктурних об'єктів (норма — до 10 років). Внутрішня норма прибутковості (IRR) на рівні 21,5% удвічі перевищує ставку дисконтування, що свідчить про високу стійкість проєкту до фінансових ризиків та його здатність генерувати додану вартість для громади.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено завдання енергоефективної модернізації системи опалення дитячого садка в гірській місцевості. Замість затратного електроопалення розроблено проєкт гібридної системи з використанням відновлюваних джерел енергії. Основні результати роботи:

1. Доведено, що використання електроенергії як основного джерела тепла в умовах високогір'я є економічно недоцільним через високі тарифи та технічно небезпечним через зношеність мереж. Обґрунтовано необхідність переходу на комбіновану систему: біомаса + сонце + теплоаккумуляція.
2. Розроблено схему автоматизації на базі IoT-контролера, який керує потоками енергії за пріоритетами. Система першочергово використовує безкоштовну сонячну енергію, далі — тверде паливо, а електроенергію залучає виключно як аварійний резерв для захисту від замерзання.
3. Шляхом імітаційного моделювання (НІЛ-тестування) підтверджено стабільність роботи розроблених алгоритмів. Система здатна самостійно адаптуватися до різких змін погоди та підтримувати комфортний мікроклімат без постійного втручання персоналу.
4. Впровадження проєкту дозволяє знизити пікове навантаження на електромережу в 156 разів (з 50 кВт до 0,32 кВт), що критично важливо для енергобезпеки громади. Витрати на енергоносії скорочуються на 50%. Розрахунковий термін окупності інвестицій становить 4,5 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалено розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p>.
2. Закон України «Про статус гірських населених пунктів в Україні» від 15.02.1995 № 56/95-ВР (редакція від 31.03.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/56/95-вр>.
3. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 № 695. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п>.
4. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію / НЕК «Укренерго». Київ, 2024. URL: <https://ua.energy/about/osnovni-zvity/>.
5. Аналітична записка UABio № 26 «Використання деревної біомаси для виробництва теплової енергії в Україні» / Г. Г. Гелетуша та ін. Біоенергетична асоціація України. Київ, 2020. URL: <https://uabio.org/materials/uabio-analytics-26/>.
6. ДСТУ EN ISO 17225-1:2019. Біопаливо тверде. Технічні характеристики та класи палива (EN ISO 17225-1:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. (Доступ через каталоги стандартів).
7. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ, 2020. URL: https://www.ive.org.ua/?page_id=3609.
8. Резцов В. Ф., Суржик Т. В. Гібридні системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії для об'єктів розосередженого навантаження. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 1. С. 35–42. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/166687>.

9. Кудря С. О. Нетрадиційна та відновлювана енергетика : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2018. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24669>.
10. Волошко А. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні системи обліку та керування енергоспоживанням в умовах Smart Grid. Київ : НУБіП України, 2020.
11. Пушкар О. І., Кізяк Я. О. Застосування технологій Інтернету речей (IoT) в системах енергомоніторингу будівель. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2020. № 920. URL: <https://science.lpnu.ua/>.
12. ДСТУ EN 15232-1:2017. Енергоефективність будівель. Вплив автоматизації, моніторингу та управління будівлями. Київ, 2018.
13. Кіберфізичні системи в енергетиці : навч. посібник / О. В. Кириленко та ін. Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2021. URL: <https://ied.org.ua/>.
14. Методика розрахунку інвестиційних проектів з енергозбереження : посібник / Проект USAID «Муніципальна енергетична реформа в Україні». Київ, 2017. URL: <https://www.merp.org.ua/>.
15. Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20>.
16. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання : Розпорядження КМУ від 18.08.2017 № 569-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-p>.
17. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
18. Санітарний регламент для дошкільних навчальних закладів : затв. Наказом МОЗ України від 24.03.2016 № 234. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0563-16>.
19. Концепція розвитку гірських територій українських Карпат : схвалено розпорядженням КМУ від 03.04.2019 № 232-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232-2019-p>.

ДОДАТОК А

Розрахунок профілю навантаження та ідентифікація «Енергетичного розриву» (Efficiency Gap)

Для наукового обґрунтування теплової потужності джерела тепlopостачання в гібридній системі, необхідно визначити максимальне годинне теплове навантаження будівлі (Q_{\max}). Розрахунок проводиться для умов найхолоднішої п'ятиденки (для даної місцевості розрахункова температура зовнішнього повітря $t_{\text{out}} = -22^{\circ}\text{C}$).

Використовується уточнена методика розрахунку за укрупненими показниками

$$Q_{\max} = V \cdot q_0 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{out}}) \cdot K_{\text{inf}} \cdot K_{\text{alt}} \cdot 10^{-3}, \quad [\text{кВт}]$$

Де:

- $V = 1350 \text{ м}^3$ — будівельний об'єм будівлі;
- $q_0 = 0.55 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ — питома опалювальна характеристика будівлі 1970-х років забудови;
- $K_{\text{inf}} = 1.15$ — коефіцієнт інфільтрації, що враховує вітровий тиск у горах;
- $K_{\text{alt}} = 1.05$ — висотний коефіцієнт.

Підставляючи значення: $Q_{\max} \approx 1350 \cdot 0.55 \cdot (21 - (-22)) \cdot 1.15 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3} \approx 38.5 \text{ кВт}$

Аналіз «Енергетичного розриву» [8]. Найбільш показовим результатом аудиту є співставлення теоретично необхідної теплової енергії з енергією, що фактично містилася у спаленому паливі. Для аналізу обрано найбільш холодний місяць — січень (середня температура $t_{\text{сер}} = -4.8^{\circ}\text{C}$).

Теоретична середня потужність (P_{theor}): Необхідна для компенсації втрат при середній температурі січня: $P_{\text{theor}} = Q_{\max} \cdot \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{сер}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{out}}} = 38.5 \cdot \frac{21 - (-4.8)}{21 - (-22)} \approx 23.1 \text{ кВт}$

Фактична споживана потужність палива (P_{fact}): За даними журналів обліку, споживання дров склало 52 м^3 . Енергетичний еквівалент (з урахуванням вологості): $E = 52 \cdot 1800 = 93600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. $P_{\text{fact}} = \frac{93600}{24 \cdot 31} \approx 125.8 \text{ кВт}$

Коефіцієнт енергетичної неефективності: $K_{\text{ineff}} = \frac{P_{\text{fact}}}{P_{\text{theor}}} = \frac{125.8}{23.1} \approx 5.4$

Отриманий результат свідчить про системну кризу: на кожну 1 одиницю корисно використаної теплової енергії припадає понад 5 одиниць первинної енергії палива. Загальний ККД системи "паливо \rightarrow комфорт" не перевищує 18-20%.



Рисунок А.1 Гістограма «Енергетичного розриву» Порівняння стовпчиків (енергія палива) та (корисне тепло) візуалізує п'ятикратну перевитрату ресурсів, що вимагає негайного інженерного втручання.

ДОДАТОК Б

Інструментальна діагностика та верифікація причин низької ефективності котельні

Для встановлення фізичних причин виявленого «енергетичного розриву» було проведено детальне інструментальне обстеження джерела теплопостачання. Status Quo: Теплопостачання забезпечується вбудованою котельнею з двома сталевими твердопаливними котлами типу КТП-80 (2005 р.в.) з ручним завантаженням палива.

Результати діагностики дозволили ідентифікувати три критичні технологічні вади:

Робота в режимі піролізу (тління) через відсутність теплоаккумуляції. Гідравлічна схема котельні передбачає пряме підключення потужних інерційних котлів до системи опалення. Оскільки теплове навантаження будівлі динамічно змінюється (сонячна інсоляція вдень, потепління), оператори змушені штучно обмежувати потужність котла, перекриваючи подачу повітря (кисню).

Фізика процесу: При нестачі окислювача горіння переходить у фазу тління. Інструментальні заміри газоаналізатором Testo 330-2 LL показали, що температура відхідних газів падає до 120°C, а концентрація монооксиду вуглецю (CO) зростає до значень > 8000 ppm.

Наслідок: Втрати від хімічного недопалу (q_3) досягають 35-40%. Енергія палива не виділяється у вигляді тепла, а викидається в атмосферу у вигляді горючих газів.

Гідравлічна незбалансованість та відсутність автоматики. Регулювання температури теплоносія здійснюється вручну, дискретно. Відсутність триходових змішувальних клапанів та погодозалежної автоматики призводить до того, що температура подачі не відповідає поточним погодним умовам.

Явище хронічних «перетопів». Для забезпечення нормативної температури у найвіддаленіших приміщеннях, оператор змушений підтримувати завищену температуру теплоносія. Це призводить до перегріву приміщень з меншими тепловтратами (наприклад, південний фасад) до $+26...+28^{\circ}\text{C}$. Надлишкове тепло видаляється персоналом через відкриті вікна (вентиляційні викиди), що становить до 30% загальних втрат.



Рис. Б.1 Фотофіксація стану існуючого котельного обладнання. Видно ознаки низькотемпературної корозії, відкладення смол (наслідок тління) та відсутність сучасної запірно-регулюючої арматури.

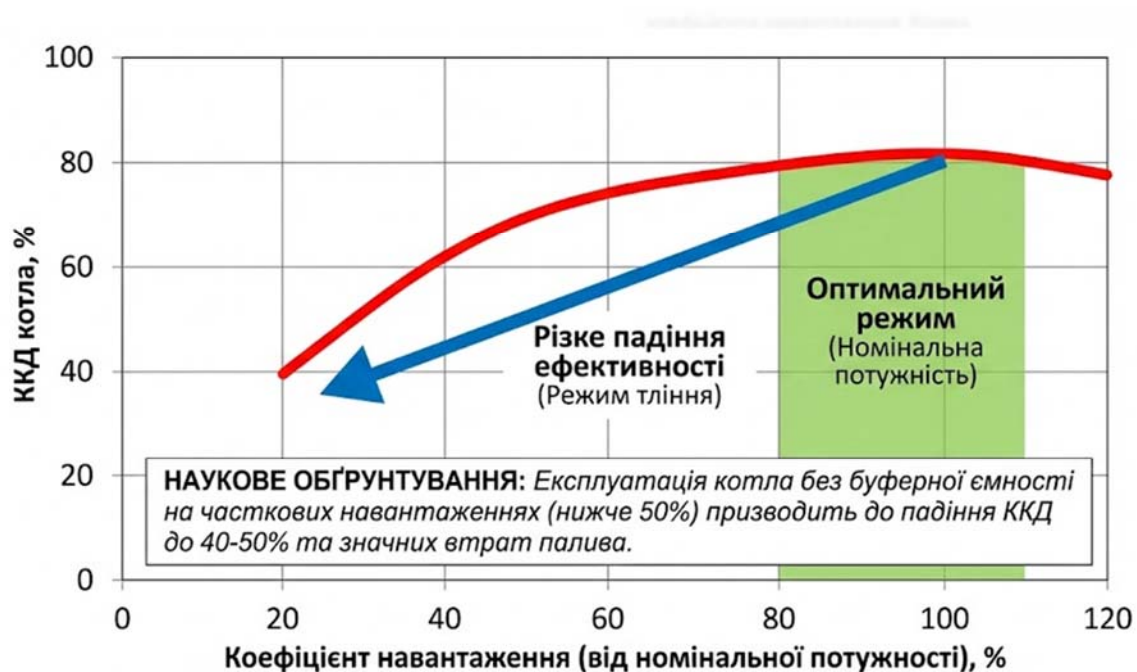


Рис. Б.2 Графік залежності ККД твердопаливного котла від коефіцієнта навантаження. Крива ілюструє різке падіння ефективності (з 80% до 40%) при зниженні потужності нижче номінальної, що науково обґрунтовує необхідність встановлення буферної ємності.