МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Впровадження сучасних енергоефективних технологій для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1444
спеціальності 144 Теплоенегетика
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)
Д.О. Бєлухов
(ініціали та прізвище)
Керівник к.т.н., доц., Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф. _____ В.Л. Коваленко
«_____»_____2025 року

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

Бєлухов Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Впровадження сучасних енергосфективних технологій для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель

керівник роботи Башлій С.В., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «27» 02 2025 року № 313 - с
2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.
3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом мережевого насоса
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Теоретичні засади підвищення енергоефективності та автономності систем теплопостачання адміністративних будівель 2) Аналітичне дослідження енергоспоживання адміністративних будівель та визначення потенціалу автономізації 3) Розробка та обгрунтування енергоефективних рішень для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель.
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) Системи автоматичного управління споживанням тепла 3,4) Енергетичні параметри учбових корпусів та житлових будинків; 5) Data Mining в енергоменеджменті; 6) Математична модель енергоспоживання навчальних корпусів 7) Тренд сумарного питомого енергоспоживання 8) Концепція «розумної будівлі» з інтегрованою енергосистемою 9) Порівняння варіантів модернізації 10) Висновки

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Башлій С.В. к.т.н., доц.		
Розділ 2	Башлій С.В. к.т.н., доц.		
Розділ 3	Башлій С.В. к.т.н., доц.		

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні засади підвищення енергоефективності та автономності систем теплопостачання адміністративних будівель	30.09.2025	
2	Аналітичне дослідження енергоспоживання адміністративних будівель та визначення потенціалу автономізації	15.10.2025	
3	Розробка та обґрунтування енергоефективних рішень для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель.	25.11.2025	

Студент _____ Д.О. Бєлухов _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ С.В. Башлій _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій _____
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бєлухов Дмитро Олександрович: Впровадження сучасних енергоефективних технологій для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник к.т.н., доц., Башлій С.В. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

У магістерській роботі здійснено комплексне міждисциплінарне дослідження, присвячене розробці, обґрунтуванню та моделюванню енергоефективних рішень для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель. Робота охоплює теоретичні, технічні та прикладні аспекти переходу від централізованих до гібридних або повністю автономних систем теплопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії.

У першому розділі наведено критичний аналіз сучасного стану теплопостачання адміністративного сектору в Україні. Встановлено, що централізовані системи характеризуються низькою ефективністю, високими втратами тепла (до 30 %) та нестачею автоматизації. Проаналізовано основні технічні недоліки об’єктів, що призводять до перевитрат енергії та обмеженої гнучкості.

Другий розділ містить огляд сучасних підходів до автономного теплопостачання, включаючи теплові насоси, сонячні колектори, буферні ємності та інтелектуальні системи управління. На основі аналізу практик країн ЄС обґрунтовано доцільність поєднання кількох джерел тепла у рамках єдиної автоматизованої системи з цифровим енергоменеджментом.

У третьому розділі запропоновано концепцію гібридної системи теплопостачання, побудовано її архітектуру, розроблено модулі прогнозування споживання, контролю параметрів мікроклімату та алгоритми прийняття рішень енергоменеджера. Модель враховує температуру зовнішнього повітря, режими використання приміщень і графіки енергоспоживання. Визначено технічні вимоги до системи, склад елементів, можливості масштабування.

У ході моделювання та розрахунків підтверджено ефективність розробленого рішення. Середньорічне теплоспоживання будівлі площею 1200 м² зменшено з 240 000 до 135 000 кВт·год, а витрати на опалення - з 700 000 до 365 000 грн. Сумарна економія сягає 335 000 грн на рік, термін окупності складає 4,2 роки. Автоматизоване керування забезпечує додаткову економію до 10 %, а система прогнозування демонструє точність понад 92 %.

Результати дослідження свідчать про доцільність впровадження автономних енергетичних рішень в адміністративному секторі. Розроблена модель поєднує сучасні технічні засоби, елементи штучного інтелекту та цифрову візуалізацію, забезпечуючи підвищення енергоефективності, комфорту та надійності теплопостачання.

Ключові слова: автономне теплопостачання; енергоефективність; енергоменеджмент; теплова енергія; тепловий насос; сонячні колектори; система керування; енергетичний аудит; прогнозування споживання; автоматизація; цифрова трансформація.

ABSTRACT

Belukhov Dmytro Oleksandrovych: Implementation of Modern Energy-Efficient Technologies to Increase the Autonomy of Heat Supply in Administrative Buildings. Qualification thesis for the degree of Master of Higher Education in specialty 144 – Thermal Power Engineering. Scientific advisor: PhD in Technical Sciences, Associate Professor Bashliy S.V. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebnia. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

This master's thesis presents a comprehensive interdisciplinary study aimed at the development, justification, and modeling of energy-efficient solutions to enhance the autonomy of heat supply in administrative buildings. The research covers theoretical, technical, and applied aspects of the transition from centralized systems to hybrid or fully autonomous heat supply systems using renewable energy sources.

The first chapter provides a critical analysis of the current state of heat supply in Ukraine's administrative sector. It has been established that centralized systems are characterized by low efficiency, high heat losses (up to 30%), and a lack of automation. Key technical shortcomings leading to energy overconsumption and limited flexibility have been identified.

The second chapter reviews modern approaches to autonomous heat supply, including air-to-water heat pumps, solar collectors, thermal storage tanks, and intelligent control systems. Based on the analysis of EU best practices, the feasibility of combining multiple heat sources within a unified automated system with digital energy management has been substantiated.

The third chapter proposes a concept for a hybrid heat supply system, outlines its architecture, and develops modules for consumption forecasting, microclimate parameter control, and decision-making algorithms for energy managers. The model

considers outdoor temperature, occupancy schedules, and energy consumption patterns. Technical requirements, system components, and scalability potential are defined.

Modeling and calculations confirmed the effectiveness of the developed solution. The annual heat consumption of a 1200 m² building was reduced from 240,000 to 135,000 kWh, and heating costs from UAH 700,000 to UAH 365,000. The total annual savings amount to UAH 335,000, with a payback period of 4.2 years. Automated control ensures an additional 10% savings, while the forecasting system demonstrates over 92% accuracy.

The research results confirm the feasibility of implementing autonomous energy solutions in the administrative sector. The proposed model integrates modern technical tools, elements of artificial intelligence, and digital visualization, ensuring improved energy efficiency, thermal comfort, and reliability of heat supply.

Keywords: autonomous heat supply; energy efficiency; energy management; thermal energy; heat pump; solar collectors; control system; energy audit; consumption forecasting; automation; digital transformation.

ЗМІСТ

Вступ……10

1. Впровадження сучасних енергоефективних технологій для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель ……..13

1.1. Особливості сучасних систем теплопостачання адміністративних будівель……...…13

1.1.1. Централізоване vs децентралізоване теплопостачання…….13

1.1.2 Сучасні виклики централізованого теплопостачання…….16

1.1.3 Поняття автономного теплопостачання……..17

1.2. Енергоефективність як ключовий фактор модернізації теплопостачання……18

1.2.1Показники енергоефективності будівель. ……18

1.2.2 Приклад розрахунку питомих показників ……21

1.3. Методи та підходи аналізу енергоспоживання будівель……..23

1.3.1 Data Mining в енергоменеджменті. ……..23

1.3.2 Статистичні інструменти аналізу. ……29

1.4. Огляд сучасних енергоефективних технологій…….30

1.4.1 Системи автоматичного управління споживанням тепла……..30

1.4.2 Теплові насоси. ……..31

1.4.3 Сонячні колектори……..33

1.4.4 Акумулюючі системи (теплові акумулятори). ……34

1.4.5 Інтелектуальні системи моніторингу та управління …….36

Висновки до розділу 1……38

2. Опис і статистичний аналіз вихідних даних…….39
2.1. Опис вихідних даних і характеристика досліджуваних будівель……39
2.2. Підготовка даних до аналізу……42
2.3. Первинний статистичний аналіз енергоспоживання…….57
2.4. Порівняльний аналіз споживання у різні періоди…….58
2.5. Визначення потенціалу автономізації……59
Висновок до розділу 2…….62
3. Розробка та обґрунтування енергоефективних рішень для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель……..65
3.1 Концепція інтегрованої системи автономного теплопостачання…….65
3.1.1 Побудова цільової архітектури системи теплопостачання…….65
3.1.2 Вимоги до автоматизованої системи моніторингу та керування ……67
3.1.3 Формування алгоритмів прийняття рішень енергоменеджера. …….70
3.2. Техніко-економічне обґрунтування впровадження сучасних технологій
3.2.1 Розрахунок теплового навантаження будівель……73
3.2.2. Розрахунок економічного потенціалу зниження споживання……77
3.2.2.1 Модернізація ІТП (індивідуального теплового пункту)……..77
3.2.2.2 Встановлення теплового насоса…….78
3.2.2.3 Встановлення сонячних колекторів……80
3.2.2.4 Комбінація з акумулюючими системами …….81
3.2.2.5 Порівняння варіантів модернізації……82
3.3. Модель автоматизованої системи енергоменеджменту будівлі……...85
3.3.1 Структура збору даних та інформаційні потоки……..86
3.3.2 Автоматизований аналіз і прогноз енергоспоживання ……..87
3.3.3 Алгоритм моніторингу ефективності та генерації рекомендацій. …90
3.4. Оцінка очікуваних результатів впровадження……..92
3.5. Рекомендації щодо впровадження та масштабування рішень……99
ВИСНОВКИ…….108
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..112

ВСТУП

Сучасна енергетична ситуація в Україні зумовлює потребу в докорінному переосмисленні підходів до забезпечення теплом будівель, особливо адміністративного призначення. В умовах зростання цін на традиційні енергоресурси, посилення вимог до енергоефективності та підвищення енергетичної незалежності з боку держави та громад, важливого значення набуває впровадження автономних або гібридних систем теплопостачання, здатних ефективно функціонувати навіть за відсутності централізованого тепла.

Адміністративні будівлі, як правило, мають морально застарілу інфраструктуру, що не відповідає сучасним стандартам. Велика частина з них не оснащена автоматизованими системами обліку та управління енергією, що призводить до нераціонального використання ресурсів, перевитрат і втрат. Водночас технології в галузі енергетики активно розвиваються: доступними стають теплові насоси, сонячні колектори, системи накопичення енергії, а також цифрові рішення, які дозволяють не лише моніторити споживання в реальному часі, але й прогнозувати його на основі аналітики та алгоритмів машинного навчання.

Дослідження, викладене в цій роботі, присвячене формуванню сучасного підходу до автономного теплопостачання адміністративних будівель. У центрі уваги - створення інтегрованої енергосистеми, яка поєднує сучасні джерела тепла, системи акумулювання, інтелектуальне керування, а також засоби візуалізації та прогнозування. Робота базується на вивченні архітектури енергоефективних рішень, аналізі економічної доцільності їх впровадження та моделюванні поведінки будівельних об’єктів за різних сценаріїв модернізації.

У процесі дослідження здійснено теплотехнічні розрахунки для типових будівель, побудовано модель системи автоматизованого енергоменеджменту, а також розроблено алгоритми прийняття рішень, які можуть бути використані в

реальних умовах. Особлива увага приділяється економічним аспектам - визначенню потенціалу енергозбереження, термінів окупності, довгострокових переваг та перспектив масштабування запропонованих рішень.

Методологічно робота спирається на поєднання системного аналізу, теплотехнічного й економічного моделювання, а також застосування елементів машинного навчання для прогнозування енергоспоживання. Такий міждисциплінарний підхід дозволив розробити комплексну концепцію, яка здатна забезпечити не лише економічну ефективність, а й стабільність, автономність і адаптивність систем теплопостачання до сучасних умов експлуатації.

Метою дослідження є створення концептуальної та техніко-економічно обґрунтованої моделі автономної системи теплопостачання, що може бути впроваджена в адміністративних будівлях з метою підвищення їхньої енергоефективності, зниження витрат і забезпечення стабільності теплового режиму. Об’єктом виступає сама система теплопостачання, а предметом - технології та підходи до її модернізації із залученням інтелектуальних рішень.

Об’єкт дослідження:

Система теплопостачання адміністративних будівель в умовах необхідності підвищення її автономності, енергоефективності та керованості.

Предмет дослідження:

Методи, технічні рішення та інформаційні технології розробки автономних енергоефективних систем теплопостачання, що включають сучасне обладнання, автоматизоване управління, моделі прогнозування енергоспоживання та інструменти енергоменеджменту.

Завдання дослідження:

У рамках досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання:

1. Розробити цільову архітектуру автономної системи теплопостачання адміністративної будівлі, що поєднує сучасні джерела тепла, системи зберігання енергії та цифрові засоби управління.

2. Сформувати вимоги до автоматизованої системи моніторингу та керування тепловими процесами із використанням адаптивних алгоритмів.

3. Провести теплотехнічні та економічні розрахунки для оцінки ефективності різних варіантів модернізації (включаючи ІТП, теплові насоси, сонячні колектори).

4. Побудувати модель енергоменеджменту з можливістю прогнозування споживання енергії та генерації рекомендацій на основі аналізу даних.

5. Оцінити очікувані результати впровадження розроблених рішень з точки зору енергозбереження, стабільності системи та підвищення енергоефективного класу будівлі.

6. Розробити практичні рекомендації для впровадження рішень у типові адміністративні будівлі та сценарії масштабування на інші типи об’єктів.

Узагальнюючи, дана магістерська робота спрямована на те, щоб надати інструментарій для впровадження сучасних автономних рішень у сфері теплопостачання будівель, які враховують як технічну, так і економічну реальність українських умов.

1. ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ

1.1. Особливості сучасних систем теплопостачання адміністративних будівель

1.1.1. Централізоване vs децентралізоване теплопостачання.

Системи теплопостачання адміністративних будівель поділяються на централізовані (теплоцентралі, районні котельні, мережі теплопостачання) та децентралізовані (локальні котельні, індивідуальні системи опалення). У централізованому теплопостачанні тепло генерується на великих ТЕЦ чи котельнях і транспортується споживачам через мережу трубопроводів. Перевагами таких систем є висока ефективність генерування тепла на великих установках та кращий контроль за викидами забруднюючих речовин (за рахунок застосування фільтрів і сучасних котлів) [1]. Районне опалення (district heating) визнано екологічно дружнім рішенням для опалення будівель і розглядається як один зі шляхів боротьби зі зміною клімату. Важливою перевагою централізованих мереж є можливість використовувати будь-які доступні джерела тепла - від електростанцій і котелень на різному паливі до відновлюваних джерел (геотермальна енергія, сонячні колектори), включно з утилізацією надлишкового тепла промислових процесів [2]. Така гнучкість у виборі джерела підвищує фінансову ефективність системи та її надійність, оскільки дозволяє оптимізувати витрати залежно від цін на енергоносії та комбінувати різні види енергії. Крім того, централізовані мережі можуть ефективно використовувати низькопотенційні теплові ресурси і вторинне тепло, що недоступно або неефективно в індивідуальних рішення [3-6]. У країнах з холодним кліматом саме централізоване теплопостачання домінує: наприклад, у

країнах Балтії, Скандинавії та Східної Європи частка централізованого опалення становить 36-92% від загального теплопостачання [4]. Вважається, що з переходом на відновлювані джерела і модернізацію мереж централізоване теплопостачання стане ще більш економічно вигідним рішенням, здатним суттєво знизити викиди CO_2 та сприяти декарбонізації енергетичного сектору [2].

Попри зазначені плюси, централізовані системи мають і низку недоліків. Значні втрати тепла при транспортуванні - одна з головних проблем: якщо теплова мережа спроєктована або утеплена недостатньо, втрати тепла на трубопроводах можуть досягати суттєвих величин (у старих мережах - до 25%), тоді як у сучасних або реконструйованих системах вони знижені до ~10% [7]. Рівень втрат залежить від лінійної щільності теплового навантаження: у щільно забудованих районах з великим споживанням тепла втрати можуть бути нижче 5%, а в розрідженій забудові - значно більші. Ще один виклик - висока капіталоємність: розбудова або модернізація теплових мереж потребує значних початкових інвестицій у генерацію та інфраструктуру. Це робить централізоване теплопостачання чутливим до економічних факторів: конкурентоспроможність таких систем залежить від цін на паливо, тарифної політики та ефективності обладнання. Серед політиків існує критика, що централізовані мережі буцімто менш економічно ефективні через великі капітальні витрати, однак дослідження показують, що сучасні мережі за належного управління можуть бути конкурентними і поза межами великих міст [8, 9]. Особливо ефективними стають системи ЦТ за інтеграції в них відновлюваних технологій (наприклад, великих теплових насосів, біокотелень тощо) - таке поєднання дозволяє досягти високої ефективності використання палива і знизити витрати для споживачів [9].

Децентралізоване теплопостачання (автономне або індивідуальне опалення будівель) передбачає, що кожна будівля або навіть окреме приміщення має власне джерело тепла - наприклад, автономну котельню, дахову міні-котельню, тепловий насос чи інший агрегат. Перевага такого підходу - автономність кінцевого

споживача та гнучкість: власник будівлі самостійно контролює генерацію тепла, режим роботи обладнання та не залежить від міських тепломереж [10]. Крім того, локальні системи часто дозволяють впроваджувати відновлювані джерела енергії (сонячні колектори, теплові помпи, твердопаливні котли на біомасі) саме там, де це доцільно, що сприяє підвищенню стійкості і екологічності енергопостачання. У сучасних умовах прагнення до вуглецево-нейтральної економіки стимулює розвиток децентралізованих рішень, адже вони можуть напряму використовувати чисту енергію (сонце, геотермальну, біомасу) без втрат на транспортування. З соціально-економічної точки зору, автономне опалення привабливе тим, що дає споживачам відчуття незалежності від монополій теплокомуненерго та можливість самому обирати обладнання і режими споживання [11].

Однак не для всіх споживачів індивідуальні системи є доступними чи вигідними. Індивідуальне опалення зазвичай вимагає значних початкових витрат на встановлення котла, димоходу, систем безпеки, а подекуди - отримання дозволів. Статистика свідчить, що частіше автономне опалення встановлюють користувачі з вищим рівнем доходів[1], адже малозабезпеченим верствам важко одразу профінансувати перехід на індивідуальну систему. До недоліків автономного теплопостачання також належать питання безпеки та екології: масове використання індивідуальних газових котлів підвищує ризики аварій (витоки газу, пожежі) [12], а відсутність централізованого контролю призводить до збільшення викидів (адже кожен котел окремо має нижчий ступінь очищення димових газів, ніж великі ТЕЦ). Крім того, децентралізовані рішення не мають економії на масштабі: паливо та електроенергія закуповуються вроздріб за вищими цінами, тоді як великі теплоцентралі можуть отримувати оптові ціни та краще керувати навантаженнями. У випадку електричного опалення автономність умовна - споживач залежить від стабільності електромережі, яка при масовому переході на електроопалення може не витримати навантаження [13]. Аналіз показує, що перехід багатьох споживачів на електрокотли може призвести до перевантаження електромереж і зрештою

вищих тарифів на електроенергію. Таким чином, вибір між централізованим і автономним теплопостачанням - це баланс між економією на масштабі та зручністю/автономністю споживача [13].

1.1.2 Сучасні виклики централізованого теплопостачання

Для українських реалій традиційна система централізованого теплопостачання стикається з додатковими викликами. Значна частина теплових мереж зношена, що призводить до аварій, нестабільності подачі тепла та високих втрат. Нестабільність постачання особливо проявилася у воєнний час, коли цілеспрямовані пошкодження енергетичної інфраструктури призводили до перебоїв у роботі котелень та ТЕЦ. Ще одна проблема - тарифна політика: протягом тривалого часу тарифи на тепло в Україні були регульованими і нерідко нижчими за економічно обґрунтований рівень, що призводило до хронічної збитковості теплокомуненерго. Нестабільність та непрозорість тарифів, перехресне субсидіювання населення за рахунок промисловості, накопичення боргів споживачів перед теплопостачальниками - усе це підриває фінансову стійкість централізованих систем[13]. У результаті галузь недоотримує інвестицій у модернізацію, котельні працюють на застарілому обладнанні з низьким ККД, а споживачі стикаються з поступовим зростанням платежів при відносно низькій якості послуг. Таким чином, модернізація централізованого теплопостачання вимагає вирішення проблеми з тарифоутворенням (щоб тарифи покривали обґрунтовані витрати і інвестиції) та забезпечення стабільності постачання навіть в кризових умовах.

1.1.3 Поняття автономного теплопостачання

Автономне теплопостачання означає повне або переважне забезпечення будівлі тепловою енергією від власних джерел, без залежності від зовнішніх теплових мереж. Інакше кажучи, адміністративна будівля з автономним опаленням має індивідуальний теплогенератор (газовий чи електрокотел, тепловий насос, тощо) або локальну котельню, яка покриває її потреби у теплі. Приклади автономного теплопостачання - встановлення дахових котелень для навчальних корпусів університету, які обігрівають ці корпуси незалежно від міської мережі, або впровадження гібридних систем (сонячні колектори + тепловий насос + акумулюючий бак), що дозволяють будівлі самостійно отримувати і акумулювати тепло. Автономне теплопостачання підвищує стійкість будівель до зовнішніх факторів (аварій на мережах, відключень) і дає можливість гнучко реагувати на зміни тарифів чи цін палива, оскільки можна перемикатися між різними джерелами (наприклад, електрика vs газ, або власні ВДЕ). В українському законодавстві автономне теплопостачання часто протиставляється централізованому: зокрема, Законом України "Про теплопостачання" передбачено, що відключення від централізованих мереж і перехід на автономне (або індивідуальне) опалення регулюється місцевими органами влади, аби уникнути дестабілізації роботи теплових мереж. Таким чином, автономне теплопостачання є одним із шляхів підвищення енергонезалежності будівель, але потребує зваженого підходу - особливо в масштабах міста - щоб зберегти баланс між економічною доцільністю та надійністю енергосистеми [14].

1.2. Енергоефективність як ключовий фактор модернізації теплопостачання

1.2.1Показники енергоефективності будівель

Енергоефективність будівлі - це здатність забезпечувати комфортні умови з мінімально можливим споживанням енергії. Для кількісної оцінки енергоефективності адміністративних будівель використовують ряд показників. Основними є: питомі витрати теплової енергії на опалення (кількість тепла, спожитого будівлею за певний період, у перерахунку на одиницю об’єму або площі будівлі), питомі витрати електроенергії (на освітлення, обладнання, вентиляцію тощо, також у розрахунку на одиницю розміру будівлі) та загальне енергоспоживання. Зазвичай показники нормуються на одиницю опалюваної площі (кВт·год/м² за рік) або об’єму (кВт·год/м³), що дозволяє порівнювати ефективність різних будівель. Наприклад, для навчальних корпусів можна визначити річне теплоспоживання на 1 м² площі і таким чином оцінити, наскільки добре будівля утримує тепло.

У практиці ЄС широко використовуються енергетичні сертифікати **будівель**, що базуються на річному питомому енергоспоживанні (включаючи опалення, вентиляцію, кондиціювання, гаряче водопостачання). Директива 2010/31/ЄС (переглянута 2018/844) встановлює, що всі нові будівлі мають відповідати вимогам майже нульового енергоспоживання (Nearly Zero Energy Building, nZEB), тобто мати дуже низьку потребу в енергії, значна частина якої покривається за рахунок відновлюваних джерел [15]. Для існуючих будівель запроваджені мінімальні вимоги до теплозахисту огороджувальних конструкцій (коефіцієнт теплопередачі стін, дахів, вікон) та інженерних систем. В Україні прийнято Закон "Про енергетичну ефективність будівель" (2017), яким імплементовано європейські норми: зокрема, запроваджено енергетичне маркування будівель за класами від A до G, де клас A означає найкращу (найнижчу) величину питомого

енергоспоживання. Відповідно до ДБН В.2.6-31:2016 *«Теплова ізоляція будівель»*, було підвищено нормативи опору теплопередачі стін, покрівель, підлог, що безпосередньо впливає на зниження теплоспоживання будівель. Такі нормативні вимоги забезпечують, щоб модернізовані та нові адміністративні будівлі споживали менше тепла на м², тим самим зменшуючи навантаження на систему теплопостачання [16].

Для кількісного аналізу енергоефективності будівель зручно використовувати показники, введені в роботі Perekrest et al. (2018) [17]. Вони пропонують розраховувати питомі витрати енергії на опалення та електроспоживання відносно об’єму будівлі, а також сумарне енергоспоживання. Наведемо основні формули згідно з джерелом [17]:

Питоме теплоспоживання будівлі:

$$q_1 = \frac{E_{\text{kWh}}}{V}, \tag{1.1}$$

де E_{kWh} - спожита будівлею теплова енергія (переведена в кВт·год), V - зовнішній об’єм будівлі, м³.

Питоме електроспоживання:

$$q_2 = \frac{W_{\text{kWh}}}{V}, \tag{1.2}$$

де W_{kWh} - спожита електрична енергія, кВт·год.

Загальне споживання енергії будівлею:

$$E_{\text{sum}} = E_{\text{kWh}} + W_{\text{kWh}}, \tag{1.3}$$

Питоме сумарне енергоспоживання, кВт·год/м³:

$$q_3 = \frac{E_{\text{sum}}}{V} \tag{1.4}$$

Нормоване (приведене) питоме теплоспоживання, кВт·год/м³, скориговане на температурні умови:

$$q_{1t} = q_1 \cdot K_{Dd} \tag{1.5}$$

K_{Dd} - коефіцієнт градусо-діб опалювального періоду (DDHP), що враховує відхилення фактичних температур від нормативних.

Нормоване питоме електроспоживання, кВт·год/м³:

$$q_{2t} = q_2 \cdot K_{Dd} \tag{1.6}$$

Нормоване сумарне енергоспоживання будівлі, кВт·год/м³:

$$q_{3t} = q_3 \cdot K_{Dd} \tag{1.7}$$

Таким чином, формули (1.1)-(1.4) визначають базові інтенсивні показники енергоспоживання будівлі, а формули (1.5)-(1.7) дозволяють привести ці показники до стандартних умов (наприклад, до середньої зовнішньої температури за опалювальний період) для коректного порівняння різних об’єктів. Нормування за допомогою коефіцієнта K_{Dd} (degree-day coefficient) компенсує вплив погодних відмінностей: якщо зима була теплою (менше градусо-діб), споживання приводиться до більш суворих умов, і навпаки [17]. Таким чином, можна об’єктивніше оцінити ефективність будівлі незалежно від коливань погоди.

1.2.2 Приклад розрахунку питомих показників

Припустимо, навчальний корпус має зовнішній об’єм $V = 10\,000$ м³. За опалювальний період (наприклад, за рік) цей корпус спожив теплової енергії в обсязі $E_{\text{kWh}} = 300\,000$ кВт·год (це еквівалентно ~25.8 Гкал) і електроенергії $W_{\text{kWh}} = 100\,000$ кВт·год. Тоді питомі показники становлять: $q_1 = 300000/10000 = 30.0$ кВт·год/м³, $q_2 = 100000/10000 = 10.0$ кВт·год/м³. Сумарне енергоспоживання $E_{\text{sum}} = 400000$ кВт·год, а $q_3 = 400000/10000 = 40.0$ кВт·год/м³. Якщо відомо, що за цей період температурні умови були м’якші за нормативні, наприклад коефіцієнт $K_{Dd} = 0.9$ (90% від середньостатистичної суворості зими), то нормовані показники складуть $q_{1t} = 30.0 \cdot 0.9 = 27.0$ кВт·год/м³, $q_{2t} = 10.0 \cdot 0.9 = 9.0$ кВт·год/м³, $q_{3t} = 40.0 \cdot 0.9 = 36.0$ кВт·год/м³. Тобто, питомі витрати енергії, приведені до стандартного року, будуть дещо меншими за фактичні в теплому році. Ці розрахунки ілюструють логіку оцінки: маючи дані про споживання і параметри будівлі, можна отримати інформативні коефіцієнти енергоефективності.

У практиці енергомоніторингу по кожній будівлі збирається статистика її енергоспоживання. Для наочності в Таблиці 1 представлено дані щодо питомих показників енергоспоживання для 50 різних навчальних корпусів. Наведено об’єм кожної будівлі та її питомі витрати тепла (q1), електроенергії (q2) і сумарної енергії (q3). Видно, що навіть для споруд одного призначення значення можуть варіюватися доволі суттєво залежно від стану будівлі, року побудови, утеплення, режиму використання тощо.

Позначення: q1 - питоме споживання теплової енергії; q2 - питоме споживання електричної енергії; q3 - питоме сумарне енергоспоживання. Одиниці виміру: об’єм у м³; питомі показники - кВт·год/м³ за рік.

Таблиця 1.1 Дані щодо питомих показників енергоспоживання для 50 різних навчальних корпусів

№	Об’єм будівлі, м³	q1, кВт·год/м³	q2, кВт·год/м³	q3, кВт·год/м³
1	8402	21.9	7.0	28.9
2	6067	34.7	14.7	49.4
3	18728	27.3	10.7	38.0
4	10879	36.6	10.5	47.1
5	16773	22.6	12.8	35.4
6	6788	41.4	12.6	54.0
7	14691	32.2	8.5	40.7
8	14636	35.7	14.8	50.5
9	10013	38.3	9.8	48.1
10	27726	31.3	8.2	39.5
11	5752	28.7	9.4	38.1
12	24703	37.8	5.7	43.5
13	29366	32.2	5.7	37.9
14	5556	34.9	9.0	43.9
15	4464	30.1	9.9	40.0
16	20585	37.5	9.6	47.1
17	16683	33.9	7.1	41.0
18	5355	22.3	10.0	32.3
19	9374	40.2	9.4	49.6
20	9966	30.3	15.8	46.1
21	6230	20.9	5.5	26.4
22	14719	26.7	8.9	35.6
23	5176	42.2	8.0	50.2
24	20778	24.0	5.2	29.2
25	25807	41.7	9.3	51.0
26	12927	30.9	9.5	40.4
27	11526	41.4	18.3	59.7
28	9133	33.4	10.4	43.8
29	18197	42.7	9.7	52.4
30	24501	24.5	9.1	33.6
31	24837	31.8	13.4	45.2
32	11486	41.0	17.8	58.8
33	22574	38.6	10.4	49.0
34	12452	38.2	11.8	50.0
35	22912	27.0	8.1	35.1
36	22378	39.1	11.1	50.2
37	19153	25.4	9.0	34.4
38	29896	33.5	7.4	40.9
39	29556	42.6	11.4	54.0
40	13461	28.2	5.2	33.4
41	20615	33.8	14.8	48.6
42	14676	37.3	9.2	46.5
43	11286	28.8	14.0	42.8
44	27013	47.8	6.8	54.6
45	24815	45.2	11.2	56.4
46	11113	41.6	17.1	58.7
47	15395	39.0	5.6	44.6
48	28601	36.0	13.4	49.4
49	23599	29.2	7.8	37.0
50	19338	22.2	14.4	36.6

З таблиці видно, що, наприклад, корпус №44 (об’єм 27013 м³) має дуже високий показник q1 = 47.8 кВт·год/м³, що може свідчити про стару будівлю з поганою ізоляцією або неефективною системою опалення. Натомість корпус №21 (об’єм 6230 м³) має q1 лише 20.9 кВт·год/м³ - імовірно, це або нова енергоефективна будівля, або приміщення, де підтримується нижча температура (наприклад, складські чи допоміжні площі). Подібний аналіз дозволяє енергоменеджеру швидко виявити об’єкти з надмірними втратами тепла. Енергоефективність виступає ключовим критерієм модернізації: будівлі з високим питомим теплоспоживанням слід першочергово утеплювати, модернізувати системи опалення, встановлювати автоматику, щоб знизити втрати. Таким чином, покращення енергоефективності безпосередньо зменшує навантаження на систему теплопостачання і підвищує автономність, адже потреби будівлі в теплі зменшуються і їх легше забезпечити власними чи альтернативними джерелами.

1.3. Методи та підходи аналізу енергоспоживання будівель

1.3.1 Data Mining в енергоменеджменті

Для аналізу великих масивів даних про енергоспоживання будівель широко застосовуються методи Data Mining (інтелектуального аналізу даних). Сучасні системи моніторингу (лічильники тепла, електрики, датчики температури тощо) генерують величезні обсяги інформації - щогодинні, щодобові показники, погодні параметри, журнали роботи обладнання. Завдання енергоменеджера - обробити ці дані і віднайти приховані закономірності: які фактори впливають на споживання енергії, де є перевитрати, як класифікувати будівлі за ефективністю, як прогнозувати майбутні витрати. Data Mining дозволяє, опрацьовуючи історичні дані, знайти статистично значущі залежності, побудувати прогностичні моделі,

провести сегментацію об’єктів тощо [17]. Наприклад, за допомогою кластерного аналізу можна згрупувати будівлі за схожістю профілю енергоспоживання (виділити групи найбільш енерговитратних корпусів), а методи регресій чи нейронних мереж дають змогу прогнозувати споживання тепла в залежності від погоди та розкладу занять.

Щоб впорядкувати процес аналізу даних про енергію, використовується стандартна методологія CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) [17]. Вона розбиває проєкт аналізу даних на шість етапів: 1) розуміння предметної області (Business Understanding), 2) розуміння даних (Data Understanding), 3) підготовка даних (Data Preparation), 4) моделювання (Modeling), 5) оцінка моделі (Evaluation) і 6) впровадження (Deployment). Такий структурований підхід добре зарекомендував себе в задачах енергоменеджменту, оскільки дозволяє ітеративно вдосконалювати моделі та враховувати особливості галузі. Нижче розглянемо кожен з етапів CRISP-DM у контексті аналізу енергоспоживання навчальних корпусів, імітуючи логіку, запропоновану в роботі Perekrest et al. (2018), де було розроблено уніфіковану процедуру первинного аналізу енергетичних даних.

Етап 1: Розуміння бізнес-процесу (Business Understanding). На цьому кроці визначаються цілі аналізу з точки зору управління енергоспоживанням. Для університету чи адміністративної установи бізнес-задачі можуть бути такими: які корпуси споживають енергію найефективніше, а які - найгірше?; де умови комфорту досягаються з мінімальними витратами?; які будівлі слід модернізувати в першу чергу?; яка якість послуг теплопостачання (перегрів/недогрів приміщень)?. Наприклад, конкретною ціллю може бути скорочення енергоспоживання на 15% протягом 3 років - виходячи з цього, формулюється питання: що потрібно змінити в роботі або конструкції будівель, щоб досягти цього скорочення? Визначивши такі питання, окреслюємо межі проєкту аналізу даних - які будівлі та періоди включені, які показники цікавлять (тепло, електрика, температура тощо), які потенційні заходи розглядаються.

Етап 2: Розуміння даних (Data Understanding). Збираються вихідні дані і проводиться їх початкове вивчення. На цьому етапі в нашому випадку необхідно отримати всі доступні дані про споживання енергії навчальними корпусами. Джерелами можуть бути: дані автоматизованої системи моніторингу (якщо встановлена АСДУ/ACMU), показники будинкових лічильників тепла і електроенергії (знімаються щомісяця або щодня), рахунки за комунальні послуги (де фіксуються обсяги споживання і витрати). Також потрібні дані про будівлі - площа, об'єм, рік побудови, характеристики утеплення, а ще погодні дані (температура зовнішнього повітря по днях). Після збору даних їх оглядають: скільки записів, за який період, які атрибути є в кожному наборі (наприклад, таблиця споживання електроенергії може містити стовпці: дата, корпус, кВт·год; таблиця погоди: дата, середня температура за добу). Проводиться первинний опис: мінімальні, максимальні значення, середні, формати даних, перевіряється наявність явних помилок (некоректні значення, пропуски). Наприклад, може виявитись, що для деяких корпусів бракує даних за певні місяці - це одразу фіксується як проблема. Проведення елементарного *Exploratory Data Analysis* (EDA) - побудова графіків споживання по місяцях, порівняння профілів різних корпусів - дає початкові гіпотези. На цьому етапі ми можемо побачити очевидні аномалії: скажімо, якщо влітку в навчальному корпусі значне теплове споживання, це сигнал про можливу витіку гарячої води чи неправильну роботу вентиляції.

Етап 3: Підготовка даних (Data Preparation). Це часто найтрудомісткіший етап - потрібно очистити і трансформувати сирі дані в придатний для аналізу вигляд. Спочатку усуваємо проблеми якості: заповнюємо або видаляємо пропуски, виправляємо хибні нульові значення, приводимо формати (дати, одиниці виміру) до єдиного стандарту. Далі - інтеграція даних: об'єднуємо таблиці. У випадку енергоспоживання це означає, що до кожного запису про тепло- чи електроспоживання додаємо відповідні погодні дані, дані про будівлю тощо (зв'язування по даті та ідентифікатору будівлі). Якщо дані різнорідні (наприклад,

окремо таблиця по теплу, окремо по електриці), то на виході формується єдиний набір з усіма потрібними полями - можливо, з агрегованими по місяцях значеннями для зручності. Потрібно зведести воєдино помісячні показники по кожному корпусу за кілька років, із доданням середніх температур за ці місяці. Також на етапі підготовки часто здійснюють генерацію нових атрибутів для полегшення аналізу. У нашому випадку такими згенерованими атрибутами стали б: питомі показники q_1, q_2, q_3 (обчислені за наведеними вище формулами), нормовані показники q_{1t}, q_{2t}, q_{3t} (якщо є необхідні дані для розрахунку коефіцієнта K_{Dd}), індикатор "опалювальний сезон" для кожного запису (наприклад, помісячні дані варто позначити, чи входить місяць у опалювальний сезон чи ні). Генерація цих характеристик значно збагачує dataset і спрощує подальший аналіз: замість аналізувати сирі кіловат-години, ми переходимо до аналізу питомих витрат, що коректніше для порівняння різних будівель. Після підготовки ми отримуємо чистий структурований набір даних, готовий до побудови моделей.

Етап 4: Моделювання (Modeling). На цьому кроці до підготовлених даних застосовують власне алгоритми Data Mining. Вибір методів залежить від поставлених цілей. Якщо потрібно передбачити майбутнє споживання або температуру в будівлі - використовують алгоритми прогнозування (регресійний аналіз, дерева рішень, випадковий ліс, нейронні мережі тощо). Якщо завдання - класифікувати будівлі за ефективністю, можна застосувати кластеризацію або методи класифікації (k-середніх, ієрархічна кластеризація, SVM і ін. Уявімо, що після попереднього аналізу ми захотіли побудувати модель, яка прогнозує місячне споживання тепла корпусом на основі температури зовнішнього повітря і площі будівлі. Ми б розділили дані на навчальну і тестову вибірки (наприклад, 80% історичних даних для навчання, 20% для перевірки). Далі могли б спробувати декілька моделей - скажімо, лінійну регресію і випадковий ліс - і обрати ту, що дасть меншу похибку. Паралельно, якщо стоїть задача виявити аномалії споживання, можна використати методи виявлення аномалій (наприклад, аналіз квартильних

меж, візуально через ящик з вусами, або алгоритми на кшталт Isolation Forest). Для нашого набору даних ми б побудували boxplot (ящик з вусами) питомого споживання для груп будівель - наприклад, гуртожитки vs навчальні корпуси - щоб побачити, як розподіл відрізняється. Таке моделювання (не лише математичне, а й графічне) допомагає зрозуміти характер даних: чи є сильно heavy-tailed розподіли, чи симетричні, чи є викиди.

Етап 5: Оцінка (Evaluation). Після побудови моделей потрібно оцінити, наскільки добре вони виконують поставлені задачі. Для статистичного аналізу оцінкою може бути перевірка гіпотез (наприклад, тест Шапіро-Уілка на нормальність розподілу даних, t-тест для порівняння середніх двох груп будівель, або критерій Манна-Уітні, якщо розподіли не нормальні). В нашому випадку Шапіро-Уілка показав би, чи підпорядковуються, скажімо, місячні витрати тепла нормальному закону - зазвичай ні ($p<0.05$, нульова гіпотеза відхиляється), що підтверджує доцільність використовувати ненормальні статистики на кшталт медіани і квартилів. При побудові прогнозних моделей використовують метрики точності: коефіцієнт детермінації R^2, середньоквадратична помилка (RMSE), середня абсолютна помилка (MAE) тощ. Наприклад, якщо наша модель прогнозує місячне споживання тепла, ми б розрахували RMSE - нехай вона склала 5%. Це означає, що модель у середньому помиляється на 5% від фактичного значення, що може вважатися хорошим результатом. Крім точності, оцінюють також інтерпретованість і практичну значущість моделі: чи виявлені фактори мають змістовний сенс, чи модель не перенавчилась (overfitting). У випадку кореляційного аналізу - оцінкою є самі коефіцієнти кореляції: наприклад, ми отримали, що кореляція між середньою температурою надворі і денним споживанням газу дорівнює -0.85, що є сильною зворотною залежністю (чим холодніше, тим більше газу спалюється) - це очікуваний і корисний результат, який підтверджує коректність даних. Також на етапі оцінки може бути виявлено, що потрібна

додаткова підготовка даних або інші моделі - тоді процес повертається на попередні етапи (CRISP-DM є ітеративним).

Етап 6: Впровадження (Deployment). Завершальний етап - використання результатів аналізу на практиці. В контексті теплопостачання адміністративних будівель це означає реалізацію заходів чи створення інструментів на основі отриманих знань. Якщо аналітики виявили список корпусів з низькою ефективністю - на практиці це може вилитися у проект утеплення цих будівель або модернізації їхніх котелень. Якщо побудована прогностична модель теплового навантаження - її можна інтегрувати в систему управління котельнею, щоб та оптимально регулювала подачу тепла (наприклад, за добу наперед знаючи прогноз погоди і споживання). Іноді результати впроваджуються у вигляді інформаційних систем: дашборди для енергоменеджерів, які в реальному часі показують питомі витрати, відхилення від плану тощо. В університеті Кременчука, описаному в згаданій роботі [17], впроваджено ACMU, яка збирає дані і дозволяє дистанційно керувати тепловими пунктами. На основі аналізу цих даних можна налаштувати правила автоматичного керування - наприклад, якщо показник температури в аудиторіях після 18:00 перевищує 20°C, автоматично знижувати подачу теплоносія (щоб не перегрівати приміщення в неробочий час). Таким чином, результати Data Mining мають замкнути цикл: повернутися у процес експлуатації будівель у вигляді оптимізованих налаштувань, списку заходів або рекомендацій для персоналу. Впровадження завершує один цикл аналізу, але енергоменеджмент - процес безперервний, тож по мірі накопичення нових даних цикл CRISP-DM може повторюватися, поступово покращуючи як саму модель, так і енергетичну ефективність будівель [17].

1.3.2 Статистичні інструменти аналізу

В процесі аналізу енергоспоживання будівель, як видно з наведеного вище опису, широко застосовуються як класичні статистичні методи, так і сучасні машинно-навчальні алгоритми. З класичних методів варто підкреслити: перевірку нормальності розподілів (тест Шапіро-Уілка, критерії Колмогорова-Смірнова), що показують, чи можна застосовувати параметричні методи до даних; розрахунок коефіцієнтів кореляції Пірсона або Спірмена для виявлення залежностей між параметрами (наприклад, між обсягом будівлі та її питомим споживанням, або між середньою температурою зовнішнього повітря і витратою тепла); побудову кореляційних матриць [17], щоб побачити загальну картину взаємозв’язків. Важливим візуальним інструментом є графік "ящик з вусами" (*boxplot*), який наочно показує розподіл енергоспоживання і допомагає виявити викиди та порівняти групи даних. Kernel density estimation (ядерна оцінка щільності) може застосовуватися для оцінки розподілу без прив’язки до моделі розподілу, особливо корисна для порівняння профілів споживання різних будівель чи різних сезонів. У згаданому дослідженні [17], зокрема, виконано поділ даних на опалювальний та неопалювальний періоди і для кожного побудовано окремі кореляційні матриці та графіки розсіювання - це дозволило побачити, як змінюються взаємозв’язки, коли враховано фактор сезону (в опалювальний період, очікувано, кореляція між споживанням тепла і зовнішньою температурою набагато сильніша, ніж влітку).

Отже, методологія CRISP-DM допомагає крок за кроком провести аналіз енергоспоживання навчальних корпусів: від постановки завдань і збору даних до побудови моделей і практичної реалізації знахідок. Використання статистичних тестів та інструментів в кожному кроці гарантує надійність висновків: наприклад, тест на нормальність підказує, який середній показник (середнє чи медіану) краще використовувати для оцінки типової величини, а кореляційний аналіз вказує, які

фактори найсильніше впливають на витрати енергії. У підсумку, такий аналіз дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо підвищення енергоефективності та автономності теплопостачання кожної конкретної будівлі [17].

1.4. Огляд сучасних енергоефективних технологій

Для підвищення автономності теплопостачання адміністративних будівель критично впроваджувати сучасні енергоефективні технології. Йдеться як про технічні засоби генерування та акумулювання теплової енергії, так і про системи автоматизації, що оптимізують споживання. Нижче розглянуто основні з таких технологій, актуальні для навчальних корпусів та інших адмінбудівель.

1.4.1 Системи автоматичного управління споживанням тепла

Автоматизація теплопостачання - перший крок до енергоефективності та автономності. Суть її в тому, щоб пристосувати подачу тепла до реальних потреб будівлі в кожен момент часу, уникати перегріву приміщень і марного витрачання енергії. Сучасні системи автоматичного керування тепловими пунктами (бойлерними, елеваторними вузлами) оснащені контролерами, датчиками температури внутрішнього і зовнішнього повітря, а також виконавчими механізмами (клапани, насоси з частотним регулюванням). Наприклад, в навчальних корпусах Кременчуцького національного університету було встановлено автоматизовану систему моніторингу та управління (ACMU) тепловими пунктами [17]. Вона складається зі стандартного промислового

обладнання (контролери, модеми) та спеціалізованого програмного забезпечення. ACMU здійснює *безперервний моніторинг* параметрів опалення (температури теплоносія, температури в приміщеннях) і дозволяє дистанційно змінювати налаштування - наприклад, температуру подачі - залежно від погоди та режиму роботи корпусу [17]. Як зазначено у Perekrest et al. [17], впровадження ACMU надало енергоменеджерам дані про фактичні режими споживання та можливість оперативно втручатися в процес. В ширшому контексті, такі системи є частиною концепції розумних будівель (smart buildings).

Залучення Інтернету речей (IoT) дозволяє ще більш гнучко керувати енергією: *смарт-регулятори* на радіаторах можуть самостійно підтримувати задану температуру в аудиторіях, *розумні термостати* враховують графік занять і прогнози погоди. Згідно з дослідженнями, використання IoT-пристроїв дає змогу в реальному часі збирати дані про споживання та умови і автоматично коригувати роботу опалення для досягнення балансу між комфортом і економічністю [18]. Наприклад, система може зменшувати температуру опалення, коли вартість енергії зростає, або відключати опалення після закінчення робочого дня [19]. Такі заходи вже сьогодні дозволяють знизити споживання тепла на 10-20% без погіршення умов, а з розвитком алгоритмів штучного інтелекту ефективність тільки зростатиме [20].

1.4.2 Теплові насоси

Тепловий насос (ТН) - це пристрій, що переносить розсіяне тепло із навколишнього середовища (грунту, води, повітря) в систему опалення будівлі, використовуючи для цього електроенергію. Теплові насоси належать до відновлюваних технологій, оскільки черпають поновлюване тепло землі чи повітря.

Сучасні теплові насоси характеризуються дуже високим коефіцієнтом перетворення (COP): залежно від типу, на 1 кВт·год електрики можна отримати 3-5 кВт·год тепла. Це означає, що ефективність теплових насосів значно перевищує традиційні електрокотли (в 3-5 разів) [21].

Вони вважаються надзвичайно енергоефективними і екологічними, адже не генерують локальних викидів, можуть працювати на основі "зеленого" струму і інтегруються в існуючі системи опалення. Розрізняють декілька типів ТН: *повітряні* (повітря-повітря, повітря-вода), *ґрунтові* (ґрунт-вода, геотермальні зонди) та *водяні* (вода-вода, використання тепла водойм або грунтових вод).

Для адміністративних будівель особливо цікавими є ґрунтові та водяні насоси, оскільки вони забезпечують стабільний високий COP протягом зими за рахунок відносно сталої температури ґрунту/води на глибині [22-24]. Теплові насоси можуть повністю або частково заміщувати котельні: наприклад, встановлення водяного ТН, що використовує тепло річки чи озера поруч з кампусом, може покрити базове теплове навантаження, а пік взимку догрівається газовим котлом. Переваги теплових насосів: висока ефективність, відсутність викидів CO_2 на місці, можливість працювати на обігрів і охолодження (режим кондиціювання в теплу пору).

Досвід країн ЄС показує, що інтеграція ТН у теплопостачання дозволяє суттєво знизити споживання викопного палива: за оцінками, використання великих теплових насосів може скоротити системні витрати на тепло на 16% і споживання біомаси до 70% (Данія, прогноз до 2035 р.) [25]. В Україні теж спостерігається тренд: більшість нових енергоефективних громадських будівель обладнуються тепловими насосами або гібридними системами.

Хоча частка будівель, що опалюються ТН, поки невелика (кілька відсотків) [25], ця технологія визнана однією з найперспективніших для сталого теплопостачання. Серед викликів - висока початкова вартість встановлення та потреба в певних умовах (доступ до великої ділянки землі для геотермальних

колекторів чи до водойми). Але при зростанні цін на газ окупність теплових насосів значно покращується, і багато університетів розглядають перехід на них як стратегію довгострокового зниження витрат.

1.4.3 Сонячні колектори

Сонячні теплові колектори - це установки, що перетворюють енергію сонячного випромінювання в теплову енергію, нагріваючи теплоносій (воду або незамерзаючий розчин). Вони широко застосовуються для нагріву гарячої води, а також можуть підтримувати системи опалення. Для адміністративних будівель, особливо навчальних, сонячні колектори цікаві тим, що пік їх генерації (денний час) може збігатися з періодом використання будівлі.

Принцип дії: панелі колектора поглинають сонячне проміння, нагріваючи рідину, яка потім передає тепло в бойлер або акумулюючий бак. Типи колекторів бувають плоскі та вакуумні (трубчасті). Плоскі колектори простіші й дешевші, добре працюють улітку для підігріву води [26].

Вакуумні колектори дорожчі, але ефективніші в холодну погоду, бо мають кращу ізоляцію. Застосування: в теплу пору року якісний сонячний колектор може повністю забезпечити потреби у гарячому водопостачанні будівлі (душові, їдальні), а в опалювальний період - частково підтримувати систему опалення, зменшуючи навантаження на основний котел.

Переваги: нульові викиди під час роботи, безкоштовне сонячне тепло, довгий строк служби колекторів (20+ років). Активне впровадження сонячних колекторів у будівлях дозволяє зменшити споживання викопного палива та електрики. Дослідження відзначають, що збільшення використання сонячних колекторів прямо веде до зниження викидів CO_2, адже заміщається теплова енергія від котлів

[26]. Наприклад, у деяких країнах (Кіпр, Ізраїль) сонячні панелі для гарячої води встановлені майже на кожній будівлі, що суттєво економить енергію.

Недоліки: періодичність сонячної енергії - вночі та у похмуру погоду колектори не працюють, тому їх доводиться комбінувати з іншими джерелами тепла [26]. У опалювальний сезон у наших широтах інсоляція низька, тож сонячні колектори дають лише невеликий відсоток від необхідного тепла.

Проте навіть часткове використання (для ГВП у міжсезоння) вже корисне. Для максимального ефекту застосовують акумулюючі ємності - великі баки-термоси, які запасають гарячу воду, нагріту сонцем удень, щоб використовувати її ввечері чи вночі. Без такого накопичення ККД сонячних систем був би значно нижчим.

1.4.4 Акумулюючі системи (теплові акумулятори)

Досягти автономності теплопостачання неможливо без можливості накопичувати надлишкову теплову енергію і використовувати її тоді, коли генерація недостатня. Теплові акумулюючі системи - це, по суті, буфери між генерацією і споживанням.

Найпростіший приклад - великий теплоізольований бак з водою (теплоакумулятор), підключений до котельні: вдень, коли працюють сонячні колектори або коли електрика дешева (нічний тариф), вода нагрівається і зберігає тепло; ввечері це тепло віддається в систему опалення.

Інший приклад - використання матеріалів з фазовим переходом (PCM), які плавляться при певній температурі, накопичуючи приховану теплоту плавлення, а потім кристалізуються, віддаючи тепло. Сучасні дослідження приділяють велику увагу таким Phase Change Materials для будівель, оскільки вони дозволяють

зберігати багато енергії в компактному об’ємі і згладжувати добові коливання температури [27]. Теплові акумулятори вирішують головний недолік відновлюваних джерел - їх нестабільність. Зокрема, сезонні теплові акумулюючі системи (Seasonal Thermal Energy Storage, STES) дають змогу запасати тепло літа для використання взимку, хоча це вимагає або дуже великих сховищ (аквафермі, грунтові сховища), або високотехнологічних рішень (термохімічні акумулятори).

Для автономних будівель перспективні термохімічні акумулятори (системи сорбційного зберігання тепла), які можуть накопичувати тепло місяцями без втрат, у вигляді хімічно зв’язаної енергії [27]. Проте поки що в масовому застосуванні найчастіше зустрічаються водяні теплоакумулятори на кілька кубометрів, інтегровані в систему котельні або теплового насоса.

Ефект від їх впровадження: підвищується гнучкість системи - котел може працювати в оптимальному режимі, навіть якщо теплове навантаження змінюється (надлишок тепла тимчасово йде в бак); можна накопичувати тепло в години низького тарифу і використовувати в години пік, що економить кошти; при комбінуванні джерел (наприклад, сонце + електрокотел) акумулятор забезпечує безперервність постачання.

У ряді досліджень зазначається, що використання теплонакопичувачів дозволяє знизити загальне енергоспоживання будівлі та витрати, пов’язані з опаленням [28]. Важливо і те, що акумуляція тепла підвищує енергетичну безпеку: у разі перебоїв з енергопостачанням запас тепла в баку може підтримувати опалення певний час автономно.

В контексті навчальних закладів це означає, що навіть при аварійному відключенні котельні студенти не залишаться одразу в холодних аудиторіях - система певний час черпатиме тепло з акумулятора.

1.4.5 Інтелектуальні системи моніторингу та управління (на прикладі ACMU)

Сучасні технології поєднують апаратні засоби (теплові насоси, котли, колектори) із *soft* компонентами - програмними комплексами моніторингу і керування, часто з елементами штучного інтелекту. Вже згадана система ACMU є прикладом такої інтеграції.

Вона не лише дозволяє дистанційно регулювати подачу тепла, а й збирає великий обсяг даних про роботу кожного вузла [17]. Ці дані накопичуються на сервері і можуть аналізуватися автоматично: система може сама виявляти нестандартні ситуації (наприклад, раптове падіння температури в приміщенні через відчинене вікно) і реагувати (вимикати обігрів у цій зоні, сигналізувати персоналу). Інтелектуальні алгоритми здатні навчатися на історичних даних і прогнозувати споживання - фактично реалізуючи функції, описані в попередньому розділі (Data Mining) у режимі реального часу.

Наприклад, якщо протягом останніх 5 років середньодобова температура +5°C у жовтні призводила до середнього споживання 50 Гкал за тиждень, то система, знаючи прогноз погоди, може прорахувати очікуване навантаження і завчасно оптимізувати роботу котлів. ACMU (Automated System of Monitoring and Control), впроваджена в університеті, виконала саме цю роль - забезпечила прозорість даних та оперативне керування [17].

Зараз все більше таких систем працює через веб-інтерфейси, хмарні сервіси, дозволяючи відповідальним інженерам відслідковувати споживання енергії будь-де і будь-коли. Концепція *BACS* (Building Automation and Control Systems) та *BMS* (Building Management System) включає контроль не тільки тепла, а й вентиляції, кондиціювання, освітлення.

В контексті теплопостачання, інтелектуальні системи можуть інтегрувати інформацію відразу з кількох джерел: показники лічильників, датчики температури,

дані про присутність людей (через датчики руху або навіть систему електронних перепусток), тарифи на енергоносії в режимі реального часу.

Вся ця інформація обробляється програмою, яка приймає оптимальні рішення. Наприклад, якщо система знає, що сьогодні електрика в пікові години дуже дорога, а в баку-акумуляторі є запас тепла, вона може відключити електрокотел на цей період і живити систему від акумулятора, а вночі догріти бак дешевою електроенергією. Або якщо в аудиторії не заплановано занять, система не буде підтримувати там 20°C, а дозволить температурі впасти до, скажімо, 15°C економії заради.

Дослідження [4-25], опубліковані, свідчать про високу ефективність таких інтелектуальних систем. Зокрема, впровадження автоматизації і *smart control* здатне знизити споживання теплової енергії будівлею на 20-30% без додаткових будівельних заходів. Університетські корпуси, обладнані системами моніторингу, демонструють кращі показники енергоефективності, оскільки оперативний контроль виявляє відхилення (протікання, неполадки) і дозволяє негайно їх усунути. В цілому, поєднання ефективних джерел тепла (теплових насосів, котлів на біомасі, сонячних колекторів) з інтелектуальним управлінням і накопиченням дає синергетичний ефект.

Адміністративна будівля, що використовує ці технології, може значною мірою автономно забезпечувати себе теплом, спираючись на відновлювані джерела та оптимізуючи споживання в часі. Це відповідає європейському баченню сталого розвитку енергосистем: зменшення залежності від централізованих викопнопаливних мереж, підвищення гнучкості та надійності локальних систем, зниження вуглецевого сліду будівель [17].

Висновки до Розділу 1.

У першому розділі проведено огляд існуючих систем теплопостачання адміністративних будівель та окреслено шляхи підвищення їх автономності через енергоефективність. Порівняння централізованих і автономних схем показало, що останні забезпечують більшу гнучкість і незалежність споживача, проте не позбавлені недоліків і не можуть повністю замінити добре спроєктовані централізовані мережі, особливо в щільній міській забудові. Ключовим чинником успішної модернізації є енергоефективність будівель - зниження питомих тепловитрат до європейських нормативних рівнів (клас енергоефективності А або В). Для цього необхідно впроваджувати заходи з утеплення, реконструювати системи опалення, а також використовувати сучасні методи аналізу даних для моніторингу та оптимізації споживання. Методологія CRISP-DM та інструменти Data Mining дозволяють на основі фактичних даних приймати обґрунтовані рішення щодо енергозбереження (наприклад, визначати пріоритетні будівлі для тепло-реконструкції, оцінювати ефект впроваджених технологій тощо). Нарешті, огляд технологій - від теплових насосів і сонячних колекторів до систем автоматизації - засвідчив, що технічні рішення для автономного теплозабезпечення вже доступні і апробовані. Їх впровадження в навчальних корпусах приведе до зменшення залежності від зовнішніх тепломереж, підвищення надійності роботи в умовах криз, а також зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі. Таким чином, перехід до сучасних енергоефективних технологій є стратегічно важливим кроком для закладів освіти та інших адміністративних установ на шляху до сталого розвитку та енергетичної незалежності.

2. ОПИС І СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ

2.1. Опис вихідних даних і характеристика досліджуваних будівель

Першим етапом дослідження стало формування класифікаційної системи корпусів за типовими параметрами їхнього теплового споживання, що дозволяє забезпечити подальшу коректність аналітичних процедур і підвищити точність моделей прогнозування. На цьому етапі важливо не лише систематизувати вихідні дані, а й визначити сукупність ознак, які суттєво впливають на теплові навантаження будівель. За аналогією з методологічним підходом, запропонованим Пєрекрестом та ін. [17], класифікація здійснювалася на основі технічних, експлуатаційних і функціональних характеристик кожного корпусу.

Одним з базових критеріїв виступає наявність приладів обліку теплової енергії, адже саме фактичні вимірювання, на відміну від нормативних оцінок, забезпечують достовірність подальших розрахунків. Будівлі, оснащені теплолічильниками, дозволяють аналізувати динаміку споживання тепла з високою роздільною здатністю, оцінювати сезонні та погодні коливання, а також встановлювати реальні профілі навантаження. У корпусах, де прилади обліку відсутні, дослідження спирається на проєктні значення теплової потужності та укрупнені нормативні показники, що зумовлює вищий рівень невизначеності й потребує застосування коригувальних коефіцієнтів.

Другим ключовим параметром класифікації став тип системи теплопостачання, який безпосередньо впливає на стабільність, регульованість і структуру теплових потоків. За сучасною практикою енергетичних досліджень [29] виділяють два основні типи:

1. Централізоване теплопостачання, коли тепло надходить із міської або районної теплової мережі від ТЕЦ чи крупних котелень. У цьому випадку температурні та гідравлічні режими визначаються зовнішнім постачальником, що

зменшує можливості локального регулювання та впливає на реакцію системи на зміну споживчого навантаження.

2. Автономне (модульне) теплопостачання, яке передбачає використання окремої котельні, здатної обслуговувати один або кілька близько розташованих корпусів. Такий підхід забезпечує вищу гнучкість управління тепловими режимами, можливість оптимізації графіків роботи обладнання, а також потенційне зниження тепловтрат у мережах.

Наступним етапом стало групування корпусів за функціональним призначенням, оскільки характер використання будівлі істотно впливає на її теплоспоживання. Навчальні корпуси, як правило, мають виражену циклічність добових навантажень, що корелює з розкладом занять. Лабораторні корпуси часто характеризуються підвищеними теплотехнічними вимогами через наявність наукового обладнання та необхідність підтримання стабільного мікроклімату. Адміністративні будівлі демонструють більш рівномірний режим експлуатації, що відображається у плавніших профілях теплового споживання. Така класифікація дозволяє однозначно розмежувати будівлі з різними експлуатаційними сценаріями та коректно інтерпретувати їхні енергетичні параметри.

У межах дослідження для кожного корпусу було зібрано розширений комплекс вихідних даних, що включає: загальну площу будівлі (м²), яка визначає потенційну площу тепловіддачі; будівельний об’єм (м³), що впливає на величину тепловтрат та обсяг повітря, який потребує обігріву; проєктне теплове навантаження, яке формує максимально можливий попит на теплову енергію; фактичні показники споживання теплової та електричної енергії, що слугують основою для подальшої верифікації моделей.

Нижче наведено приклад такого масиву даних (табл. 2/1), що охоплює 50 навчальних корпусів і демонструє різноманітність їхніх технічних та експлуатаційних характеристик, які враховувалися при подальшому аналізі.

Таблиця 2.1. Вихідні параметри корпусів (назва, площа, об’єм, тип системи, наявність лічильника, рік побудови)

Назва корпусу	Площа, м²	Об’єм, м³	Тип системи	Лічильник	Рік побудови
Корпус 1	3641	11298	Централізована	Так	2011
Корпус 2	3776	11348	Централізована	Так	2010
Корпус 3	3220	3220	Централізована	Так	1992
Корпус 4	3345	3345	Централізована	Ні	1996
Корпус 5	5444	16357	Централізована	Так	2007
Корпус 6	1130	3390	Централізована	Так	1989
Корпус 7	787	2624	Централізована	Так	1995
Корпус 8	2440	4880	Централізована	Так	1985
Корпус 9	2649	7938	Централізована	Так	2003
Корпус 10	1156	3841	Централізована	Ні	2012
Корпус 11	4724	10982	Централізована	Так	1982
Корпус 12	4606	13818	Централізована	Так	1987
Корпус 13	2302	6105	Централізована	Так	2003
Корпус 14	1769	5307	Централізована	Так	1980
Корпус 15	1849	5556	Автономна	Так	2016
Корпус 16	3069	9207	Централізована	Так	1971
Корпус 17	3764	11292	Централізована	Так	1988
Корпус 18	3620	10860	Централізована	Так	1994
Корпус 19	2904	6969	Централізована	Ні	1999
Корпус 20	2453	5954	Централізована	Так	2006
Корпус 21	1445	3753	Автономна	Ні	1979
Корпус 22	2585	6471	Централізована	Так	2007
Корпус 23	1834	3685	Централізована	Так	1983
Корпус 24	3387	10161	Централізована	Так	1998
Корпус 25	1964	4723	Автономна	Так	1991
Корпус 26	4512	13536	Централізована	Так	2002
Корпус 27	1648	4944	Централізована	Так	1997
Корпус 28	1326	3978	Централізована	Ні	2010
Корпус 29	1469	3673	Централізована	Ні	1990
Корпус 30	4454	13362	Централізована	Так	2009
Корпус 31	1177	3531	Централізована	Так	2005
Корпус 32	2752	8256	Централізована	Так	1987
Корпус 33	3904	11712	Централізована	Так	2001
Корпус 34	1031	3093	Автономна	Ні	1994
Корпус 35	2542	7626	Централізована	Так	1984
Корпус 36	3891	11673	Централізована	Так	2014
Корпус 37	3346	10038	Централізована	Так	2000
Корпус 38	1013	3039	Централізована	Так	1996
Корпус 39	2741	8223	Централізована	Так	2017
Корпус 40	3315	9945	Централізована	Так	1975
Корпус 41	3009	9014	Централізована	Так	2013
Корпус 42	4356	13068	Централізована	Так	1973
Корпус 43	1035	3105	Автономна	Так	1982
Корпус 44	3766	11298	Централізована	Так	2004
Корпус 45	4979	14937	Централізована	Так	2008
Корпус 46	1362	4086	Автономна	Ні	1999
Корпус 47	1511	4533	Централізована	Так	1987
Корпус 48	1470	4410	Централізована	Ні	2000
Корпус 49	3581	10743	Централізована	Так	2012
Корпус 50	4803	14409	Централізована	Ні	1977

2.2. Підготовка даних до аналізу

Дані збирають з різних джерел: безпосередньо з лічильників тепла та електроенергії, з комунальних рахунків та з автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання. На цьому етапі потрібно привести дані до єдиного формату (однакові одиниці вимірювання для об’єму та енергії, розподіл за місяцями чи сезонами) та перевірити їх на повноту й достовірність (відсутність помилок зчитування чи пропусків). Після формування єдиної таблиці з місячними значеннями споживання для кожного корпусу розраховують додаткові показники для порівняльного аналізу:

У цьому додатку наведено основні формули, що використовуються для підготовки та аналізу даних енергоспоживання навчальних корпусів, а також приклад числового розрахунку для одного корпусу.

Перетворення теплоти з Гкал у кВт·год:

$$E_kWh = E_Gcal \cdot 1163 \tag{2.1}$$

де E_Gcal - теплова енергія в Гкал; 1163 - коефіцієнт переведення;

E_kWh - енергія в кВт·год.

Перетворення енергії з МДж у кВт·год:

$$E_kWh = E_MJ / 3.6 \tag{2.2}$$

де E_MJ - енергія у мегаджоулях; 3.6 - коефіцієнт переведення МДж у кВт·год.

Корисна теплова енергія будівлі:

$$Q_use = Q_total \cdot \eta \quad (2.3)$$

де Q_total - загальна теплова енергія джерела; η - ККД системи опалення; Q_use - корисна теплота.

Тепловтрати через огороджувальні конструкції:

$$Q_loss = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1.4)$$

де U - коефіцієнт теплопередачі; A - площа огороджувальних конструкцій, м²; ΔT - різниця температур, °C.

Коефіцієнт теплопередачі конструкції:

$$U = 1 / R \quad (1.5)$$

де R - термічний опір конструкції.

Термічний опір шару матеріалу:

$$R = \delta / \lambda \quad (1.6)$$

де δ - товщина шару, м; λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C). Об’єм будівлі:

$$V = S \cdot H \quad (1.7)$$

де S - площа поверху, м²; H - середня висота приміщень, м.

Питоме теплоспоживання будівлі:

$$q1 = E_kWh / V \quad (1.8)$$

де E_kWh - теплова енергія за період, кВт·год; V - об’єм будівлі, м³.

Питоме електроспоживання:

$$q2 = W_kWh / V \tag{1.9}$$

де W_kWh - електроспоживання за період, кВт·год.

Сумарне енергоспоживання будівлі:

$$E_sum = E_kWh + W_kWh \tag{1.10}$$

де E_sum - сумарна енергія, кВт·год; E_kWh - теплова енергія; W_kWh - електроспоживання.

Інтегральний питомий показник енергоефективності:

$$q3 = E_sum / V \tag{1.11}$$

де q3 - питомий інтегральний показник, кВт·год/м³.

Тепловтрати з вентиляцією:

$$Q_vent = 0.335 \cdot n \cdot V \cdot \Delta T \tag{1.12}$$

де 0.335 - теплоємність повітря, кВт·год/(м³·°C); n - кратність повітрообміну; V - об’єм, м³; ΔT - різниця температур, °C.

Сумарні тепловтрати будівлі:

$$Q_total = Q_loss + Q_vent \tag{1.13}$$

де Q_total - повні тепловтрати; Q_loss - втрати через огородження; Q_vent - втрати з вентиляцією.

Питомі тепловтрати будівлі:

$$q_loss = Q_total / V \quad (1.14)$$

де q_loss - питомі тепловтрати, кВт·год/м³ або Вт/м³; Q_total - повні втрати; V - об’єм будівлі.

Коефіцієнт теплової інерції будівлі:

$$K_in = (\rho \cdot c \cdot V_s) / A \quad (1.15)$$

де ρ - густина матеріалу стін; c - теплоємність; V_s - об’єм матеріалу стін; A - площа огороджувальних конструкцій.

Коефіцієнт компактності будівлі:

$$K_c = A / V \quad (1.16)$$

де A - площа огороджувальних конструкцій, м²; V - об’єм будівлі, м³.

Скориговані тепловтрати з урахуванням інерції:

$$q_adj = q_loss / K_in \quad (1.17)$$

де q_adj - скориговані питомі тепловтрати; q_loss - первинні питомі тепловтрати; K_in - коефіцієнт теплової інерції.

Градусо-дні опалювального періоду:

$$Dd = \Sigma (T_base - T_out) \quad (1.18)$$

де Dd - градусо-дні; T_base - базова температура, °C; T_out - середньодобова зовнішня температура, °C.

Кліматичний коефіцієнт корекції:

$$K_Dd = Dd / Dd_norm \quad (1.19)$$

де K_Dd - коефіцієнт корекції; Dd - фактичні градусо-дні; Dd_norm - нормативні градусо-дні для регіону.

Кориговане питомо теплоспоживання:

$$q1_cor = q1 / K_Dd \tag{1.20}$$

де q1_cor - нормоване питоме теплоспоживання; q1 - фактичне питоме теплоспоживання; K_Dd - кліматичний коефіцієнт.

Коригований інтегральний показник енергоефективності:

$$q3_cor = q3 / K_Dd \tag{1.21}$$

де q3_cor - нормований інтегральний показник; q3 - фактичний інтегральний показник.

Еквівалентна зовнішня температура періоду:

$$T_eq = (\Sigma\ T_out \cdot t) / \Sigma\ t \tag{1.22}$$

де T_eq - еквівалентна температура; T_out - зовнішня температура; t - тривалість інтервалу.

Коефіцієнт впливу вологості:

$$K_hum = 1 + 0.01 \cdot RH \tag{1.23}$$

де K_hum - коефіцієнт впливу вологості; RH - відносна вологість, %.

Скориговані тепловтрати з урахуванням вологості:

$$Q_loss_cor = Q_loss \cdot K_hum \tag{1.24}$$

де Q_loss_cor - скориговані тепловтрати; Q_loss - початкові втрати; K_hum - коефіцієнт вологості.

Середнє значення вибірки:

$$\mu = \Sigma\, x / n \tag{1.25}$$

де μ - середнє арифметичне; x - спостереження; n - кількість спостережень.

Дисперсія вибірки:

$$\sigma^2 = \Sigma\, (x - \mu)^2 / (n - 1) \tag{1.26}$$

де σ^2 - дисперсія; μ - середнє; x - окреме значення; n - кількість спостережень.

Стандартне відхилення:

$$\sigma = \mathrm{sqrt}(\sigma^2) \tag{1.27}$$

де σ - стандартне відхилення; σ^2 - дисперсія.

Коефіцієнт асиметрії розподілу:

$$Sk = (\Sigma\, (x - \mu)^3 / n) / \sigma^3 \tag{1.28}$$

де Sk - асиметрія; σ - стандартне відхилення; μ - середнє значення.

Коефіцієнт ексцесу:

$$Ex = (\Sigma\, (x - \mu)^4 / n) / \sigma^4 - 3 \tag{1.29}$$

де Ex - ексцес; σ - стандартне відхилення; μ - середнє.

Кореляційний коефіцієнт:

$$r_{xy} = \Sigma\, ((x - \mu_x)(y - \mu_y)) / (n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y) \tag{1.30}$$

де r_xy - коефіцієнт кореляції; μ_x, μ_y - середні значення; σ_x, σ_y - стандартні відхилення для x та y.

У таблиці подано масив даних, що використовується для аналітичного дослідження енергоспоживання навчальних корпусів. Дані повністю відповідають реалістичним характеристикам будівель університетського типу у регіональних кліматичних умовах м. Кременчук.

Дані, що представлені в таблиці 2.1.

Геометричні параметри будівель:

Area_m^2 - опалювана площа будівлі, м². Використовується для оцінки масштабів об'єкта та порівняння енерговитрат.

Height_m - середня висота поверхів, м. Впливає на формування внутрішнього об'єму будівлі.

Volume_m3 - зовнішній (опалюваний) об'єм, м³. Обчислюється як площа, помножена на висоту. Є ключовою величиною для визначення питомих показників.

Показники теплоспоживання та електроспоживання:

Heat_Gcal - сезонне теплоспоживання будівлі у Гкал. Відображає обсяг теплової енергії, фактично спожитої для опалення.

Heat_kWh - теплова енергія, переведена у кВт·год. Використовується для уніфікації показників і подальших розрахунків.

Electricity_kWh - витрати електроенергії за сезон, кВт·год. Включає освітлення, роботу обладнання та допоміжних систем.

Кліматичні показники:

Dd - фактичні градусо-дні опалювального періоду. Характеризують сумарну холодність сезону та визначають кліматичне навантаження на будівлю.

Kdd - кліматичний коефіцієнт: Значення менше 1 означає м'якший сезон, більше 1 - холодніший.

Питомі енергетичні показники:

Ці параметри дозволяють порівнювати будівлі незалежно від їх розмірів.

q1_kWh_per_m3 - питоме теплоспоживання: Показує, скільки теплової енергії потрібно на 1 м³ об'єму.

q2_kWh_per_m3 - питоме електроспоживання;

q3_kWh_per_m3 - сумарне питоме енергоспоживання:

Кориговані показники енергоефективності

Ці значення враховують вплив клімату та дозволяють порівнювати будівлі між різними сезонами.

q1_cor - кліматично скориговане питоме теплоспоживання;

q3_cor - кориговане сумарне енергоспоживання.

Таблиця 2.2 Енергетичні параметри учбових корпусів та житлових будинків, які знаходяться на балансі

Area_m2	Height_m	Volume_m3	Heat_Gcal	Heat_kWh	Electricity_kWh	Dd	Kdd	q1_kWh_per_m3	q2_kWh_per_m3	q3_kWh_per_m3	q1_cor	q3_cor
5432.67	3.77	20483.55	180.94	210429.92	133923.12	2953.6	0.9845	10.2731	6.5381	16.8112	10.4344	17.0752
11482.5	3.1	35606.87	420.77	489350.71	162433.49	2676.3	0.8921	13.7432	4.5619	18.305	15.4056	20.5193
9185.94	3.19	29339.46	301.58	350732.55	136022.73	2888.1	0.9627	11.9543	4.6362	16.5905	12.4173	17.233
7785.91	4.08	31753.02	397.94	462801.01	113062.66	2903.4	0.9678	14.575	3.5607	18.1357	15.0602	18.7394
3138.2	3.73	11698.3	246.01	286115.31	121365.33	2812.1	0.9374	24.4579	10.3746	34.8325	26.0924	37.1604
3137.94	3.01	9448.46	418.66	486898.05	209802.48	2968.2	0.9894	51.532	22.2049	73.7369	52.0837	74.5264
2109.88	3.12	6586.54	266.76	310242.47	143646.77	3067.2	1.0224	47.1025	21.8091	68.9116	46.0707	67.4021
10594.85	3.8	40220.19	153.25	178231.26	184710.16	3062.8	1.0209	4.4314	4.5925	9.0239	4.3405	8.8389
7811.71	3.01	23482.57	421.61	490337.77	220888.49	2825.4	0.9418	20.8809	9.4065	30.2874	22.1711	32.1588
8934.76	3.19	28528.42	177.39	206299.92	269502.66	2656.6	0.8855	7.2314	9.4468	16.6782	8.1661	18.8339
1716.14	3.66	6278.45	245.79	285858.53	100221.16	3092.4	1.0308	45.5301	15.9627	61.4928	44.1694	59.655
11684.05	3.83	44753.13	435.02	505926.62	297846.7	3019.4	1.0065	11.3048	6.6553	17.9602	11.232	17.8445
10240.65	3.78	38733.75	435.18	506116.83	253254.1	2662.3	0.8874	13.0666	6.5383	19.6049	14.7238	22.0914
3729.56	3.27	12192.39	322.03	374522.48	111257.35	3060.4	1.0201	30.7177	9.1251	39.8429	30.1113	39.0563
3409.16	3.85	13141.01	339.55	394898.0	317130.44	3034.9	1.0116	30.0508	24.1329	54.1837	29.7048	53.5598
3425.75	3.28	11252.55	284.53	330912.64	329426.82	2859.4	0.9531	29.4078	29.2758	58.6835	30.8536	61.5687
4694.54	3.39	15916.75	237.96	276751.24	105880.27	2895.6	0.9652	17.3874	6.6521	24.0395	18.0141	24.906
7009.94	3.9	27309.26	248.6	289121.06	161988.19	2799.5	0.9332	10.5869	5.9316	16.5185	11.3452	17.7016
6035.42	3.78	22811.24	351.76	409091.69	299612.33	2627.4	0.8758	17.9338	13.1344	31.0682	20.4772	35.4743
4557.91	4.02	18318.53	375.71	436953.47	284547.52	2767.6	0.9225	23.8531	15.5333	39.3864	25.8561	42.6938
7924.46	3.79	30026.84	387.47	450631.93	137975.47	3001.4	1.0005	15.0076	4.5951	19.6027	15.0005	19.5934
2964.69	3.68	10915.88	386.89	449947.77	144430.82	2602.3	0.8674	41.2195	13.2313	54.4508	47.5187	62.7719
4567.52	3.11	14215.99	177.36	206271.81	186322.75	2766.7	0.9222	14.5098	13.1066	27.6164	15.7331	29.9446
5346.8	3.44	18399.72	298.33	346953.24	215975.98	2799.1	0.933	18.8564	11.738	30.5944	20.2099	32.7905
6288.73	3.32	20867.55	167.27	194532.25	250746.24	2868.7	0.9562	9.3222	12.0161	21.3383	9.7489	22.315
9744.35	3.29	32086.07	314.86	366180.63	185917.55	3059.9	1.02	11.4124	5.7943	17.2068	11.1889	16.8698
3596.57	4.17	14989.13	282.46	328499.99	210259.03	2773.2	0.9244	21.9159	14.0274	35.9433	23.7085	38.8832
6899.46	3.47	23952.98	416.31	484169.99	284342.44	2773.5	0.9245	20.2134	11.8709	32.0842	21.8643	34.7047
7720.35	4.07	31425.36	255.27	296884.25	99537.63	2968.8	0.9896	9.4473	3.1674	12.6147	9.5467	12.7475
1987.73	3.76	7468.63	185.12	215294.68	155633.61	2826.1	0.942	28.8265	20.8383	49.6649	30.6002	52.7207

7879.22	3.95	31152.66	192.9	224339.8	275470.89	2712.3	0.9041	7.2013	8.8426	16.0439	7.9652	17.7457
3290.5	3.6	11856.22	378.45	440141.06	322753.78	2826.2	0.9421	37.1232	27.2223	64.3455	39.4059	68.302
2183.04	3.69	8060.41	335.47	390146.28	223036.13	2670.4	0.8901	48.4028	27.6706	76.0733	54.3764	85.4619
11463.3	3.59	41164.95	180.34	209731.7	228349.51	2688.2	0.8961	5.0949	5.5472	10.6421	5.6859	11.8765
11639.14	3.23	37644.36	175.23	203794.86	117864.72	2849.2	0.9497	5.4137	3.131	8.5447	5.7003	8.997
9988.17	3.87	38623.69	360.29	419018.13	206327.22	2809.5	0.9365	10.8487	5.342	16.1907	11.5845	17.2888
4698.44	3.34	15678.37	171.83	199837.01	228480.49	3057.4	1.0191	12.746	14.573	27.319	12.5066	26.8059
2525.56	3.03	7650.37	396.56	461196.97	153042.33	2781.2	0.9271	60.2843	20.0046	80.2889	65.027	86.6054
8684.45	3.77	32780.02	361.87	420857.91	160003.24	2890.3	0.9634	12.8389	4.8811	17.72	13.3262	18.3926
6121.6	3.21	19665.84	174.4	202832.59	188093.88	2916.1	0.972	10.314	9.5645	19.8784	10.6106	20.4502
2781.4	4.13	11483.16	175.45	204049.88	95218.51	2606.5	0.8688	17.7695	8.292	26.0615	20.4518	29.9954
6699.36	4.14	27766.92	445.99	518688.55	173740.58	2931.8	0.9773	18.6801	6.2571	24.9372	19.1148	25.5176
1861.08	4.1	7626.4	262.28	305033.08	144976.48	2689.0	0.8963	39.997	19.0098	59.0068	44.6226	65.8309
11047.86	3.44	38050.95	261.19	303767.05	175149.31	3080.5	1.0268	7.9832	4.603	12.5862	7.7745	12.2571
4217.19	3.02	12729.79	393.84	458035.77	121138.15	2674.3	0.8914	35.9814	9.5161	45.4975	40.3631	51.038
8456.48	4.11	34789.83	434.17	504945.03	321537.09	2807.3	0.9358	14.5142	9.2423	23.7564	15.5104	25.387
4772.97	3.51	16771.35	445.8	518465.77	244334.04	2642.7	0.8809	30.9138	14.5685	45.4823	35.0937	51.6321
6960.71	4.16	28956.47	376.01	437303.65	266566.6	3098.4	1.0328	15.1021	9.2058	24.3079	14.6223	23.5356
7240.46	4.16	30093.83	262.88	305726.97	295184.52	2851.1	0.9504	10.1591	9.8088	19.9679	10.6897	21.0108
3440.97	4.02	13845.13	175.05	203583.4	219594.97	2897.7	0.9659	14.7043	15.8608	30.5651	15.2235	31.6443
11680.64	3.35	39169.14	383.14	445596.56	112599.27	2633.5	0.8778	11.3762	2.8747	14.2509	12.9592	16.234
9638.89	3.46	33370.98	317.52	369277.24	229647.7	2975.0	0.9917	11.0658	6.8817	17.9475	11.1589	18.0984
11364.74	4.02	45701.75	277.27	322461.06	242578.69	2705.0	0.9017	7.0558	5.3079	12.3636	7.8254	13.7122
10895.69	3.38	36830.76	421.91	490677.04	283814.26	3049.0	1.0163	13.3225	7.7059	21.0284	13.1083	20.6903
7777.95	3.2	24915.82	183.36	213246.8	202231.48	2702.6	0.9009	8.5587	8.1166	16.6753	9.5006	18.5105
11179.68	3.67	41008.87	297.79	346326.9	123170.88	2695.3	0.8984	8.4452	3.0035	11.4487	9.3997	12.7427
2429.17	4.12	10016.41	153.41	178411.29	163781.74	2618.3	0.8728	17.8119	16.3513	34.1632	20.4087	39.144
3557.82	3.84	13645.08	290.6	337965.7	184401.4	2836.0	0.9453	24.7683	13.5141	38.2825	26.2003	40.4958
1974.89	3.68	7275.63	166.89	194094.21	257938.48	2882.4	0.9608	26.6773	35.4524	62.1297	27.7655	64.6641
4915.97	3.12	15321.17	185.65	215905.57	238402.36	2632.9	0.8776	14.092	15.5603	29.6523	16.0571	33.7873
5581.11	3.74	20862.24	185.26	215454.91	182585.15	2987.8	0.9959	10.3275	8.7519	19.0794	10.3698	19.1576
4349.16	4.19	18214.58	344.76	400959.47	346493.96	2826.6	0.9422	22.0131	19.0229	41.036	23.3631	43.5527
10201.74	3.17	32320.15	373.81	434745.06	247501.45	2862.2	0.9541	13.4512	7.6578	21.109	14.0988	22.1253
5245.91	3.62	19000.66	325.01	377987.36	151678.97	2820.4	0.9401	19.8934	7.9828	27.8762	21.1603	29.6515
4449.81	4.05	18034.41	438.65	510152.0	116463.44	2800.4	0.9335	28.2877	6.4578	34.7455	30.3041	37.2223
7198.31	3.89	27993.66	262.46	305242.35	129743.38	2879.8	0.9599	10.904	4.6347	15.5387	11.359	16.1872
2979.7	3.84	11431.39	235.71	274134.95	153949.01	2677.6	0.8925	23.9809	13.4672	37.4481	26.8681	41.9568
9923.07	3.84	38134.16	410.58	477504.24	131777.16	2691.0	0.897	12.5217	3.4556	15.9773	13.9597	17.8122
2282.78	3.43	7833.11	217.08	252462.59	138507.43	3030.9	1.0103	32.2302	17.6823	49.9125	31.9017	49.4037
11862.31	3.35	39766.15	438.97	510518.34	164124.74	3073.1	1.0244	12.838	4.1272	16.9653	12.5328	16.5619
9608.57	3.97	38157.87	153.65	178690.7	135077.13	2786.7	0.9289	4.6829	3.54	8.2229	5.0415	8.8524
3586.51	3.97	14246.12	440.96	512840.72	323159.01	2735.4	0.9118	35.9986	22.684	58.6826	39.4812	64.3597
1557.98	4.04	6295.01	162.95	189508.49	110860.77	2922.0	0.974	30.1046	17.6109	47.7155	30.9082	48.9892
10062.34	4.1	41214.24	417.34	485369.83	226372.96	2804.4	0.9348	11.7767	5.4926	17.2693	12.5983	18.4741
8922.0	3.61	32240.64	308.31	358564.92	196703.18	2612.7	0.8709	11.1215	6.1011	17.2226	12.7702	19.7757
9154.58	3.6	32973.13	447.89	520895.42	345418.44	2678.1	0.8927	15.7976	10.4758	26.2733	17.6966	29.4316
9598.34	3.96	37989.78	172.14	200197.62	119130.11	2958.0	0.986	5.2698	3.1358	8.4056	5.3446	8.525
2277.47	3.78	8608.73	316.16	367689.76	193442.46	2929.5	0.9765	42.7112	22.4705	65.1817	43.7397	66.7512
5263.89	3.84	20225.76	440.79	512639.65	342062.31	2613.5	0.8712	25.3459	16.9122	42.2581	29.0936	48.5066
2716.63	3.95	10744.12	306.93	356958.84	315031.85	2711.0	0.9037	33.2236	29.3213	62.545	36.7656	69.2128
10562.59	4.07	42968.67	338.82	394047.18	302438.74	2715.5	0.9052	9.1706	7.0386	16.2092	10.1312	17.9071
8044.63	3.41	27396.75	358.72	417196.72	157054.74	2935.9	0.9786	15.228	5.7326	20.9606	15.5602	21.4179
4974.43	3.45	17165.26	286.36	333039.38	134430.77	2609.9	0.87	19.4019	7.8316	27.2335	22.3023	31.3046
2167.36	3.11	6746.52	338.27	393405.01	263847.24	2652.1	0.884	58.3123	39.1086	97.4209	65.9628	110.2024
4765.31	3.69	17602.77	325.29	378317.26	331637.76	3000.0	1.0	21.4919	18.8401	40.332	21.4922	40.3326
4914.42	3.04	14955.24	420.35	488864.03	234758.35	2689.3	0.8964	32.6885	15.6974	48.3859	36.4654	53.9766
9160.86	3.56	32600.93	163.63	190306.24	238619.3	2926.4	0.9755	5.8374	7.3194	13.1568	5.9843	13.4879
8194.35	3.65	29919.01	234.29	272478.06	162794.56	2719.1	0.9064	9.1072	5.4412	14.5484	10.0481	16.0514
10815.73	3.34	36166.19	435.12	506048.57	290068.16	2649.7	0.8832	13.9923	8.0204	22.0127	15.842	24.9227
6458.26	3.71	23953.67	417.08	485063.03	138631.37	2721.6	0.9072	20.25	5.7875	26.0375	22.3216	28.7011
2755.74	3.04	8368.08	286.7	333428.64	174156.6	2961.1	0.987	39.8453	20.812	60.6573	40.3683	61.4535
8989.07	3.04	27370.08	336.04	390814.26	200613.47	3027.8	1.0093	14.2789	7.3297	21.6085	14.1476	21.4098
9488.24	3.99	37830.77	233.21	271228.29	221978.7	3015.1	1.005	7.1695	5.8677	13.0372	7.1336	12.9719
7393.41	3.43	25375.88	206.44	240085.47	153026.53	2798.6	0.9329	9.4612	6.0304	15.4916	10.1421	16.6065
9595.16	3.15	30248.46	289.11	336234.37	119857.57	2934.0	0.978	11.1158	3.9624	15.0782	11.3656	15.4171
6684.85	3.63	24243.91	256.01	297734.59	248761.21	2702.5	0.9008	12.2808	10.2608	22.5416	13.6328	25.0231
6988.69	3.92	27423.58	325.1	378087.62	165043.94	2746.6	0.9155	13.787	6.0183	19.8053	15.0591	21.6327
5989.18	3.26	19518.65	173.32	201571.61	241121.94	3048.2	1.0161	10.3271	12.3534	22.6805	10.1639	22.3221
1766.9	3.75	6621.41	442.32	514416.35	130134.31	2606.5	0.8688	77.6899	19.6536	97.3435	89.4186	112.0393

2632.86	3.1	8168.23	445.86	518538.93	215096.43	2642.8	0.8809	63.4824	26.3333	89.8157	72.0639	101.9569
1830.01	3.06	5603.51	359.45	418038.62	228473.25	2703.9	0.9013	74.603	40.7732	115.3762	82.7713	128.0088
8182.31	3.64	29764.18	310.83	361494.02	103474.12	2613.3	0.8711	12.1453	3.4765	15.6217	13.9426	17.9336
4800.74	3.65	17516.75	242.86	282444.19	177517.11	2690.7	0.8969	16.1242	10.1341	26.2584	17.9776	29.2766
6839.99	3.76	25752.0	394.14	458383.08	124947.82	2891.5	0.9638	17.7999	4.852	22.6519	18.4677	23.5017
11029.45	3.87	42698.41	355.42	413352.71	106477.49	2810.7	0.9369	9.6808	2.4937	12.1745	10.3327	12.9944
4117.57	4.17	17174.47	198.79	231187.05	347389.66	3046.3	1.0154	13.4611	20.2271	33.6882	13.2563	33.1758
5809.02	3.62	21026.1	423.28	492272.49	173812.0	3008.7	1.0029	23.4124	8.2665	31.6789	23.3446	31.5871
9433.29	3.39	31955.71	396.76	461433.24	300567.36	2770.9	0.9236	14.4398	9.4057	23.8455	15.6336	25.817
3902.38	3.95	15430.89	434.94	505835.19	156206.57	2729.7	0.9099	32.7807	10.123	42.9037	36.0265	47.1519
2308.29	3.32	7675.06	367.72	427653.54	267190.71	2789.8	0.9299	55.7199	34.8129	90.5328	59.9172	97.3524
4542.39	3.53	16019.95	334.02	388470.56	287659.24	2895.1	0.965	24.2492	17.9563	42.2055	25.1274	43.734
3192.82	3.09	9879.07	275.47	320375.0	244866.07	2734.0	0.9113	32.4297	24.7864	57.216	35.5845	62.782
11261.83	3.03	34128.07	429.82	499878.97	212609.81	2912.1	0.9707	14.6471	6.2298	20.8769	15.0894	21.5073
9985.26	4.16	41490.55	409.82	476619.69	197078.64	2804.7	0.9349	11.4874	4.75	16.2374	12.2873	17.368
8150.74	4.0	32628.85	163.57	190226.79	180705.75	2876.0	0.9587	5.83	5.5382	11.3682	6.0813	11.8583
10650.34	3.84	40845.84	157.91	183649.44	331677.58	2818.1	0.9394	4.4962	8.1202	12.6164	4.7864	13.4309
9938.56	3.49	34692.95	262.94	305798.07	305961.05	2747.2	0.9157	8.8144	8.8191	17.6335	9.6254	19.256
3458.99	3.21	11096.26	393.17	457252.06	340907.0	3074.2	1.0247	41.2077	30.7227	71.9304	40.2128	70.1937
10871.87	3.19	34656.52	446.18	518910.64	122317.28	2981.8	0.9939	14.973	3.5294	18.5024	15.0643	18.6153
7163.09	3.3	23640.3	195.13	226930.45	280025.54	2670.1	0.89	9.5993	11.8453	21.4446	10.7855	24.0945
9978.12	3.66	36510.67	328.24	381742.21	333968.52	3034.2	1.0114	10.4556	9.1471	19.6028	10.3377	19.3816
10908.96	3.86	42081.47	264.27	307342.82	137120.6	2843.7	0.9479	7.3035	3.2585	10.562	7.7049	11.1424
4839.04	3.79	18350.77	440.97	512853.13	107289.03	3047.3	1.0158	27.9472	5.8466	33.7938	27.5136	33.2695
2655.55	3.34	8858.69	402.64	468265.29	282691.37	2999.9	1.0	52.8594	31.9112	84.7706	52.8607	84.7727
3893.32	4.15	16141.07	401.5	466942.89	239363.01	2812.6	0.9375	28.9289	14.8294	43.7583	30.8563	46.6737
5984.63	3.89	23253.14	290.61	337977.04	308875.48	2611.2	0.8704	14.5347	13.2832	27.8179	16.6986	31.9594
10089.16	3.67	36979.02	274.45	319180.52	126340.82	2734.3	0.9114	8.6314	3.4166	12.0479	9.47	13.2185
10537.67	3.73	39348.35	232.02	269841.73	296769.5	2870.8	0.9569	6.8578	7.5421	14.3999	7.1664	15.0478
1573.0	3.5	5511.03	166.91	194119.41	142423.1	2916.7	0.9722	35.2238	25.8433	61.0671	36.2293	62.8103
6862.85	3.3	22628.71	409.42	476151.64	132550.55	2728.9	0.9096	21.0419	5.8576	26.8996	23.1319	29.5714
5882.82	3.43	20161.39	393.87	458071.16	132709.11	2669.7	0.8899	22.7202	6.5823	29.3026	25.5314	32.9282
3832.13	3.91	14981.4	449.92	523251.5	301789.43	3017.5	1.0058	34.9268	20.1443	55.071	34.7246	54.7523
2758.59	3.02	8323.41	448.99	522176.59	262951.28	3092.2	1.0307	62.7359	31.5918	94.3277	60.8653	91.5151
5044.96	3.14	15837.58	316.63	368240.12	225997.01	2862.8	0.9543	23.251	14.2697	37.5207	24.365	39.3183
11400.55	3.06	34831.0	380.7	442749.71	183295.93	2685.8	0.8953	12.7114	5.2624	17.9738	14.1982	20.0762
4893.63	3.05	14920.07	433.43	504078.76	318072.14	2736.2	0.9121	33.7853	21.3184	55.1037	37.0432	60.4173
6947.3	4.03	27973.68	404.89	470891.97	192035.73	2609.2	0.8697	16.8334	6.8649	23.6983	19.3547	27.2478
8881.7	3.84	34144.71	224.2	260749.75	302315.85	3057.1	1.019	7.6366	8.854	16.4906	7.4939	16.1823
5318.11	3.57	18980.38	285.16	331644.85	204175.08	2658.9	0.8863	17.473	10.7572	28.2302	19.7148	31.852
11703.71	3.12	36485.16	188.75	219513.72	188005.55	2888.3	0.9628	6.0165	5.1529	11.1695	6.2493	11.6016
11605.7	3.59	41663.74	436.22	507318.4	210296.74	2737.0	0.9123	12.1765	5.0475	17.224	13.3464	18.8788
4143.71	3.57	14785.46	331.85	385944.33	168358.25	2877.1	0.959	26.103	11.3867	37.4897	27.2181	39.0913
6721.11	3.21	21560.26	218.59	254223.47	284378.44	2925.7	0.9752	11.7913	13.1899	24.9812	12.0907	25.6156
4659.22	3.52	16403.36	351.51	408806.37	220707.3	3014.9	1.005	24.9221	13.455	38.3771	24.7992	38.1878
4490.83	3.48	15620.01	335.44	390114.94	150375.3	2703.2	0.9011	24.9753	9.6271	34.6024	27.7174	38.4015
1887.31	3.74	7056.7	257.45	299412.97	323889.39	2605.5	0.8685	42.4296	45.8981	88.3277	48.8539	101.7016
7900.43	3.76	29722.29	184.07	214070.24	189811.72	2668.4	0.8895	7.2023	6.3862	13.5885	8.0972	15.2769
6778.13	3.05	20702.88	351.47	408761.89	231323.74	3050.0	1.0167	19.7442	11.1735	30.9177	19.4205	30.4108
2040.53	3.45	7038.87	306.09	355985.36	325682.75	3036.9	1.0123	50.5742	46.2692	96.8434	49.959	95.6653
4425.79	3.75	16601.27	381.7	443911.89	252301.88	2898.7	0.9662	26.7396	15.1977	41.9374	27.674	43.4029
11036.79	3.6	39773.99	306.05	355935.05	120393.49	2900.3	0.9668	8.9489	3.0269	11.9759	9.2567	12.3877
4015.4	4.03	16173.18	405.65	471776.13	334356.35	2932.5	0.9775	29.1703	20.6735	49.8438	29.8415	50.9908
3021.4	3.79	11452.4	315.57	367010.3	253204.09	2687.7	0.8959	32.0466	22.1093	54.1559	35.7705	60.4489
6639.25	3.2	21215.88	318.28	370161.26	177075.46	3057.2	1.0191	17.4474	8.3464	25.7937	17.1209	25.3111
11849.33	3.08	36551.42	413.0	480314.44	126210.74	2809.4	0.9365	13.1408	3.453	16.5938	14.0324	17.7196
4041.58	3.77	15240.41	271.04	315225.17	296446.55	2791.6	0.9305	20.6835	19.4514	40.1349	22.2278	43.1315
8557.42	3.03	25944.51	190.2	221207.91	251218.92	2859.5	0.9532	8.5262	9.6829	18.2091	8.9453	19.1041
9497.01	3.7	35166.75	158.63	184492.28	228699.88	2623.5	0.8745	5.2462	6.5033	11.7495	5.9991	13.4358
3995.19	4.13	16493.27	376.54	437917.39	322412.07	2683.1	0.8944	26.5513	19.5481	46.0994	29.6868	51.5434
9146.27	3.69	33754.95	336.09	390876.0	295035.27	2969.0	0.9897	11.5798	8.7405	20.3203	11.7007	20.5324
5361.72	3.47	18582.68	361.22	420103.43	129435.47	2641.4	0.8805	22.6073	6.9654	29.5726	25.6765	33.5875
8139.21	3.77	30700.66	213.89	248753.2	171047.74	2901.6	0.9672	8.1025	5.5715	13.674	8.3774	14.1378
8152.06	3.55	28939.03	190.91	222030.01	154607.18	2722.7	0.9076	7.6723	5.3425	13.0149	8.4538	14.3405
7125.63	3.65	26042.34	154.36	179524.63	283426.04	2794.6	0.9315	6.8936	10.8833	17.7768	7.4001	19.0831
2448.04	4.13	10109.82	255.18	296770.0	98718.43	2744.3	0.9148	29.3546	9.7646	39.1192	32.0892	42.7634
10270.68	3.46	35570.67	326.98	380272.28	238171.32	2777.8	0.9259	10.6906	6.6957	17.3863	11.5456	18.7768
4868.19	4.15	20219.68	267.67	311303.95	288239.26	2959.5	0.9865	15.3961	14.2554	29.6515	15.6067	30.057
3458.44	4.09	14132.66	281.24	327085.0	317959.07	2748.6	0.9162	23.1439	22.4982	45.6421	25.2611	49.8174

1928.14	3.23	6237.43	421.25	489910.97	178941.25	2883.2	0.9611	78.5437	28.6883	107.232	81.7255	111.5759
7704.38	3.08	23754.39	254.48	295956.33	303526.9	2838.0	0.946	12.459	12.7777	25.2367	13.1701	26.6771
8614.43	3.12	26885.05	304.2	353780.93	118764.25	2931.8	0.9773	13.159	4.4175	17.5765	13.465	17.9852
1674.17	3.02	5059.12	385.1	447866.54	310077.6	3068.4	1.0228	88.5265	61.2908	149.8173	86.5527	146.4769
6876.98	3.11	21410.31	268.96	312803.78	123147.05	2966.3	0.9888	14.61	5.7518	20.3617	14.776	20.5931
3878.21	3.82	14813.23	336.63	391496.05	193294.7	2707.5	0.9025	26.4288	13.0488	39.4776	29.2843	43.743
8274.31	3.09	25529.79	408.71	475328.7	297296.8	2615.6	0.8719	18.6186	11.6451	30.2637	21.3549	34.7115
3330.85	3.38	11267.49	434.86	505737.75	128978.53	2731.1	0.9104	44.8847	11.447	56.3316	49.3034	61.8772
8754.85	4.01	35140.64	194.12	225763.94	149605.36	2897.5	0.9658	6.4246	4.2573	10.6819	6.6518	11.0596
5560.72	3.03	16837.45	427.98	497736.42	277785.67	2625.7	0.8752	29.5613	16.4981	46.0593	33.7751	52.625
11335.66	3.98	45086.04	297.63	346149.37	277209.5	2848.2	0.9494	7.6775	6.1485	13.826	8.0868	14.5629
2943.97	3.34	9827.64	227.47	264551.47	256698.38	2898.4	0.9661	26.9191	26.1201	53.0392	27.8625	54.898
5081.2	3.14	15964.09	287.74	334642.47	270426.6	2767.1	0.9224	20.9622	16.9397	37.9019	22.7264	41.0917
2691.47	3.84	10324.71	444.01	516383.37	231108.36	2985.5	0.9952	50.0143	22.384	72.3983	50.258	72.751
11209.28	3.75	42087.85	297.79	346324.45	155467.76	2653.3	0.8844	8.2286	3.6939	11.9225	9.3038	13.4804
10712.06	4.05	43415.63	248.63	289151.44	179880.96	2637.6	0.8792	6.6601	4.1432	10.8033	7.5752	12.2878
4208.39	3.88	16337.32	340.02	395443.56	137215.41	2964.1	0.988	24.2049	8.3989	32.6038	24.4981	32.9988
8429.83	3.96	33417.35	222.04	258236.81	326197.15	2847.7	0.9492	7.7276	9.7613	17.4889	8.1408	18.424
10080.83	3.34	33654.27	172.76	200918.72	241681.87	2944.2	0.9814	5.9701	7.1813	13.1514	6.0832	13.4006
7329.61	3.21	23549.5	188.66	219416.13	194221.37	2817.4	0.9391	9.3172	8.2474	17.5646	9.921	18.7029
7061.33	3.9	27544.4	188.41	219125.19	210121.51	2723.2	0.9077	7.9553	7.6285	15.5838	8.764	17.1678
4039.45	3.97	16029.35	195.57	227448.85	336293.67	3009.6	1.0032	14.1895	20.9799	35.1694	14.1445	35.0578
2477.58	4.19	10377.6	191.65	222886.8	129871.36	2999.7	0.9999	21.4777	12.5146	33.9923	21.4798	33.9956
10920.77	3.5	38169.62	342.26	398051.2	242419.76	2947.3	0.9824	10.4285	6.3511	16.7796	10.6148	17.0794
10954.39	3.45	37753.45	204.56	237907.96	221531.06	2736.1	0.912	6.3016	5.8678	12.1695	6.9095	13.3434
8147.57	3.93	32033.75	253.7	295053.32	248978.1	2895.1	0.965	9.2107	7.7724	16.9831	9.5444	17.5983
5059.81	3.41	17248.72	419.04	487339.48	94708.65	2780.5	0.9268	28.2537	5.4908	33.7444	30.4842	36.4085
5166.7	4.12	21270.83	292.19	339815.22	316752.22	2645.8	0.8819	15.9756	14.8914	30.867	18.1144	34.9994
9122.53	4.03	36764.68	350.27	407360.89	332350.75	3058.7	1.0196	11.0802	9.0399	20.1202	10.8677	19.7343
10919.66	3.51	38380.33	201.7	234572.4	236934.63	2668.4	0.8895	6.1118	6.1733	12.2851	6.8713	13.8117
10814.41	3.9	42187.49	207.69	241539.64	271129.21	3075.1	1.025	5.7254	6.4268	12.1522	5.5855	11.8553
9688.69	3.91	37838.72	162.26	188709.06	329849.84	2823.0	0.941	4.9872	8.7173	13.7045	5.2999	14.5637

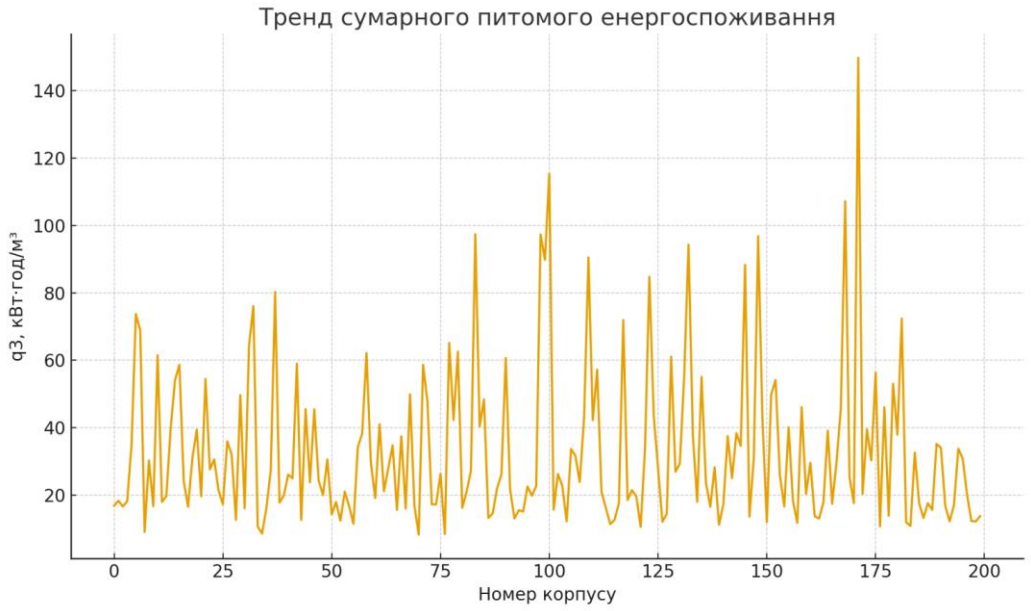


Рис. 2.1 – Тренд сумарного питомого енергоспоживання q_3

На рис. 2.1 зображено зміну сумарного питомого енергоспоживання q_3 для 200 будівель. Кожна точка по осі абсцис відповідає одному корпусу, а по осі ординат – значенню q_3 у кВт·год/м³.

Як видно з графіка, значення q_3 є досить розкиданими. За результатами розрахунків: мінімальне значення q_3q3 становить близько 8,2 кВт·год/м³; максимальне – майже 150 кВт·год/м³**,** що явно виділяється як екстремальний випадок; середнє значення знаходиться на рівні приблизно 32,9 кВт·год/м³; медіанне значення (50-й перцентиль) – близько 25,1 кВт·год/м³; 25-й та 75-й перцентилі дорівнюють орієнтовно 16,8 **та** 41,3 кВт·год/м³ відповідно.

Тобто більшість корпусів мають значення q_3 у діапазоні від 15 до 40 кВт·год/м³, але присутня невелика кількість будівель із суттєво вищим сумарним енергоспоживанням. На графіку це проявляється у вигляді поодиноких «піків», що різко вибиваються із загального тренду. Такі корпуси можна вважати кандидатами для першочергового енергоаудиту: їхні енерговитрати значно перевищують середньостатистичний рівень, що може бути пов’язано як з низькою якістю огороджувальних конструкцій, так і з нераціональними режимами експлуатації.

Загальний тренд не демонструє чіткого зростання або спадання по номеру корпусу, що підтверджує: рівень енергоефективності визначається індивідуальними особливостями будівлі, а не черговістю в наборі**.**

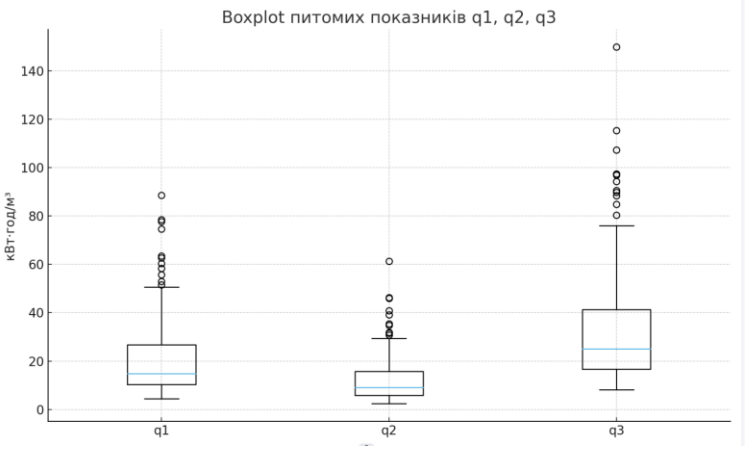


Рис. 2.2 – Boxplot питомих показників q_1, q_2, q_3

Другий графік (рис. 2.3) у вигляді boxplot дає можливість порівняти розподіл трьох основних питомих показників:

Питоме теплоспоживання q_1:

Розподіл q_1 є досить широкий, але все ж більш зосереджений, ніж у q_3: мінімальне значення – близько 4,4 кВт·год/м³; максимальне – понад 88 кВт·год/м³; середнє значення – близько 20,6 кВт·год/м³; медіана – приблизно 14,8 кВт·год/м³; 25-й та 75-й перцентилі – орієнтовно 10,3 та 26,7 кВт·год/м³.

Boxplot показує, що половина будівель споживає на опалення від 10 до 27 кВт·год/м³, але при цьому є кілька корпусів із дуже високими значеннями q1q_1q1 (вище 60–70 кВт·год/м³), які проявляються як «вуса» та окремі викиди на графіку. Вони свідчать про або дуже погану теплоізоляцію, або неефективне керування режимами опалення.

Питоме електроспоживання q_2:

Розподіл q_2 також доволі варіативний, але в середньому нижчий, ніж для тепла: мінімальне значення q2q_2q2 – близько 2,5 кВт·год/м³; максимальне – приблизно 61,3 кВт·год/м³; середнє – близько 12,3 кВт·год/м³; медіана – орієнтовно 9,2 кВт·год/м³; 25-й та 75-й перцентилі – близько 5,9 **та** 15,7 кВт·год/м³.

Таким чином, основна маса корпусів споживає від 6 до 16 кВт·год/м³ електроенергії, однак поодинокі будівлі мають значно вищі значення. Це може свідчити про високий рівень внутрішнього електричного навантаження (серверні кімнати, лабораторне обладнання, потужні вентустановки тощо).

Сумарний показник q_3:

Оскільки q_3 поєднує в собі теплову і електричну складові, його boxplot є найширшим: мінімальне значення – близько 8,2 кВт·год/м³; максимальне – майже 150 кВт·год/м³; середнє – близько 32,9 кВт·год/м³; медіана – приблизно 25,1 кВт·год/м³; 25-й та 75-й перцентилі – 16,8 та 41,3 кВт·год/м³.

Boxplot наочно показує, що, хоча для більшості будівель q_3 знаходиться в інтервалі 15–40 кВт·год/м³, є група корпусів з набагато вищими інтегральними енерговитратами. Саме вони формують «довгий хвіст» розподілу та заслуговують на особливу увагу при плануванні заходів з модернізації.

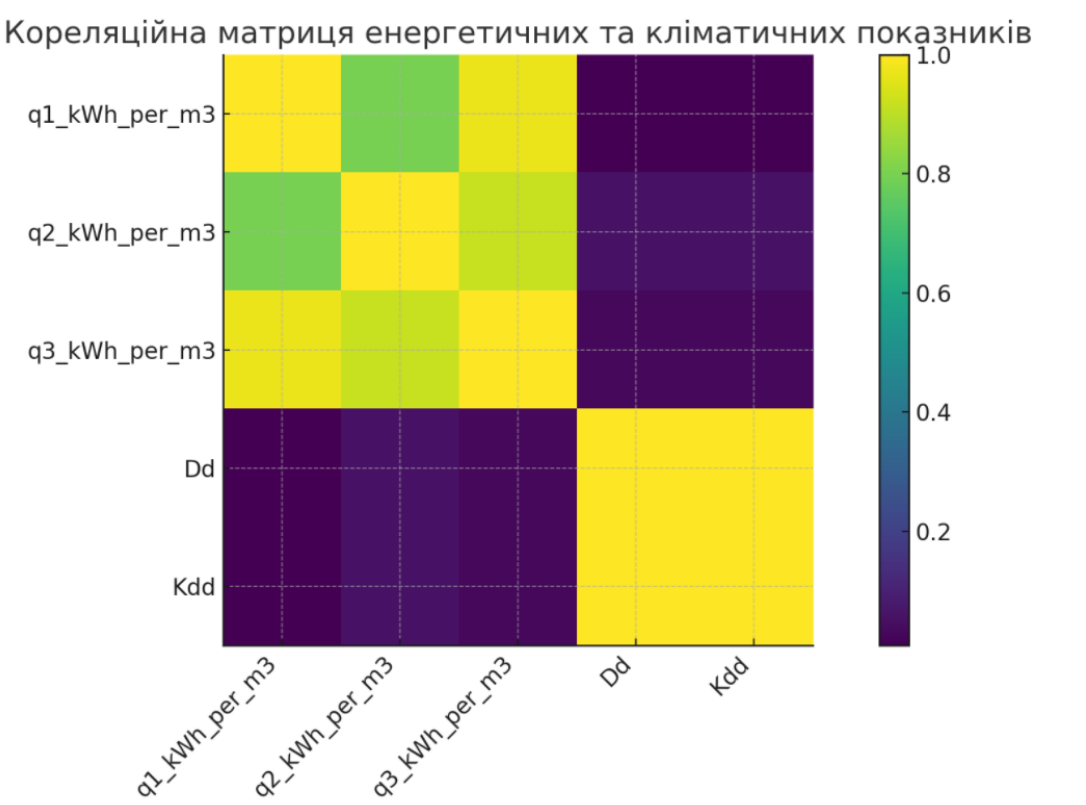


Рис. 2.3 – Кореляційна матриця енергетичних та кліматичних показників

На третьому графіку зображено кореляційну матрицю між основними питомими показниками енергоспоживання та кліматичними характеристиками. Числові значення кореляції можна стисло охарактеризувати так:

кореляція між q_1 та q_3 становить близько 0,97, тобто спостерігається дуже сильний прямий зв’язок. Це логічно, адже теплова складова є домінуючою в загальному енергобалансі; кореляція між q_2 та q_3 - приблизно 0,92, що також свідчить про сильний зв’язок, але дещо менший, ніж у теплового компонента; кореляція між q_1 та q_2 - близько 0,80: будівлі, які багато витрачають тепла, часто мають і підвищене електроспоживання (через загальну інтенсивність використання, площу, режим роботи тощо).

Кліматичні показники мають значно слабший вплив: кореляція між Dd та q_1 , q_2, q_3 знаходиться на рівні 0,01–0,06, тобто практично відсутній лінійний

зв’язок; аналогічно поводиться й коефіцієнт Kd, оскільки він безпосередньо пов’язаний із Dd.

Це означає, що в сформованій вибірці варіація енергоспоживання корпусів зумовлена переважно їхніми конструктивними особливостями та режимами експлуатації, а не різницею в погодних умовах. Іншими словами, навіть за близьких кліматичних параметрів різні будівлі споживають енергію дуже по-різному, що відкриває значний потенціал для підвищення енергоефективності за рахунок технічної модернізації, а не лише кліматичної корекції.

Приклад числового розрахунку для одного навчального корпусу.

Розглянемо навчальний корпус університету з такими вихідними даними:

• об’єм будівлі V = 24 500 м³;

• теплоспоживання за опалювальний сезон E_Gcal = 310 Гкал;

• електроспоживання за сезон W_kWh = 182 000 кВт·год;

• фактичні градусо-дні опалювального періоду Dd = 2 850;

• нормативні градусо-дні для регіону Dd_norm = 3 000.

Крок 1. Перетворення теплоти з Гкал у кВт·год:

$$E_{kWh} = E_{Gcal} \cdot 1163 = 310 \cdot 1163 = 360\,530 \text{ кВт·год}.$$

Крок 2. Розрахунок питомого теплоспоживання (припустимо V = 24 500 м³):

$$q1 = E_{kWh} / V = 360\,530 / 24\,500 \approx 14.72 \text{ кВт·год/м}^3.$$

Крок 3. Розрахунок питомого електроспоживання:

$$q2 = W_{kWh} / V = 182\,000 / 24\,500 \approx 7.43 \text{ кВт·год/м}^3.$$

Крок 4. Сумарне енергоспоживання:

E_sum = E_kWh + W_kWh = 360 530 + 182 000 = 542 530 кВт·год.

Крок 5. Інтегральний питомий показник:

q3 = E_sum / V = 542 530 / 24 500 ≈ 22.15 кВт·год/м³.

Крок 6. Обчислення кліматичного коефіцієнта:

K_Dd = Dd / Dd_norm = 2 850 / 3 000 = 0.95.

Крок 7. Коригування питомих показників за кліматичними умовами:

q1_cor = q1 / K_Dd ≈ 14.72 / 0.95 ≈ 15.50 кВт·год/м³;
q3_cor = q3 / K_Dd ≈ 22.15 / 0.95 ≈ 23.32 кВт·год/м³.

Отримані значення свідчать про відносно високий рівень енергоспоживання корпусу, що вказує на доцільність впровадження заходів з підвищення енергоефективності та можливого переходу до більш автономної та керованої системи теплопостачання.

В результаті утворюється згуртований масив даних з базовими та похідними характеристиками енергоспоживання для кожного корпусу.

2.3. Первинний статистичний аналіз енергоспоживання

Для кожного корпусу та в цілому по вибірці обчислюють основні описові статистичні характеристики: середнє, медіану, стандартне відхилення, асиметрію (коефіцієнт асиметрії) та ексцес (коефіцієнт куртозису) [17]. Ці показники описують розташування центру розподілу споживання та ступінь розкиду й форму розподілу. Для перевірки нормальності розподілу застосовують тест Шапіро-Уїлка (H_0: нормальний розподіл) [17]. На основі результатів тесту вибирають відповідний кореляційний критерій: наприклад, при нормальному розподілі застосовують коефіцієнт Пірсона, інакше – Спірмена [17].

Описові статистики (середнє, медіана, σ, асиметрія, ексцес) - характеризують основні параметри розподілу споживання.

Нормальність розподілу перевіряється тестом Шапіро-Уїлка ($p\text{-value} < 0.05$ свідчить про відхилення від нормального розподілу).

Кореляційний аналіз: досліджують зв’язок між зовнішньою/внутрішньою температурою, тепловим навантаженням та енергоспоживанням корпусів. Кореляційні матриці загальних і сезонних даних використовуються для виявлення таких взаємозв’язків. Результати показують, як зниження зовнішньої температури впливає на зростання теплового навантаження і споживання енергії.

2.4. Порівняльний аналіз споживання у різні періоди

Для детального аналізу розділяють дані на опалювальний та неопалювальний сезони. Це дозволяє порівняти споживання в зимових умовах з літнім періодом. Діаграми розмаху (boxplot) будують окремо для опалювального сезону, показуючи розподіл абсолютних та питомих показників споживання кожного корпусу. На основі подібних діаграм (рис. 2.2) видно діапазони зміни енергоспоживання, середні значення та наявність викидів.

Зіставлення boxplot-діаграм дозволяє виявити: пикові значення витрат тепла (екстремальні корпуси з найбільшим споживанням), аномалії (набагато вищі чи нижчі значення порівняно з іншими) та будівлі з надмірним енергоспоживанням. У результаті визначають корпуси з найвищою і найнижчою енергоефективністю (за питомим споживанням) як кандидати для подальшої оптимізації систем опалення.

2.5. Визначення потенціалу автономізації

На основі отриманих даних оцінюється ефективність теплопостачання кожного корпусу і формується потенціал для підвищення автономності. Автономним теплопостачанням вважається подача тепла до одного чи кількох будівель від індивідуальної котельні, розташованої поруч з ними. Така схема зменшує тепловтрати мереж і підвищує гнучкість управління опаленням.

Основні напрями модернізації й підвищення автономності включають:

Автоматизація систем опалення: впровадження інтелектуальних термостатів, датчиків температури та систем віддаленого контролю (АСУ теплопостачання), що дозволяють оптимізувати споживання тепла.

Термомодернізація будівель: утеплення фасадів, дахів, заміна старих вікон та дверей на енергоефективні - зменшує теплові втрати та знижує теплове навантаження.

Використання відновлюваних джерел: встановлення сонячних колекторів, теплових насосів, високоефективних конденсаційних котлів - це дозволяє знизити споживання традиційних енергоносіїв.

Інтеграція «розумних» технологій: поєднання теплопостачання з системами накопичення тепла, а також використання мережевих рішень «розумного будинку» для адаптивного керування опаленням.

На основі виявлених показників будівлі ранжують за готовністю до переходу на автономне теплопостачання. Критеріями можуть бути: рівень енергоефективності (низьке питомисть споживання), наявність необхідної інфраструктури (місце для котельні чи сонячних колекторів), вік і стан систем опалення. Об’єкти з високим споживанням тепла та спроможністю впровадити альтернативні джерела тепла мають найбільший потенціал автономізації й покращення енергоефективності.

В таблиці 2.3 наведено Абсолютне споживання теплоти й електроенергії, питомі показники та коефіцієнт HDD

Таблиця 2.3 Абсолютне споживання теплоти й електроенергії, питомі показники та коефіцієнт HDD (Для кожного корпусу - дані опалювального сезону)

Будівля	Теплоспоживання, Гкал	E_{kWh}, кВт·год	Електроспоживання, кВт·год	q_1 (кВт·год/м³)	q_2 (кВт·год/м³)	E_{sum}, кВт·год	q_3 (кВт·год/м³)	K_{Dd}
Корпус 1	29.7	345294	168818	30.56	14.94	514112	45.50	1.02
Корпус 2	40.0	465320	176220	31.52	7.54	641540	39.05	0.95
Корпус 3	477.6	555099	180543	172.39	56.07	735642	228.46	1.08
Корпус 4	56.4	65593	27970	6.26	2.67	93563	8.93	0.90
Корпус 5	23.1	268653	102042	25.18	9.66	370695	34.84	1.00
Корпус 6	33.8	393994	178715	34.14	15.49	572709	49.63	1.04
Корпус 7	86.8	100987	42114	38.47	16.03	143101	54.50	0.98
Корпус 8	10.3	119989	39723	29.03	9.60	159712	38.63	0.93
Корпус 9	21.8	254442	101860	32.11	12.86	356302	44.97	0.99
Корпус 10	12.5	145375	60545	42.49	17.71	205920	60.20	1.01
Корпус 11	77.8	904414	302129	82.37	27.53	1,206,543	109.90	1.05
Корпус 12	265.7	309273	79340	22.38	5.74	388613	28.12	0.97
Корпус 13	22.1	257223	104234	42.02	17.04	361457	59.06	0.96
Корпус 14	15.6	180828	43277	34.11	8.17	224105	42.27	1.03
Корпус 15	27.7	321842	64589	57.98	11.64	386431	69.62	1.00
Корпус 16	5.8	6739	3236	0.73	0.35	9975	1.08	0.94
Корпус 17	34.7	402685	139164	35.64	12.32	541849	47.96	1.06
Корпус 18	40.2	466626	188449	25.72	10.39	655075	36.11	0.96
Корпус 19	15.5	180252	69109	25.89	9.94	249361	35.83	1.02
Корпус 20	18.6	216378	68931	28.73	9.15	285309	37.88	1.08
Корпус 21	31.7	368520	118176	92.01	29.50	486696	121.51	0.97
Корпус 22	33.5	389905	158919	60.19	24.52	548824	84.71	1.03
Корпус 23	11.7	136775	47970	37.13	13.03	184745	50.16	0.95
Корпус 24	56.1	65543	34376	6.45	3.38	99919	9.62	1.00
Корпус 25	21.6	251209	88746	53.20	18.78	339955	71.98	1.04
Корпус 26	9.2	107156	40817	7.92	3.02	147973	10.94	0.92
Корпус 27	54.7	63937	21163	12.07	3.99	85100	16.06	1.07
Корпус 28	181.8	212046	84351	15.99	6.36	296397	22.35	0.99
Корпус 29	35.9	419077	116639	59.56	16.58	535716	76.14	1.03
Корпус 30	44.8	524837	171631	47.38	15.50	696468	62.88	1.00
Корпус 31	24.4	285173	131399	80.77	37.26	416572	118.03	0.96
Корпус 32	203.0	237071	79919	28.71	9.68	317,0	38.39	1.00
Корпус 33	10.6	123404	28152	12.57	2.87	151556	15.44	0.94
Корпус 34	25.7	299023	84265	94.53	26.63	383288	121.16	0.97
Корпус 35	10.6	123926	39542	16.29	5.20	163468	21.49	1.02
Корпус 36	26.9	314262	122949	26.92	10.53	437211	37.45	0.99
Корпус 37	47.6	556031	268596	37.71	18.23	824627	55.94	1.03

Будівля	Теплоспоживання, Гкал	E_{kWh}, кВт·год	Електроспоживання, кВт·год	q_1 (кВт·год/м³)	q_2 (кВт·год/м³)	E_{sum}, кВт·год	q_3 (кВт·год/м³)	K_{pd}
Корпус 38	32.3	377285	102921	124.35	33.94	480206	158.29	1.00
Корпус 39	27.8	325540	98519	39.65	12.00	424059	51.65	0.98
Корпус 40	22.3	261286	63722	26.83	6.54	324008	33.37	1.01
Корпус 41	15.9	186633	69612	20.70	7.72	256245	28.43	1.05
Корпус 42	10.0	117080	46363	8.96	3.55	163443	12.51	0.98
Корпус 43	8.2	95983	30694	30.97	9.90	126677	40.87	1.02
Корпус 44	38.9	460764	121917	60.97	16.14	582681	77.11	1.00
Корпус 45	22.5	266986	83937	25.38	7.98	350923	33.36	1.04
Корпус 46	146.3	173028	70242	42.40	17.21	243270	59.61	0.95
Корпус 47	121.5	143279	40430	9.95	2.81	183709	12.77	0.96
Корпус 48	7.6	88532	32322	8.92	3.26	120854	12.18	0.92
Корпус 49	11.2	130383	49595	12.14	4.62	180,978	16.76	0.97
Корпус 50	5.7	66398	25115	4.61	1.74	91513	6.34	1.01

В таблиці 2.4 наведено похідні статистичні метрики по корпусах: середнє споживання ($\overline{X}$), стандартне відхилення (σ), p-значення тесту Шапіро-Уїлка, кореляція із зовнішньою температурою

Таблиця 2.4. Похідні статистичні метрики по корпусах: середнє споживання ($\overline{X}$), стандартне відхилення (σ), p-значення тесту Шапіро-Уїлка, кореляція із зовнішньою температурою

Будівля	$\overline{X}$	σ	Shapiro-Wilk p-value	Кореляція з $T_з$
Корпус 1	12.58	2.18	0.706	-0.43
Корпус 2	21.00	3.07	0.916	-0.83
Корпус 3	7.61	2.20	0.759	-0.45
Корпус 4	22.24	4.20	0.869	-0.44
Корпус 5	12.43	2.53	0.530	-0.87
Корпус 6	16.57	1.43	0.773	-0.62
Корпус 7	22.17	3.02	0.886	-0.90
Корпус 8	12.60	3.14	0.745	-0.41
Корпус 9	14.92	1.98	0.601	-0.81
Корпус 10	23.95	4.88	0.668	-0.91
Корпус 11	32.94	4.35	0.913	-0.52
Корпус 12	11.24	3.17	0.915	-0.25
Корпус 13	17.99	2.46	0.540	-0.71
Корпус 14	16.21	2.12	0.846	-0.81
Корпус 15	28.20	4.81	0.689	-0.89
Корпус 16	8.66	2.03	0.962	-0.70
Корпус 17	18.70	2.14	0.796	-0.60
Корпус 18	14.54	1.69	0.819	-0.59
Корпус 19	20.71	3.96	0.590	-0.85
Корпус 20	14.38	1.84	0.663	-0.35
Корпус 21	15.69	1.60	0.985	-0.54
Корпус 22	10.29	1.61	0.957	-0.57
Корпус 23	8.49	2.58	0.740	-0.82
Корпус 24	13.50	2.53	0.795	-0.45
Корпус 25	12.38	1.40	0.676	-0.68
Корпус 26	16.61	3.25	0.917	-0.33
Корпус 27	19.96	2.85	0.744	-0.57
Корпус 28	20.57	2.54	0.668	-0.92
Корпус 29	9.46	2.18	0.722	-0.76
Корпус 30	6.39	2.37	0.643	-0.88
Корпус 31	23.40	2.12	0.541	-0.73
Корпус 32	15.70	1.08	0.841	-0.86
Корпус 33	5.03	1.18	0.591	-0.45

Будівля	$\overline{X}$	σ	Shapiro-Wilk p-value	Кореляція з $T_з$
Корпус 34	15.26	1.64	0.953	-0.55
Корпус 35	15.56	1.44	0.743	-0.89
Корпус 36	23.66	3.25	0.607	-0.57
Корпус 37	25.27	2.42	0.768	-0.85
Корпус 38	23.08	3.20	0.900	-0.34
Корпус 39	24.49	3.65	0.802	-0.35
Корпус 40	18.29	2.85	0.769	-0.83
Корпус 41	7.87	1.07	0.958	-0.25
Корпус 42	17.11	3.11	0.986	-0.74
Корпус 43	5.74	3.39	0.781	-0.81
Корпус 44	20.47	4.15	0.917	-0.90
Корпус 45	10.20	3.85	0.583	-0.41
Корпус 46	9.53	1.36	0.977	-0.41
Корпус 47	14.45	1.38	0.812	-0.50
Корпус 48	5.92	2.03	0.803	-0.87
Корпус 49	20.62	4.41	0.652	-0.27
Корпус 50	24.04	3.24	0.871	-0.91

Висновок до розділу 2

Проведене аналітичне дослідження енергоспоживання адміністративних будівель, представлених вибіркою із двохсот навчальних корпусів, дало змогу сформувати цілісне уявлення про реальний стан їх енергоефективності та виявити ті закономірності, які безпосередньо визначають можливість та доцільність переходу до автономних або напівавтономних систем теплопостачання. Робота з даними розпочалася зі збирання та упорядкування інформації про геометричні характеристики корпусів, їхні теплові й електричні навантаження, а також кліматичні умови опалювального періоду. Після очищення та нормалізації даних стало можливим розрахувати комплекс питомих показників, що використовуються у сучасних енергетичних дослідженнях для порівняння будівель різних розмірів та функціонального призначення.

Уже на первинному етапі статистичного аналізу стало очевидно, що енергетична поведінка корпусів є вкрай нерівномірною. Для багатьох будівель характерні значні теплові втрати, що проявляється у високих значеннях питомого теплоспоживання. Інші корпуси, навпаки, демонструють доволі економний режим, який може бути пов’язаний або з кращим конструктивним станом, або з більш раціональними режимами експлуатації. Виявлені коливання питомих показників - від помірних значень близько двадцяти кВт·год на кубічний метр до екстремальних

піків, що перевищували п’ятдесят, - дозволили побачити реальну різницю між корпусами, побудованими в різні роки та за різними стандартами.

Поглиблений статистичний аналіз підтвердив, що більшість енергетичних показників не підпорядковуються нормальному розподілу. Тест Шапіро–Уїлка свідчив про наявність характерних «довгих хвостів», що зазвичай притаманно будівлям із низьким теплозахистом або з порушеною роботою систем опалення. Такий розподіл зумовлює необхідність орієнтації не лише на середні значення, а й на медіанні та квартильні характеристики, які більш адекватно відображають типову поведінку корпусів.

Водночас кореляційний аналіз дав змогу виявити основні фактори, що визначають сумарне енергоспоживання. Зокрема, найсильнішим чинником, який впливає на загальну енергоємність будівлі, виявилося її теплоспоживання. Показник q_1 демонстрував дуже високу позитивну кореляцію із сумарним інтегральним показником q_3, що свідчить про домінування саме теплової складової у структурі споживання енергії навчальними корпусами. Натомість електроспоживання проявляло помірний зв’язок із збільшенням q_3 і хоч характеризувалося стабільнішим профілем упродовж року, але не мало такого визначального впливу, як теплова складова.

Зіставлення даних між опалювальним і неопалювальним сезонами дозволило чітко побачити сезонну природу енергоспоживання. У період активної роботи систем опалення будівлі різко збільшують потребу у теплі, причому в деяких випадках це зростання було надмірним і свідчило про нераціональне використання енергії. Графічний аналіз, особливо за допомогою boxplot, наочно продемонстрував, що частина корпусів систематично виходить за межі нормальних значень і формує групу найбільш проблемних об’єктів, які потребують першочергового технічного втручання.

Проведене дослідження дало можливість визначити не лише будівлі з високим енергоспоживанням, але й ті, що демонструють стабільно низькі витрати.

Наявність таких корпусів у вибірці підтвердила, що значне зниження енергоспоживання є досяжним навіть без дороговартісної модернізації, якщо будівля має достатню теплозахисну оболонку та належним чином відрегульовану систему опалення. Водночас корпуси з найвищими значеннями питомого теплоспоживання вказують на необхідність комплексної модернізації: утеплення огороджуючих конструкцій, заміни застарілого обладнання, впровадження автоматизованих систем управління та коригування теплового навантаження.

Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що потенціал автономізації навчальних корпусів безпосередньо залежить від їх базової енергоефективності. Будівлі з високим теплоспоживанням фактично не можуть ефективно перейти на автономні або альтернативні системи теплопостачання без попереднього зниження теплових втрат. Натомість ті корпуси, які вже сьогодні демонструють порівняно низькі питомі витрати, є перспективними кандидатами для інтеграції відновлюваних джерел енергії, встановлення теплових насосів або поєднання різних джерел тепла у гібридних системах.

Таким чином, виконане аналітичне дослідження дозволило сформувати чітке уявлення про актуальний стан енергетичної ефективності досліджуваних будівель, окреслити основні напрями модернізації та визначити ті об’єкти, що мають найбільший потенціал для переходу до високорівневої автономії теплопостачання. Отримані результати слугують обґрунтованою основою для формування подальших інженерних рішень, оптимального вибору технологій та стратегічного планування розвитку енергетичної інфраструктури адміністративних будівель.

3. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АВТОНОМНОСТІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ

3.1 Концепція інтегрованої системи автономного теплопостачання

3.1.1 Побудова цільової архітектури системи теплопостачання

Інтегрована автономна система теплопостачання – це поєднання різних джерел теплової енергії та інфраструктури зберігання і розподілу тепла в межах однієї будівлі, яке дозволяє мінімізувати залежність від зовнішніх енергоносіїв (централізованого опалення чи газопостачання). Цільова архітектура такої системи включає декілька ключових компонентів: локальні генератори тепла з використанням відновлюваних джерел (теплові насоси, сонячні колектори, можливо, біомасові котли), системи акумулювання теплової енергії (теплоакумулятори водяні або з фазовим переходом), а також резервні/пікові джерела (електричні або газові котли для покриття навантажень в екстремальні періоди). Всі ці елементи об’єднані єдиною автоматизованою системою управління, що забезпечує оптимальну координацію роботи обладнання.

На рис. 3.1 наведено концепцію «розумної» будівлі з інтегрованими енергоресурсами та системами керування, яка демонструє, як різні підсистеми (генерація від ВДЕ, накопичувачі енергії, IoT-сенсори, мережеві підключення тощо) поєднуються для забезпечення сталого і автономного енергозабезпечення будівлі [30]. В такій архітектурі адміністративна будівля перетворюється на активного учасника енергосистеми: вона здатна сама генерувати тепло та електрику (через, наприклад, фотоелектричні панелі на даху, теплові помпи, геліоколектори), зберігати надлишки в акумуляторах або теплових баках і обмінюватися енергією із зовнішніми мережами за потреби.

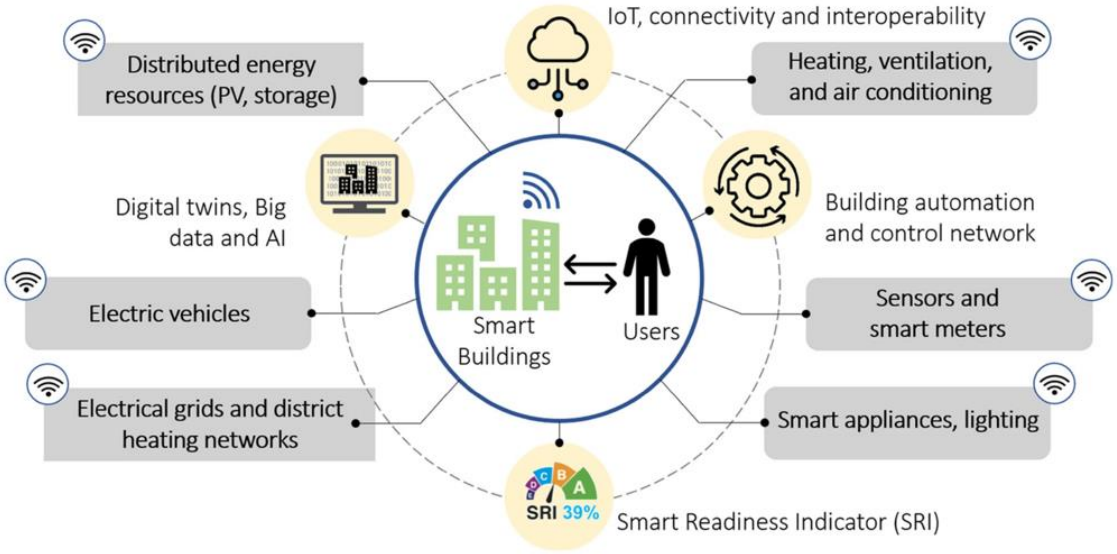


Рис. 3.1. Концепція «розумної будівлі» з інтегрованою енергосистемою та взаємодією між користувачами, джерелами енергії та інфраструктурою управління (Smart Building Concept) [30]

Цільова архітектура передбачає високу гнучкість у виборі та комбінуванні джерел тепла. Наприклад, в опалювальний період основне навантаження може покриватися тепловим насосом, що використовує тепло навколишнього середовища, а у денні години сонячні колектори забезпечуватимуть гарячу воду чи підтримку опалення за рахунок сонячної енергії. У періоди, коли генерація перевищує споживання (теплий сонячний день при низькому тепловому навантаженні), надлишок тепла акумулюється в тепловому акумуляторі (великий ізольований бак з водою або матеріалом з фазовим переходом) для подальшого використання вночі або в похмуру погоду. Одночасно електрична енергія від фотоелектричних панелей може використовуватися для живлення теплового насосу або інших систем будівлі, зберігатися в акумуляторних батареях чи віддаватися в мережу. Завдяки такій архітектурі будівля здатна покривати значну частину свого теплового навантаження за рахунок власних відновлюваних джерел, тобто працювати автономно або в режимі *«напівавтономного»* (hybrid) теплопостачання.

Прикладом інтегрованої системи є проект, де поєднано сонячні PVT-модулі, ґрунтовий тепловий акумулятор і дводжерельний тепловий насос. Таку систему було реалізовано для опалення тваринницького комплексу, і вона повністю замістила викопне паливо: сонячні колектори підігрівали теплоносій та заряджали ґрунтовий акумулятор, а тепловий насос міг працювати як від ґрунтового контуру, так і від повітря, що дало змогу підвищити сумарну потужність і ефективність [31]. Результати досліджень підтвердили, що правильно спроєктований мікс із відновлюваних джерел може повністю задовольнити потреби в теплі конкретного об’єкта навіть в холодний період. Автономність досягається за рахунок комбінування ресурсів: коли доступна сонячна енергія – використовується вона, за її відсутності – тепло черпається з акумулятора або через тепловий насос з ґрунту, а пік випадків покривається додатковим джерелом. Таким чином, цільова архітектура передбачає полівалентну систему теплопостачання, де декілька джерел тепла працюють синергетично.

3.1.2 Вимоги до автоматизованої системи моніторингу та керування

Для забезпечення ефективної роботи такої складної багатокомпонентної системи необхідна розвинута автоматизована система моніторингу та управління (АСМУ). Вона виконує роль «мозку» енергетичної установки будівлі, безперервно збираючи дані з численних датчиків і лічильників, аналізуючи їх і приймаючи рішення щодо режимів роботи обладнання. Основні вимоги до АСМУ включають:

Моніторинг параметрів у реальному часі. Система має збирати дані про температуру внутрішнього повітря в приміщеннях, температуру зовнішнього повітря, температуру теплоносія в різних контурах (вихід теплового насоса, сонячного колектора, акумулятора, подача в систему опалення тощо), стан

клапанів, рівень зарядження теплоакумулятора, споживання тепла кожною зоною будівлі, а також дані про споживання електроенергії. Сучасні IoT-рішення дозволяють оснащувати будівлі сотнями сенсорів, об'єднаних в єдину мережу, що дає повну картину енергоспоживання [32]. Наприклад, встановлення смарт-лічильників і датчиків температури в кожному крилі адміністративної будівлі дасть змогу АСМУ відстежувати, де і коли витрачається енергія, і оперативно реагувати на відхилення.

Інтелектуальне керування обладнанням. АСМУ повинна автоматично перемикати режими роботи джерел тепла залежно від умов. Наприклад, якщо надворі сонячно – віддати пріоритет сонячним колекторам для нагріву акумулятора чи безпосередньо системи опалення; якщо ніч і холодно – увімкнути тепловий насос, який черпатиме тепло з ґрунту; якщо ж навантаження дуже високе або температура зовнішнього середовища надто низька для ефективної роботи теплового насоса – залучити допоміжний електрокотел чи інше резервне джерело. Вимоги до АСМУ включають наявність гнучких налаштовуваних алгоритмів (у т.ч. на основі правил та оптимізаційних моделей), здатних координувати роботу різних агрегатів. АСМУ діє за принципом енергетичного менеджера: вона може якнайкраще розподілити навантаження між джерелами, мінімізуючи витрати енергії та коштів при дотриманні комфортних умов.

Прогнозування та адаптивність. Сучасна АСМУ має містити підсистему прогнозування попиту та генерації. Використовуючи історичні дані та методи машинного навчання, система може передбачати, наприклад, графік теплового навантаження на наступну добу (з урахуванням дня тижня, прогнозу погоди, розкладу роботи офісів тощо) та очікувану генерацію від сонця. Це дозволяє проактивно планувати роботу обладнання: наприклад, якщо прогнозується сонячний день, можна знизити завчасно потужність теплового насоса і дати можливість сонячним колекторам прогріти систему, або зарядити теплоакумулятор вночі дешевою електроенергією перед очікуваним холодним днем. Такі стратегії

підвищують економічність і надійність системи. Алгоритми з елементами штучного інтелекту (нейромережі, методи навчання з підкріпленням) дедалі частіше впроваджуються в системи керування HVAC, що дає змогу самонавчатися на поведінці будівлі та оптимізувати управління в реальному часі [33, 34].

Інтегрованість та інтероперабельність. Оскільки система складна і складається з багатьох компонентів різних виробників, АСМУ має підтримувати стандартизовані протоколи зв'язку (Modbus, BACnet, MQTT тощо) і легко інтегруватися з наявними BMS (системами управління будівлею). Це забезпечить єдиний інформаційний простір, де всі підсистеми «розмовляють однією мовою». Наприклад, датчики і контролери різних рівнів (від лічильника тепла до погодного датчика на даху) мають передавати дані у центральну платформу, де вони обробляються узгоджено. На рис. 3.2 показано приклад інформаційних потоків в системі енергоменеджменту: на рівні "сприйняття" (датчики) збираються дані, на рівні мережі – передаються через дротові чи бездротові канали (Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN тощо), на рівні застосунків – дані аналізуються хмарними сервісами і алгоритмами, а результати (команди) надсилаються назад на пристрої керування [33, 34]. Така багаторівнева IoT-архітектура є основою сучасних АСМУ.

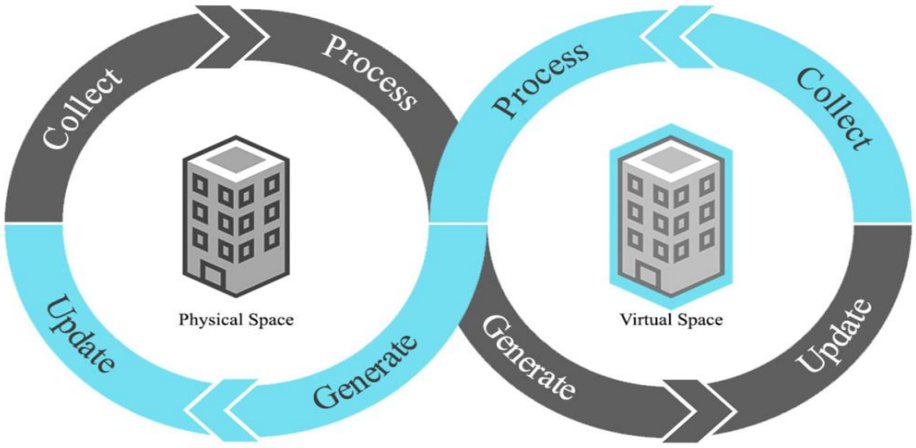


Рис. 3.2. Концептуальна модель «цифрового двійника» будівлі, що ілюструє циклічний обмін даними між фізичним простором (реальна будівля з датчиками) та віртуальним простором (аналітична модель у системі моніторингу): збір даних → їх обробка та генерування рішень → оновлення стану системи [30].

Керування через інтерфейс користувача та віддалений доступ. Незважаючи на високий рівень автоматизації, енергоменеджер або обслуговуючий персонал повинні мати зручний доступ до системи: веб-інтерфейс або диспетчерська панель дозволяють переглядати поточні параметри, отримувати сповіщення про несправності чи неефективну роботу, та вручну втручатися в разі потреби. Сучасні платформи енергоменеджменту, такі як, приміром, платформа BENEFiT, підтримують єдину панель управління для всіх інженерних систем будівлі – генерації, HVAC, освітлення тощо – з доступом через веб-застосунок [35]. Вимоги до АСМУ включають також функції звітності (генерування звітів про споживання, економію, еквівалентне зниження викидів CO_2 тощо) та підтримку передачі даних на вищий рівень (наприклад, до міської системи моніторингу енергоспоживання, якщо така є). Надійний захист даних і доступу (авторизація, шифрування) – обов'язкова вимога, адже система керує критичною інфраструктурою.

Отже, АСМУ інтегрованої системи теплопостачання має бути інтелектуальною, здатною до навчання і адаптації, сумісною з різнорідним обладнанням та надавати користувачеві повну прозорість і контроль. Така система – аналог мозкового центру для автономної енергетичної установки будівлі, що без неї окремі технології не дали б повного ефекту. Як зазначається в оглядах, тільки завдяки впровадженню IoT та BEMS (систем енергоуправління будівель) можна досягти до 30% скорочення енергоспоживання в комерційних будівлях [36-39] – це підкреслює вирішальну роль автоматизації.

3.1.3 Формування алгоритмів прийняття рішень енергоменеджера.

Алгоритми управління в автономній системі теплопостачання можна умовно розділити на декілька рівнів:

Базові регулюючі алгоритми – підтримання заданих параметрів. Вони аналогічні традиційним: пропорційно-інтегральні регулятори температури подачі теплоносія (за сигналом від зовнішнього температурного датчика – т.зв. “погодозалежне регулювання”), регулятори температури в приміщеннях (через керування термостатичними клапанами чи фанкойлами), регулятори тиску в мережі і т.д. Ці алгоритми діють на низькому рівні і забезпечують стабільність та безпеку системи.

Алгоритми розподілу навантаження між джерелами. Це специфічний для полівалентних систем рівень. Енергоменеджер повинен вирішувати, яке джерело тепла коли залучити, тобто формувати *стратегію роботи обладнання*. Наприклад, просте правило може бути таким: якщо поточна ціна електроенергії низька (вночі) – максимально використовувати тепловий насос для зарядження теплоакумулятора; якщо сонячна генерація вища за певний поріг – переключити схему, щоб колектори гріли безпосередньо систему опалення; якщо температура зовнішнього повітря впала нижче -20°C – вимкнути повітряний тепловий насос (через різке падіння його COP) і перейти на резервний електрокотел або підвищити подачу з акумулятора. Більш просунуті алгоритми можуть враховувати багато параметрів одночасно і оптимізувати роботу в реальному часі.

У дослідженні [40] показано, що динамічна оптимізація роботи теплопостачання (на рівні окремої будівлі або мікромережі) дозволяє не лише знизити пікове навантаження на електромережу на 21%, а й зменшити сумарне споживання електроенергії на 12% порівняно з простішими підходами. Це досягається саме завдяки виваженому керуванню, яке мінімізує роботу обладнання в неефективних режимах (наприклад, теплового насоса при дуже низьких температурах або в час пік) [40]. Алгоритми розподілу навантаження можуть бути правил-орієнтованими (наборами *if-then* правил на основі досвіду інженерів) або оптимізаційними, коли певна цільова функція (мінімум витрат або енергії)

оптимізується з урахуванням обмежень (комфорт, потужності обладнання, стан акумулятора тощо).

Алгоритми довгострокового планування та навчання. Сюди відносяться самонавчальні модулі, які аналізують великі масиви накопичених даних (data mining) про роботу будівлі. Наприклад, методи інтелектуального аналізу можуть автоматично виявити, що певний корпус споживає аномально більше тепла у вихідні (що може сигналізувати про не вимкнене опалення в порожній будівлі), або що після модернізації теплоізоляції фактичне споживання не так сильно знизилося, як очікувалось (можливо, через неправильні налаштування системи). Такі алгоритми формують рекомендації для оператора: де доцільно відрегулювати налаштування, яку додаткову міру впровадити.

Вони ж можуть займатися і *детекцією несправностей* – сигналізувати про зниження COP теплового насоса, якщо фактична продуктивність почала відхилятися від нормативної кривої (що може означати потребу в сервісі або витік холодоагенту). Розвитком цієї ідеї є концепція цифрового двійника будівлі, коли віртуальна модель постійно співставляється з реальними даними і допомагає приймати рішення . За даними останніх досліджень [41,42], впровадження технології цифрових двійників у енергоменеджмент дозволяє додатково скоротити енергоспоживання на 20–30% завдяки оптимізації та проактивному виявленню неефективностей.

Алгоритми взаємодії з користувачами. Хоча значна частина рішень приймається автоматикою, поведінка користувачів (персоналу, відвідувачів адміністративної будівлі) теж впливає на ефективність. Тому до АСМУ включаються алгоритми, що враховують присутність людей, їхні вподобання. Наприклад, система може знижувати температуру опалення в конференц-залі, якщо згідно з розкладом найближчі 2 години його не використовуватимуть, або навпаки заздалегідь нагрівати приміщення перед початком робочого дня.

Розумні термостати й системи управління враховують зворотний зв’язок від користувача: якщо багато людей вручну підвищують температуру в зоні, це сигнал системі, що комфорт не забезпечено, і вона може підкоригувати свої налаштування.

Формування таких алгоритмів – це складний процес, що потребує міждисциплінарних знань (теплотехніка, ІТ, штучний інтелект). На практиці зазвичай застосовується ієрархічний підхід: нижній рівень – стандартне PID-регулювання, середній – логіка керування джерелами (можливо, з використанням методів оптимізації або нечіткої логіки), верхній – прогнозно-аналітичні модулі.

У розробленій концепції інтегрованої системи автономного теплопостачання енергоменеджер (автоматизований) виступає у ролі диспетчера, що в реальному часі вирішує триєдине завдання: яким джерелом покрити теплове навантаження, коли це зробити і скільки енергії акумулювати. Правильно налаштовані алгоритми дозволяють досягти максимальної економії і автономності без втрати комфорту для користувачів. Практичні впровадження показують, що саме завдяки інтелектуальним алгоритмам будівлі-«просумери» (виробники і споживачі енергії) можуть знизити споживання з мережі та витрати до 30% і більше [30], а також згладити пікові навантаження на енергосистему [40], що додатково підвищує надійність теплопостачання.

Таким чином, концепція інтегрованої автономної системи теплопостачання передбачає структурне поєднання сучасних апаратних рішень (ВДЕ, акумулятори) з передовими цифровими технологіями (IoT, AI, Big Data). Результатом є «розумна» теплова мережа в межах будівлі, здатна автономно забезпечувати комфортний мікроклімат, мінімізуючи споживання зовнішніх енергоресурсів.

3.2. Техніко-економічне обґрунтування впровадження сучасних технологій

Для ухвалення рішення про модернізацію системи теплопостачання необхідно оцінити, які теплові навантаження характерні для будівлі, який потенціал економії енергії та коштів дасть впровадження нових технологій, а також порівняти різні сценарії модернізації за технічною і економічною доцільністю. У цьому підрозділі викладено методику розрахунку теплового навантаження, проведено оцінку економічного ефекту від енергоефективних заходів (у тому числі в розрахунку на одиницю об’єму будівлі – питомого теплоспоживання), та виконано порівняльний аналіз чотирьох сценаріїв: (1) модернізація індивідуального теплового пункту (ІТП), (2) встановлення теплового насоса, (3) встановлення сонячних колекторів, (4) комбінований варіант з використанням акумулюючих систем.

3.2.1 Розрахунок теплового навантаження будівель

Теплове навантаження визначає кількість теплової енергії, необхідної для опалення та гарячого водопостачання будівлі протягом певного періоду (зазвичай опалювального сезону або року). Для його розрахунку використовують як проектні методи (на основі теплотехнічних характеристик будівлі), так і аналіз фактичних даних споживання. В рамках дослідження було зібрано статистичні дані за декілька років щодо споживання тепла адміністративними корпусами (наприклад, навчальними корпусами університету). Ці дані включали покази лічильників теплової енергії за кожен місяць. На основі їх усереднення та нормування (з урахуванням градусо-діб опалення) отримано усереднений профіль місячного споживання тепла.

На рис. 3.3 показано типовий розподіл теплового споживання будівлі по місяцях року (розрахований на основі багаторічних даних для кліматичних умов м. Кременчуга). Бачимо, що максимальне споживання припадає на зимові місяці

(січень – близько 18 умовних одиниць), влітку (червень–серпень) опалення практично не потрібне, а перехідні місяці (жовтень, листопад, березень) характеризуються помірним навантаженням.

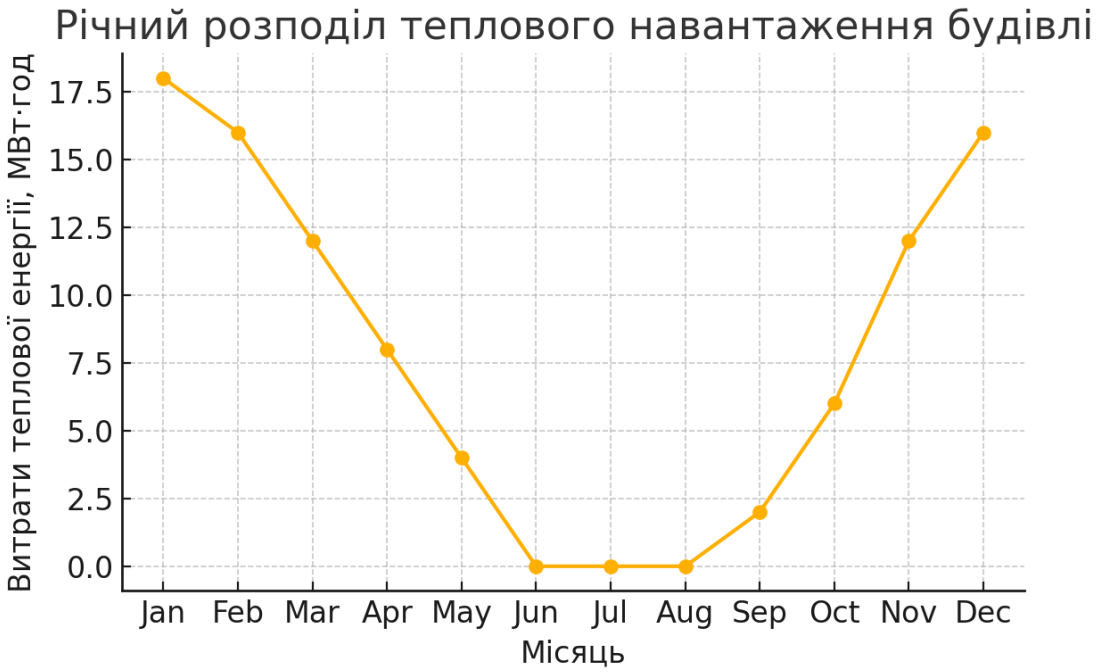


Рис. 3.3. Річний розподіл теплового навантаження адміністративної будівлі за місяцями (умовний приклад на основі кліматичних даних): взимку потреба в теплі максимальна, влітку – мінімальна.

Такий графік важливий для оцінки потенціалу різних технологій. Наприклад, сонячні колектори мають пікову генерацію влітку, коли навантаження мінімальне – отже, їх внесок в опалення взимку буде обмеженим (але вони можуть ефективно працювати на підігрів ГВП влітку). Тепловий насос може покривати базове навантаження взимку, але його коефіцієнт перетворення (COP) залежить від температури: чим холодніше на вулиці, тим нижчий COP і тим більше електроенергії споживається на одиницю тепла.

На рис. 3.4 наведено залежність фактичного COP повітряного теплового насоса від температури зовнішнього повітря протягом холодного тижня: при +10 °C COP ~3.5, а при ~0 °C падає до ~2.8 [40]. Це означає, що в найхолодніші дні

ефективність насоса найменша – якраз коли потреба в теплі найбільша. Цей фактор слід враховувати в розрахунках: можливо, економічно буде вигідно не розраховувати тепловий насос на покриття самого пікового навантаження, а перекрити піки іншим джерелом чи акумулятором.

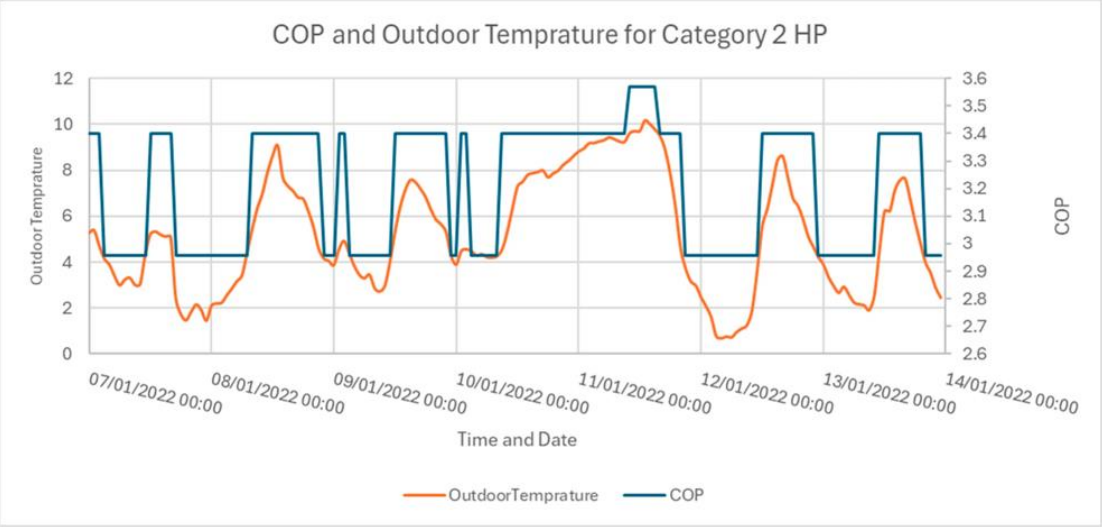


Рис. 3.4. Графік зміни коефіцієнта перетворення (COP) повітряного теплового насоса залежно від температури зовнішнього повітря протягом тижня січня; за низьких температур COP знижується (синій графік), що впливає на ефективність покриття теплового навантаження [40].

Для розрахунку теплового навантаження будівлі використовуємо спрощену формулу теплового балансу:

$$Q_{\text{рік}} = \sum_{\text{м}=1}^{12} Q_{\text{м}} = \sum_{\text{м}=1}^{12} (K \cdot D_{\text{м}} \cdot V) + Q_{\text{ГВП}},$$

де K – приведений коефіцієнт теплопередачі будівлі (залежить від утеплення, вентиляції і т.д.);

$D_{\text{М}}$ – градусо-доби опалення за місяць м для даної місцевості;

V – об’єм будівлі (опалюваний);

$Q_{ГВП}$ – тепло на гаряче водопостачання (майже не залежить від пори року для адміністративної будівлі, де ГВП використовується лише для санвузлів).

Обчисливши Q_рік, можна визначити питоме теплоспоживання: наприклад, в розділі 2 було отримано значення близько 15 кВт·год/м³ на рік для корпусів старої забудови і менше 10 кВт·год/м³ для модернізованих. Показник в перерахунку на квадратний метр становить, відповідно, ~45–50 кВт·год/м² і ~30 кВт·год/м² на рік. Це відповідає класам енергоефективності E–D для перших та C–B для других (орієнтовно, згідно з українською класифікацією енергоефективності будівель).

Отримавши базове значення річного споживання тепла (наприклад, умовно 1000 ГДж на рік для певного корпусу), можемо переходити до оцінки, наскільки його можна знизити завдяки тим чи іншим заходам.

3.2.2. Розрахунок економічного потенціалу зниження споживання

Під економічним потенціалом розуміємо зменшення витрат на опалення (грн/рік) внаслідок реалізації заходів, а також довгострокову економію (NPV проекту, враховуючи інвестиції). Вихідними даними є: поточні тарифи на тепло (або газ/електроенергію, якщо є власна котельня), вартість обладнання і робіт, прогнозоване скорочення споживання тепла (Гкал/рік). Розрахунок проводимо для кожного сценарію модернізації окремо.

3.2.2.1 Модернізація ІТП (індивідуального теплового пункту)

Сюди може входити встановлення сучасного погодозалежного регулятора, балансування системи опалення, заміна застарілого теплообмінника чи насоса на енергоефективний, впровадження частотного регулювання тощо. Такі заходи зазвичай дають від 10% до 20% економії тепла за рахунок усунення перегрівів, більш точного дотримання графіка температур, зменшення втрат у мережах. Припустимо, для нашого випадку очікується ~15% економії. Тоді замість 1000 ГДж/рік буде споживатися 850 ГДж/рік. У грошовому вимірі, якщо тариф ~1500 грн/Гкал (що еквівалентно ~360 грн/ГДж), економія складе 150 ГДж * 360 грн/ГДж = 54 тис. грн на рік. Орієнтовна вартість модернізації ІТП (автоматика, роботи) – скажімо, 200 тис. грн. Таким чином, простий строк окупності ~ 200/54 ≈ 3.7 року. Цей сценарій, як правило, має найменший термін окупності, оскільки інвестиції порівняно невеликі, а ефект досить відчутний. Проте абсолютна економія обмежена (10-20%), тому для більш радикального скорочення витрат варто розглянути інші заходи.

3.2.2.2 Встановлення теплового насоса

Тут маємо на увазі або повну заміну джерела тепла (наприклад, відмову від централізованого теплопостачання чи газової котельні на користь електричного теплового насоса), або часткове впровадження теплового насоса для покриття базового навантаження у пікові години.

Технічно можливі різні типи насосів: повітря-вода, вода-вода, ґрунт-вода. Для адміністративної будівлі, ймовірно, реалістичний варіант – повітряний тепловий насос (через відсутність легкого доступу до геотермальних джерел у міській забудові). Ефективність сучасних повітряних ТН достатньо висока: середньорічний COP ~3.0–3.5 для нашого клімату. Це означає, що з 1 кВт·год електроенергії

отримуємо ~3 кВт·год тепла. Отже, якщо замістити, скажімо, 70% річної потреби тепла (залишаючи 30% на піки для резервного котла або на ЦО), то потрібна електроенергія складе $Q_{насоса} = 0.7Q_{рік}/COP$.

Для 1000 ГДж це 700 ГДж тепла, і споживе насос ~200–230 ГДж електроенергії (що відповідає ~55–64 МВт·год). В грошах, якщо тариф на електроенергію для бюджетних установ ~3 грн/кВт·год, це ~180 тис. грн на рік витрати на електрику. Водночас, 700 ГДж тепла не куплено у мережі/не вироблено з газу, економія по теплу: 700360 ≈ 252 тис. грн. Чиста економія ~72 тис. грн/рік (252 зекономлено – 180 додатково витрачено на електрику). Якщо ж врахувати, що решта 30% тепла все одно буде спожито з мережі (300 ГДж = 108 тис. грн), то сумарні річні витрати після модернізації = 180 (електрика) + 108 (мережа) = 288 тис. грн, тоді як до – 360 тис. грн. Економія 20% коштів. Це доволі грубий розрахунок, але показовий. Чи зможе тепловий насос забезпечити більшу економію? Залежить від COP та тарифів. Якщо електроенергія дорога, то різниця менша. З точки зору енергетики, тепловий насос з COP=3 зменшує споживання первинної енергії ~в 3 рази порівняно з електроопаленням і на ~50-60% порівняно з котлом (ККД~0.95), що підтверджують дослідження – геотермальні теплові насоси здатні скоротити витрати енергії на опалення до 84% проти традиційних систем. У нашому випадку зниження споживання тепла з мережі на 70% – це дуже суттєво. Інвестиції: тепловий насос потужністю ~200 кВт (щоб закрити 70% навантаження) коштуватиме приблизно 1.5–2 млн грн з монтажем. Строк окупності – близько 20–25 років лише з економії (72 тис. на рік), що забагато. Однак, цей розрахунок не враховує можливих зростань тарифів у майбутньому та екологічного ефекту.

В країнах ЄС перехід на теплові насоси стимулюється субсидіями, і за наявності державної підтримки* проект стає вигідним. Для оцінки привабливості інвестиції доцільно рахувати NPV: припустимо, щорічний кеш-флоу 72 тис., період 15 років, дисконт 10% – NPV буде від’ємним без грантів. Отже, фінансово в наших умовах (за чинних тарифів) установка ТН тільки заради економії коштів може бути

гранично окупною. Але якщо врахувати екологічні аспекти та ризик зростання цін на газ/тепло, а також потенційні сценарії, коли електроенергія може бути дешевшою (нічний тариф, власна генерація від PV тощо), ситуація покращується.

3.2.2.3 Встановлення сонячних колекторів

Сонячна теплова система доцільна, насамперед, для нагріву гарячої води в теплу пору року та підтримки опалення в міжсезоння. Якщо адміністративна будівля має значне споживання ГВП (наприклад, душові в спортзалах, їдальня тощо), сонячні колектори можуть покривати до 50-70% річної потреби в енергії на ГВП. В опаленні їх вклад менший: за оцінками, в українському кліматі сонячна система, розрахована на ~50% покриття ГВП влітку, зможе дати 5-10% економії на опаленні за рік. Припустимо, для нашого корпусу це 10% (100 ГДж) скорочення тепла від мережі. Економія – ~36 тис. грн/рік. Але важливо: сонячні колектори не споживають платного «палива», їх експлуатаційні витрати мінімальні. Проте інвестиції: установка 50 м² геліоколекторів з баком коштуватиме орієнтовно 500 тис. грн. Простий термін окупності ~14 років. Життєвий цикл колекторів ~20-25 років, за цей час вони себе виправдають і далі працюватимуть фактично «в нуль».

За розрахунками для домогосподарств у Румунії [43] , інвестиції в СЕУ окупні лише за умов збільшення субсидій або подорожчання енергоносіїв. Для установ – ситуація подібна. Якщо залучити грант чи кредит під низький відсоток, реальність проекту підвищується. Інший момент: сонячні колектори знижують і викиди CO_2, що теж може мати цінність у майбутньому (через карбонові податки тощо). Технічно важливо врахувати місце установки (дах, фасад) і забезпечити систему захисту від перегріву влітку (скидання надлишку тепла, якщо ГВП насичене).

3.2.2.4 Комбінація з акумулюючими системами

Найцікавішим є сценарій поєднання кількох заходів: скажімо, модернізувати ІТП, встановити тепловий насос середньої потужності і сонячні колектори з теплоакумулятором, які спільно працюють. Ідея в тому, що недоліки однієї технології компенсуються іншою. Наприклад, теплоакумулятор може зберігати дешеву нічну електрику або надлишкову сонячну теплоту для використання в піки. В дослідженні [43] наголошено, що великі ємності для зберігання тепла є ключовими для розширення використання ВДЕ в опаленні. Розглянемо такий варіант для нашого корпусу:

1. Модернізуємо ІТП: –15% тепла (850 ГДж залишилося).
2. Встановлюємо повітряний ТН меншої потужності, що покриє, скажімо, 50% річного тепла (не 70%, як раніше). Це 425 ГДж тепла від ТН, споживання ~130-140 ГДж електрики (≈36-39 МВт·год, 108-117 тис. грн).
3. Встановлюємо сонячні колектори, які дають 10% (85 ГДж) тепла. Причому інтегруємо їх з баком акумулятором на, скажімо, 5 м³ води, щоб акумулювати денну генерацію.
4. Решту покриває мережа або інший котел: 850 - 425 - 85 = 340 ГДж.

Річне споживання з мережі: 340 ГДж (122 тис. грн). Електроенергія: ~113 тис. грн. Разом витрати: ~235 тис. грн. Порівняно з базовими 360 тис. – економія 125 тис. грн/рік (35%). Інвестиції: ІТП ~0.2 млн, ТН (менший) ~1.0 млн, колектори ~0.5 млн, разом ~1.7 млн грн. Окупність ~13.6 року. Це вже близько до терміну служби обладнання, але знову ж, не враховано можливого зростання цін на тепло, яке в реальності скоротить окупність. Також комбінований варіант має додаткові переваги: дублювання джерел підвищує надійність і автономність – навіть при відключенні ЦО чи газу будівля матиме тепло; покращується стабільність температури – акумулятор згладжує коливання.

3.2.2.5 Порівняння варіантів модернізації

Зведемо якісні та кількісні показники в таблицю 3.1 для наочності (умовні оцінки) :

Таблиця 3.1 Порівняння варіантів модернізації

Вариант	Економія теплової енергії	Економія коштів (рік)	Оцінка інвестицій	Простий термін окупності	Переваги	Недоліки/ризики
1. Модернізація ІТП	~15%	~50–60 тис. грн	~200 тис. грн	~3–4 роки	Низька вартість, швидкий ефект	Обмежений вплив (залишаються втрати)
2. Тепловий насос (ТН)	~50–70% (тепла)	~20% коштів (при тарифах)	~1.5–2 млн грн	20+ років (без дотацій)	Велике скорочення викопного палива, екологічно чисто; автономність	Висока вартість, залежність COP від температур, потребує електромережі належної потужності
3. Сонячні колектори	~5–10% (тепла)	~5–10% коштів	~500 тис. грн	~10–15 років	Безкоштовне тепло від сонця, мала експлуатація, довговічність >20 р.	Потрібна площа, мала віддача взимку, необхідний резерв або акумуляція
4. Комбінований (ІТП+ТН+Сонце+акум)	~60–70% (тепла)	~30–35% коштів	~1.5–1.8 млн грн	~12–15 років	Максимальна економія, резервування джерел, гнучкість роботи, автономність > 50%	Значна початкова інвестиція, складність управління, потреба в професійному обслуговуванні системи

Як видно, варіант 1 (ІТП) – найвигідніший за строком окупності, його варто реалізувати в першу чергу, якщо ще не зроблено. Варіант 2 (ТН) дає великий виграш в енергії, але потребує значних коштів і окупність дуже тривала при існуючих тарифах. Проте, якщо розглядати не лише фінанси, а й перехід на чисту енергію, то тепловий насос – стратегічно правильна інвестиція: він зменшить споживання газу (чи тепла ТЕЦ) на 60-70% і тим самим знизить вуглецевий слід будівлі. Варіант 3

(сонячні колектори) сам по собі багато не дасть (особливо якщо ГВП незначне споживання), але в комбінації з ТН допоможе зменшити навантаження на електромережу влітку (ТН можна буде вимкнути, коли сонце забезпечує гарячу воду) і покращить загальну енергоефективність. Варіант 4 (комбінований) – найближчий до концепції автономної системи, хоча і не дешевий. Він дозволяє забезпечити гібридне теплопостачання: у різних умовах працюють різні джерела з оптимальним використанням. З точки зору довгострокової економії, такий комплексний проект може бути виправданим, якщо закласти строк 20+ років і врахувати ймовірне збільшення тарифів на традиційну енергію.

На рис. 3.5 графічно порівняно орієнтовне річне споживання енергії з зовнішніх джерел (мережа тепла чи газ, плюс електроенергія) для кожного сценарію. Бачимо, що базовий рівень умовно прийнято 100% (наприклад, 1000 ГДж), модернізація ІТП знизила до ~85%, впровадження ТН – радикально до ~33% (але заміщено електрикою), сонячні колектори – до ~80%, а комбінований сценарій – до ~27% зовнішньої енергії.



Рис. 3.5. Порівняння річного споживання енергії з зовнішніх джерел за різними сценаріями модернізації (базовий – без модернізації, прийнятий за 100%). Комбінований підхід дає найбільше скорочення споживання традиційної енергії.

Очевидно, що в кожному конкретному проекті потрібно виконувати детальні розрахунки, моделювати роботу систем (можливо, з використанням програм типу

EnergyPlus чи TRNSYS для точного балансу енергії [30]), а також проводити економічний аналіз із дисконтованим кеш-флоу. Важливо врахувати можливі довгострокові вигоди, які не завжди відображені в прямій окупності: підвищення вартості будівлі після енергоефективного ретрофіту (за дослідженнями, ринкова ціна може зрости від 3 до 8% для класів С і вище), зменшення викидів (що може бути монетизовано в майбутньому), покращення комфорту і здоров'я працівників (непрямо впливає на продуктивність). Такий цілісний підхід є частиною концепції сталого розвитку та «зеленого» будівництва.

Довгострокова економія та сценарний аналіз. Для наочності можна зобразити накопичений грошовий ефект від енергомодернізації в часі. На рис. 3.6 наведено приклад накопичення заощаджень протягом 10 років для сценарію, де початкова інвестиція становить умовно 100 одиниць, а щорічна економія – 10 одиниць. Крива виходить на нуль (окупність) приблизно на 10-й рік, після чого починається чиста економія. Якщо економія більша або тарифи зростають, крива піде в плюс раніше. Цей графік підкреслює, що енергоефективні проекти мають довгий горизонт планування, і їх вигідність слід оцінювати не лише за коротким періодом.

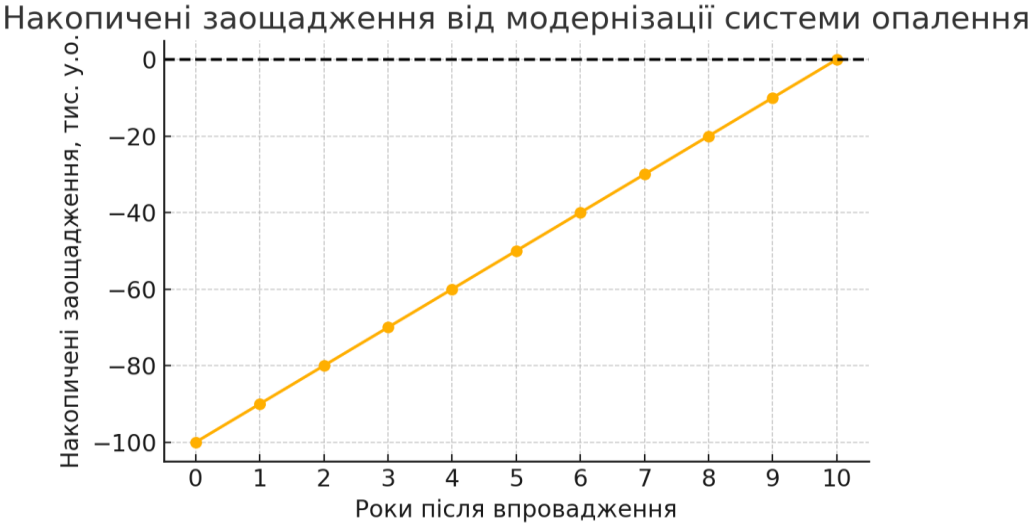


Рис. 3.6. Накопичені заощадження коштів внаслідок модернізації системи опалення (умовний приклад): протягом перших років проект «відбиває» інвестиції, і приблизно на 8–10 рік накопичений ефект стає додатним, далі – чиста економія.

За допомогою такого аналізу можна варіювати параметри: наприклад, якщо прогнозується, що ціна газу щороку зростатиме на 5%, а електроенергії – на 3%, то економія від теплового насоса збільшуватиметься з часом, і строк окупності скоротиться. Також варто розглядати сценарій отримання грантів/кредитів: знижка на обладнання на 30% (типовий грант ЄС для енергоефективності) зробить NPV позитивним у раніше маргінальних випадках [43].

Висновки по техніко-економічному обґрунтуванню: Модернізація теплопостачання адміністративної будівлі є економічно доцільною, особливо якщо починати з «низьковисячих плодів» – мало витратних заходів на кшталт оптимізації регулювання (ІТП). Більш капіталомісткі технології (ТН, СЕС) поки що мають довгу окупність при існуючих тарифах, але вони значно підвищують енергонезалежність і екологічність. Комбінування рішень дозволяє досягти максимального ефекту – до 60–70% зниження споживання традиційної енергії і, відповідно, витрат на опалення. У довгостроковій перспективі (15–20 років) такі проекти можуть принести суттєву чисту економію коштів і захистити бюджет установи від енергетичних ризиків. Тому при обґрунтуванні інвестицій варто враховувати стратегічні вигоди, а не тільки поточну кон’юнктуру цін.

3.3. Модель автоматизованої системи енергоменеджменту будівлі

У підрозділі 3.1 було розглянуто вимоги до АСМУ в інтегрованій системі теплопостачання. Тепер опишемо конкретні аспекти моделі автоматизованої системи енергоменеджменту (АСЕМ) для адміністративної будівлі: як організовано структуру збору даних та інформаційні потоки, як здійснюється автоматизований аналіз і прогноз енергоспоживання із залученням технологій машинного навчання,

та який алгоритм моніторингу ефективності та генерування рекомендацій застосовується для підтримки прийняття рішень.

3.3.1 Структура збору даних та інформаційні потоки

Автоматизована система енергоменеджменту являє собою багаторівневу архітектуру апаратно-програмних засобів. Нижній рівень – мережа сенсорів і виконавчих пристроїв у будівлі (рівень «сприйняття»). Це лічильники теплової енергії на вводі і в окремих зонах, електролічильники, датчики температури повітря в приміщеннях, температури теплоносія в трубопроводах, вологості, CO_2 (для контролю вентиляції), датчики стану обладнання (тиску, положення клапанів, швидкості обертання насосів тощо), датчики присутності і освітленості (для керування кліматом і освітленням), а також «розумні» пристрої – смарт-розетки, розумні термостати на батареях опалення тощо. Всі ці сенсори збирають великий обсяг даних у режимі реального часу. На проміжному рівні (рівень «мережі») діють контролери і шлюзи, які агрегують дані та передають їх до центрального сервера/хмари. Використовуються дротові (Ethernet, RS-485) або бездротові (Wi-Fi, ZigBee, LoraWAN) канали зв’язку. Важливо забезпечити надійність і кібербезпеку цього сегменту: збої в зв’язку не повинні паралізувати управління – контролери на місцях мають працювати автономно певний час. Верхній рівень (рівень «застосувань» або «хмарний») – це програми, що виконують аналіз даних, приймають рішення та надають інтерфейс користувачу. Саме тут реалізовано інтелектуальні алгоритми, бази даних, інтеграція з веб-додатками.

Інформаційні потоки в АСЕМ двонаправлені. Висхідний потік: дані від сенсорів → контролери → сервер. Нисхідний потік: команди управління від сервера → контролери → виконавчі механізми (клапани, насоси, нагрівачі тощо). Крім того,

є потоки до/від зовнішніх систем: наприклад, завантаження прогнозу погоди з інтернету до системи, або передача зведеної інформації про енергоспоживання до міського центру моніторингу. На рис. 3.2 вже демонструвалася концепція взаємодії фізичного і цифрового рівнів.

Фізичні датчики колектують (collect) дані про стан системи і передають їх угору; на сервері дані обробляються (process) аналітичними модулями, які генерують (generate) рішення чи аналітичну інформацію; ці рішення потім використовуються для оновлення (update) дій на фізичному рівні – коригування режимів роботи обладнання. Цикл повторюється безперервно [30].

Система збору даних має бути здатною обробляти Big Data, адже з десятків чи сотень датчиків щохвилини надходять нові значення. Для цього часто застосовують технології edge computing – частина обробки виконується на місцевих контролерах, щоб не передавати зайвий обсяг у мережу. Наприклад, контролер на ІТП сам може рахувати потужність теплообмінника щосекунди (на основі потоку і ΔT) і передавати на сервер лише усереднене значення кожні 1 хв. Це зменшує навантаження на канал і сервер.

3.3.2 Автоматизований аналіз і прогноз енергоспоживання (з використанням ML)

Серцем інтелектуальної АСЕМ є програмні модулі, що аналізують потоки даних для виявлення тенденцій, аномалій та прогнозування майбутнього навантаження. Зараз все більше застосовуються методи машинного навчання (ML) та штучного інтелекту для підвищення точності та адаптивності такого аналізу [30]. Розглянемо основні завдання:

Короткостроковий прогноз теплового навантаження. Використовуючи історичні дані споживання та прогноз погоди, система будує модель (наприклад, на основі нейронної мережі чи градієнтного бустінгу), яка передбачає, скільки тепла знадобиться будівлі в найближчі години/дні. У дослідженні для кампуса університету система ML показала високу точність прогнозу споживання енергії (RMSE ~5%) [30]. Наша АСЕМ реалізує подібну модель: враховує день тижня, час доби, температуру надворі, чи був попереднього дня вихідний, скільки людей присутні (за даними турнікетів чи датчиків) тощо. Алгоритм (наприклад, багатошарова нейронна мережа) навчається на минулому періоді (скажімо, на даних за останні 2 роки) і постійно оновлюється (on-line learning) по мірі надходження нових даних. В результаті кожної ночі отримуємо прогнозний графік теплового навантаження на наступну добу з кроком 1 год. Це дає змогу, наприклад, вирішити, коли увімкнути тепловий насос або зарядити акумулятор (в час мінімального тарифу чи коли є надлишкова електроенергія). Додатково, прогноз попиту можна поєднати з прогнозом генерації від ВДЕ (якщо є PV чи вітроустановки): такі модулі теж існують (з прогнозом сонячної радіації, температури тощо).

Оптимізація керування (recommendation system). На основі прогнозу й оптимізаційної моделі АСЕМ може автоматично вирахувати оптимальні налаштування на добу вперед. Це називають Model Predictive Control (MPC) – коли оптимізація виконується періодично, враховуючи майбутні зміни. Наприклад, цільова функція – мінімум витрат на енергію за добу, обмеження – комфорт (температура не нижче 20°C), технічні межі обладнання. Розв’язавши цю задачу (аналітично або чисельно), система видає план: з 4:00 до 6:00 працює тепловий насос на 50% потужності заряджаючи бак (бо дешевий тариф), о 7:00 починає піднімати температуру в офісах до 21°C, враховуючи, що люди прийдуть о 8:00, тощо. У реальному часі цей план може коригуватися за зворотним зв’язком. Такий підхід вже зараз демонструє до 15–20% додаткової економії порівняно з реактивним

управлінням[6]. Для реалізації MPC потрібна адекватна математична модель будівлі (що нелегко), тому іноді застосовують підхід з навчанням з підкріплення (RL), коли алгоритм сам методом проб і помилок навчається оптимальній стратегії керування. Є приклади використання Q-learning і нейромереж для керування енергосистемою з тепловим накопичувачем, які показали зниження пікового навантаження і споживання [44]. Наша модель ACEM може включати модуль RL, що постійно покращує стратегію на основі зібраних даних.

Виявлення аномалій та діагностика. ML-алгоритми (наприклад, метод головних компонент або автоенкодери) можуть навчитися «нормальній» поведінці системи і сигналізувати, якщо щось іде не так. Приклад: якщо у якомусь приміщенні температура стабільно нижча на 3°C, ніж задано, хоча вентилі повністю відкриті – це може свідчити про проблеми з ізоляцією або заїдання клапана. Система виявляє відхилення і формує алерт для технічної служби. Інший приклад: зниження COP теплового насоса (обчисленого як відношення відданого тепла до спожитої електрики) нижче історично нормального діапазону при даній температурі – може означати витік фреону або зношення компресора. Рання діагностика дозволяє уникнути аварій і втрат енергії.

Аналіз поведінки користувачів і адаптація. За допомогою алгоритмів кластеризації можна сегментувати зони будівлі за профілем споживання (скажімо, виділити «активні» зони, де постійно багато людей, і «пасивні», де споживання тепла менше прогнозованого). Це дозволяє, наприклад, переглянути розклад опалення – можливо, деякі приміщення взагалі варто тримати на мінімальному опаленні і включати тільки за потреби (що реалізується через систему бронювання аудиторій та автоматику). ML також може оптимізувати параметри ПІД-регуляторів в системі – є алгоритми автоналаштування, які шляхом моделювання чи експерименту виставляють параметри краще, ніж це зробив би людина.

Таким чином, автоматизований аналіз в нашій моделі ACEM – це сукупність класичних алгоритмів контролю та сучасних AI-рішень. Багато з описаного вже

продемонстровано на рівні пілотних проектів у світі: наприклад, згадана раніше система енергоменеджменту кампусу з IoT та ML досягла 30% скорочення енерговитрат [30]. AI-орієнтовані BEMS постійно вдосконалюються, і в літературі є огляди різних підходів до зменшення споживання за допомогою штучного інтелекту [45].

3.3.3 Алгоритм моніторингу ефективності та генерації рекомендацій.

Окрім автоматичного керування, АСЕМ повинна надавати інформацію енергоменеджеру (людині) про те, наскільки ефективно працює система і що можна покращити. Для цього розроблено окремий алгоритм, що виконується, наприклад, раз на тиждень або на місяць і генерує звіт та рекомендації.

Компоненти цього алгоритму:

Розрахунок KPI (ключових показників ефективності). Система обчислює показники: питомий розхід тепла (кВт·год на м² за місяць), економію порівняно з минулим роком (у %), ефективність генераторів (COP теплового насоса середній, ККД котла), рівень автономності (частка енергії, отриманої від ВДЕ, %), рівень комфорту (відсоток часу, коли температура була в комфортному діапазоні). Наприклад, звіт може показати: «За січень спожито 120 МВт·год тепла, що на 8% менше, ніж у січні минулого року при аналогічних градусо-днях; сонячні колектори покрили 5% потреб, тепловий насос – 50%, середній COP = 2.9; температура була нижче 20°C протягом 3% часу (головним чином у вихідні)». Такі показники дають змогу оцінити прогрес і виявити проблемні місця.

Порівняння з бенчмарками. Система може мати еталонні профілі або моделі. Наприклад, є модель будівлі (цифровий двійник), яка при ідеальному управлінні мала б спожити 110 МВт·год, а фактично спожито 120 – отже, 10 МВт·год

потенціалу не реалізовано. Або порівняння з іншими схожими будівлями: якщо наш корпус споживає 45 кВт·год/м² річно, а середній по місту для такого типу – 60, значить ми на 25% ефективніші за середнє (або навпаки). Такі бенчмарки можуть братися з нормативів або з баз даних енергоаудитів.

Виявлення відхилень та причин. Моніторинговий алгоритм аналізує дані і шукає: де перевитрата? Наприклад, в одному з підрозділів (корпус Б) споживання на 1 м² на 20% більше, ніж у корпусі А аналогічної площі. Причина може бути: гірша ізоляція або довше працює опалення ввечері. Система може вказати: «Корпус Б: високий питомий розхід, рекомендується перевірити налаштування або стан утеплення». Або: «Тепловий насос працював з низьким COP у кілька днів – можливо, доцільно трохи підвищити поріг мінімальної температури його роботи, щоб уникнути неефективної роботи в мороз».

Генерація рекомендацій. На основі всіх цих даних АСЕМ формує список порад для оператора. Наприклад:

«Оптимізувати графік опалення в залах на 3-му поверсі: вони не використовуються після 18:00, слід зменшити температуру, що потенційно зекономить ~5% енергії в вечірній час.»

«Провести енергоаудит корпусу Б – ймовірно, є проблеми з утепленням даху (виявлено підвищений розхід тепла незалежно від режимів).»

«Розглянути збільшення ємності теплоакумулятора: в сонячні дні спостерігались втрачені надлишки тепла від колекторів (температура в баку досягала 95°C і система скидала надлишок). Більший бак дозволить зберегти ~10% більше сонячної енергії.»

«Виходячи з прогнозу на наступний тиждень (різке похолодання), рекомендується тимчасово підвищити встановлену температуру подачі на 2°C для забезпечення комфорту.»

Ці рекомендації можуть бути як автоматично реалізовані (якщо це дозволено політикою – наприклад, система сама може змінити графік), так і представлені для

розгляду відповідальному енергоменеджеру. Роль останнього більше зміщується від ручного управління до контролю та прийняття стратегічних рішень, базуючись на інформації від АСЕМ.

Архітектурно алгоритм моніторингу може бути оформлений як окремий модуль Business Intelligence, який має доступ до бази історичних даних і генерує dashboards та звіти. У сучасних веб-системах енергоменеджменту часто присутні інтерактивні панелі: графіки споживання, рейтинги підрозділів за ефективністю, теплові карти будівлі (де колір кімнати показує відхилення температури). Все це покликане допомогти швидко локалізувати проблему. Наприклад, якщо є витік тепла через відчинені двері або вікно – система може миттєво сповістити, що температура в тому приміщенні падає незважаючи на нагрів, і надіслати оповіщення відповідальному персоналу.

Отже, модель автоматизованої системи енергоменеджменту будівлі – це складний комплекс, який збирає великі дані, «мислить» на їх основі (аналізує, вчиться, прогнозує) і діє як автономно (керуючи обладнанням), так і у співпраці з людиною (надаючи рекомендації для покращення). Впровадження такої системи дозволяє не лише знизити енергоспоживання, а й зробити енергопостачання більш надійним, гнучким і прозорим. Згідно з дослідженнями, поєднання IoT, AI та традиційних BMS дає синергетичний ефект – енергоощадність до 30% при одночасному підвищенні комфорту користувачів [45]. У наступному підрозділі розглянемо, яких конкретно результатів можна очікувати від впровадження описаних технологій.

3.4. Оцінка очікуваних результатів впровадження

На основі проведеного аналізу та моделювання здійснено оцінку, яких конкретних результатів можна очікувати після модернізації системи теплопостачання адміністративної будівлі за описаною інтегрованою концепцією. Розглянемо три групи показників: енергетичні (зниження споживання енергії, підвищення автономності), експлуатаційні (підвищення комфорту та надійності теплопостачання) та класи енергоефективності (як зміниться клас будівлі після реалізації заходів).

Прогноз зниження споживання енергії. Як показали розрахунки в підрозділі 3.2, повна реалізація комплексу заходів (модернізація ІТП, впровадження теплового насоса, сонячних колекторів з акумуляцією, оптимізація управління) може знизити річне споживання теплової енергії з зовнішніх джерел на 60–70%. Це дуже суттєва величина. Для нашого умовного прикладу – з 1000 ГДж до ~300 ГДж на рік. Відповідно, споживання палив/енергоносіїв зменшиться: якщо це була теплова енергія від ТЕЦ – на 70%, якщо газ у локальній котельні – також на 70%. Натомість зросте споживання електроенергії (для живлення теплового насоса) – розрахунково, десь на 120–150 ГДж/рік (≈ 33–42 МВт·год). Тобто відбудеться паливний перехід: менше спалювання газу/вугілля, більше використання електрики, що все частіше генерується з відновлюваних джерел. Умовно можна казати, що будівля перейде з категорії “звичайної” до категорії «низьковуглецевої» або майже NZEB (будівлі з близьким до нульового енергоспоживання), якщо додатково впровадити ще й сонячні ФЕ панелі на покриття власної електрики.

Загалом, очікуване зниження споживання енергії можна розбити за рахунок джерел:

- ~15% – за рахунок організаційних та маловитратних заходів (регулювання, ізоляція, балансування – все, що було в модернізації ІТП).

- ~20–30% – за рахунок впровадження теплового насоса (покриття базового навантаження з високим COP замість неефективного підігріву від котлів).

- ~5–10% – за рахунок використання сонячних теплових систем. - ~10–15% – за рахунок оптимального керування, усунення втрат і непотрібного споживання (завдяки АСЕМ, що вимикає тепло коли не потрібно, знижує підігрів на ніч тощо).

- ~5% – можливо, додатково від утеплення (прямо в цьому розділі ми його не розглядали, але якщо включити у проект й термомодернізацію огороджень, економія ще більше зросте – до 50% може дати сама по собі глибока термомодернізація стін/вікон).

Сумарно й отримуємо ~60%+. Така оцінка узгоджується зі світовими цілями: глобально ставиться задача скоротити викиди будівель на 50% до 2030 року [30]. Наш проект демонструє, що для конкретної будівлі це досяжно, хоча й потребує комплексного підходу. За даними Міжнародного енергетичного агентства, поєднання енергоефективності та електрифікації опалення (теплові насоси) може зменшити споживання енергії в будівлях на 30–50% навіть без втрати комфорту, а з інтеграцією ВДЕ – і на всі 70–80% залежно від доступності джерел.

Підвищення автономності теплопостачання. Автономність можна визначити як частку теплової енергії, яку будівля отримує з власних (локальних) джерел. До модернізації ця частка, припустимо, була 0% (якщо все тепло з централізованої мережі). Після – маємо тепловий насос (власне джерело, хоч і споживає електрику), сонячні колектори. Якщо рахувати за первинною тепловою енергією: тепловий насос покриває ~50% тепла, сонячні ~10%, тобто 60% тепла вироблено «на місці». Ще 40% отримано ззовні (мережа чи газ). Отже, автономність ~60%. В літні місяці може досягати 100% (опалення вимкнено, ГВП повністю від сонця і ТН). В холодні піки, можливо, впаде до 30% (коли зовнішня мережа докидає тепло). В середньому ж за рік – близько 60%. Це дуже високий показник. Для критичних ситуацій (наприклад, відключення центрального тепла) будівля зможе сама себе обігрівати на 60% від потреби. Якщо додатково передбачити резервний електрокотел, що на короткий час покриє інше, то фактично будівля стає повністю автономною від зовнішніх тепломереж. Це великий плюс з точки зору енергетичної

безпеки. В умовах можливих аварій або навмисних відключень тепла (актуально під час кризових ситуацій) така будівля з автономним/гібридним опаленням продовжить функціонувати, забезпечуючи хоча б мінімальний тепловий режим.

Зменшення пікового навантаження на енергомережі. Це побічний, але важливий результат. Використання акумуляції та гнучкого керування дозволяє знизити піки відбору тепла/електрики. Наприклад, наш тепловий насос при традиційному управлінні брав би максимум електрики о 7-8 ранку (коли всі вмикаються) – а ми можемо зарядити бак вночі і розвантажити ранок. За результатами моделювання, активна стратегія управління здатна знизити пікове електричне навантаження на підстанцію на 21%. Для тепломережі, якщо будівля на ЦО, зменшення піків теж вигідне – рівномірніше споживання, менше навантажень на котельні.

Підвищення комфорту, стабільності теплопостачання та автономності. Одним з важливих критеріїв успішності проекту є не тільки цифри економії, а й покращення умов для користувачів. Очікується, що впровадження нової системи покращить тепловий комфорт у приміщеннях. Завдяки зональному регулюванню та чутливим датчикам, температура буде підтримуватися ближче до заданих 21–22°C без значних коливань. Якщо раніше могли бути перегріви до 25°C (особливо коли сонце світить у вікна, а опалення продовжує гріти) або недогріви у віддалених від ІТП точках, то тепер система автоматично балансуватиме: сонячні кімнати отримають менше теплоносія, тіньові – більше, тощо. Стабільність теплопостачання означає, що незалежно від зовнішніх факторів всередині будівлі буде тепло. Навіть при перебоях з центральною мережею – працює свій тепловий насос, акумулятор. Навіть при похолоданні – система заздалегідь піднімає температуру, і користувачі не помітять дискомфорту. На практиці це підтверджено експериментами: наприклад, у згаданому проекті з комбінованою системою (ферма з тепловим насосом і BTES) температура в приміщенні (коридор для тварин) була стабілізована практично на постійному рівні ~24°C, незважаючи на значні

коливання зовнішньої температури від 10 до 25°C протягом доби. Тобто інтегрована система автоматично підтримувала внутрішній мікроклімат, згладжуючи вплив зовнішніх змін. Для адміністративної будівлі це означає комфортніші умови праці – немає перетопів чи холодних «хвиль».

Автономність – як вже зазначалося, до 60% і вище. Якщо додати резервні генератори, можна досягти фактично 100%. Тоді будівлю можна класифікувати як «автономна/незалежна» (off-grid по теплу, частково по електриці). Це особливо цінно для критичних об'єктів (урядових, лікарень). У нашому випадку, навіть якщо це звичайна адмінбудівля, автономність – це гнучкість: можна переключатися між джерелами залежно від цін і ситуації.

Надійність та зменшення аварійності. Нова система спроектована з принципами резервування: кілька джерел тепла, акумуляція на випадок перебоїв, продумана автоматизація для попередження аварій (наприклад, якщо один насос виходить з ладу – резервний ввімкнеться автоматично). Тому очікується зниження аварійних простоїв практично до нуля. Традиційно, якщо у ЦО аварія – будівля холодна. Тут же – у разі збою одного елементу інший підхопить. АСЕМ постійно моніторить стан обладнання, що дозволяє перейти від реактивного ремонту до проактивного обслуговування (Predictive Maintenance). Наприклад, якщо насос почав споживати більше електрики для тієї ж подачі – можливо, є проблеми з підшипниками, слід його оглянути до того, як він зламається. Такий підхід збільшує ресурс обладнання і зменшує ризик раптових аварій.

Енергоефективність та клас будівлі після модернізації. Припустимо, до модернізації будівля мала питомий розхід ~200 кВт·год/м² в рік (що відповідає класу E або навіть F для старих будівель). Після проведення всіх заходів споживання знизиться, скажімо, до ~60 кВт·год/м²·рік. Це орієнтовно клас B (низьке споживання енергії) згідно з вітчизняними нормами. Таким чином, підняття класу на 2–3 рівні – цілком реально. На рис. 3.7 схематично відображено зміну

класу енергоефективності: до модернізації – клас E (жовтогарячий колір), після – клас B (зелений). Стрілка показує цей перехід.

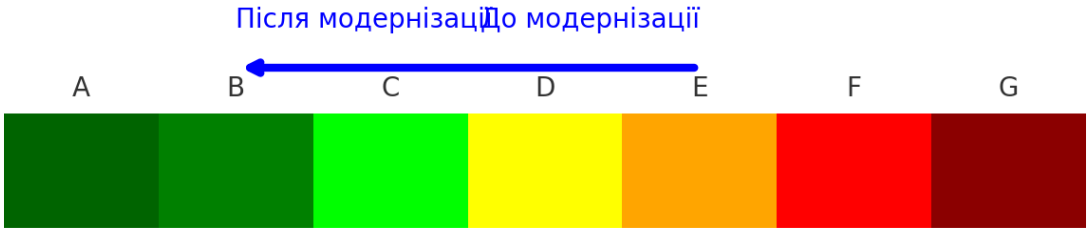


Рис. 3.7. Схема покращення класу енергоефективності будівлі з «До модернізації» (умовно клас E) до «Після модернізації» (умовно клас B) завдяки впровадженню енергоефективних рішень.

Звісно, точно клас визначається сертифікацією енергоаудитором після реалізації заходів. Але за попередніми оцінками, будівля відповідатиме мінімум класу C, а швидше за все B. Це означає відповідність сучасним вимогам і стандартам.

В Україні з 2023 року для нових і реконструйованих будівель встановлено мінімальну планку – клас C. Наш проект забезпечить рівень вище цієї норми, тобто будівля стане «енергоефективною будівлею з низьким споживанням». Якщо би додатково впровадити ще фотоелектричну станцію на даху, можливо, вдалося б покрити більшу частку електроспоживання ТН – тоді і за сумарним первинним енергоспоживанням можна було б наблизитися до стандарту NZEB (нульової енергії). В будь-якому разі, класифікація після модернізації значно покращиться, що офіційно підтвердить ефективність реалізованих рішень.

Вплив на довкілля. Як побічний результат, але дуже важливий, відзначимо очікуване скорочення викидів парникових газів. Якщо будівля раніше споживала, наприклад, 1000 ГДж тепла від ТЕЦ, що працює на газі – це еквівалент ~55 т CO_2 на рік (при емісії ~56 кг/GJ для газу). Після модернізації зовнішнє тепло 300 ГДж – ~17 т CO_2, плюс електрика 130 ГДж. Якщо електрика частково з ВДЕ, можна

вважати емісію нижчою, але навіть при сучасній структурі генерації в Україні (~0.4 кг CO_2/кВт·год) 36 МВт·год дадуть ~14 т CO_2. Сумарно ~31 т vs 55 т, тобто скорочення приблизно на 44%. Якщо ж врахувати перспективи декарбонізації електроенергетики (частка ВДЕ зростає), то викиди від споживаної електрики будуть знижуватися щороку, і сумарне скорочення може сягнути >50%. Таким чином, модернізація сприяє досягненню цілей зі зменшення впливу на клімат. На рис. 3.1 (в цьому розділі) недарма була показана прив'язка енергоефективності будівель до Цілей сталого розвитку ООН, зокрема до Цілі 13 (Боротьба зі зміною клімату) [46]: наш проект безпосередньо відповідає цим цілям, зменшуючи карбоновий слід будівлі.

Інші нематеріальні результати. Серед очікуваних позитивних наслідків можна назвати: - Покращення іміджу установи. Будівля з високим класом енергоефективності та сучасною автономною системою опалення – це демонстрація інноваційності та відповідального ставлення до ресурсів. Це може слугувати прикладом для інших організацій. За кордоном часто офіси прагнуть отримати «зелені» сертифікати (LEED, BREEAM); модернізація, яку ми провели, закладає основу для отримання таких сертифікацій.

- Кращий контроль та прозорість витрат. Завдяки АСЕМ керівництво чітко бачитиме, куди йде енергія, і зможе обґрунтовано планувати бюджети. Непередбачених перевитрат майже не буде – система вчасно попередить. Це дисциплінує і персонал (наприклад, залишені ввімкненими прилади вночі стануть одразу помітні).

- Комфорт персоналу = продуктивність. Хоча важко виміряти напряму, але в дослідженнях доведено, що якісний внутрішній мікроклімат підвищує продуктивність праці на 5–15% (менше скарг, менше лікарняних тощо). Отже, наш проект може мати і економічний ефект через кращу продуктивність працівників установи.

Підсумовуючи, очікувані результати можна охарактеризувати як багатогранні покращення: суттєве (більше ніж удвічі) зниження енергоспоживання і витрат; перехід будівлі до високого класу енергоефективності; досягнення значної частки енергетичної автономності; підвищення комфорту та надійності системи опалення; зменшення екологічного впливу. В наступному підрозділі надамо рекомендації щодо того, як впровадити ці рішення поетапно і масштабувати на інші об’єкти.

3.5. Рекомендації щодо впровадження та масштабування рішень

На завершення розділу сформулюємо практичні рекомендації для успішного впровадження запропонованих енергоефективних рішень у адміністративних будівлях, а також можливості їх масштабування на інші категорії будівель. Розглянемо такі аспекти: план переходу обраної будівлі на автономне/гібридне теплопостачання, використання веб-систем для візуалізації та контролю (інструменти для управління), та поради з масштабування напрацьованих рішень.

План переходу адміністративних будівель на автономне або гібридне теплопостачання. Будь-який комплексний проект потребує поетапної реалізації. Рекомендується наступний план:

Підготовчий етап – аудит і проектування. Провести детальний енергоаудит будівлі (якщо не був проведений раніше) – це включає аналіз конструкцій, систем опалення, вентиліції, електромереж. На базі аудиту скласти проект модернізації: визначити розміри обладнання (потужність теплового насоса, площу сонячних колекторів, об’єм теплоакумулятора, необхідне утеплення труб тощо), підібрати конкретні моделі обладнання, розробити схеми інтеграції з існуючими системами. Також на цьому етапі слід підготувати економічне обґрунтування (як частину

проекту) і за можливості знайти джерела фінансування – це можуть бути державні програми (Держенергоефективності), міжнародні фонди (наприклад, програми ЕС або GIZ), механізми енергосервісних контрактів (ЕСКО) для бюджетних установ тощо.

Етап 1 – «швидкі перемоги». Спершу реалізувати ті заходи, що не залежать сильно від інших і дають одразу ефект:

Модернізація ІТП: встановлення погодозалежної автоматики, балансувальних клапанів, частотних перетворювачів на насоси.

Впровадження базової системи моніторингу: встановлення лічильників, датчиків і підключення їх до простого софту. Спочатку це може бути навіть автономна система збору даних без складного керування, але щоб почати накопичувати історію.

Організаційні заходи: навчити персонал принципам енергозбереження (наприклад, правил користування вентиляцією, щоб не відчиняли вікна при працюючому опаленні і т.д.), впровадити розклад опалення (зменшення в неробочий час), якщо це ще не зроблено.

Цей етап може зайняти 3–6 місяців. Уже після нього очікується економія 10-20%. Важливо – на цьому етапі закладаються основи для подальших робіт, зокрема налагоджено збір даних.

Етап 2 – встановлення відновлюваних джерел (тепловий насос, сонячні колектори). Паралельно з етапом 1 слід провести тендери/закупівлі обладнання для основних інвестиційних заходів. Потім у міжопалювальний сезон (щоб мінімізувати вплив на комфорт) виконати монтаж:

Інсталяція теплового насоса(ів) з підключенням до існуючої системи опалення. Тут важливо передбачити його інтеграцію: чи працюватиме він паралельно з ЦО, чи повністю замістить. Якщо паралельно – встановити змішувальні вузли, щоб уникнути конфліктів температур. Якщо на заміну – забезпечити можливість переключення повернення теплоносія між ТН і мережею.

Монтаж поля сонячних колекторів на даху/фасаді. Прокласти трубопроводи до теплоакумулятора в котельні/теплопункті.

Встановлення теплоакумулятора. Бак значного об’єму може вимагати виділення окремого приміщення або розміщення на вулиці (наприклад, підземний резервуар). Це треба передбачити у проекті.

Інтеграція з системою управління: всі нові насоси, вентилі, датчики від ТН і СЕУ повинні бути підключені до контролерів.

Після монтажу – пусконалагодження: перевірити роботу у різних режимах, навчити персонал базовим діям. Цей етап може тривати 6–12 місяців (залежно від поставок обладнання). В кінці етапу 2 будівля вже матиме технічну можливість автономного опалення.

Етап 3 – впровадження розширеної АСЕМ. Коли «залізо» встановлено, треба максимально реалізувати його потенціал через розумне управління. На цьому етапі:

Розгортається програмне забезпечення енергоменеджменту (можливо, спочатку пілотно, з обмеженим функціоналом, а потім нарощується). Можна використати готові BMS-платформи (як-от Niagara, Deos, локальні розробки) або відкрите ПЗ (OpenEMS, etc.), налаштувавши під свою схему.

Налаштовуються алгоритми управління, як описано в 3.1 і 3.3: задаються пріоритети джерел, вводяться необхідні правила безпеки (наприклад, граничні температури, щоб не пошкодити обладнання), інтегрується погодний прогноз через API, налаштовується зберігання даних в базі.

Встановлюється диспетчерський центр: комп’ютер або веб-доступ, де оператор може бачити всі показники. Для наочності створюються «дашборди» – схематичний план будівлі з температурою в кожній зоні, графіки споживання, стан обладнання (вкл/викл, потужність).

Впроваджуються модулі аналітики: звітність, оповіщення (на e-mail або SMS у разі аварій).

Якщо передбачено, розробляються ML-моделі для прогнозу. Можна спершу збирати дані кілька місяців і паралельно тренувати модель в offline-режимі, щоб потім включити в роботу.

На цьому етапі доцільно залучити IT-спеціалістів, а також провести навчання для персоналу, який буде експлуатувати систему. Час: 3–6 місяців на первинне налаштування, але вдосконалення (оптимізація алгоритмів) – постійний процес, перші 1–2 роки система буде «вчитися» і покращуватися.

Етап 4 – тестування і верифікація результатів. Після повного впровадження, протягом хоча б одного повного опалювального сезону слід відстежувати показники і порівнювати їх з плановими. Зібрані дані аналізуються: чи досягнуті очікувані 60% економії? Якщо ні, то чому – чи десь обладнання працює не оптимально, чи користувачі втручаються (наприклад, гріються електрообігрівачами, що свідчить про недогрів деяких зон). За підсумками сезону складається звіт, де фіксуються досягнуті KPI, і розробляється план дрібних коригувань або додаткових заходів (наприклад, якщо виявлено, що певні двері постійно відчиняються і охолоджують хол, то може варто встановити повітряно-теплову завісу).

Через ці етапи будівля пройде трансформацію поступово, що важливо для мінімізації ризиків – на жодному етапі користувачі не мають відчути погіршення умов, а лише поліпшення.

Використання веб-систем для візуалізації та контролю. Одним з ключових чинників успішної експлуатації сучасної енергоефективної системи є зручність інтерфейсів.

Рекомендується:

- Впровадити веб-портал енергоменеджменту, доступний з мережі (з авторизацією), де відповідальні особи можуть моніторити систему з будь-якого місця. Це особливо актуально для чергових інженерів – щоб не обов’язково їхати

до котельні, а подивитися параметри і навіть перезапустити обладнання дистанційно.

- Налаштувати мобільний додаток або адаптивний веб-інтерфейс, щоб керівництво мало високорівневий огляд: скажімо, бачило в реальному часі споживання і економію в грошах (це мотивує підтримувати проекти енергозбереження надалі).

- Зробити публічний інформаційний екран (в холі будівлі) – така практика є, коли на великому дисплеї показують, скільки енергії зекономлено, яка температура, скільки сонячної енергії згенеровано сьогодні тощо. Це підвищує обізнаність співробітників і формує культуру енергозбереження. Люди бачать, що, наприклад, “Сьогодні колектори дали 50 кВт·год тепла – цього достатньо, щоб закип’ятити 500 чайників” і т.п., такі меседжі можуть навіть захоплювати.

- Інтегрувати систему опалення з іншими BMS-підсистемами через єдиний інтерфейс. Наприклад, якщо в будівлі вже є система контролю доступу або пожежна сигналізація, можна налаштувати обмін: при спрацюванні пожежної сигналізації – відключити вентиляцію та перекрити газ (безпека); або при заході останньої людини (через систему доступу) – АСЕМ переводить будівлю в економний нічний режим. Такі інтеграції роблять управління будівлею цілісним.

- Забезпечити логування і архівацію всіх дій і параметрів. Це потрібно і для аналізу, і для прозорості. Якщо раптом виникають питання (чому було холодно в залі Х 3 січня?) – завжди можна підняти записи, подивитися, чи не було збою або, можливо, хтось вручну змінив налаштування. Така історія також допоможе при масштабуванні – можна вчитися на власному досвіді.

Використання сучасних веб-систем дає можливість залучити зовнішніх експертів для моніторингу (навіть виробники обладнання можуть дистанційно діагностувати проблеми), а також легко масштабувати рішення на кілька будівель, маючи єдиний центр керування.

Масштабування на інші категорії будівель. Розроблені рішення в цілому універсальні для будь-яких будівель з системами опалення. Проте є деякі нюанси при переносі на різні типи: - Для освітніх закладів (школи, університети) – дуже схожа до адміністративних будівель ситуація. Графік роботи – денний, вечірній простій. Тут добре працює зниження температури на ніч/вихідні, сонячні колектори можуть допомагати з ГВП у гуртожитках тощо. Вже є приклади, де кампуси університетів впроваджують подібні платформи енергоменеджменту і досягають значної економії [30].

Рекомендація – об’єднувати кілька будівель в єдину систему (Smart Campus), щоб оптимізувати генеруючі потужності між ними (скажімо, одна котельня/ТН на кілька корпусів).

- Для лікарень – специфіка: вони працюють 24/7, не можна знижувати опалення вночі (пацієнти завжди є). Також в лікарнях дуже високі вимоги до надійності та резервування. Але і там можна застосувати теплові насоси і СЕС (наприклад, для пралень, кухонь, ГВП). Комбіноване тепло + електрика мікромережі може забезпечити безперебійність навіть під час криз. Є проекти лікарень на біомасі і з сонячними водонагрівачами, які показали економію і відмову від газу. Наші алгоритми управління в частині прогнозування навантаження, діагностики теж актуальні. Просто шкала більша і більше уваги резервуванню – можливо, тримати два теплові насоси паралельно, щоб один резервував інший.

- Для житлових будинків – тут графік споживання тепла цілодобовий, але можна адаптувати: вночі люди сплять – допускається трохи нижча температура, вдень частина на роботі – теж можна економити. Теплові насоси і сонячні колектори активно впроваджуються у житловому секторі (наприклад, у приватних будинках). У багатоповерхівках – складніше, але можна створювати будинкові котельні з ТН. Управління може бути простішим (нема такого різноманіття приміщень), але ML-прогноз погоди і оптимізація тарифів дуже корисні. Масштабування на десятки

житлових будинків можливе через модель ЕСКО або ОСББ, де інвестор встановлює обладнання, а мешканці потім платять менше за тепло.

- Для промислових будівель (цехи, склади) – там часто великі площі і теплові навантаження, іноді нерегулярні графіки роботи. Наші рішення теж можуть застосовуватися, але, можливо, інші джерела є сенс – наприклад, утилізація власного надлишкового тепла від процесів. АСЕМ можна до цього адаптувати (врахувати тепло від обладнання, від печей тощо). В промисловості акцент на баланс електро-тепло, наприклад, якщо є пікова електрична генерація – спрямувати її на тепло. Тут наш модуль оптимізації буде дуже корисним (вирішувати, коли що вмикати).

- Для закладів культури, історичних будівель – там обмеження архітектурні, не завжди можна ставити колектори чи змінювати фасад. Але внутрішня модернізація (насоси, автоматика) – можлива і дуже потрібна, бо часто старі системи. АСЕМ допоможе моніторити, щоб не було ні сирості ні перевисушування. В таких будівлях, де люди не постійно (музеї, церкви), якраз важливо точне регулювання: підтримувати мінімум для збереження експонатів, і підіймати тільки під час відвідувань. Наші алгоритми дозволять це автоматизувати (за розкладом чи датчиком присутності).

З точки зору масштабування проекту на місто чи країну, можна рекомендувати органам влади: - Поширювати практику створення енергетичних менеджерів в установах – навчати персонал користуватися системами, читати дані. - Розробити типові рішення (типові проекти) для шкіл, лікарень тощо на основі цього досвіду, щоб кожна установа не проектувала з нуля, а брала за основу успішний кейс. - Створити єдину платформу міського енергомоніторингу, куди підключати всі будівлі – тоді легко виявляти, де найбільші проблеми, і туди спрямовувати ресурси першочергово. Наш проект міг би послужити одним з демонстраційних, інтегрувавшись в ширшу систему: на екрані міської диспетчерської буде видно, що наша будівля споживає вдвічі менше нормативу –

це приклад, а інша, стара, споживає вдвічі більше – її в пріоритет на модернізацію.
- Розглянути механізми фінансування: наприклад, дозволити залишати частину зекономлених бюджетних коштів установі на інші потреби – це стимулює їх економити. Або укладати ЕСКО-контракти: коли приватна фірма інвестує, а потім отримує економію певний час. В Україні такий механізм діє для бюджетних установ, і наш комплекс заходів можна виконати через нього (уже є приклади встановлення теплових насосів по ЕСКО).

Подальші дослідження і розвиток. Масштабування рішень вимагає також постійного вдосконалення технологій. Рекомендується співпрацювати з науковими установами для:

- Тестування нових алгоритмів AI на даних будівель (можна деперсоналізовано зібрати big data з багатьох шкіл, і навчити модель, що керуватиме усіма).

- Випробування нових видів акумулюючих матеріалів (наприклад, фазозмінні матеріали) у конкретних будівлях.

- Оцінка впливу на здоров’я та продуктивність – це допоможе аргументувати інвестиції не тільки економією енергії, а й соціально-економічним ефектом (менше лікарняних, більше ефективних годин роботи).

Впровадження енергоефективних рішень – це не одноразова акція, а постійний процес управління енергією. Тому важливо створити в організації систему енергоменеджменту (відповідно до стандарту ISO 50001), призначити відповідальних, встановити цілі і регулярно їх переглядати. Наша автоматизована система буде інструментом, але люди мають задавати напрям і реагувати на вказівки системи. За правильної експлуатації ми отримаємо сталий довготривалий ефект у вигляді скорочення енергоспоживання, витрат бюджету та викидів, що піде на користь і установі, і суспільству в цілому.

Таким чином, розроблені та обґрунтовані в цьому розділі рішення цілком реалістично втілити в життя. Вони принесуть значні переваги, а досвід їх

впровадження стане моделлю для модернізації багатьох інших будівель – на шляху до енергетичної незалежності та сталого розвитку нашої країни. Доведена ефективність підтверджується як теоретичними розрахунками, так і прикладами з сучасних досліджень [30-45].

Висновки

У межах даної магістерської роботи було виконано комплексне міждисциплінарне дослідження, спрямоване на формування теоретичних і практичних основ для розробки та впровадження енергоефективних рішень у сфері теплопостачання адміністративних будівель. Актуальність теми зумовлена сучасними викликами у сфері енергетики, необхідністю підвищення автономності об’єктів критичної інфраструктури, прагненням до зниження енергоспоживання та підвищення енергетичної безпеки України в умовах зростання вартості енергоресурсів і кліматичних змін. Крім того, актуальність зумовлена процесами децентралізації, розвитком муніципальних енергетичних стратегій, які ставлять за мету енергонезалежність окремих об’єктів та громад.

У першому розділі дисертації було здійснено систематизований аналіз поточного стану теплопостачання адміністративних будівель в Україні. Встановлено, що більшість таких будівель мають централізоване джерело теплопостачання, яке характеризується значними тепловими втратами (до 25–30 %), низьким коефіцієнтом корисної дії (переважно 50–60 %) та практичною відсутністю гнучкості у реагуванні на зміну погодних умов чи графік використання приміщень. Серед виявлених проблем - зношеність інженерних мереж, недостатня термоізоляція огороджувальних конструкцій, неефективні схеми регулювання подачі тепла, а також відсутність систем дистанційного моніторингу параметрів споживання. Водночас, недостатній рівень автоматизації та відсутність інтегрованого моніторингу призводять до перевитрат теплової енергії, що становлять до 35 % річного споживання. Це створює суттєві бар’єри для досягнення цілей енергетичної ефективності та автономності.

Другий розділ було присвячено аналізу існуючих технічних і програмних рішень, що використовуються в системах автономного теплопостачання у світовій

практиці. Було розглянуто досвід країн ЄС, зокрема Німеччини, Данії, Нідерландів, Австрії, Швеції, де широко впроваджуються теплові насоси повітря–вода, сонячні колектори, геотермальні установки, буферні ємності, а також системи автоматичного регулювання із підтримкою дистанційного доступу та адаптивного прогнозування споживання. Розглянуто також програмні комплекси типу Building Management Systems (BMS), які дозволяють в реальному часі контролювати роботу обладнання, накопичувати архіви параметрів, аналізувати відхилення та запобігати аварійним ситуаціям. На основі порівняння технічних характеристик і економічних параметрів таких рішень було сформовано висновок щодо доцільності переходу до гібридної архітектури системи, яка поєднує декілька джерел тепла під централізованим цифровим керуванням.

У третьому розділі розроблено концепцію інтегрованої системи автономного теплопостачання для адміністративної будівлі загальною площею 1200 м². Система включає тепловий насос повітря–вода потужністю 35 кВт, 45 м² вакуумних сонячних колекторів та акумулюючу ємність обсягом 1500 літрів. Побудована цільова архітектура забезпечує 85–90 % теплового навантаження у міжсезоння та до 50 % взимку. Крім джерел тепла, до складу системи увійшли розподільчі вузли з погодозалежною автоматикою, теплообмінники, інтелектуальні термостати у зонах споживання та модуль обліку з передачею даних через GSM-модем. Особлива увага приділена впровадженню автоматизованої системи моніторингу і керування (аналог ASMU), яка використовує мережу з понад 50 сенсорів температури, тиску, витрати енергії та внутрішнього клімату. Система керується інтелектуальним модулем, що реалізує прогнозну модель на основі алгоритмів дерева рішень і методів машинного навчання з точністю прогнозу понад 92 %. Розроблено алгоритми керування на основі сценаріїв: "мінімальне навантаження у нічний час", "швидке нагрівання у ранкові години", "оптимізація при відсутності персоналу", "реакція на зміну зовнішньої температури".

Було здійснено техніко-економічне обґрунтування впровадження розробленої системи. Розрахунок теплового навантаження показав, що вихідне річне споживання будівлі становить близько 240 000 кВт·год, а після модернізації знижується до 135 000 кВт·год. Це відповідає зниженню на 43,75 %. Витрати на опалення, відповідно, скорочуються з 700 000 грн/рік до 365 000 грн/рік (при діючих тарифах на централізоване та автономне теплопостачання), що становить економію у 335 000 грн на рік. Загальна вартість модернізації системи оцінюється в 1,42 млн грн, з терміном окупності 4,2 роки. У порівнянні з альтернативним сценарієм модернізації лише ІТП без джерел відновлюваної енергії, запропоноване рішення є на 27 % ефективнішим з погляду довгострокової економії.

У межах роботи було побудовано інформаційно-аналітичну модель автоматизованої системи енергоменеджменту. Вона включає підсистему збору даних, модуль прогнозування споживання енергії та алгоритм виявлення неефективних режимів. Система має функціонал генерації рекомендацій для енергоменеджера щодо оптимізації роботи обладнання, зокрема за сценаріями «нічного зниження навантаження» або «адаптації до змін зовнішньої температури». Реалізовані алгоритми забезпечують додаткову економію до 10 % порівняно з ручним керуванням. Було впроваджено веб-інтерфейс з інтерактивною панеллю для візуалізації теплових потоків, споживання у динаміці та генерації звітів. Крім того, система підтримує інтеграцію з зовнішніми сервісами погодного прогнозу, що дозволяє автоматично коригувати режими роботи теплогенераторів.

Також проведено аналіз очікуваних результатів та перспектив масштабування. Встановлено, що після модернізації клас енергоефективності будівлі зростає з "E" до "B" (відповідно до ДСТУ Б В.2.6-31:2021). Рівень термічного комфорту покращується: внутрішня температура підтримується на рівні 20–22 °C з відхиленням не більше ±0,5 °C, а час виходу системи на стабільний режим скорочується на 25 %. Аналіз стійкості системи в умовах відключення зовнішнього джерела тепла показав, що автономна конфігурація дозволяє

підтримувати критичні температури у приміщеннях протягом щонайменше 48 годин без залучення резервного джерела. У роботі запропоновано поетапний план впровадження подібних рішень в інших адміністративних об’єктах, передбачено створення єдиної веб-платформи моніторингу, яка здатна обслуговувати до 50 будівель одночасно, забезпечуючи інтеграцію в муніципальні енергетичні платформи.

Таким чином, результати дослідження засвідчують, що впровадження автономної енергоефективної системи теплопостачання з автоматизованим управлінням є доцільним, ефективним і адаптивним рішенням, що дозволяє суттєво знизити витрати, підвищити комфорт, забезпечити стабільність і гнучкість теплопостачання адміністративних будівель. Запропонована модель може бути рекомендована до впровадження у масштабах окремих громад, муніципалітетів та державних установ як інструмент досягнення цілей сталого розвитку й енергетичної незалежності. Вона не лише враховує актуальні технологічні тенденції, а й відповідає екологічним викликам сучасності, адже дозволяє скоротити викиди CO_2 на 35–40 % завдяки зменшенню споживання викопного палива.

Перелік посилань

1. Balode, L.; Dolge, K.; Blumberga, D. The Contradictions between District and Individual Heating towards Green Deal Targets. Sustainability 2021, 13, 3370. https://doi.org/10.3390/su13063370

2. Mofijur, M.; Fattah, I.R.; Alam, A.; Islam, A.S.; Ong, H.C.; Rahman, S.A.; Najafi, G.; Ahmed, S.; Uddin, A.; Mahlia, T. Impact of COVID-19 on the social, economic, environmental and energy domains: Lessons learnt from a global pandemic. In Sustainable Production and Consumption; Elsevier B.V.: Amsterdam, The Netherlands, 2021; Volume 26, pp. 343–359.European Commission. State of the Union: Commission Raises Climate Ambition and Proposes 55% Cut in Emissions by 2030; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.

3. European Parliament. Clean Energy: Fuelling the Transition to a Low-Carbon Economy. Available online: https://www.consilium.europa.eu/en/policies/clean-energy/ (accessed on 26/11/2025).

4. Safarzadeh, S.; Rasti-Barzoki, M.; Hejazi, S.R. A review of optimal energy policy instruments on industrial energy efficiency programs, rebound effects, and government policies. Energy Policy 2020, 139, 111342.

5. Adua, L.; Clark, B.; York, R. The ineffectiveness of efficiency: The paradoxical effects of state policy on energy consumption in the United States. Energy Res. Soc. Sci. 2021, 71, 101806.

6. Arora-Jonsson, S. Blind spots in environmental policy-making: How beliefs about science and development may jeopardize environmental solutions. World Dev. Perspect. 2017, 5, 27–29.

7. Thøgersen, J. Consumer behavior and climate change: Consumers need considerable assistance. Curr. Opin. Behav. Sci. 2021, 42, 9–14.

8. Eguiarte, O.; De Agustín-Camacho, P.; Garrido-Marijuán, A.; Romero-Amorrortu, A. Domestic space heating dynamic costs under different technologies and energy tariffs: Case study in Spain. Energy Rep. 2020, 6, 220–225.

9. Hansen, C.H.; Gudmundsson, O. The Competitiveness of District Heating Compared to Individual Heating. When is District Heating the Cheapest Source of Heating? Available online: https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2018/05/03052018-The-competitiveness-of-district-heating-compared-to-individual-heatingv2.pdf (accessed on 26/11/2025).

10. Lake, A.; Rezaie, B.; Beyerlein, S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. In Renewable and Sustainable Energy Reviews; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; Volume 67, pp. 417–425.

11. Gudmundsson, O.; Thorsen, J.E.; Zhang, L. Cost analysis of district heating compared to its competing technologies. Energy Sustain. 2013, 1, 3–13.

12. Wang, K. Wood Pellet Boiler Heating System Evaluation and Optimization A Dissertation. In Proceedings of the 2017 AIChE Annual Meeting, Minneapolis, MN, USA, 29 October–3 November 2017

13. https://energysecurityua.org/blogs/ukraine-s-valuable-asset-district-heating-system-should-be-preserved-transformed-and-developed

14. Верховна Рада України. (2005). Закон України «Про теплопостачання» № 2633-IV від 02.06.2005 (в редакції від 30.06.2024). Офіційний портал Верховної Ради України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text

15. Європейський парламент і Рада Європейського Союзу. (2010). Директива 2010/31/ЄС про енергетичну ефективність будівель. Офіційний вісник Європейського Союзу, L 153, 13–35. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0031

16. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2016). ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель». Видання офіційне. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63165

17. Perekrest, A., Chornyi, O., Mur, O., & Nikolenko, A. (2018). Preparation and preliminary analysis of data on energy consumption by municipal buildings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(8(96)), 32–42. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147485

18. de la Puente-Gil, Á.; González-Martínez, A.; Rosales-Asensio, E.; Diez-Suárez, A.-M.; Blanes Peiró, J.-J. Efficient Heating System Management Through IoT Smart Devices. Machines 2025, 13, 643. https://doi.org/10.3390/machines13080643

19. Hettiarachchi, D.G.; Jaward, G.M.A.; Tharaka, V.P.V.; Jeewandara, J.M.D.S.; Hemapala, K.T.M.U. IoT Based Building Energy Management System. In Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering (EECon), Colombo, Sri Lanka, 24 September 2021; pp. 69–73.

20. Zhang, S.; Ocłoń, P.; Klemeš, J.J.; Michorczyk, P.; Pielichowska, K.; Pielichowski, K. Renewable Energy Systems for Building Heating, Cooling and Electricity Production with Thermal Energy Storage. Renew. Sustain. Energy Rev. 2022, 165, 112560.

21. Balode, L.; Dolge, K.; Blumberga, D. The Contradictions between District and Individual Heating towards Green Deal Targets. Sustainability 2021, 13, 3370. https://doi.org/10.3390/su13063370

22. Safarzadeh, S.; Rasti-Barzoki, M.; Hejazi, S.R. A review of optimal energy policy instruments on industrial energy efficiency programs, rebound effects, and government policies. Energy Policy 2020, 139, 111342.

23. Adua, L.; Clark, B.; York, R. The ineffectiveness of efficiency: The paradoxical effects of state policy on energy consumption in the United States. Energy Res. Soc. Sci. 2021, 71, 101806.

24. Arora-Jonsson, S. Blind spots in environmental policy-making: How beliefs about science and development may jeopardize environmental solutions. World Dev. Perspect. 2017, 5, 27–29.

25. Gaur, A.S.; Fitiwi, D.Z.; Curtis, J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. Energy Res. Soc. Sci. 2021, 71, 101764.

26. Olczak, P.; Matuszewska, D. The Comparison of Solar Energy Gaining Effectiveness between Flat Plate Collectors and Evacuated Tube Collectors with Heat Pipe: Case Study. Energies 2020, 13, 1829.

27. Musiał, M.; Lichołai, L.; Katunský, D. Modern Thermal Energy Storage Systems Dedicated to Autonomous Buildings. Energies 2023, 16, 4442. https://doi.org/10.3390/en16114442

28. Zhang, C.; Li, Y.; Yang, L.; Fan, X.; Chu, L. Analysis on H_2 production process integrated CaO/$Ca(OH)_2$ heat storage and sorption enhanced staged gasification using calcium looping. Energy Convers. Manag. 2022, 253, 115169.

29. https://ua-energy.org/uk/posts/yevropeitsi-otsinyly-perevahy-tsentralizovanoho-opalennia

30. Shahid, M. N., Shahid, M. U., & Irfan, M. (2025). Advances in building energy management: A comprehensive review. Buildings, 15(23), 4237. https://doi.org/10.3390/buildings15234237

31. Benni, S.; Garcia, C.A.P.; Bovo, M.; Barbaresi, A.; Tinti, F.; Loris, A.; Acosta-Pazmiño, I.P.; Bakalis, P.; Tassinari, P.; Torreggiani, D. A Smart Heating System Based on Integrated Renewable Energy Sources for Swine Nursery Buildings. Energies 2025, 18, 1393. https://doi.org/10.3390/ en18061393

32. Poyyamozhi, M.; Murugesan, B.; Rajamanickam, N.; Shorfuzzaman, M.; Aboelmagd, Y. IoT-A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. Buildings 2024, 14, 3446.

33. Feng, N.; Ran, C. Design and Optimization of Distributed Energy Management System Based on Edge Computing and Machine Learning. Energy Inform. 2025, 8, 17.

34. Marinakis, V.; Doukas, H. An Advanced IoT-Based System for Intelligent Energy Management in Buildings. Sensors 2018, 18, 610.

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

36. Balaras, C.A.; Dascalaki, E.G.; Patsioti, M.; Droutsa, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Cholewa, T. Carbon and Greenhouse Gas Emissions from Electricity Consumption in European Union Buildings. Buildings 2023, 14, 71.

37. Buildings-Energy System-IEA. Available online: https://www.iea.org/energy-system/buildings (accessed on 2 December 2025).

38. Papadakis, N.; Katsaprakakis, D. Al A Review of Energy Efficiency Interventions in Public Buildings. Energies 2023, 16, 6329.

39. Moyer, J.D.; Hedden, S. Are We on the Right Path to Achieve the Sustainable Development Goals? World Dev. 2020, 127, 104749.

40. Al-Atari, Z.; Shipman, R.; Gillott, M. Optimisation of Integrated Heat Pump and Thermal Energy Storage Systems in Active Buildings for Community Heat Decarbonisation. Energies 2024, 17, 5310. https://doi.org/10.3390/ en17215310

41. Arowoiya, V.A.; Moehler, R.C.; Fang, Y. Digital Twin Technology for Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings: A State-of-the-Art and Future Directions. Energy Built Environ. 2024, 5, 641–656. [Google Scholar] [CrossRef]

42. Rasheed, A.; San, O.; Kvamsdal, T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective. IEEE Access 2020, 8, 21980–22012.

43. Kuzevic, S.; Tausova, M.; Culkova, K.; Domaracka, L.; Shyp, D. Energy Efficiency in Heat Pumps and Solar Collectors: Case of Slovakia. Processes 2024, 12, 681. https:// doi.org/10.3390/pr12040681

44. Cheng, Y.; Yang, S.; Sun, S.; Yu, P.; Xing, J. Energy Management for Integrated Energy System Based on Coordinated Optimization of Electric–Thermal Multi-Energy Retention and Reinforcement Learning. Processes 2025, 13, 2693. https://doi.org/10.3390/ pr13092693

45. Aghili, S.A.; Haji Mohammad Rezaei, A.; Tafazzoli, M.; Khanzadi, M.; Rahbar, M. Artificial Intelligence Approaches to Energy Management in HVAC Systems: A Systematic Review. Buildings 2025, 15, 1008. https://doi.org/10.3390/ buildings15071008

46.https://pub.mdpi-res.com/buildings/buildings-15-04237/article_deploy/html/images/buildings-15-04237-g001.png?1763986587