

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

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методи обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища
«розумних будівель»

Виконав: студент VI курсу, групи СНнм-61
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Котлінський О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Пасічник В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Дуда О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

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

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«13» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Котлінському Олександрю Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель».

Керівник роботи Пасічник Володимир Володимирович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» березня 2026 року № 4/9-150

2. Термін подання студентом завершеної роботи 27 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про технології систем спостереження внутрішнього середовища «розумних приміщень»

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Стан та тенденції розвитку інформаційних технологій оптимізації внутрішнього середовища розумних будівель. 2. Математичне формалізування задачі багатоцільової оптимізації та алгоритмічне забезпечення системи. Огляд набору даних. Очищення та попередня обробка даних. Формулювання задачі. Мінімізація енергоспоживання. Оптимізація комфорту. Обмеження. Алгоритми, натхненні природою. Показники оптимізації. Показники продуктивності. Середовище моделювання. 3. Імітаційне моделювання, аналітичний синтез та комплексна оцінка результатів оптимізації. Огляд продуктивності алгоритмів. Порівняльний аналіз алгоритмів. Аналіз чутливості та надійності. Багатовимірна візуалізація. Порівняльний аналіз ефективності оптимізаторів. 4. Безпека життєдіяльності, основи хорони праці. Висновки. Перелік джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів). 1. Титульний слайд. 2. Актуальність 3-4. Мета, завдання, об'єкт дослідження, предмет дослідження 5. Параметри внутрішнього середовища. 6 Математичне формалізування задачі. 7. Експлуатаційні обмеження та біоінспіровані алгоритми. 8. Огляд продуктивності в реальному часі. 9. Реакція на погодні та сезонні зміни. 10. Порівняльний аналіз економії енергії. 11. Аналіз чутливості та надійності. 12. Багатовимірна візуалізація. 13. Висновки. 14. Завершальний слайд

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц., Сенчишин В.С.	03.05.2026	07.05.2026
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.М., проректор адміністративно-господарської роботи та будівництва	08.05.2026	10.05.2026

7. Дата видачі завдання 13 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	13.04.2026	
2.	Підбір та опрацювання наукових публікацій, збір даних по темі роботи	13.04.2026-20.04.2026	
3.	Виконання дослідження згідно теми кваліфікаційної роботи	21.04.2026-03.05.2026	
4.	Оформлення розділу «Стан та тенденції розвитку інформаційних технологій оптимізації внутрішнього середовища розумних будівель»	04.05.2026-10.05.2026	
5.	Оформлення розділу «Математичне формалізування задачі багатоцільової оптимізації та алгоритмічне забезпечення системи»	04.05.2026-10.05.2026	
6.	Оформлення розділу «Імітаційне моделювання, аналітичний синтез та комплексна оцінка результатів оптимізації»	04.05.2026-10.05.2026	
7.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	27.04.2026-10.05.2026	
8.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	27.04.2026-10.05.2026	
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	11.05.2026-13.05.2026	
10.	Нормоконтроль	14.05.2026	
11.	Перевірка на плагіат	15.05.2026	
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	18.05.2026	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	27.05.2026	

Студент

_____ (підпис)

Котлінський О.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Пасічник В.В.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Методи обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища розумних будівель // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Котлінський Олександр Олексійович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СНм-61 // Тернопіль, 2026 // С. 94, рис. – 11, кресл – 14, табл. – 7, додат. – 1, бібліогр. – 67.

Ключові слова: розумна будівля, сенсор навколишнього середовища, обробка даних, біоінспірований алгоритм, багатоцільова оптимізація, енергоефективність, тепловий комфорт.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці й обґрунтуванню методів обробки та аналізу даних сенсорів «розумних будівель» для багатокритеріальної оптимізації енергоменеджменту.

В першому розділі описані концептуальні засади систем моніторингу в інфраструктурі «розумного міста». Висвітлено роль внутрішнього середовища для комфорту мешканців. Розглянуто структуру споживання енергії інженерними вузлами. Проаналізовано конфлікт між екологічністю й економією, обґрунтовано ефективність еволюційних підходів штучного інтелекту.

В другому розділі формалізовано задачу багатоцільової оптимізації та створено середовище моделювання. Досліджено структуру датасету CU-BEMS. Подано математичний опис п'яти новітніх біоінспірованих алгоритмів.

В третьому розділі описано результати експериментів за різних сценаріїв роботи систем. Проаналізовано енергоефективність і швидкість збіжності оптимізаторів. Проведено побудову компромісних рішень. Об'єкт дослідження: процеси обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища будівель. Предмет дослідження: методи, моделі та біоінспіровані алгоритми оптимізації енергоспоживання інженерних систем.

ANNOTATION

Methods for Processing and Analyzing Sensor Data of Smart Building Indoor Environments // The educational level "Master" qualification work // Kotlinskyi Oleksandr Oleksiyovych // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Computer Information Systems and Software Engineering, Department of Computer Science, SNnm-61 group // Ternopil, 2026 // P. 94, fig. – 11, annexes. – 1, tables – 7, chair. -13, references – 67.

Keywords: smart building, environmental sensor, data processing, bioinspired algorithm, multi-objective optimization, energy efficiency, thermal comfort.

The qualification work is devoted to the development and justification of methods for processing and analyzing data from sensors of "smart buildings" for multi-criteria optimization of energy management.

The first section describes the conceptual principles of monitoring systems in the infrastructure of a "smart city". The role of the internal environment for the comfort of residents is highlighted. The structure of energy consumption by engineering nodes is considered. The conflict between environmental friendliness and economy is analyzed, the effectiveness of evolutionary approaches to artificial intelligence is substantiated.

In the second section, the multi-objective optimization problem is formalized and a modeling environment is created. The structure of the CU-BEMS dataset is studied. A mathematical description of five new bioinspired algorithms is presented.

In the third section, the results of experiments under different scenarios of system operation are described. The energy efficiency and convergence speed of optimizers are analyzed. Compromise solutions are constructed.

The object of research: the processes of processing and analyzing data from sensors of the internal environment of buildings. Subject of research: methods, models and bioinspired algorithms for optimizing energy consumption of engineering systems.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ШІ – штучний інтелект.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря).

CU-BEMS – Chulalongkorn University Building Energy Management System (набір даних мікроклімату та енергоспоживання розумної будівлі Чулалонгкорнського університету).

HVAC – Heating, Ventilation, and Air Conditioning (опалення, вентиляція та кондиціонування повітря).

IEQ – Indoor Environmental Quality (якість внутрішнього середовища приміщення, інтегральний показник комфорту).

IoT – Internet of Things (Інтернет речей, мережа фізичних об'єктів, оснащених сенсорами).

PMV – Predicted Mean Vote (прогнозований середній бал теплового сприйняття людини за міжнародним стандартом ISO 7730).

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied (прогнозований відсоток незадоволених тепловим комфортом мешканців).

ЗМІСТ

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. Стан і тенденції аналізу та набори даних внутрішнього середовища розумних будівель	12
1.1. Стан та тенденції розвитку інформаційних технологій аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища розумних будівель.....	12
1.2. Математичне формалізування задачі обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	15
1.3. Набір даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	17
1.4. Очищення та попередня обробка даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	18
1.5. Висновок до першого розділу	19
РОЗДІЛ 2. Математичне та алгоритмічне забезпечення задачі аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	20
2.1. Деталізація задачі аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель».....	20
2.1.1. Мінімізація енергоспоживання «розумних будівель».....	20
2.1.2. Оптимізація комфорту «розумних будівель».....	21
2.1.3. Обмеження аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель».....	23
2.2. Алгоритми аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель» на основі природніх процесів.....	24
2.2.1. Оптимізатор «Пума».....	25
2.2.2. Оптимізатор «Морж».....	27
2.2.3. Алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця»	29
2.2.4. Алгоритм «Рослина водяне колесо»	30
2.2.5. Оптимізатор «Енергетична долина»	32

2.3. Показники оптимізації внутрішнього середовища «розумних будівель»	33
2.3.1. Показники енергоспоживання «розумних будівель»	33
2.3.2. Показники комфорту внутрішнього середовища «розумних будівель»	34
Стабільність температури.	35
2.4. Показники продуктивності біоінспірованих алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	36
2.4.1. Швидкість збіжності.....	36
2.4.2. Надійність алгоритмів в умовах коливань від зовнішніх факторів	37
2.4.3. Різноманітність рішень – аналіз фронту Парето	37
2.5. Середовище моделювання процесів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	38
2.5.1. Налаштування моделі «розумних будівель».....	38
2.5.2. Параметри алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	40
2.5.3. Налаштування сценаріїв аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	41
2.6. Висновок до другого розділу	44
РОЗДІЛ 3. Імітаційне моделювання, аналітичний синтез та комплексна оцінка результатів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	45
3.1. Огляд продуктивності алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	45
3.1.1. Оптимізатор «Пума».....	45
3.1.2. Оптимізатор «Морж».....	48
3.1.3. Алгоритм оптимізації «літаюча лисиця»	50
3.1.4. Алгоритм «Рослина водяне колесо»	52
3.1.5. Оптимізатор «Енергетична долина»	55

3.2. Порівняльний аналіз алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	57
3.3. Аналіз чутливості та надійності алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	61
3.4. Багатовимірна візуалізація компромісів між енергоефективністю та комфортом.....	64
3.5. Порівняльний аналіз ефективності оптимізаторів алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	67
3.6. Комплексна оцінка та висновки щодо ефективності оптимізаційних методів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»	72
3.7. Висновок до третього розділу	74
РОЗДІЛ 4. Безпека життєдіяльності, основи хорони праці.....	76
4.1. Організація безпечних умов праці при експлуатації інженерних систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря	76
4.2. Превентивні інженерно-технічні заходи пожежо та вибухозахисту в системах опалення, вентиляції, освітлення та кондиціонування повітря .	80
Висновки.....	84
Перелік джерел.....	87
Додатки	

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімка урбанізація та глобалізація ставлять перед сучасними мегаполісами нові виклики у сфері раціонального використання ресурсів та створення комфортних умов для життєдіяльності людини. Концепція «розумних міст», яка базується на впровадженні передових інформаційно-комунікаційних технологій та Інтернету речей, виступає ключовим інструментом для автоматизації процесів моніторингу й сталого управління міською інфраструктурою. Оскільки сучасна людина проводить більшу частину свого часу всередині будівель, забезпечення оптимальної ІЕQ, зокрема прецизійний контроль температури, вологості та параметрів енергоспоживання, набуває критично важливого значення.

Традиційні підходи до автоматизації будівель часто фокусуються виключно на жорсткому зниженні витрат енергії, що призводить до суттєвого порушення теплового та мікрокліматичного комфорту мешканців, особливо в умовах динамічної заселеності приміщень чи екстремальних коливань погодних умов. На алгоритмічному рівні існує гостра потреба у впровадженні гнучких еволюційних підходів, здатних розв'язувати задачі багатоцільової оптимізації та знаходити стабільну компромісну рівновагу в режимі реального часу. Тому розроблення та дослідження інформаційних систем багатокритеріального аналізу екологічних та енергетичних показників із використанням сучасних біоінспірованих алгоритмів є актуальним напрямком сучасних прикладних комп'ютерних наук.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є підвищення ефективності автоматизованого управління енергоспоживанням та стабільністю мікроклімату в інтелектуальних будівлях шляхом розробки та порівняльного аналізу моделей багатоцільової оптимізації на основі біоінспірованих алгоритмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати стан сучасних досліджень у сфері інформаційних систем «розумних міст» та визначити роль внутрішнього середовища в загальній концепції сталого розвитку; Так далі по тексту для всіх списків.

- дослідити існуючі на даний час методи, сенсорні технології моніторингу та математичні метрики оцінки мікрокліматичного комфорту та енергоефективності приміщень;

- проаналізувати теоретичні засади, операційну логіку та математичні моделі сучасних біоінспірованих алгоритмів оптимізації ресурсів;

- виконати порівняльний аналіз п'яти біоінспірованих алгоритмів (Оптимізатор «Пума», Оптимізатор «Морж», Оптимізатор «Літаюча лисиця», «Рослина водяне колесо» та Оптимізатор «Енергетична долина») у віртуальному середовищі моделювання за різних експлуатаційних сценаріїв;

- розробити архітектурне, структурне та програмне рішення для інформаційної системи, що інтегрує процеси аналітичного опрацювання даних сенсорів та алгоритмічного керування інженерними системами розумних будівель.

Об'єкт дослідження: процеси збирання, обробки та багатокритеріального аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища інтелектуальних будівель.

Предмет дослідження: методи, математичні моделі та біоінспіровані алгоритми оптимізації енергоспоживання інженерних систем при підтриманні нормативних параметрів комфорту мешканців.

Наукова новизна одержаних результатів кваліфікаційної роботи полягає у тому, що:

- отримав подальший розвиток метод порівняльного оцінювання еволюційних алгоритмів шляхом побудови багатовимірних просторів рішень (фронтів Парето), що дозволило вперше визначити специфічні експлуатаційні межі, рівні чутливості та показники надійності для кожного з п'яти новітніх біоінспірованих оптимізаторів в умовах динамічної заселеності та погодних коливань приміщень.

Практичне значення одержаних результатів. Створено надійне програмне середовище моделювання та виконано прототипування інформаційної системи управління енергоефективністю Розумних будівель. На основі щохвилинних даних з високою роздільною здатністю CU-BEMS практично підтверджено можливість досягнення комплексної економії енергії системами HVAC, освітлення та розеток у межах від 18% до 22% при одночасному утриманні відхилень кімнатної температури в межах прецизійної норми (0,4–0,6 °C). Результати роботи можуть слугувати алгоритмічним базисом для проектування промислових систем автоматизації та IoT-платформ енергоменеджменту комерційних та житлових об'єктів сталого будівництва.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні теоретичні положення та практичні результати проведених досліджень обговорювалися та доповідалися на XIII науково-технічній конференції „Інформаційні моделі, системи та технології“ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025 р.).

Публікації. Основні результати кваліфікаційної роботи опубліковано у двох працях у науковому збірнику «Матеріали XIII науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології“» (м. Тернопіль, ТНТУ, 2025 р.) (див. додатки А):

1. Котлінський О., Вітів І., Довгалюк С. Розумні міста – концепти та напрямки досліджень.
2. Ониськів Д., Довгалюк С., Котлінський О. Системи спостереження показників довкілля.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 67 найменувань та 1 додатку. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 94 сторінок, з яких 85 сторінок основного тексту. Робота містить 11 рисунків та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1. СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ АНАЛІЗУ ТА НАБОРИ ДАНИХ ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА РОЗУМНИХ БУДІВЕЛЬ

1.1. Стан та тенденції розвитку інформаційних технологій аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища розумних будівель

Модернізація параметрів внутрішнього простору й оптимізація енергопотреби в сучасних спорудах є важливими для підвищення зручності користувачів за мінімального ресурсоспоживання. Новітні будівлі інтегрують передові інструменти, зокрема машинне навчання та Інтернет речей, здійснюючи моніторинг енерговитрат задля скорочення деструктивних викидів CO₂ і покращення умов перебування людей [1], [2]. Менше з тим, гострою залишається проблема гармонізації процесів заощадження енергії та збереження мікроклімату, адже непередбачувані коливання в поточних потребах мешканців зазвичай спричиняють зниження загальної ефективності інженерних мереж [3].

У наявних наукових працях аналізувалися різні підходи до керування, серед яких алгоритми предиктивного контролю та автоматизовані платформи енергоменеджменту. Наразі зростає попит на адаптивні інструменти, що здатні в режимі реального часу опрацьовувати дані [4], [5], [6], [7], [8]. Комплекси екологічного моніторингу, які функціонують у синергії з інноваційними рішеннями та модернізованими контурами управління HVAC [61], мають вагомі перспективи для подолання труднощів, гарантуючи відповідність обсягів споживання чинним нормам, критеріям здоров'я та затишку людей [4], [9], [66].

Впровадження штучного інтелекту спільно з біоінспірованими алгоритмами останнім часом розглядається як концепція з великими можливостями для раціоналізації енергетичних балансів у багатьох галузях. ШІ дозволяє підняти якість енергетичного планування завдяки точному прогнозуванню, оптимізації процесів обробки великих даних, а також безперешкодному підключенню альтернативних джерел до загальних мереж, мінімізуючи наявні технологічні ризики щодо продуктивності [10], [11], [12].

Завдяки запозиченню природних патернів поведінки біоінспіровані алгоритми здатні ефективно розв'язувати складні нелінійні завдання, притаманні сучасним енергосистемам. До математичних методів, які продемонстрували високу результативність під час скорочення операційних витрат та модернізації інтелектуальних архітектур енергоменеджменту, належать алгоритм «Dragonfly» та генетичні алгоритми [13], [14].

Крім того, впровадження біоінспірованих конструкцій для модернізації лопатей турбін, що генерують електрику завдяки використанню океанічних течій [60], дозволяє наочно підтвердити їхні переваги у сфері підвищення загальної енергоефективності [15]. Тісна інтеграція штучного інтелекту та біоінспірованих підходів виступає рушієм інноваційних змін в інженерній інфраструктурі, допомагаючи розбудові розумних міст на принципах сталого споживання енергії [16], [17], [67]. Як наслідок, спільне залучення інструментів ШІ та біоінспірованих алгоритмів окреслює найбільш перспективний вектор у сфері оптимізації енергопотоків та гарантує підвищення живучості інженерних систем.

Для служб експлуатації споруд досить складним викликом є мінімізація витрат електричної енергії за одночасного збереження стабільного мікроклімату, головним чином у контурах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, штучного висвітлення приміщень і лініях живлення розеткових мереж. Системи HVAC традиційно є найбільш енергоємними вузлами будівель, проте науково зафіксовано суттєве зменшення витрат при впровадженні інтелектуальних сценаріїв контролю, наприклад, через прецизійне коригування температурних уставок за фактом присутності персоналу, що дозволило знизити витрати на генерацію холоду аж на 59% [18]. Своєю чергою, внутрішнє освітлення та побутова апаратура сумарно споживають близько 30% ресурсу в житловому секторі [62], [60], і раціоналізація роботи цих вузлів шляхом димування за сигналами від давачів руху та впровадження розумних освітлювальних систем на основі поточної заповнюваності кімнат здатна забезпечити значне енергозбереження без шкоди для зручності людей [19], [20].

Електричні навантаження розеткових мереж, які охоплюють прилади, не пов'язані з кліматичними системами та штучним висвітленням, є важливим напрямком для оптимізації енерговитрат. За даними 2017 року, на цей сектор припадало близько 40% загального енергоспоживання комерційного фонду, і впровадження автоматизованого керування здатне знизити ці витрати за умови збереження повної працездатності обладнання [21]. Проте надмірне зміщення пріоритетів у бік економії ресурсів може спровокувати дискомфорт персоналу й падіння продуктивності праці, що вимагає пошуку збалансованих рішень.

Сучасні інструменти Інтернету речей та предиктивного аналізу відкривають нові можливості для створення гнучких комплексів, які підлаштовуються під поточні потреби людей у режимі реального часу, гармонізуючи енергоефективність та затишок [59]. Зокрема, аналітичні моделі на базі зібраних даних дають змогу мінімізувати енерговитрати без порушення нормативного теплового мікроклімату завдяки математичному прогнозуванню динаміки суб'єктивного відчуття тепла в кімнатах [22], [23], [64]. Крім того, застосування мереж інтелектуальних давачів дозволяє оптимізувати графіки споживання ресурсів, цілковито гарантуючи приватність користувачів та враховуючи їхні поведінкові патерни й зворотний зв'язок [24], [25]. Зрештою, глибока інтеграція цифрових технологій забезпечує надійний баланс між продуктивністю інженерних систем, екологічною стабільністю та задоволеністю мешканців [26].

Проаналізуємо біоінспірований алгоритмічний підхід до оптимізації енерговитрат та параметрів мікроклімату в сучасних спорудах. Зокрема, у праці [58] задіяно динамічний інформаційний масив показників енергопотребі та факторів довкілля в режимі реального часу, відомий як датасет CU-BEMS, на основі якого реалізуються еволюційні методи метаевристичного керування. Створена база містить високодеталізовані відомості щодо функціонування контурів опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, штучного висвітлення, ліній живлення розеткових мереж, а також поточних характеристик внутрішнього простору. Висока роздільна здатність фіксації температурного

режиму, вологості й природної освітленості для багатьох кімнат забезпечує точність аналітичного оцінювання та адаптацію оптимізаційних процедур до специфіки конкретних локацій. Біоінспіровані алгоритми інтегруються задля досягнення прецизійного балансу між мінімізацією енерговитрат і підтриманням нормативного рівня затишку людей. Як наслідок, ці математичні методи здатні гнучко підлаштовуватися під поточні пертурбації, як-от коливання щільності персоналу або безпосередній вплив атмосферних явищ, що підтверджує їхню ефективність в умовах високої динаміки внутрішнього та зовнішнього середовища споруд. Спроектвана в межах цих вишукувань система багатокритеріального керування враховує об'єктивні суперечності між вимогами комфорту та обмеженням ресурсів, пропонуючи надійну алгоритмічну платформу для автоматизованого енергоменеджменту [66].

1.2. Математичне формалізування задачі обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Було детально висвітлено методологію дослідження, де увагу зосереджено на математичній постановці проблеми, структурі масиву та інструментах оптимізації. Параметри затишку користувачів та обсяги енерговитрат узгоджуються шляхом інтеграції біоінспірованих метаевристик у загальну екосистему інтелектуальної споруди. Опис методології побудовано за логічним ланцюжком: спочатку аналізується архітектура датасету, після чого розглядаються процедури підготовки сенсорних часових рядів, а наприкінці досліджується впровадження алгоритмів для розв'язання задачі.

На рисунку 1.1 зображено спроектовану структурно-функціональну схему, яка пояснює етапи розробки алгоритмічного забезпечення для збалансування енергоефективності й комфорту за допомогою еволюційного пошуку. Початковим кроком виступає огляд бази даних, де інформаційні потоки CU-BEMS агрегуються та диференціюються за поверхами й незалежними зонами,

охоплюючи контури HVAC, штучного висвітлення, лінії живлення розеткових мереж і масиви показників довкілля.

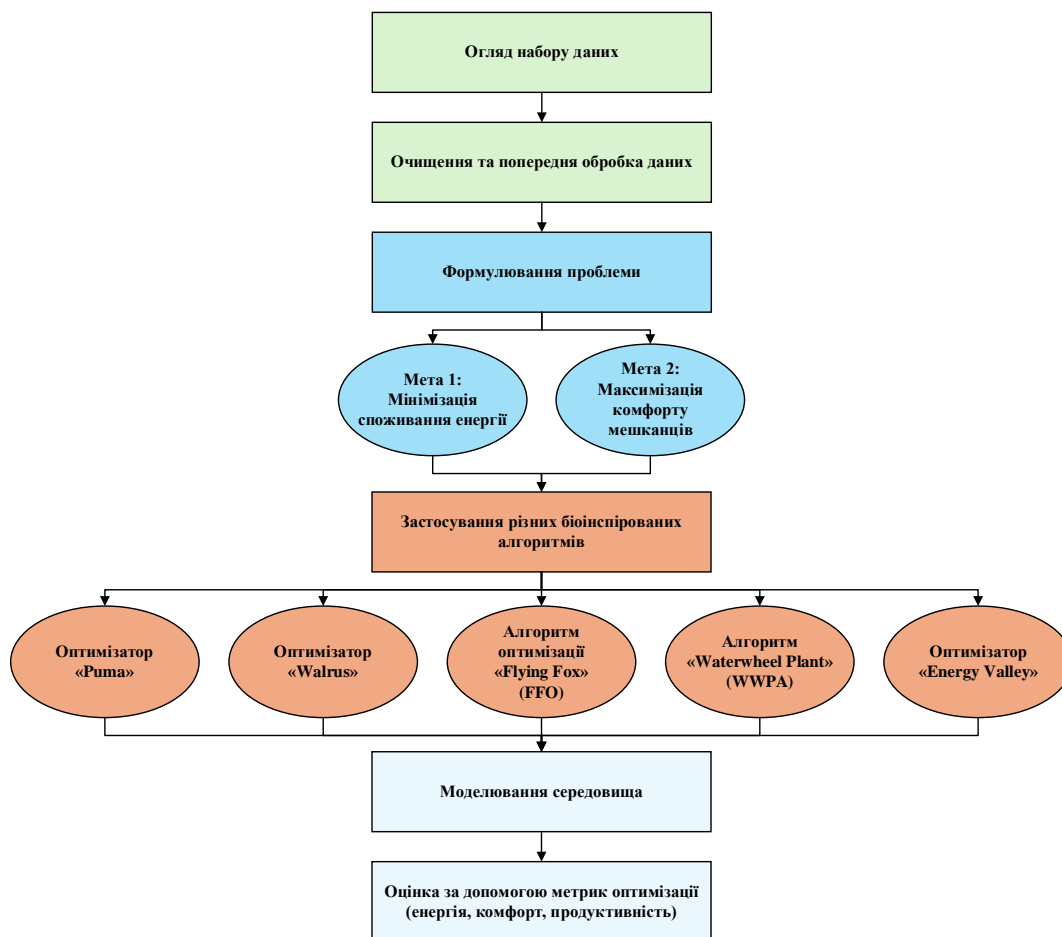


Рисунок 1.1 – Блок-схема методології дослідження.

Процедури попередньої обробки гарантують якість даних, заповнення пропусків і нормалізацію ознак для подальшого позонного аналізу. Математична постановка проблеми поєднує дві цілі: мінімізацію енергоспоживання (контури HVAC, освітлення, розеткові мережі) та максимізацію затишку людей (теплові й світлові показники). Для адаптивного коригування параметрів у режимі реального часу залучаються біоінспіровані метаевристики, зокрема оптимізатор «Пума» та оптимізатор «Морж». Це дозволяє створити імітаційне віртуальне середовище споруди для тестування алгоритмів за умов пікових навантажень та мінливої погоди [65]. Комплексна оцінка здійснюється на основі системи метрик, що балансують енергоефективність, стабільність мікроклімату та загальну надійність роботи.

1.3. Набір даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Масив даних, задіяний у дослідженні [58], сформовано на основі CU-BEMS [27] – відкритого інформаційного ресурсу розумних споруд, який фіксує витрати електрики та параметри мікроклімату в розрізі окремих приміщень. Ця база містить 14 автономних CSV-файлів, що структурують енергетичні та екологічні показники кожного поверху за 2018 і 2019 роки. Матеріали по кожному рівню деталізовані за зонами й відображають роботу систем HVAC, штучного освітлення, розеткових ліній, а також заміри датчиків температури, вологості й природної ілюмінації. Інтервал фіксації становить 1 хвилину, забезпечуючи високу дискретність обсягом 1 440 вимірів на добу. Хронологія за 2018 рік охоплює 184 дні, генеруючи 264 960 записів у файлі. Для 2019 року наявні безперервні річні спостереження, що становить 525 600 рядків на один файл.

Загалом архітектура наявних відомостей мала відмінності залежно від поверху, оскільки склад і характер замірів у конкретних приміщеннях споруди варіювалися. Наприклад, перший поверх позбавлений екологічних сенсорів, через що наявні параметри обмежуються лише витратами електрики на штучне висвітлення, розеткові лінії та контури HVAC у межах чотирьох виділених зон. Натомість інформаційні масиви для рівнів з 2-го по 7-й є більш розгорнутими, охоплюючи як показники енергоспоживання, так і заміри датчиків температури, вологості й ілюмінації для максимум п'яти кімнат на кожному поверсі. Зазначені файли містять від 11 до 36 інформаційних стовпців відповідно до специфіки рівня, причому обсяг контрольованих параметрів зростає на верхніх поверхах. Сумарно вони акумулюють відомості про функціонування 55 автономних систем опалення, вентиляції та кондиціонування, 33 локацій штучного світла, 32 ліній розеткового навантаження та 24 точок розміщення кліматичних давачів по всій будівлі. Увесь цей комплекс технічних та мікрокліматичних параметрів формує надійну аналітичну базу для подальшого збалансування енергоефективності інженерних мереж та комфорту користувачів.

1.4. Очищення та попередня обробка даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Перед використанням інфраструктурних масивів для оптимізації реалізовано їх попередню підготовку, що охоплювала кілька фаз: верифікацію та валідацію узгодженості інформації. Зважаючи на масштабність бази, початковим кроком став аудит і усунення порожніх або фрагментарних записів. Втрата вимірів у цьому датасеті зазвичай обумовлювалася апаратними збоями сенсорів або звітними паузами в мережі телеметрії, що утворювало пропуски у часових рядах. У межах цих вишукувань відновлення втрачених метрик здійснювалося обчислювальними методами математичної інтерполяції. Зокрема, алгоритм лінійної інтерполяції усував ізольовані пропуски в неперервних функціях температурного режиму та енергоспоживання задля збереження базових трендів. У випадках тривалих хронологічних прогалин, де інтерполяційні методи втрачали точність, дефектні інформаційні блоки повністю вилучалися з розрахунків або маркувалися для окремої експертної ревізії. [27], [28], [29], [30].

Згодом масив даних піддали процедурі нормалізації з метою зведення всіх контрольованих параметрів до єдиного масштабу, зважаючи на значні розбіжності в одиницях виміру, як-от кіловати для енерговитрат, градуси Цельсія для температурного режиму та люкси для інтенсивності світлового потоку. Це критично важлива фаза підготовки інформації для оптимізаційних завдань, передусім тих, де функція обчислення витрат певною мірою спирається на метрики відстані, оскільки ознаки з ширшим діапазоном значень зазвичай чинять домінуючий вплив на траєкторію пошуку рішень. У праці [58] впроваджено метод мінімально-максимального масштабування, який трансформує кожен змінну у фіксовані межі від 0 до 1, що гарантує прискорену збіжність обчислювальних методів та забезпечує еквівалентну вагомість кожної характеристики в процесі еволюційного пошуку.

Наприкінці структуровані відомості диференціювали за окремими кімнатами задля реалізації локальних процедур керування, оскільки кожна зона

в межах споруди має унікальні патерни енергоспоживання та власну специфіку формування мікроклімату. Такий підхід надає гнучкості аналітичному інструментарію, дозволяючи розробляти цільові заходи для конкретних ділянок об'єкта, що вирізняються надмірними витратами ресурсів або незадовільними параметрами внутрішнього середовища. Отримані масиви згодом агрегували з різними часовими інтервалами (зокрема, обчислювали середньогодинні та середньодобові показники) для виявлення довгострокових трендів енергопотреби й комфорту, що послужило додатковими вхідними векторами для алгоритмів оптимізації.

1.5. Висновок до першого розділу

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» описано концептуальні засади побудови та функціонування сучасних інформаційних систем моніторингу параметрів приміщень у загальній інфраструктурі «розумних міст»

Висвітлено ключову роль забезпечення належної якості внутрішнього середовища будівель для сталого розвитку міських екосистем та збереження здоров'я, теплового комфорту і продуктивності мешканців. Розглянуто детальну структуру споживання енергетичних ресурсів основними інженерними вузлами, зокрема системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, комплексами штучного освітлення та побутовими навантаженнями від розеткових мереж. Проаналізовано наявні автоматизовані системи й класичні стратегії керування будівлями та виявлено їхні характерні недоліки, пов'язані з нездатністю оперативно реагувати на випадкові динамічні збурення. Визначено сутність природного нелінійного конфлікту між прецизійним підтриманням мікроклімату та суворою економією енергоносіїв. На основі проведеного аналізу сформовано комплексні концептуальні та алгоритмічні вимоги до побудови інформаційних систем багатокритеріальної оптимізації параметрів внутрішнього середовища споруд у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ ДАНИХ СЕНСОРІВ ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА «РОЗУМНИХ БУДІВЕЛЬ»

2.1. Деталізація задачі аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Математична постановка цього дослідження спирається на принципи багатокритеріального керування, метою якого є одночасне зниження енерговитрат та підвищення якості умов людей. Попри взаємозв'язок, зазначені цільові орієнтири зазвичай перебувають у стані гострого протиріччя: радикальне зменшення енергоспоживання, передусім системами HVAC, провокує деградацію параметрів кімнатного мікроклімату й знижує задоволеність користувачів. Через це ключове завдання оптимізаційного процесу полягає у знаходженні компромісного балансу між цими взаємовиключними чинниками.

2.1.1. Мінімізація енергоспоживання «розумних будівель»

Першим завданням цього дослідження є мінімізація загального енергоспоживання будівлі. Набір даних класифікує енергоспоживання на три основні складові: системи HVAC, освітлення та навантаження на розетки. Кожне з цих значних навантажень становить істотну частину загального енергоспоживання, тому для процесу оптимізації необхідно враховувати структуру споживання [31].

- Зниження енерговитрат кліматичних систем HVAC: Комплекси HVAC виступають головними споживачами електрики в спорудах, оскільки саме вони контролюють температурний режим та якісні показники повітряного середовища задля забезпечення затишку людей. Основна мета полягає у мінімізації енергоспоживання систем HVAC за умови збереження мікроклімату в кімнатах на нормативному рівні. Оптимізаційна математична модель аналізує витрати

електроенергії по кожному з 55 блоків HVAC у розрізі виділених приміщень і прагне скоротити тривалість їхнього активного функціонування або скоригувати керуючі параметри для зменшення їхніх загальних енергетичних потреб. [65].

- Зменшення енерговитрат штучного освітлення: Навантаження від освітлювальних приладів формують енергоспоживання у 33 виділених зонах. Оптимізаційна модель намагається мінімізувати ці витрати шляхом деактивації або димування (зменшення яскравості) джерел світла під час низької щільності відвідувачів або за умови достатнього рівня природної інсоляції, який фіксується сенсорами зовнішньої освітленості.

- Оптимізація розеткових навантажень: Цей напрям передбачає зниження енергоспоживання побутовими приладами й устаткуванням, що підключені до розеткових мереж у 32 виділених приміщеннях. Процес концентрується на усуненні зайвих енерговитрат, передусім у години мінімального попиту, шляхом координації режимів роботи некритичного обладнання.

Математично завдання мінімізації енергоспоживання представляють у вигляді цільової функції (див. формулу 2.1):

$$\text{Minimize } E_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T (E_{\text{HVAC}}(t) + E_{\text{lighting}}(t) + E_{\text{plug}}(t)) \quad (2.1)$$

де $E_{\text{HVAC}}(t)$; $E_{\text{lighting}}(t)$ та $E_{\text{plug}}(t)$ представляють споживання енергії системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), освітленням та навантаженням розеток у момент часу t відповідно. Мета полягає у мінімізації загального споживання енергії E_{total} протягом усього періоду експлуатації T .

2.1.2. Оптимізація комфорту «розумних будівель»

Друга мета полягає в максимізації комфорту людей, на який суттєво впливають такі параметри мікроклімату, як температура, вологість, освітленість,

рівень шуму та якість повітря (зокрема, концентрація CO₂ і летких органічних сполук). Хоча в цьому дослідженні через простоту фіксації враховано лише перші три показники, якість повітряного середовища та акустичний фон залишаються важливими чинниками загальної якості внутрішнього простору (IEQ).

Висока концентрація CO₂ та Низька швидкість повітряного потоку в приміщенні викликає дискомфорт та знижує продуктивність праці, тоді як підвищений рівень шуму пригнічує когнітивні здібності й погіршує самопочуття мешканців. Тому інструменти контролю якості повітряного середовища та заходи з шумозаглушення мають бути інтегровані в майбутні моделі оптимізації розумних будівель. Наразі ж у таких спорудах базовий комфорт людей підтримується переважно стандартними контурами HVAC, які коригують виключно температурний режим та вологість повітря. Водночас умови освітлення регулюються для забезпечення належного освітлення для виконання різних завдань [31].

- **Термічний комфорт:** Термічний комфорт є ключовим аспектом добробуту мешканців, і значною мірою він визначається рівнем температури та вологості повітря в приміщенні. У дослідженні для кількісної оцінки термічного комфорту використовуються загальновизнані індекси комфорту, такі як прогнозований середній бал (PMV) та прогнозований відсоток незадоволених (PPD). Мета полягає в підтримці температури в приміщенні в межах заздалегідь визначеного діапазону комфорту (наприклад, від 22°C до 26 °C) та вологості в межах прийнятних меж (наприклад, від 40% до 60%) у всіх зонах, мінімізуючи відхилення від цих значень.

- **Комфорт освітлення:** Належна освітленість є критичною для комфорту та продуктивності праці. Сенсори фіксують рівень природного світла в приміщеннях, а система оптимізації регулює інтенсивність штучного висвітлення для підтримання заданих нормативних меж. Це дозволяє забезпечити затишок користувачів і уникнути надмірних енерговитрат. Математично мету максимізації комфорту виражають у вигляді цільової функції. (див. формулу 2.2):

$$\text{Maximize } C_{\text{total}} = \sum_{z=1}^Z \left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T C_{\text{HVAC}}(z, t) + C_{\text{lighting}}(z, t) \right) \quad (2.2)$$

де $C_{\text{HVAC}}(z; t)$ представляє комфорт, що забезпечується системою HVAC у зоні z у момент часу t , а $C_{\text{lighting}}(z; t)$ представляє комфорт, що забезпечується системою освітлення. Мета полягає у максимізації загального комфорту C_{total} у всіх зонах Z та протягом усього періоду експлуатації T .

2.1.3. Обмеження аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Процес оптимізації підпорядкований низці експлуатаційних обмежень, які гарантують досягнення цільових показників енергоспоживання та комфорту без порушення реальних технічних лімітів інженерних систем.

- Обмеження діапазону температур: температура в приміщенні повинна знаходитися в межах встановленої зони комфорту, щоб уникнути теплового дискомфорту для мешканців [64]. Нормативний температурний діапазон комфорту для всіх зон зазвичай становить від 22°C до 26°C. Алгоритм оптимізації штрафує будь-які відхилення від цих меж, оскільки суттєві коливання температури призводять до гострого дискомфорту мешканців (див. формулу 2.3):

$$T_{\min} \leq T_{\text{zone}}(t) \leq T_{\max} \forall t \in [0, T] \quad (2.3)$$

де T_{\min} та T_{\max} представляють нижню і верхню межі прийняттого діапазону температур, а $T_{\text{zone}}(t)$ – це температура в конкретній зоні в момент часу t .

- Обмеження діапазону вологості: аналогічно, вологість повинна знаходитися в межах зони комфорту, зазвичай від 40% до 60%, щоб люди не відчували дискомфорту та не мали проблем зі здоров'ям (див. формулу 2.4):

$$H_{\min} \leq H_{\text{zone}}(t) \leq H_{\max} \forall t \in [0, T] \quad (2.4)$$

- Обмеження щодо освітлення: Рівень ілюмінації в кожній зоні не повинен опускатися нижче встановленого порогу люксів, який визначається поточною кількістю людей та специфікою їхньої діяльності. Автоматика регулює інтенсивність штучного висвітлення, враховуючи показники датчиків природного світла, задля точного досягнення цього ліміту. (див. формулу 2.5):

$$L_{\min} \leq L_{\text{zone}}(t) \forall t \in [0, T] \quad (2.5)$$

- Обмеження щодо енергії: мета полягає у зменшенні споживання енергії, але загальне зменшення не повинно перевищувати практичні межі, що дозволяють зберегти функціональність будівлі. Мінімальний поріг споживання енергії встановлюється для забезпечення безперебійної роботи критично важливих систем, таких як системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря та системи освітлення.

Система також повинна гарантувати, що деякі критично важливі навантаження, такі як сервери або системи безпеки, завжди отримують живлення.

Це забезпечить функціонування будівлі в межах прийнятних рівнів комфорту та енергоефективності шляхом включення обмежень до моделі оптимізації та пошуку оптимального компромісу між цими суперечливими цілями.

2.2. Алгоритми аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель» на основі природних процесів

У роботі [58] комплекс біоінспірованих алгоритмів, що імітують природні явища, а також поведінкові патерни тварин і рослин, залучається для розв'язання

складних багатокритеріальних задач оптимізації в реальних інженерних сценаріях. Ці метаевристичні методи застосовуються для мінімізації сукупного енергоспоживання інфраструктури розумних будівель за одночасного забезпечення максимального рівня комфорту для їхніх мешканців [32], [33], [34], [35]. Хоча традиційні підходи, такі як ГА та ОРЧ, знайшли широке застосування в управлінні енергією, біоінспіровані алгоритми мають переваги в універсальності, швидкій збіжності в динамічних ситуаціях та уникненні локальних оптимумів. Наприклад, ГА та ОРЧ застосовують підходи пошуку на основі популяції, але можуть не впоратися зі складними багатоцільовими завданнями, що передбачають точний баланс між енергоефективністю та комфортом користувачів.

У дослідженні [58] було залучено алгоритми Оптимізатор «Пума», оптимізатор «Морж», оптимізація «Летюча лисиця», алгоритм «Водяне колесо» «Рослина водяне колесо» та Оптимізатор «Енергетична долина», зважаючи на їхню високу ефективність при розв'язанні нелінійних і динамічних завдань багатоцільового керування. Перспективні вишукування можуть бути спрямовані на порівняльний аналіз цих підходів із класичними методами задля детальнішої верифікації переваг біоінспірованих метаевристик. Загалом інтегрований комплекс оптимізаційних рішень охоплює оптимізатор «Пума», оптимізатор «Морж», алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця», алгоритм «Рослина водяне колесо» та Оптимізатор «Енергетична долина». Кожен із зазначених алгоритмів забезпечує адаптивне коригування робочих параметрів систем HVAC, штучного освітлення та розеткових мереж на основі потокових даних телеметрії споруди в режимі реального часу.

2.2.1. Оптимізатор «Пума»

Оптимізатор «Пума» розроблено на основі мисливських стратегій пуми, яка вистежує, переслідує та атакує здобич із мінімальними витратами власних сил [36], [37]. У межах цієї роботи алгоритм динамічно змінює тактику пошуку

для адаптації до мінливих умов. На практиці це забезпечує енергоефективне коригування параметрів систем HVAC та штучного освітлення будівлі на основі потокових даних від сенсорів у реальному часі.

Роль в оптимізації: Оптимізатор «Пума» знаходить раціональні параметри роботи систем HVAC та штучного освітлення через адаптацію до коливань зовнішнього середовища (зміни температури) та графіка відвідуваності кімнат. Процес імітує поведінку хижака, що гнучко коригує траєкторію полювання залежно від маневрів здобичі. Ключовий критерій – мінімізація енергоспоживання за обов'язкового збереження умов у межах нормативної зони комфорту. Завдяки такому підходу алгоритм дозволяє досягти динамічного компромісу між заощадженням ресурсів та підтриманням стабільного мікроклімату в реальному часі.

Математичне формулювання: Алгоритм оптимізатор «Пума» можна сформулювати як задачу мінімізації, яку представлено у виразі (див. формулу 2.6):

$$\text{Minimize } f(E_{\text{total}}) = E_{\text{HVAC}}(t) + E_{\text{lighting}}(t) \quad (2.6)$$

З урахуванням обмежень комфорту (див. формулу 2.7):

$$T_{\min} \leq T_{\text{zone}}(t) \leq T_{\max}, H_{\min} \leq H_{\text{zone}}(t) \leq H_{\max} \quad (2.7)$$

Оптимізатор «Пума» динамічно коригує налаштування системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря і штучного освітлення на основі поточних відхилень від встановлених порогових значень комфорту. Алгоритм гнучко адаптує параметри інженерних мереж, мінімізуючи витрати енергії в періоди низької відвідуваності або за сприятливих погодних умов. Загальну логіку функціонування, черговість обчислювальних процедур та послідовність кроків розрахунку наведено у відповідному псевдокоді. (див. лістинг 2.1).

Лістинг 2.1 – Псевдокод оптимізатора «Пума»

```

Initialize популяцію пум (вектори рішень)
Evaluate придатність кожної пуми (споживання енергії та комфорт)
While критерії завершення не виконані do
  For each пума do
    Оновити позицію на основі адаптивної стратегії полювання
    Evaluate нову придатність (баланс енергії та комфорту)
    If нова придатність краща then Оновлюємо положення пуми
  End If
End For
Вибрати найкращу пуму (найкраще рішення)
End While
Return найкраще рішення

```

Наведений алгоритмічний підхід забезпечує збалансоване коригування режимів роботи інженерного обладнання розумних будівель відповідно до динаміки вхідних сенсорних даних. Це дозволяє мінімізувати загальні енергетичні витрати без ризику порушення базових умов життєдіяльності.

2.2.2. Оптимізатор «Морж»

Оптимізатор «Морж» створено на основі здатності моржа орієнтуватися в суворих і мінливих умовах, таких як крижані води Арктики [38]. Цей алгоритм використовує рух моржа як метафору для навігації у багатовимірному просторі пошуку енергоефективності та комфорту мешканців.

Роль в оптимізації: Оптимізатор «Морж» ефективно знаходить раціональні інженерні рішення в умовах високої невизначеності та постійних флуктуацій навколишнього середовища. Поведінкова модель цього алгоритму імітує здатність моржів успішно адаптуватися до суворих кліматичних змін та мігрувати залежно від зовнішніх факторів. У контексті автоматизації будівель це дозволяє системі гнучко балансувати між заощадженням енергії та підтриманням мікроклімату, оперативно реагуючи на різкі зміни погоди, коливання кількості людей у кімнатах або зміну часу доби. Завдяки високій стійкості до динамічних збурень алгоритм запобігає запізненню керуючих сигналів і мінімізує перевитрати ресурсів під час перехідних режимів роботи обладнання.

Математична формулювання: Алгоритм-оптимізатор «Морж» спрямований на оптимізацію компромісу між енергоспоживанням та комфортом мешканців(див. формулу 2.8):

$$\text{Minimize } f(E_{\text{total}}) = \sum_{t=1}^T (E_{\text{HVAC}}(t) + E_{\text{lighting}}(t) + E_{\text{plug}}(t)) \quad (2.8)$$

З урахуванням: $T_{\min} \leq T_{\text{zone}} \leq T_{\max}$, та інших обмежень щодо комфорту.

Оптимізатор «Морж» динамічно коригує енергетичні налаштування у міру зміни умов навколишнього середовища та експлуатації, імітуючи здатність моржа до адаптації.

Покрокову процедуру пошуку компромісних рішень за еволюційною стратегією поведінки моржів відображено у відповідному псевдокоді (див. лістинг 2.2).

Лістинг 2.2 – Псевдокод оптимізатора «Морж»

```

Initialize популяцію моржів (вектори рішень)
Evaluate придатність кожного моржа (баланс енергії та комфорту)
While критерії завершення не виконані do
  For each морж do
    Оновити положення, використовуючи стратегію адаптації
    моржа до
    навколишнього середовища
    Evaluate нову придатність (енергія та комфорт)
    If нова придатність краща then Оновити положення
    End If
  End For
  Вибрати найкращого моржа (найкраще рішення)
End While
Return найкраще рішення

```

Описана послідовність операцій орієнтована на підвищення надійності керування мікрокліматом за умов випадкових збурень внутрішнього і зовнішнього середовища. Завдяки високій адаптивності еволюційного пошуку досягається стабільність функціонування системи у динамічних експлуатаційних сценаріях.

2.2.3. Алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця»

Алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця» сформовано на основі соціальної поведінки лисиць та моделями польоту літаючих лисиць. Ці тварини використовують ехолокацію та колективну поведінку для пошуку оптимальних місць для харчування [39], [40]. У цьому алгоритмі летючі лисиці колективно досліджують простір рішень, подібно до того, як вони шукають їжу в дикій природі.

Роль в оптимізації: оптимізатор «Літаюча лисиця» сформовано на основі кооперативних летючих лисиць, які досліджують та використовують простір рішень у пошуках оптимальних рішень щодо енергії та комфорту. Цей алгоритм збалансовує пошук нових рішень та вдосконалення існуючих, розвиваючи оптимізований дизайн у споживанні енергії без впливу на комфорт мешканців.

Математична формулювання: оптимізатор «Літаюча лисиця» досліджує компроміс між енергозбереженням та комфортом шляхом мінімізації наступної цілі яку представлено у виразі (див. формулу 2.9):

$$\text{Minimize}(E_{\text{total}}) = E_{\text{HVAC}}(t) + E_{\text{lighting}}(t) + E_{\text{plug}}(t) \quad (2.9)$$

З урахуванням обмежень комфорту (див. формулу 2.10):

$$T_{\min} \leq T_{\text{zone}}(t) \leq T_{\max}, L_{\min} \leq L_{\text{zone}}(t) \quad (2.10)$$

Ітераційну процедуру колективного дослідження простору Парето-оптимальних компромісів за алгоритмом оптимізатором «Літаюча лисиця» представлено у вигляді псевдокоду (див. лістинг 2.3).

Зазначена модель колективного пошуку та ехолокації дозволяє ефективно досліджувати простір рішень і формувати щільну множину невідомованих компромісних варіантів на фронті Парето.

Лістинг 2.3 – Псевдокод оптимізації «Літаюча лисиця»

```

Initialize популяцію летючих лисиць (вектори рішень)
Evaluate придатність кожної летючої лисиці (енергія та комфорт)
While критерії завершення не виконані do
  For each летюча лисиця do
    Оновити положення на основі колективної поведінки
    (дослідження)
    Evaluate придатність нового положення
    Оновити положення на основі рішення найкращого сусіда
    (експлуатація)
  End For
  Вибрати найкращу летючу лисицю (найкраще рішення)
End While
Return найкраще рішення

```

Це робить алгоритм перспективним для систем, де пріоритет зміщено в бік максимізації енергозбереження.

2.2.4. Алгоритм «Рослина водяне колесо»

Алгоритм «Рослина водяне колесо» слідує стратегії оптимізації ресурсів рослини щодо ефективного захоплення та раціонального використання поживних речовин із навколишнього середовища [41]. Цей алгоритм використовуватиме принципи оптимізації ресурсів рослини для регулювання споживання енергії в різних зонах будівлі [58].

Роль в оптимізації: динамічне регулювання енергетичних налаштувань шляхом імітації стратегії рослини, яка ефективно поглинає та розподіляє доступні ресурси.

Це дозволить оптимізувати енергоспоживання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, освітлення та навантажень від розеток у різних зонах будівлі та розподілити ресурси для досягнення максимальної ефективності та комфорту.

Математична формула: алгоритм «Рослина водяне колесо» мінімізує споживання енергії, зберігаючи комфорт, використовуючи формулу 2.11:

$$\text{Minimize } f(E_{\text{total}}) = \sum_{t=1}^T (E_{\text{HVAC}}(t) + E_{\text{lighting}}(t)) \quad (2.11)$$

З урахуванням обмежень щодо температури, вологості та освітлення (див. формулу 2.12):

$$T_{\min} \leq T_{\text{zone}}(t) \leq T_{\max}, H_{\min} \leq H_{\text{zone}}(t) \leq H_{\max} \quad (2.12)$$

Схему динамічного перерозподілу енергетичних ресурсів та обробки зворотного зв'язку від датчиків за алгоритмом «Рослина водяне колесо» наведено нижче в лістингу 2.4.

Лістинг 2.4 – Псевдокод алгоритму водяного колеса електростанції

```

Initialize популяцію рослин (вектори рішень)
Evaluate придатність кожної рослини (енергія та комфорт)
While не виконано критерії завершення do
  For each рослина do
    Коригувати розподіл ресурсів (енергію на систему опалення,
    вентиляції та
    кондиціювання, освітлення) на основі зворотного зв'язку з
    навколишнім середовищем
    Evaluate нову придатність (енергія та комфорт)
    If придатність покращується then
      Оновити розподіл ресурсів
    End If
  End For
  Вибрати найкращий завод (найкраще рішення)
End While
Return найкраще рішення

```

Практична реалізація цього підходу спрямована на оптимізацію розподілу обмежених енергетичних ресурсів між різнорідними споживачами розумної будівлі.

Динамічне реагування на зміну метеорологічних чинників дозволяє гнучко адаптувати інтенсивність штучного освітлення та вентиляції.

2.2.5. Оптимізатор «Енергетична долина»

Оптимізатор «Енергетична долина» використовує підхід динаміки енергетичної долини, який моделює поведінку частинок у полі потенційної енергії для досягнення стабільної рівноваги [42]. Оптимізатор «Енергетична долина» застосовує цю концепцію для збалансування енергоспоживання та комфорту шляхом регулювання налаштувань системи HVAC з метою підвищення енергоефективності без шкоди для комфорту мешканців [58].

Роль в оптимізації: оптимізатор «Енергетична долина» зосереджується на мінімізації енергоспоживання, зокрема в системах HVAC, направляючи систему до енергоефективних налаштувань, що підтримують стабільний рівень комфорту, подібно до того, як частинка шукає найнижчу точку в долині потенційної енергії.

Математична формулювання: задача оптимізації формулюється як формула 2.13:

$$\text{Minimize } f(E_{\text{HVAC}}) = E_{\text{HVAC}}(t) \quad (2.13)$$

З урахуванням обмежень комфорту щодо температури та вологості (див. формулу 2.14):

$$T_{\min} \leq T_{\text{zone}}(t) \leq T_{\max}, H_{\min} \leq H_{\text{zone}}(t) \leq H_{\max} \quad (2.14)$$

Послідовність кроків алгоритмічного процесу для зміщення обчислювальних частинок до точки глобальної стабільної рівноваги описано в структурі псевдокоду (див. лістинг 2.5).

Описаний процес гарантує високу швидкість збіжності алгоритму при пошуку оптимальних прецизійних налаштувань. Моделювання фізичної поведінки частинок забезпечує утримання параметрів мікроклімату в межах вузьких нормативних допусків за мінімального цільового споживання енергії системами HVAC.

Лістинг 2.5 – Псевдокод оптимізатора «Енергетична долина»

```

Initialize частинки (вектори рішень) в енергетичній долині
Evaluate придатність кожної частинки (енергія HVAC та комфорт)
While критерії завершення не виконані do
  For each частинка do
    Перемістити частинку до стабільної рівноваги (оптимальні
    налаштування
    енергоспоживання)
    Evaluate придатність у новому положенні (енергоспоживання
    та комфорт)
    If придатність покращується then
      Оновити положення
    End If
  End For
  Вибрати найкращу частинку (найкраще рішення)
End While
Return найкраще рішення

```

Кожен із цих алгоритмів унікальним чином оптимізує баланс між енергоспоживанням та комфортом у розумних будівлях, використовуючи біоінспіровані стратегії для пошуку найефективніших рішень.

2.3. Показники оптимізації внутрішнього середовища «розумних будівель»

Для оцінки ефективності біоінспірованих алгоритмів в оптимізації енергоспоживання та комфорту мешканців використовується комплекс ключових критеріїв. Ці показники дозволяють кількісно оцінити, наскільки успішно кожен алгоритм мінімізує витрати потужності й одночасно забезпечує задоволеність користувачів мікрокліматом, а також визначають його обчислювальну стабільність, як показано в роботах [43], [44]. Показники поділяються на три типи: енергетичні показники, показники комфорту та показники продуктивності.

2.3.1. Показники енергоспоживання «розумних будівель»

Споживання енергії є однією з головних цілей даного дослідження. Енергетичні показники кількісно оцінюють ефективність алгоритму, вимірюючи

загальне споживання ресурсів у різних інженерних системах будівлі. Цей набір даних містить похвилинні метрики споживання потужності комплексами HVAC, штучним освітленням та побутовими навантаженнями на розетки, що забезпечує високу точність розрахунку використаної енергії.

Показник енергоспоживання: він показує загальну кількість енергії, використаної за день, тиждень або рік. Енергія, використана системами HVAC, освітленням та навантаженнями на розетки в кожній зоні та за кожен часовий інтервал, обчислюється окремо та підсумовується для отримання загального енергоспоживання всієї будівлі.

Загальне споживання енергії E_{total} для кожної зони z обчислюється за формулою 2.15:

$$E_{total} = \sum_{t=1}^T (E_{HVAC}(z, t) + E_{lighting}(z, t) + E_{plug}(z, t)) \quad (2.15)$$

де

- $E_{HVAC}(z; t)$ – енергія, спожита системою HVAC у зоні z у момент часу t ;
- $E_{lighting}(z; t)$ – енергія, спожита освітленням у зоні z ;
- $E_{plug}(z; t)$ – енергія, спожита навантаженнями розеток у зоні z ;
- T – загальний період часу, що розглядається.

Споживання енергії зазвичай вимірюється в кіловат-годинах (кВт·год) і позначається як кВт·год. Зниження споживання енергії буде кількісно оцінено шляхом обчислення різниці між сумою загального споживання енергії до та після використання алгоритмів оптимізації. Мета полягає у вирішенні задачі мінімізації, яка мінімізує E_{total} , зберігаючи прийнятні параметри комфорту.

2.3.2. Показники комфорту внутрішнього середовища «розумних будівель»

Показники комфорту стосуються того, наскільки добре алгоритми оптимізації можуть підтримувати умови IEQ на прийнятному для мешканців

рівні. На комфорт мешканців впливають основні фактори будівельної фізики, такі як температура, вологість та умови освітлення. Іншим викликом є забезпечення задоволеності мешканців шляхом підтримання стабільності цих параметрів.

Стабільність температури. Серед важливих показників комфорту одним є стабільність температури, що описується як підтримання температури в приміщенні в межах діапазону комфорту, заздалегідь визначеного нижньою та верхньою межами, наприклад, між (22°C та 26°C). Під час оптимізації відхилення від оптимального діапазону температур карається штрафними балами. Показник стабільності температури можна визначити як середнє відхилення фактичної температури $T_{\text{zone}}(t)$ від цільової температури T_{target} (див. формулу 2.16):

$$\Delta T_{\text{zone}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |T_{\text{zone}}(t) - T_{\text{target}}| \quad (2.16)$$

Це відхилення буде мінімізовано, щоб температура залишалася якомога ближчою до заданого значення.

Стабільність вологості. Подібно до температури, відсоток вологості повинен залишатися в комфортному діапазоні, наприклад, від 40% до 60%. Середнє значення абсолютної різниці між фактичною вологістю $H_{\text{zone}}(t)$ та цільовою вологістю H_{target} обчислюється для того, щоб показати, наскільки добре алгоритм підтримує якість повітря в приміщенні (див. формулу 2.17):

$$\Delta H_{\text{zone}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |H_{\text{zone}}(t) - H_{\text{target}}| \quad (2.17)$$

Комфорт освітлення. Комфорт, пов'язаний з освітленням, вимірюється шляхом обчислення різниці між фактичним освітленням у люксах та цільовим рівнем освітлення в зоні. Адекватні рівні освітлення забезпечать продуктивність

та комфорт без марнування енергії. Мета полягає в тому, щоб підтримувати освітлення в цільовому діапазоні, визначеному залежно від зайнятості приміщення та вимог до виконання завдань.

2.4. Показники продуктивності біоінспірованих алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

На додаток до показників енергоспоживання та комфорту, показники ефективності використовуються для вимірювання ефективності та результативності біоінспірованих алгоритмів.

Ці показники більше стосуються здатності алгоритму знаходити оптимальні рішення протягом розумного проміжку часу та його стійкості в різних умовах.

2.4.1. Швидкість збіжності

Швидкість збіжності – це швидкість, з якою алгоритм збігається до оптимального або майже оптимального рішення [45]. Для практичного застосування швидкість збіжності повинна бути вищою, щоб забезпечити коригування енергетичних налаштувань будівлі в режимі реального часу або майже реального часу. Швидкість збіжності можна визначити як кількість ітерацій, необхідних алгоритму для досягнення найкращого відомого рішення(див. формулу 2.18):

$$C_{\text{speed}} = \text{Iterations to reach optimum solution} \quad (2.18)$$

Менша кількість ітерацій свідчить про швидшу збіжність, що є особливо важливим для динамічних систем, таких як «розумні» будівлі, де умови часто змінюються.

2.4.2. Надійність алгоритмів в умовах коливань від зовнішніх факторів

Надійність кількісно характеризує, наскільки стабільно алгоритм функціонує в умовах коливань зовнішніх факторів, таких як погодні умови, графіки завантаження приміщень або динамічні тарифи на енергію. Вона відображає здатність системи збігатися до високоякісних рішень у широкому спектрі сценаріїв без погіршення кінцевої продуктивності. Цей критерій зазвичай оцінюють шляхом тестування алгоритму на відмінних наборах даних і за різних обмежень із подальшим аналізом дисперсії отриманих результатів.

2.4.3. Різноманітність рішень – аналіз фронту Парето

У задачах багатоцільової оптимізації, таких як балансування енергоспоживання та комфорту мешканців, алгоритми спрямовані на пошук набору парето-оптимальних рішень [46], [47]. Різноманітність рішень уздовж фронту Парето є критично важливим показником ефективності, оскільки вона надає особам, що приймають рішення, широкий спектр альтернативних компромісів між енергозбереженням та комфортом. Ефективний алгоритм не просто знаходить оптимальні точки, а й рівномірно розподіляє їх уздовж усього фронту, забезпечуючи максимальну гнучкість при виборі стратегії керування.

Цей фронт Парето відповідає множині недомінованих рішень, таких, що поліпшення одного цільового показника (енергоспоживання) супроводжується погіршенням іншого (комфорт). Різноманітність рішень уздовж фронту Парето можна кількісно оцінити за допомогою розкиду рішень, який визначається як відстань між крайніми рішеннями уздовж фронту (див. формулу 2.19):

$$D_{\text{Pareto}} = \sum_{i=1}^n (\text{Distance between adjacent solutions}) \quad (2.19)$$

Більший розкид свідчить про кращу різноманітність альтернатив, що дозволяє особам, які приймають рішення, обирати варіант під конкретні

пріоритети – залежно від того, чи акцентується увага на максимальному енергозбереженні, чи на підвищеному комфорті. У роботі [58] всебічно проаналізовано ефективність комплексу біоінспірованих алгоритмів щодо збалансування енергоефективності та задоволеності мешканців за допомогою інтеграції метрик енергії, комфорту й обчислювальної продуктивності. З огляду на це, саме енергетичні показники виступають головним інструментом кількісної оцінки зниження загального споживання ресурсів.

Натомість показники комфорту гарантують відсутність компромісів щодо добробуту мешканців, а показники продуктивності дають уявлення про те, наскільки ефективними, надійними та різноманітними є знайдені рішення. Ці показники слід розглядати як такі, що сприяють пошуку алгоритмів з найкращими характеристиками для реальних застосувань у сфері розумних будівель.

2.5. Середовище моделювання процесів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

У роботі [58] було створено середовище моделювання для імітації реальної роботи розумної будівлі, що дозволить дослідити ефективність біоінспірованих алгоритмів у питаннях оптимізації енергоспоживання та IEQ. У наступному розділі буде детально описано налаштування моделі будівлі, параметри алгоритмів та різні сценарії моделювання, що забезпечать оцінку алгоритмів за різних умов та обмежень.

2.5.1. Налаштування моделі «розумних будівель»

Для експерименту використовується цифрова модель будівлі, створена на основі реального набору даних CU-BEMS. Цей масив містить детальні похвилинні метрики енергоспоживання та параметрів навколишнього середовища за два роки (2018 та 2019) для семи поверхів інтелектуальної

споруди. Структурно модель будівлі складається з поверхів, які додатково поділяються на окремі зони. Кожна така зона відповідає певній ділянці приміщення зі своїми автономними контурами HVAC, штучного освітлення та розеткових навантажень. Зони обладнані датчиками мікроклімату, що фіксують температуру, вологість та рівень освітленості. При цьому кожен поверх у моделі має унікальну конфігурацію зон із відмінними профілями енергоспоживання. Прикладом може бути:

- 1-й поверх має чотири зони з даними щодо систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, освітлення та навантаження на розетки, але не має давачів навколишнього середовища.
- 2-й поверх має більш складну конфігурацію, що включає дані про системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, освітлення, навантаження на розетки та давачі навколишнього середовища, які вимірюють температуру, вологість та освітленість.
- Поверхи з 3 по 7 мають подібні конфігурації з п'ятьма зонами на кожному, з даними, що фіксують енергоспоживання семи блоків системи HVAC, освітлення, навантажень на розетки та умов навколишнього середовища за допомогою чотирьох давачів у кожній зоні.

Процес моделювання передбачає інтеграцію в режимі реального часу набору даних, який містить щохвилинні показники енергоспоживання систем HVAC, штучного освітлення й розеткових навантажень, а також параметри внутрішнього мікроклімату. Такі високодеталізовані дані дозволяють фіксувати як короткострокові, так і довгострокові коливання в режимах роботи споруди, забезпечуючи реалістичну й динамічну оцінку ефективності алгоритмів оптимізації. Перед завантаженням у симуляційне середовище масив даних проходить попередню обробку задля очищення від аномалій та підготовки до потокового застосування.

Віртуальна модель будівлі конфігурується таким чином, що кожна зона функціонує незалежно, але залишається підпорядкованою загальній системі енергоменеджменту (BEMS). Така архітектура дозволяє біоінспірованим

алгоритмам локально оптимізувати рівні енергоспоживання та комфорту для кожної кімнати, враховуючи при цьому сумарні ліміти потужності об'єкта. Контури HVAC регулюють температуру та вологість на основі потокової телеметрії; системи освітлення з датчиками руху керуються як фактором присутності людей, так і рівнем природної інсоляції, а навантаження на розетки оптимізуються на основі виявлених поведінкових моделей використання техніки.

2.5.2. Параметри алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Кожен з біоінспірованих алгоритмів, застосованих у цьому дослідженні, вимагає конкретних параметрів для керування процесом оптимізації. Ці параметри, такі як розмір популяції, кількість ітерацій та швидкості мутації/кросовера, налаштовуються для забезпечення ефективної роботи алгоритмів та знаходження оптимальних рішень у контексті енергетичних потреб та вимог до комфорту будівлі.

- Розмір популяції: Для всіх алгоритмів (оптимізатор «Пума», оптимізатор «Морж», Алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця», «Рослина водяне колесо» та оптимізатор «Енергетична долина») розмір популяції означає кількість потенційних рішень (наприклад, можливих налаштувань систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря та освітлення), що розглядаються під час кожної ітерації. Типовий розмір популяції для цього дослідження коливається від 50 до 100, що забезпечує баланс між обчислювальною ефективністю та необхідністю досліджувати різноманітний набір рішень.

- Кількість ітерацій: Кількість ітерацій визначає, скільки разів алгоритм оновлює свої варіанти рішень. З огляду на складність компромісів між енергоспоживанням та комфортом, для кожного моделювання використовується від 500 до 1000 ітерацій, що гарантує, що алгоритми матимуть достатньо часу для збіжності до оптимального або майже оптимального рішення [48].

- Швидкість мутації та швидкість кросовера (для еволюційних алгоритмів):

- Частота мутацій: У таких алгоритмах, як Оптимізатор «Пума» та Оптимізатор «Морж», частота мутацій визначає ймовірність внесення випадкових змін до кандидатів на рішення. Вибирається частота мутацій від 0,01 до 0,05, щоб забезпечити різноманітність у популяції, запобігаючи передчасному збігу до субоптимальних рішень [49].

- Коефіцієнт кросовера: Коефіцієнт кросовера визначає ймовірність поєднання двох батьківських рішень для отримання нових дочірніх рішень. У цьому дослідженні використовується коефіцієнт кросовера від 0,7 до 0,9, що сприяє обміну корисними ознаками між рішеннями та одночасно дозволяє досліджувати нові комбінації [49].

- Швидкість навчання (для адаптивних алгоритмів): Для алгоритмів, таких як Оптимізатор «Енергетична долина», які адаптивно коригують рішення, застосовується швидкість навчання від 0,1 до 0,3, що контролює розмір кроку оновлень рішення на основі компромісів між енергією та комфортом, спостережуваних у даних у реальному часі [50].

Ці параметри налаштовуються за допомогою попередніх експериментів, щоб забезпечити баланс між дослідженням (пошуком нових рішень) та використанням (удосконаленням існуючих рішень) у складному ландшафті оптимізації енергії та комфорту.

2.5.3. Налаштування сценаріїв аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Для всебічного аналізу й поглибленої перевірки продуктивності біоінспірованих алгоритмів було розроблено кілька сценаріїв моделювання за різних умов експлуатації інтелектуального будинку. Вони відіграють вирішальну роль у тестуванні стійкості та надійності метаевристик відповідно до динамічних змін зовнішніх чинників і моделей використання споруди. Кожен сценарій має

чітко визначені межі параметрів та цільові характеристики, що забезпечує високу реалістичність симуляційного процесу.

Наприклад, температура в приміщеннях підтримується в строгому діапазоні від 22°C до 26°C, а відносна вологість – у межах від 40% до 60%, що повністю відповідає міжнародним рекомендаціям ASHRAE та ISO 7730 щодо забезпечення теплового комфорту мешканців. Умови штучного освітлення встановлюються відповідно до вимог конкретних робочих завдань, тому загальні офісні приміщення отримують ілюмінацію не менше 300 люкс, тоді як зони з інтенсивною зоровою працею – до 500 люкс. Обмеження на основі датчиків присутності інтегруються динамічно, тобто режим максимальної економії енергії активується лише тоді, коли кімнати залишаються незайнятими або в позаробочий час, щоб жодним чином не погіршувати умови проживання чи праці. Такі заздалегідь визначені граничні порогові значення слугують для надійної перевірки практичної здійсненності запропонованих методів оптимізації без жодного ризику для добробуту людей всередині будівлі.

1) Періоди пікового споживання енергії: Цей тестовий сценарій відображає періоди високого попиту на енергію в будівлі, наприклад, опівдні, коли системи HVAC охолоджують будівлю, а кількість людей у приміщенні також досягає пікового рівня. Алгоритми будуть протестовані для досягнення комфортного рівня без компромісів, щоб мінімізувати споживання енергії під час цих пікових періодів.

Оптимізація відбуватиметься шляхом зміни заданих значень систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, приглушення непотрібного освітлення та зменшення навантаження на розетки.

2) Непікові періоди: Сюди входить моделювання нічних годин або вихідних, коли будівля здебільшого порожня, а попит на енергію низький. У таких ситуаціях алгоритми тестуються, щоб визначити, наскільки добре вони можуть заощаджувати енергію, що витрачається даремно, при цьому підтримуючи базовий рівень комфорту в тих приміщеннях, що залишаються зайняті, таких як охоронні або серверні кімнати [63].

3) Змінна зайнятість: Зайнятість є динамічною, як очікується від зон, що демонструють високий трафік у певні години, таких як зали для нарад або зони загального користування, і залишаються здебільшого недовикористаними протягом значної частини дня. Такі алгоритми автоматично реагуватимуть на дані про зайнятість у реальному часі, щоб централізовано оптимізувати системи HVAC та освітлення для забезпечення комфорту в зайнятих зонах та мінімізації споживання енергії в незайнятих зонах.

4) Погодні умови: Несприятливі зовнішні погодні умови значно впливають на енергоспоживання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Цей сценарій перевірить алгоритми за різних умов зовнішньої температури, імітуючи спекотні літні дні або холодні зимові ночі. Алгоритми повинні налаштовувати параметри систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, підтримуючи комфорт у приміщенні та намагаючись мінімізувати енергоспоживання у відповідь на коливання зовнішньої температури.

5) Сценарій ціноутворення на енергію: У цьому випадку застосовується змінне ціноутворення на енергію, включаючи здатність алгоритмів оптимізувати споживання енергії з огляду на її вартість. Алгоритми повинні мінімізувати споживання енергії під час високих цін на енергію, водночас забезпечуючи гнучкість у періоди, коли ціни на енергію низькі. Це відображає більш реалістичну ситуацію, за якої динамічне ціноутворення використовується для стимулювання економії енергії під час пікового попиту [58].

Кожен сценарій передбачає всебічну та ретельну перевірку біоінспірованих алгоритмів для підтвердження їхньої високої ефективності в різноманітних реалістичних умовах. Важливим аспектом практичного впровадження таких рішень є аналіз їхньої поведінки за екстремальних навантажень – наприклад, під час пікової спеки чи різкого похолодання, раптових сплесків відвідуваності або випадкових збоїв обладнання (зокрема, несправностей у контурах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря). Попри те, що в межах цього дослідження зазначені критичні режими не моделюються в окремих сценаріях,

майбутні вишукування мають обов'язково включати спеціалізовані процедури стрес–тестування для детального вивчення надійності розробленої платформи.

Симуляція раптового напливу людей під час масових заходів або повної відмови кліматичної техніки посеред літа дозволила б чіткіше визначити межі гнучкості та адаптивності алгоритмів. Крім того, інтеграція механізмів прогнозного виявлення відмов забезпечила б можливість випереджального коригування енергетичних параметрів для запобігання порушенням теплового чи візуального комфорту. Комплексне поєднання різних поверхів, автономних зон, інженерних систем та сценаріїв експлуатації формує надійне симуляційне середовище для тестування й оптимізації ключових показників будівлі. Завдяки такій масштабній конфігурації дослідження гарантує сувору оцінку алгоритмів у широкому спектрі потенційних умов експлуатації, надаючи глибоке розуміння їхньої практичної цінності для автоматизованого керування сучасними розумними спорудами.

2.6. Висновок до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» описано комплексну методологію дослідження, математичний апарат багатокритеріальної оптимізації та архітектурні принципи побудови віртуального середовища імітаційного моделювання. Подано детальний порівняльний опис теоретичних засад, операційної логіки, пошукових стратегій та агентної поведінки п'яти новітніх біоінспірованих алгоритмів метаевристичної оптимізації, зокрема: оптимізатора «Пума», оптимізатора «Морж» , Алгоритму «Літаюча лисиця», Алгоритму «Рослина водяне колесо» та Оптимізатора «Енергетична долина». Сформульовано математичні моделі цільових функцій, спрямованих на одночасну мінімізацію сумарних витрат електроенергії інженерними системами та максимізацію інтегральних показників теплового й світлового комфорту.

РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІТИЧНИЙ СИНТЕЗ ТА КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ СЕНСОРІВ ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА «РОЗУМНИХ БУДІВЕЛЬ»

У цьому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» представлено результати моделювання та оптимізації щодо ефективності біоінспірованих алгоритмів у досягненні раціонального енергоспоживання за обов'язкового збереження комфорту мешканців. Проаналізовано ключові показники енергозбереження, стабільності мікроклімату та обчислювальної ефективності за різних сценаріїв експлуатації споруди. Крім того, оцінено адаптивну здатність кожного підходу функціонувати в мінливих зовнішніх умовах. Проведено порівняльний аналіз отриманих даних для визначення алгоритмів, які найкраще збалансовують компроміси між мінімізацією витрат ресурсів та підтриманням нормативних параметрів задоволеності користувачів.

3.1. Огляд продуктивності алгоритмів аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

У контексті роботи ефективність біоінспірованих алгоритмів оцінювалася за критеріями зниження енергоспоживання, стабільності температурно-вологісного комфорту та загальної операційної ефективності. Досліджено динамічне регулювання енерговитрат у режимі реального часу із збереженням належної якості внутрішнього середовища (IEQ). Результати кожного алгоритму деталізовано з акцентом на їхній внесок у заощадження ресурсів та оптимізацію комфорту мешканців.

3.1.1. Оптимізатор «Пума»

Алгоритм-оптимізатор «Пума» сформовано на основі розумних та адаптивних стратегій полювання пум, що робить його придатним для

оперативного коригування енергетичних налаштувань будівлі з використанням потоків даних у реальному часі. У таблиці 3.1 наведено підсумок ефективності алгоритму в оптимізації енергоспоживання систем HVAC, освітлення та навантажень від електроприладів з огляду на показники енергоспоживання та стабільності комфорту в пікові та непікові періоди для кожної зони.

Таблиця 3.1 – Показники енергоспоживання та стабільності комфорту в зонах за періодами навантаження з використанням оптимізатора «Пума» [58]

Зона	Споживання енергії (піковий час, кВт·год)	Споживання енергії (поза піком, кВт·год)	Середнє відхилення температури (°C)	Середнє відхилення вологості (%)
1	1200	600	0.5	1.2
2	1300	700	0.6	1.5
3	1150	650	0.4	1.1
4	1250	680	0.5	1.3
5	1180	620	0.6	1.4

Результати показали, що алгоритм-оптимізатор «Пума» забезпечив значну економію енергії, стабілізувавши при цьому температуру та вологість у приміщенні. Він дозволив зменшити споживання енергії у пікові періоди до 1200 кВт·год, а у непікові – до 600 кВт·год у зоні 1. Середнє відхилення температури для цієї зони становило 0,5°C, а відхилення вологості – 1,2%. Це ще раз підтверджує, що комфортні умови можна було добре підтримувати навіть за умов зниженого енергоспоживання. Інші зони також показали подібні результати; наприклад, зона 3 має найнижче споживання енергії – 1150 кВт·год у години пікового навантаження – при середньому відхиленні температури 0,4 °C.

Ці результати демонструють, наскільки ефективно Оптимізатор «Пума» може збалансувати економію енергії та комфорт мешканців. Алгоритмічні зміни в режимі реального часу мінімізували непотрібне споживання енергії в періоди поза піковим навантаженням, не впливаючи негативно на умови мікроклімату в приміщенні. На рисунку 3.1 показано детальні тенденції споживання енергії системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, освітленням та

навантаженнями на розетки, які порівнюються до та після оптимізації для вибраних зон. Наступний графік ілюструє, що оптимізатор «Пума» може безперервно зменшувати споживання енергії, при цьому підтримуючи відхилення температури та вологості в межах прийняттого діапазону.

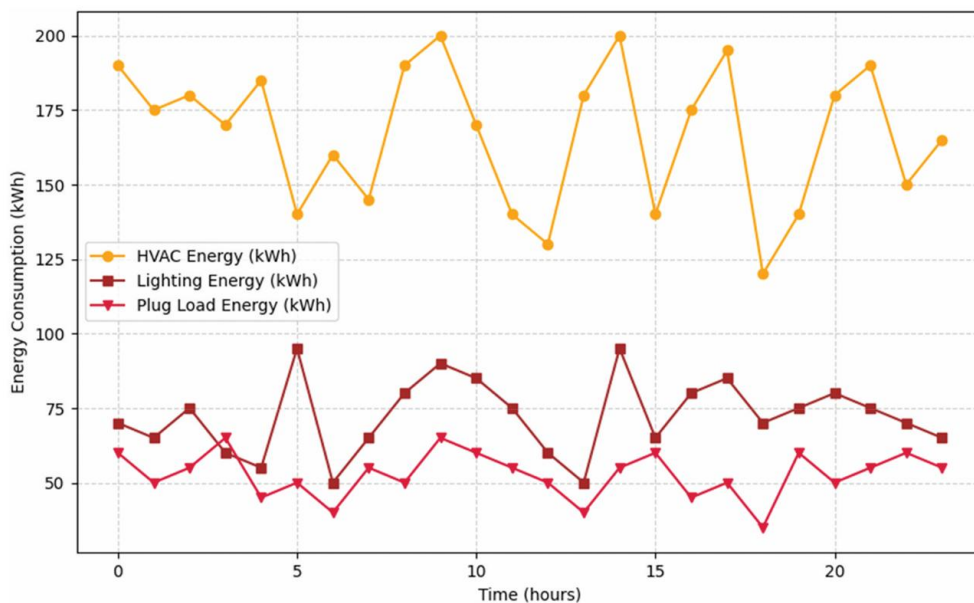


Рисунок 3.1 – Графік енергоспоживання HVAC, освітлення та розеток у часі (до/після оптимізації) із застосуванням Оптимізатор «Пума» [58]

Таким чином, це підвищує ефективність Оптимізатор «Пума» у зниженні енергоспоживання без шкоди для комфорту, що є критично важливим у середовищах інтелектуального управління будівлями, де основна увага приділяється досягненню максимальної енергоефективності. Результати вимірювань температури та вологості також показують, що алгоритм підтримував умови в приміщенні в межах порогів комфорту, що ще раз підтверджує його ефективність у оптимізації в режимі реального часу для застосування в розумних будівлях. Це вказує на те, що такі результати можуть бути корисними під час періодів дуже високого попиту на енергію, оскільки оптимізатор «Пума» забезпечуватиме баланс між ефективністю роботи та задоволеністю мешканців.

3.1.2. Оптимізатор «Морж»

Техніка оптимізатора «Морж» була розроблена для умов з високою мінливістю навколишнього середовища, а принцип роботи оптимізатора «Морж» призначений для адаптації до такої складної екосистеми. У статті [58] оцінюється ефективність оптимізатора «Морж» за умов динамічної зайнятості приміщень та коливань погодних умов з метою досягнення оптимізованого енергоспоживання при збереженні задовільного рівня комфорту для мешканців. Отримані результати свідчатимуть про надійність оптимізатора «Морж» у роботі в умовах мінливих умов, особливо під час пікових навантажень на енергосистему.

У таблиці 3.2 наведено показники енергоспоживання та комфорту для п'яти зон із використанням алгоритму-оптимізатора «Морж». З точки зору енергоспоживання алгоритм забезпечив значне зниження споживання як у пікові, так і в непікові періоди: у зоні 1 пікове енергоспоживання становило 1150 кВт·год, а непікове – 580 кВт·год, тоді як показники комфорту мали середнє відхилення температури 0,4°C та відхилення вологості 1,0%.

Таблиця 3.2 – Енергоспоживання та параметри комфорту за сценаріїв динамічної заселеності (Оптимізатор «Морж») [58]

Зона	Споживання енергії (пікове, кВт·год)	Споживання енергії (поза піком, кВт·год)	Сер. відхилення температури (°C)	Сер. відхилення вологості (%)
1	1150	580	0,4	1,0
2	1250	690	0,5	1,3
3	1100	550	0,4	1,1
4	1200	610	0,6	1,2
5	1130	600	0,5	1,3

Ці показники свідчать про те, що оптимізатор «Морж» успішно підтримував умови мікроклімату в приміщенні в межах порогів комфорту, одночасно оптимізуючи енергоспоживання.

У різних зонах спостерігалася незначна різниця в середньому відхиленні температури, в межах від 0,4°C до 0,6 °C, що вказує на те, що оптимізатор «Морж» забезпечив ефективний тепловий комфорт за умов змінної заповненості приміщень. Аналогічно, відхилення вологості утримуються в вузькому діапазоні від 1,0% до 1,3%, що ще раз підтверджує здатність оптимізатора «Морж» балансувати комфорт та енергоефективність за мінливих умов. Мінімальне споживання енергії було досягнуто в зоні 3, яке становило 1100 кВт·год у пікові періоди. Температура та вологість зазнавали найменших коливань; отже, було підтверджено, що оптимізатор «Морж» здатний оптимізувати використання ресурсів без необхідності поступатися комфортом мешканців.

Загальну ефективність оптимізатора «Морж» можна підсумувати за допомогою рисунка 3.2, який представляє гістограму порівняння енергоспоживання в різних зонах під час пікових періодів. Гістограма однозначно демонструє здатність оптимізатора «Морж» досягати значної економії енергії у всіх зонах, причому найбільша економія була досягнута в зонах 3 та 5. Графік знову показує, наскільки стабільним є зниження енергоспоживання в усій будівлі, що підкреслює надійність оптимізатора «Морж» в адаптації до динамічних умов.

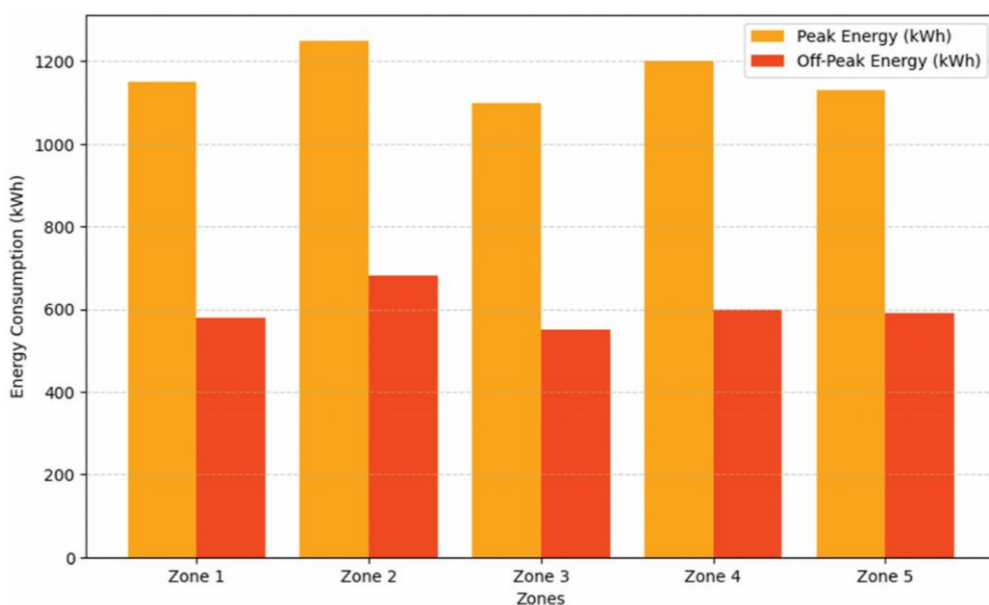


Рисунок 3.2 – Використання оптимізатора «Морж» для порівняння енергоспоживання під час періодів пікового енергоспоживання [58]

Ці результати, у свою чергу, показують, наскільки ефективним може бути оптимізатор «Морж» для середовищ, де споживання енергії та рівень комфорту змінюються залежно від зовнішніх факторів, таких як схеми заселення та коливання погоди. Динамічне коригування енергетичних налаштувань оптимізатора «Морж» на основі поточних умов може забезпечувати постійну економію енергії, утримуючи відхилення від комфорту в межах допустимих меж. Адаптивність та надійність алгоритму в таких сценаріях роблять його кращим інструментом у системах розумних будівель, де умови часто змінюються.

3.1.3. Алгоритм оптимізації «літаюча лисиця»

Алгоритм оптимізації «літаюча лисиця» було розроблено для моделювання кооперативної поведінки та моделей польоту літаючих лисиць, використовуючи колективний інтелект для ефективного дослідження та використання їхнього середовища. У цьому контексті пошук оптимальних рішень є компромісом між економією енергії та комфортом мешканців, де алгоритм-оптимізатор «Літаюча лисиця» застосовує свою стратегію колективного пошуку. Ці результати моделювання доводять здатність оптимізатора «Літаюча лисиця» ефективно сканувати простір рішень та отримувати широкий набір парето-оптимальних рішень, що гарантують різні рівні економії енергії та комфорту з високою ефективністю.

У таблиці 3.3 наведено компроміси між енергозбереженням та комфортом, отримані для п'яти зон за допомогою оптимізатора «Літаюча лисиця». Також включено розкид фронту Парето, щоб підкреслити здатність алгоритму знаходити різноманітні рішення, надаючи при цьому можливість особі, яка приймає рішення, обирати з-поміж декількох варіантів компромісів. Результати показують, що алгоритм показав виняткову ефективність у пошуку належного балансу між споживанням енергії та комфортом. Наприклад, зона 1 забезпечила 15% економії енергії при середньому відхиленні температури $0,5^{\circ}\text{C}$ та високому розкиді фронту Парето, що означає, що алгоритм знайшов різні рішення, які

підтримують комфорт, одночасно зменшуючи споживання енергії. Аналогічно, зона 4 також зафіксувала найвищу економію енергії на рівні 22% при помірному відхиленні комфорту $0,5^{\circ}\text{C}$, що вказує на те, що оптимізатор «Літаюча лисиця» зміг розширити межі економії енергії, не надто погіршуючи комфорт мешканців.

Таблиця 3.3 – Енергозбереження (%) та компроміси щодо комфорту по всьому фронту Парето для різних зон з використанням оптимізатора «Літаюча лисиця» [58]

Зона	Енергозбереження (%)	Сер. відхилення температури ($^{\circ}\text{C}$)	Розподіл фронту Парето (різноманітність)
1	15	0,5	Високий
2	20	0,6	Середній
3	18	0,4	Високий
4	22	0,5	Середній
5	17	0,5	Низький

На рисунку 3.3 показано, що в зонах 1 і 3 оптимізатор «Літаюча лисиця» може знаходити дуже різноманітні рішення. Це відповідно означає, що алгоритм дослідив різні можливі конфігурації, пропонуючи різні компроміси між енергоефективністю та комфортом.

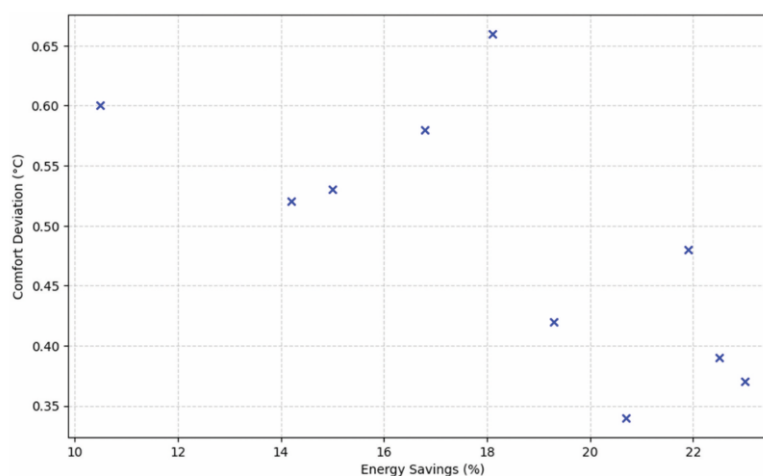


Рисунок 3.3 – Фронт Парето: компроміс між енергоспоживанням та рівнем комфорту (алгоритм-оптимізатор «Літаюча лисиця») [58]

Розкид у зонах 2 і 4 є середнім; алгоритм зосередився на рішеннях, ближчих до оптимального балансу. У зоні 5 різноманітність нижча, що відображає вузький діапазон варіантів компромісів. Ці результати підтверджують здатність оптимізатора «Літаюча лисиця» генерувати спектр альтернатив, що дає можливість менеджерам будівель обирати найбільш відповідну конфігурацію на основі конкретних пріоритетів енергозбереження або комфорту.

На рис. 4 додатково проілюстровано компроміс між енергоспоживанням та комфортом шляхом відображення фронту Парето для вибраних зон. Кожна точка на графіку представляє рішення, знайдене алгоритмом «Оптимізатор Літаюча лисиця». Вісь X відображає економію енергії, а вісь Y – відхилення від комфорту. Фронт Парето утворює набір оптимальних рішень, у яких поліпшення однієї цільової функції (наприклад, максимізації економії енергії) неминуче призводить до погіршення іншої (наприклад, збільшення відхилення від комфорту). Наведений графік ілюструє гнучкість алгоритму у формуванні різноманітних альтернатив: частина точок репрезентує конфігурації з високим рівнем енергозбереження за умови дещо більшого відхилення від мікрокліматичного оптимуму, тоді як інші точки забезпечують мінімальне відхилення від комфорту за меншої економії ресурсів.

3.1.4. Алгоритм «Рослина водяне колесо»

Ідея алгоритму «Рослина водяне колесо» сформована на основі стратегій оптимізації ресурсів у природному середовищі та принципу дії водяних коліс, які перерозподіляють потоки відповідно до зміни зовнішніх умов. У сфері управління розумними будівлями цей алгоритм оптимізує споживання енергії шляхом динамічного регулювання інженерних налаштувань у різних зонах, оперативно реагуючи на коливання параметрів навколишнього середовища, зокрема на погоду. Було досліджено ефективність функціонування алгоритму в системі енергоменеджменту за умов сонячної та хмарної погоди, а також оцінено

його здатність надійно забезпечувати комфорт мешканців при одночасному зведенні до мінімуму витрат потужності.

У таблиці 3.4 наведено показники енергоспоживання та комфорту при використанні алгоритму «Рослина водяне колесо» у п'яти зонах за сонячної та хмарної погоди. Результати показують, що у всіх п'яти зонах алгоритм «Рослина водяне колесо» забезпечив зменшення енергоспоживання при переході від сонячної до хмарної погоди.

Таблиця 3.4 – Показники енергоспоживання та комфорту в різних зонах з використанням Алгоритму «Рослина водяне колесо» за різних погодних умов [58]

Зона	Споживання (сонячно, кВт·год)	Споживання (похмуро, кВт·год)	Сер. відхилення температури (°C)	Сер. відхилення вологості (%)
1	1250	1150	0,4	1,1
2	1300	1200	0,5	1,3
3	1220	1100	0,5	1,2
4	1280	1170	0,6	1,4
5	1240	1130	0,4	1,3

Наприклад, у зоні 1 споживання енергії становило 1250 кВт·год за сонячної погоди, а за похмурої знизилося до 1150 кВт·год при відхиленні температури на 0,4°C та вологості на 1,1%. Аналогічна динаміка зафіксована й у зоні 2, де споживання зменшилося з 1300 до 1200 кВт·год при відхиленні температури на 0,5°C та вологості на 1,3%. Ці результати наочно демонструють здатність алгоритму «Рослина водяне колесо» ефективно реагувати на зміну зовнішніх метеорологічних умов із мінімальним погіршенням мікрокліматичного комфорту для мешканців.

Це особливо вражає у випадку з зоною 3 та зоною 5, де було зафіксовано зниження енергоспоживання приблизно на 10% за мінливих умов сонячної та похмурої погоди. Водночас відхилення температури та вологості стабільно залишалися в межах допустимих нормативних значень. Зокрема, у зоні 3

споживання енергії зменшилося з 1220 кВт·год до 1100 кВт·год при утриманні відхилення температури на рівні $0,5^{\circ}\text{C}$ та відхилення вологості на 1,2 [58].

Це означає, що алгоритм «Рослина водяне колесо» ефективно функціонує в зонах, де енергетичні потреби є найбільш чутливими до зовнішніх метеорологічних чинників, оскільки система динамічно оптимізує роботу контурів опалення, вентиляції, кондиціонування повітря та штучного освітлення з урахуванням змінних параметрів навколишнього середовища.

На рисунку 3.4 показано загальний вплив погоди на споживання енергії: його теплова карта відображає коливання енергоспоживання у всіх зонах за сонячної та хмарної погоди.

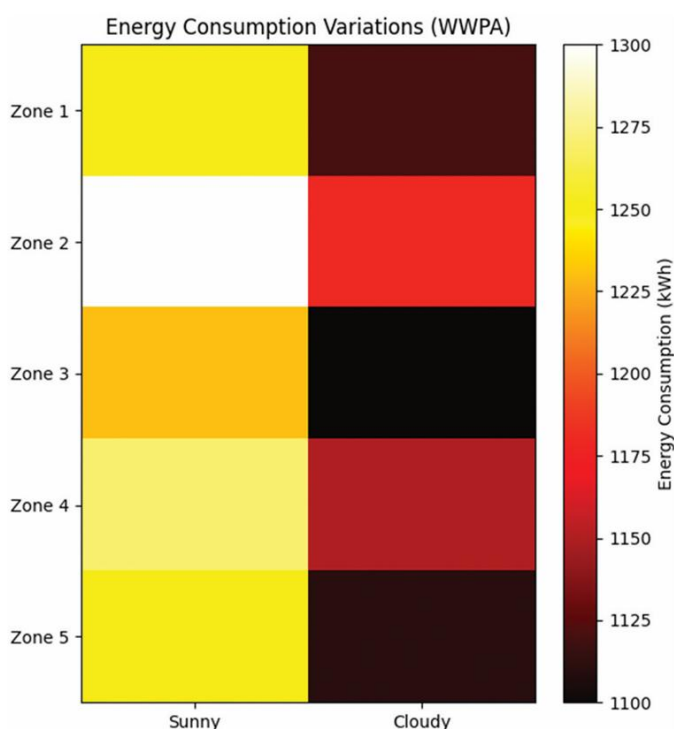


Рисунок 3.4 – Теплова карта, що ілюструє коливання енергоспоживання в різних зонах під час сонячної та хмарної погоди з використанням алгоритму «Рослина водяне колесо» [58]

У цьому випадку спостерігається зниження енергоспоживання у всіх зонах за похмурої погоди, що вказує на здатність алгоритму «Рослина водяне колесо» динамічно оптимізувати інженерні системи будівлі для економії ресурсів. Це

наочно відображає ефективність алгоритму у збалансуванні енергоефективності та комфорту завдяки безперервному контролю температури й вологості, навіть за умов суттєвого зниження споживання потужності.

3.1.5. Оптимізатор «Енергетична долина»

Оптимізатор «Енергетична долина» – це фізично обґрунтований алгоритм, який моделює робочі режими будівлі як рух частинок у полі потенційної енергії, де точка глобального мінімуму відповідає найменшому споживанню ресурсів за умови збереження заданого мікроклімату. Оскільки системи HVAC є найбільш енергоємними вузлами в розумних будівлях, цей алгоритм був розроблений насамперед для їхньої оптимізації. Його функціонал спрямований на забезпечення суттєвого енергозбереження через коригування налаштувань обладнання у відповідь на коливання зовнішньої температури, що дозволяє утримувати комфортні умови в приміщеннях у межах нормативних вимог.

У таблиці 3.5 наведено показники енергоспоживання та продуктивності системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря п'яти зон, що використовують оптимізатор «Енергетична долина», за різних сезонних умов, таких як зима та літо.

Таблиця 3.5 – Енергоспоживання та продуктивність системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (відхилення температури) при використанні оптимізатора «Енергетична долина» за різних зовнішніх умов [58]

Зона	Енергоспоживання (зима, кВт·год)	Енергоспоживання (літо, кВт·год)	Відхилення темп. зима (°C)	Відхилення темп. літо (°C)
1	1100	1400	0,3	0,7
2	1150	1450	0,4	0,6
3	1050	1350	0,3	0,5
4	1200	1500	0,4	0,7
5	1120	1420	0,3	0,6

Результати продемонстрували здатність оптимізатора «Енергетична долина» ефективно адаптувати продуктивність системи HVAC відповідно до коливань зовнішньої температури, забезпечуючи чіткий баланс між енергозбереженням та тепловим комфортом. Наприклад, у зоні 1 завдяки роботі алгоритму енергоспоживання в зимовий період було зменшено до 1100 кВт·год, тоді як середнє відхилення температури вдалося утримати на рівні всього $0,3^{\circ}\text{C}$ для забезпечення стабільного мікроклімату в приміщенні. Натомість у літній сезон споживання енергії прогнозовано зросло до 1400 кВт·год через різке збільшення потреби в охолодженні, що супроводжувалося відповідним відхиленням температури на $0,7^{\circ}\text{C}$. Така тенденція спостерігалася в усіх зонах об'єкта через значне підвищення холодильного навантаження влітку, проте всі температурні девіації залишалися в межах допустимого нормативного діапазону.

Мінімальне споживання енергії в зоні 3 взимку, як показано на рисунку 5, становило 1050 кВт·год за відхилення температури всього $0,3^{\circ}\text{C}$. Улітку воно зросло до 1350 кВт·год, проте температурне відхилення утрималося на рівні $0,5^{\circ}\text{C}$, що підтверджує ефективність оптимізатора «Енергетична долина» при сезонному налаштуванні систем HVAC. Аналогічно, у зоні 5 споживання становило 1120 кВт·год взимку та 1420 кВт·год влітку при низьких девіаціях температури – $0,3^{\circ}\text{C}$ та $0,6^{\circ}\text{C}$ відповідно. Ці результати доводять здатність алгоритму ефективно керувати кліматичним обладнанням і забезпечувати тепловий комфорт під час пікових сезонних навантажень [58].

Ці тенденції енергоспоживання за сезонами додатково підтверджуються на рисунку 3.5, який показує лінійний графік порівняння енергоспоживання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у п'яти зонах взимку та влітку.

Наведений графік ілюструє зростання енергоспоживання в літній період, зумовлене підвищеним попитом на охолодження приміщень. Цей рисунок містить текстові примітки, які позначають точки пікової продуктивності, де алгоритм досяг найкращого балансу між енергоефективністю та тепловим комфортом.

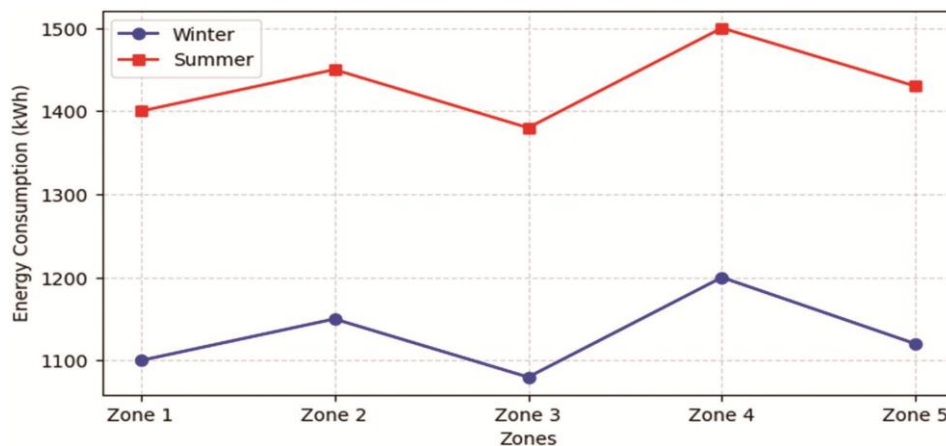


Рисунок 3.5 – Порівняння сезонного енергоспоживання систем HVAC (зима/літо) з використанням оптимізатора «Енергетична долина» та позначенням точок пікової продуктивності [58]

Звідси зрозуміло, що оптимізатор «Енергетична долина» є особливо ефективним для оптимізації систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря в регіонах із вираженими кліматичними змінами, де сезонні коливання температури значно впливають на загальне енергоспоживання будівлі.

3.2. Порівняльний аналіз алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Для аналізу ефективності порівнюються оптимізатори «Пума», «Морж», «Літаюча лисиця», «Рослина водяне колесо» та «Енергетична долина». Кожен алгоритм оцінювався за трьома критеріями: сумарне енергозбереження, стабільність комфорту (мінімізація девіацій температури й вологості) та швидкість збіжності за кількістю ітерацій до знаходження оптимуму. Застосування такої багатофакторної системи метрик дозволяє отримати цілісне уявлення про здатність кожного алгоритму адаптуватися до динамічних умов середовища та знаходити найкращий компроміс між зниженням витрат енергоносіїв і задоволеністю мешканців будівлі.

Підсумовуючи, загальні результати в таблиці 3.6 показують, що найкраща загальна економія енергії була у оптимізатора «Літаюча лисиця», на рівні 22%.

Це відбулося за рахунок середнього відхилення температури на $0,6^{\circ}\text{C}$ та збільшених обчислювальних витрат із 750 ітераціями для досягнення збіжності.

Таблиця 3.6 – Порівняльна ефективність біоінспірованих алгоритмів з точки зору загальної економії енергії (%) та середніх відхилень комфорту у всіх зонах [58]

Алгоритм	Економія енергії (%)	Відхилення темп. ($^{\circ}\text{C}$)	Відхилення волог. (%)	Швидкість збіжності (іт.)
Оптимізатор «Пума»	18	0,5	1,2	700
Оптимізатор «Морж»	20	0,4	1,1	650
Оптимізатор «Літаюча лисиця»	22	0,6	1,3	750
Алгоритм «Рослина водяне колесо»	19	0,5	1,2	700
Оптимізатор «Енергетична долина»	21	0,4	1,1	600

Різниця в продуктивності алгоритмів зумовлена їхніми внутрішніми механізмами пошуку та специфікою реагування на мінливі умови. Наприклад, оптимізатор «Енергетична долина» стабільно демонстрував низьке відхилення температури ($0,4^{\circ}\text{C}$) при високій економії енергії на рівні 21% завдяки здатності динамічно коригувати параметри HVAC відповідно до змін середовища. На іншому кінці спектру перебуває алгоритм «Літаюча лисиця», який забезпечує максимальне енергозбереження, проте потребує вичерпного балансування між стратегіями дослідження (exploration) та використання (exploitation) простору рішень, що суттєво збільшує обчислювальні витрати. Хоча такий підхід дещо

шкодить стабільності теплового комфорту, висока ефективність алгоритму «Літаюча лисиця» у заощадженні ресурсів робить його вкрай корисним у випадках, де мінімізація витрат є головним пріоритетом над суворими мікрокліматичними вимогами.

Оптимізатори «Морж» та «Пума» показали схожі результати, але «Морж» виявився стійкішим до екстремальної мінливості чинників, що підтверджує його здатність адаптуватися до непередбачуваних змін у реальному часі. Отримані дані свідчать про те, що універсального рішення не існує: вибір конкретного підходу має враховувати архітектуру будівлі, кліматичну зону та поточні експлуатаційні пріоритети. Майбутні дослідження доцільно спрямувати на глибший аналіз поведінки збіжності, оцінку математичної складності та перевірку ефективності алгоритмів у різних типах споруд, що дозволить сформулювати чіткі інженерні рекомендації для обґрунтованого вибору оптимізаційних рішень у реальних сценаріях.

Навпаки, оптимізатор «Енергетична долина» продемонстрував чудовий баланс між енергозбереженням та стабільністю комфорту. Він виявив високу ефективність із загальною економією енергії на рівні 21%, середнім відхиленням температури лише 0,4°C та найвищою швидкістю збіжності, яка склала 600 ітерацій. Здатність цього алгоритму адаптуватися до постійно мінливих чинників навколишнього середовища без суттєвого погіршення умов проживання робить його сильним кандидатом для сценаріїв, де енергоефективність і комфорт є однаково пріоритетними. Оптимізатор «Енергетична долина» також забезпечив найнижче відхилення вологості – 1,1%, що додатково підкреслює його надійність у підтриманні нормативної якості внутрішнього мікроклімату.

Алгоритм «Оптимізатор Морж» показав дуже близькі результати, забезпечивши сумарну економію енергії на рівні 20%. Водночас показники стабільності комфорту були ідентичними до попереднього алгоритму: середнє відхилення температури становило 0,4°C, а відхилення вологості – 1,1%. «Оптимізатор Морж» досяг збіжності за 650 ітерацій, що дещо повільніше порівняно з оптимізатором «Енергетична долина», але залишається

висококонкурентним результатом. Це позиціонує його як надійне рішення для умов, що вимагають підвищеної стійкості до динамічних факторів, таких як різкі коливання рівня заселеності приміщень та швидка зміна зовнішніх погодних умов.

Енергозбереження для оптимізатора «Пума» та алгоритму «Рослина водяне колесо» становило 18% та 19% відповідно, що є помірно високим показником, при цьому обидва підходи продемонстрували однакові значення середнього відхилення температури на рівні $0,5^{\circ}\text{C}$ та відхилення вологості на рівні 1,2%. Хоча їхня здатність до економії енергії є дещо нижчою порівняно з алгоритмами «Літаюча лисиця», «Енергетична долина» та «Морж», оптимізатор «Пума» та алгоритм «Рослина водяне колесо» все ж забезпечили відносно стабільні результати, зберігаючи прийнятну швидкість збіжності на рівні 700 ітерацій. Такі інструменти з помірною динамікою пошуку рішень можуть бути ефективно застосовані в будівлях, де пріоритетом є стабільний рівень комфорту за умови досягнення базових показників оптимізації енерговитрат.

На рисунку 3.6 представлено більш детальний порівняльний аналіз у вигляді стовпчастої діаграми, що відображає економію енергії за кожним алгоритмом стосовно систем опалення, вентиляції та кондиціонування, освітлення та навантажень від електроприладів.

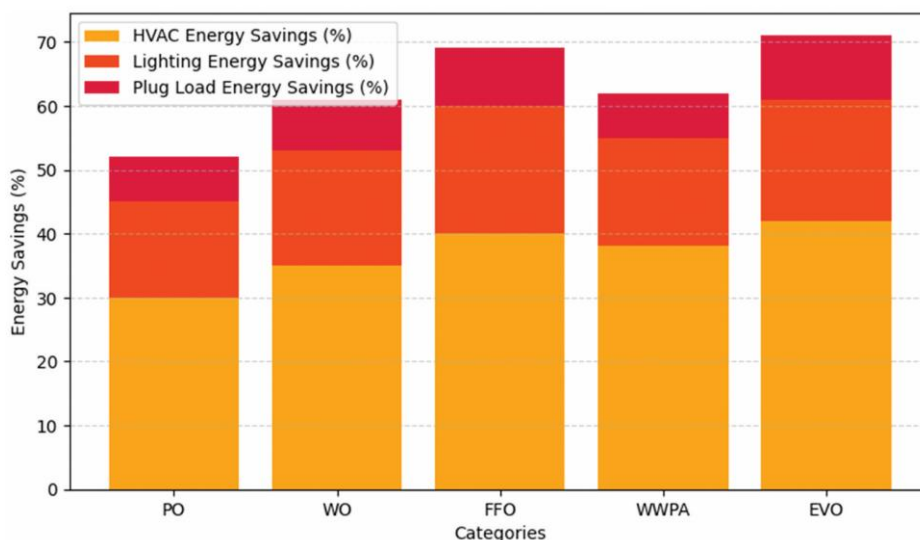


Рисунок 3.6 – Розподіл економії енергії за категоріями споживання для досліджуваних алгоритмів [58]

З наведеної діаграми видно, що існує чітка відмінність у пріоритетах між алгоритмами щодо оптимізації різних інженерних систем будівлі. Зокрема, у структурі ефективності оптимізатора «Літаюча лисиця» найбільша частка припадає саме на економію енергії в системах HVAC. Натомість для оптимізатора «Пума» та алгоритму «Рослина водяне колесо» характерний збалансований розподіл: отримане енергозбереження практично рівномірно розподілене між кліматичним обладнанням (HVAC) та системами штучного освітлення.

3.3. Аналіз чутливості та надійності алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Аналіз чутливості та надійності дозволяє оцінити, як біоінспіровані алгоритми реагують на зміни заповнюваності приміщень, погодних умов та тарифів на енергоносії. Це критично важливо для розуміння їхніх адаптаційних властивостей у реальних умовах розумних будівель, де випадкові збурення суттєво впливають на енергоспоживання та комфорт мешканців.

Крім того, оцінюється стійкість (робастність) кожного підходу – тобто здатність зберігати оптимізаційні властивості за різних експлуатаційних режимів. У таблиці 3.7 підсумовано результати цього аналізу, що відображають реакцію алгоритмів на варіативність антропогенного навантаження й зовнішньої температури, а також наведено інтегральні показники, які кількісно описують стабільність їхньої продуктивності.

Результати показують, що оптимізатор «Енергетична долина» мав найнижчу чутливість до змін у заповнюваності приміщень та коливань температури. Наприклад, показник чутливості до антропогенного навантаження становив 9%, а до температурних коливань – 12%. Це вказує на високу стабільність алгоритму та підтверджує, що оптимізатор «Енергетична долина» є оптимальним рішенням для об'єктів із динамічними зовнішніми та внутрішніми умовами, оскільки його продуктивність залишається стійкою, забезпечуючи високий рівень енергозбереження незалежно від різких збурень середовища.

Таблиця 3.7 – Результати аналізу чутливості для кожного алгоритму за різних рівнів заповнюваності та умов зовнішньої температури [58]

Алгоритм	Чутливість до заповнюваності (економія,%)	Чутливість до температури (економія,%)	Надійність (відхилення продуктивності)
Оптимізатор «Пума»	15	18	Низька
Оптимізатор «Морж»	12	16	Висока
Оптимізатор «Літаюча лисиця»	10	14	Середня
Алгоритм «Рослина водяне колесо»	13	17	Середня
Оптимізатор «Енергетична долина»	9	12	Висока

Оптимізатор «Енергетична долина» визнано високонадійним завдяки стабільному досягненню цільових показників енергозбереження та комфорту за будь-яких умов експлуатації. Оптимізатор «Морж» також продемонстрував високу надійність і помірну залежність від зовнішніх чинників: його чутливість до зміни заповнюваності приміщень становила 12%, а до коливань температури – 16%. Це підтверджує здатність алгоритму ефективно адаптуватися до динамічного антропогенного навантаження та мінливих погодних умов.

Натомість алгоритм «Літаюча лисиця» виявився найменш стійким серед порівнюваних методів. Його середня чутливість до заповнюваності склала 10%, а до температури – 14%. Показники ефективності цього алгоритму суттєво коливалися при зміні операційного контексту, через що він отримав помірний

рейтинг стійкості. Як наслідок, цей підхід рекомендується для впровадження у відносно стабільних, а не високодинамічних інженерних середовищах.

Оптимізатор «Пума» та алгоритм «Рослина водяне колесо» продемонстрували помірну чутливість до зовнішніх коливань: чутливість до заповнюваності для них становила 15% та 13%, а до температури – 18% та 17% відповідно. Через ризик помітних коливань ефективності в динамічних умовах обидва методи класифіковано як рішення з надійністю від низької до середньої. Їхнє впровадження є доцільним на об'єктах зі стабільними профілями температури та зайнятості, де відсутні різкі зовнішні або внутрішні збурення.

На рисунку 3.7 ці результати зображено графічно за допомогою павутинної діаграми для порівняння надійності алгоритмів щодо деяких ключових показників ефективності – енергозбереження, стабільність комфорту та реагування на зміни погоди – на одній діаграмі.

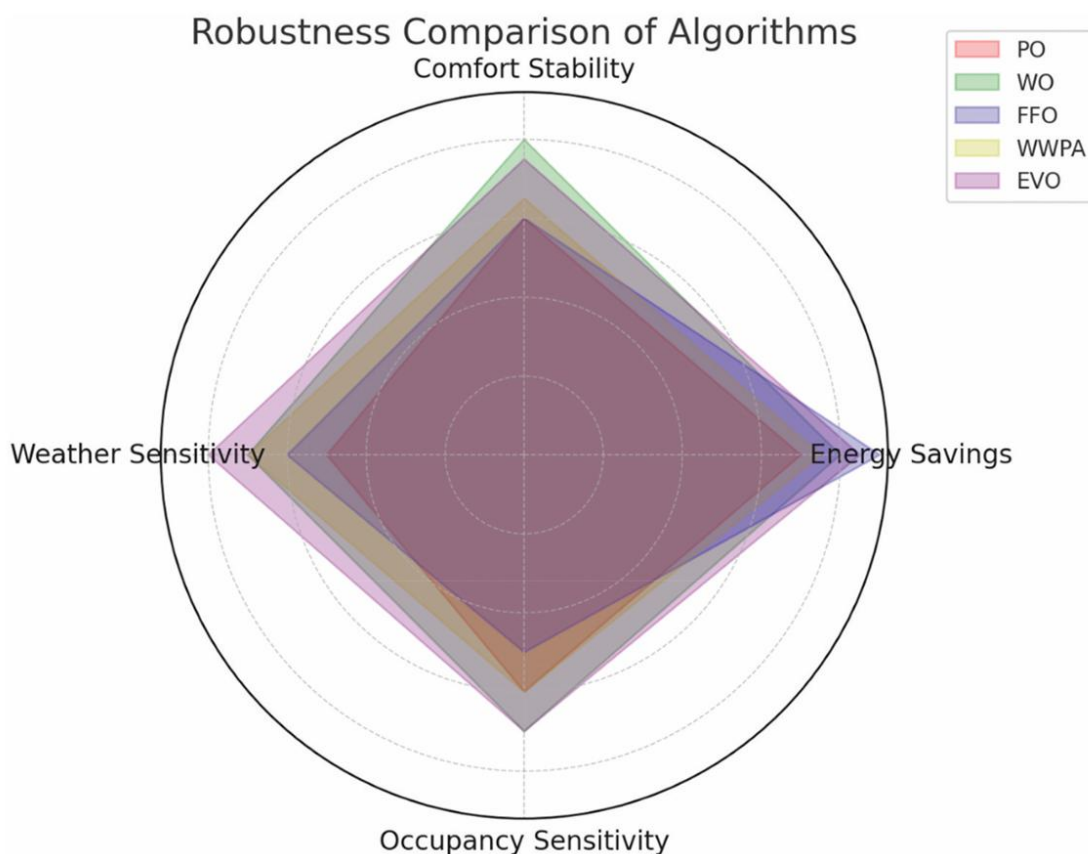


Рисунок 3.7 – Павукова діаграма, що порівнює надійність алгоритмів за ключовими показниками ефективності [58]

Павукова діаграма наочно підтверджує, що оптимізатори «Енергетична долина» та «Морж» є найнадійнішими архітектурними рішеннями; алгоритм «Літаюча лисиця» демонструє помірну робастність, тоді як оптимізатор «Пума» та алгоритм «Рослина водяне колесо» виявляють вищу мінливість і залежність від зовнішніх експлуатаційних факторів.

3.4. Багатовимірна візуалізація компромісів між енергоефективністю та комфортом

Багатовимірні візуалізації висвітлюють складні взаємозв'язки між ключовими змінними оптимізації: енергозбереженням, комфортом мешканців та надійністю алгоритмів. Такий підхід дає інтуїтивне уявлення про компроміси, що виникають під час налаштування інженерних систем, і дозволяє глибоко оцінити ефективність кожного підходу в різних вимірах.

Взаємозв'язок між енергоефективністю, девіаціями від мікрокліматичного оптимуму та чутливістю до зовнішніх чинників відображено за допомогою тривимірних точкових та поверхневих діаграм. Перша візуалізація поєднує ці графічні елементи для формування цілісного уявлення про багатокритеріальний простір рішень. У цьому контексті під надійністю розуміють здатність алгоритму стабільно забезпечувати високу ефективність функціонування при зміні операційного контексту – як під впливом динамічного антропогенного навантаження, так і за умов непередбачуваних коливань зовнішніх метеорологічних параметрів.

На рисунку 3.8 зображений 3D-графік розсіювання, що відображає дискретний простір рішень для кожного біоінспірованого алгоритму: економія енергії на осі X, відхилення комфорту в °C на осі Y та надійність на осі Z.

Кожна дискретна точка зображує одне можливе рішення; чим вища на осі Z, тим він надійніший. Розкид точок відображає різноманітність рішень, отриманих кожним алгоритмом, виділяючи ті, що забезпечують значну економію енергії з незначними відхиленнями в комфорті.

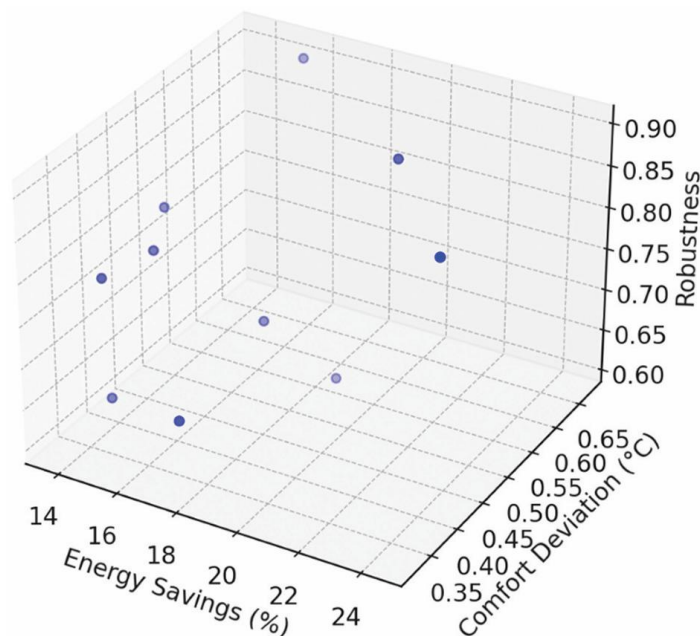


Рисунок 3.8 – Тривимірний розкидний графік, що показує енергозбереження, відхилення від комфорту та надійність [58]

Останнє доповнюється 3D-графіком поверхні, зображеним на рисунку 3.9, який надає більш суцільний огляд взаємозалежностей між змінними. Поверхня, представлена на графіку, описує простір можливих компромісів, який досліджують алгоритми.

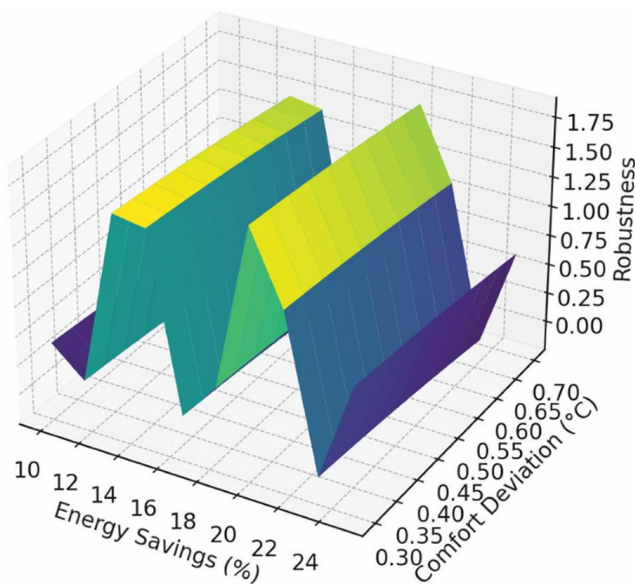


Рисунок 3.9 – 3D-графік поверхні, що ілюструє співвідношення енергозбереження, відхилення від комфорту та надійності [58]

Загалом, області з високою економією енергії та низьким відхиленням від комфорту мають вищі значення надійності, про що свідчать характерні піки на побудованій поверхні. Таким чином, ця тривимірна поверхня дає чітке розуміння того, як навіть незначні зміни параметрів енергоспоживання або мікроклімату можуть вплинути на загальну стабільність і робастність процесу оптимізації.

Поряд із надійністю чутливість до погоди є іншим важливим виміром, що визначає ефективність алгоритмів розумних будівель, особливо в управлінні системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Тому в цьому розділі наведено 3D-графік поверхні, як показано на рисунку 3.10, що відображає взаємодію між енергоспоживанням, відхиленням від комфорту та чутливістю до погоди.

Чутливість до погоди характеризує, як алгоритм реагуватиме на зміну рівня зовнішньої температури, що є важливим фактором для оптимальної енергоефективності та комфорту за динамічних погодних умов. Це здійснюється шляхом відображення енергоспоживання в кВт·год на осі X, відхилення від комфорту на осі Y та чутливості до погоди на осі Z. Рівні ділянки поверхневого графіка представляють рішення, коли алгоритми підтримують стабільний рівень комфорту з мінімальним енергоспоживанням при зміні зовнішніх погодних умов.

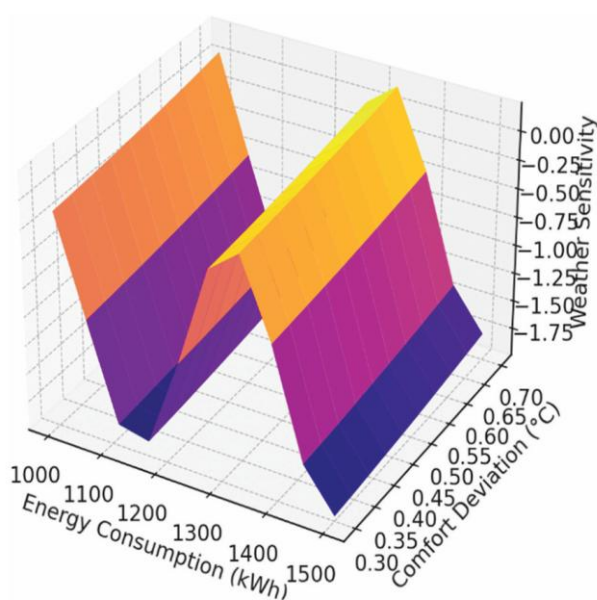


Рисунок 3.10 – 3D-графік, що показує енергоспоживання, відхилення від комфорту та чутливість до погоди [58]

Натомість більш круті ділянки поверхні вказують на високу чутливість певних алгоритмів до метеорологічних коливань: у таких зонах навіть незначні зміни зовнішніх умов можуть призвести до стрімкого зростання енергоспоживання або істотного зниження рівня комфорту. Ця тривимірна візуалізація чітко доводить, що для реального застосування в системах «розумних» будівель найціннішими є алгоритми, здатні не просто знаходити баланс між енергоефективністю та комфортом, а й забезпечувати високу стійкість до динамічних чинників навколишнього середовища..

3.5. Порівняльний аналіз ефективності оптимізаторів алгоритмів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

У роботі [58] представлено ефективність п'яти біоінспірованих алгоритмів – оптимізатор «Пума», оптимізатор «Морж», алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця», «Рослина водяне колесо» та оптимізатор «Енергетична долина» – в оптимізації енергоспоживання при збереженні комфорту мешканців у середовищах розумних будівель. Хоча ця робота значною мірою ґрунтується на моделюванні на основі набору даних CU-BEMS, практичне впровадження все ж є необхідним кроком для перевірки достовірності результатів. Набір даних CU-BEMS було використано завдяки його високій точності та моніторингу навколишнього середовища в режимі реального часу, що наближається до реальних умов експлуатації будівлі [61]. Проте ми визнаємо, що мінливість реальних умов, таких як людська діяльність, незаплановані поломки обладнання та мінливість зовнішніх погодних умов, може вплинути на ефективність запропонованих алгоритмів оптимізації. Експерименти в реальних «розумних» будівлях шляхом впровадження запропонованих біоінспірованих алгоритмів у функціональні системи управління енергоспоживанням будуть включені до майбутніх робіт. Співпраця з менеджерами об'єктів та інженерами будівель надасть додаткове розуміння обмежень та практичної здійсненності в польових

умовах. Ці алгоритми були протестовані за різних умов експлуатації, таких як коливання енергетичного попиту під час пікових періодів, зміна рівня заповнюваності приміщень та мінливі зовнішні погодні умови. У дослідженні всебічно розглядається, як кожен алгоритм адаптується для оптимізації енергоспоживання будівлі без погіршення якості мікроклімату в приміщеннях за допомогою моделювання. Використовується система багатокритеріальної оцінки, що включає енергозбереження, стабільність комфорту та операційну ефективність, щоб надати глибоке розуміння ефективності цих алгоритмів в енергоменеджменті розумних будівель [51], [45].

Ефективність оптимізації енергоспоживання в режимі реального часу була досягнута за допомогою Оптимізатор «Пума», сформованого на основі адаптивної стратегії полювання пум. Таким чином, було зафіксовано значну економію енергії при стабільних умовах у приміщенні. Оптимізатору «Пума» вдалося зменшити пікове споживання енергії до 1200 кВт·год у зоні 1 при відхиленні температури $0,5^{\circ}\text{C}$ та до 1150 кВт·год у зоні 3 при середньому відхиленні температури $0,4^{\circ}\text{C}$. Ці результати доводять, що оптимізатор «Пума» підходить для застосування в інтелектуальних будівлях, де критично важливо досягти балансу між енергоефективністю та комфортом мешканців [46].

Оптимізатор «Морж» продемонстрував високу ефективність у роботі в умовах коливань завантаженості приміщень та погодних умов. Оптимізатор «Морж» зміг досягти значного зниження енергоспоживання у всіх зонах, зокрема у Зоні 1, де пікове енергоспоживання становило 1150 кВт·год при середньому відхиленні температури $0,4^{\circ}\text{C}$. З огляду на стабільні результати як в управлінні енергоспоживанням, так і в забезпеченні комфорту в динамічних умовах «розумних будівель», оптимізатор «Морж» може виявитися надзвичайно надійним у середовищах, що характеризуються високою мінливістю внутрішніх та зовнішніх факторів [52].

Серед усіх алгоритмів найкращий загальний рівень енергозбереження (22%) забезпечив алгоритм оптимізації «Літаюча лисиця». Оскільки оптимізатор «Літаюча лисиця» дозволяє досліджувати більше рішень у широкому діапазоні,

він може забезпечити численні парето-оптимальні компроміси між енергоефективністю та комфортом. Наприклад, у зоні 1 було досягнуто 15% економії енергії при відхиленні температури лише на $0,5^{\circ}\text{C}$, тоді як у зоні 4, де було досягнуто максимальної економії енергії на рівні 22%, комфорт не зазнав значних втрат. Ці результати доводять, що оптимізатор «Літаюча лисиця» буде ефективнішим, коли енергоефективність є вищим пріоритетом, що дозволяє відхиленням комфорту бути дещо вищими, ніж у інших алгоритмів [53].

Запропонований алгоритм «Рослина водяне колесо» дуже добре керував енергоспоживанням у середовищі, чутливому до погоди. Завдяки динамічному пристосуванню до сонячної та хмарної погоди алгоритм «Рослина водяне колесо» зменшив енергоспоживання у всіх зонах, зберігаючи при цьому комфорт. Наприклад, енергоспоживання зони 1 зменшується з 1250 кВт·год за сонячної погоди до 1150 кВт·год за хмарної погоди при лише незначному відхиленні температури на $0,4^{\circ}\text{C}$. Це робить алгоритм «Рослина водяне колесо» ідеальним для будівель, що зазнають впливу екстремальних погодних умов [32].

Серед них оптимізатор «Енергетична долина» показав найкращі результати щодо енергозбереження та стабільності комфорту, особливо для систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, які зазвичай є найбільш енергоємними в розумних будівлях. Оптимізатор «Енергетична долина» досяг загального енергозбереження на рівні 21% при найменшому відхиленні температури в $0,4^{\circ}\text{C}$ та найкоротшому часі збіжності порівняно з іншими протестованими алгоритмами. Наприклад, у зоні 1 споживання енергії взимку було зменшено до 1100 кВт·год при відхиленні температури лише на $0,3^{\circ}\text{C}$. Сильна сторона оптимізатора «Енергетична долина» також полягає в адаптації до сезонних потреб в енергії, тому він є підходящим вибором для будівель, де метою є висока енергоефективність та комфорт у приміщенні [42].

Проведений тут поглиблений аналіз є значним внеском у сферу енергоменеджменту розумних будівель, оскільки демонструє ефективність біоінспірованих алгоритмів у пошуку оптимального використання енергії при забезпеченні високого рівня комфорту мешканців. Хоча дослідження

підтверджує ефективність біоінспірованих алгоритмів у щодо мінімізації енергоспоживання при максимізації комфорту мешканців, оцінка базується виключно на конкретному наборі даних про розумні будівлі. Необхідно додатково дослідити можливість узагальнення запропонованих методів на більш складні, великомасштабні або багатофункціональні будівлі. «Розумні» споруди з різноманітними плануваннями, режимами використання та енергетичними потребами можуть створити інші виклики щодо оптимізації, потенціал яких не досліджено повною мірою. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на впровадження цих алгоритмів у більших базах даних різноманітних категорій будівель – комерційних, промислових та житлових споруд – для підтвердження їх універсальності. Крім того, застосування цих методів у багатофункціональних спорудах з різноманітними графіками роботи та енергетичними потребами дасть змогу краще зрозуміти їх надійність та універсальність. Цей аргумент дослідження також застосовуватиметься до архітектурного та інженерного проектування, де досягнення цілей енергоефективності без шкоди для комфорту є проблемою у досягненні практик сталого будівництва [51], [45], [46], [52].

Окрім питань масштабованості, економічна ефективність є не менш важливою при розгляді практичної можливості впровадження біоінспірованих алгоритмів оптимізації в розумних будівлях. Як і в цьому дослідженні, значна увага приділяється економії енергії, і політикам доводиться зважувати цю економію з фінансовими наслідками впровадження, що включають початкові інвестиції в установку цих алгоритмів, обладнання для отримання даних у реальному часі та витрати на інтеграцію відповідного програмного забезпечення. Економія енергії має зрівноважити ці початкові витрати. Подальші дослідження повинні включати аналіз витрат та вигод з урахуванням майбутньої економії, а також рентабельності інвестицій (ROI). Місцева варіативність тарифів на енергію може впливати на економічну доцільність цих методів оптимізації в різних регіональних умовах, тому економічну ефективність необхідно враховувати в різних регіональних умовах. Таким чином, дане дослідження є важливим для архітектури, інженерії та енергоменеджменту розумних будівель,

оскільки воно показує, що біоінспіровані алгоритми можуть ефективно використовуватися для оптимізації в режимі реального часу. Інтеграція таких алгоритмів дозволяє досягти дуже точного балансу між енергозбереженням та комфортом мешканців, що є вирішальним для сталого управління будівлями та прогресивного архітектурного проектування. У дослідженні детально розглядається порівняння, яке вказує на різні компроміси, пов'язані з енергоефективністю, комфортом мешканців та архітектурними міркуваннями, що враховуються при виборі найбільш відповідного алгоритму для різних типів будівель. Це дослідження біоінспірованої оптимізації для інтелектуальних будівель має обмеження. У модельованих умовах, що використовуються в ньому, відсутні такі польові умови, як активність мешканців та несправності систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. У майбутніх дослідженнях необхідно передбачити тестування в реальних умовах. Необхідні показники комфорту – температура, вологість та освітлення – обмежуються якістю повітря та рівнем шуму. Розширення цих показників дозволило б покращити якість внутрішнього середовища. Більша масштабованість будівель не перевірена і потребує подальшого дослідження. Економічна доцільність є ще одним недоліком; політикам необхідні інвестиції.

Економічна доцільність має бути кількісно оцінена в майбутніх дослідженнях. Етичні наслідки використання даних IoT мають бути враховані для збереження приватності та безпеки. Усунення цих недоліків покращило б практичну значущість. Важливим аспектом впровадження оптимізації на основі ШІ у розумних будівлях є те, як дані, що генеруються ШІ в режимі реального часу, впливають на етичні питання та питання приватності. Давачі на основі IoT для вимірювання зайнятості простору, умов середовища та енергоспоживання викликають занепокоєння щодо згоди користувачів, приватності та захисту їхніх даних. Система управління розумними будівлями має анонімізувати дані користувачів, щоб захистити їх від несанкціонованого доступу.

Етичні занепокоєння виникають у випадках мінімізації енергоспоживання в багатокористувацьких приміщеннях – процеси оптимізації, що зменшують

попит на енергію, не можуть несправедливо впливати на комфорт конкретних осіб. Безпечні підходи до роботи з даними в майбутніх розробках включають шифрування даних на основі блокчейну та федеративне навчання для збалансування захисту конфіденційності та ефективності оптимізації. Нормативні вимоги щодо використання даних розумних будівель мають враховуватися при впровадженні на основі ШІ в реалістичних сценаріях. Основна увага до багатовимірних методів візуалізації ще більше покращує розуміння компромісів між енергоефективністю та комфортом щодо естетики будівлі, використання простору та контролю навколишнього середовища, що робить її дуже важливим довідником для майбутніх архітектурних проєктів з точки зору оптимізації енергоспоживання без шкоди для цілісності дизайну та добробуту мешканців. Отже, це дослідження стане основою для розробки інтелектуальних систем будівель, які є енергоефективними та відповідають викликам сучасного сталого дизайну.

3.6. Комплексна оцінка та висновки щодо ефективності оптимізаційних методів опрацювання даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель»

Метою дослідження є визначення ефективності різних біоінспірованих алгоритмів для оптимізації енергоспоживання та підтримання комфорту мешканців у середовищах розумних будівель. У роботі аналізується ефективність п'яти алгоритмів оптимізації, натхненних природою, а саме: оптимізатора «Пума», оптимізатора «Морж», алгоритму «Літаюча лисиця», алгоритму «Рослина водяне колесо» та оптимізатора «Енергетична долина». Їхню роботу продемонстровано для різних сценаріїв експлуатації, що включають коливання енергетичного попиту в пікові періоди, зміни рівнів заповнюваності приміщень та динамічні погодні умови. Отримані результати підтвердили здатність кожного алгоритму ефективно балансувати між енергоефективністю та стабільністю

мікроклімату, що надає цінну аналітичну інформацію для впровадження систем оптимізації інженерних мереж у режимі реального часу.

Серед основних переваг варто відзначити здатність оптимізатора «Пума» та оптимізатора «Морж» ефективно адаптуватися до мінливих зовнішніх чинників, що дозволяє досягти значного рівня енергозбереження без шкоди для мікрокліматичного комфорту. Натомість алгоритм «Літаюча лисиця» забезпечує максимальну економію енергії, завдяки чому його доцільно застосовувати у специфічних сценаріях, де мінімізація енерговитрат є пріоритетнішою за суворе підтримання стабільних параметрів комфорту. [63]. Натомість алгоритм «Рослина водяне колесо» виявляється найбільш корисним для інженерних екосистем, високочутливих до погодних умов. У свою чергу, оптимізатор «Енергетична долина» забезпечує зразковий баланс між енергозбереженням та мікрокліматичним комфортом мешканців, демонструючи найкращі інтегральні показники у більшості ситуацій для безперебійного регулювання систем HVAC. Таким чином, цей алгоритм повністю довів свою надійність та стабільність у межах усіх розглянутих експлуатаційних сценаріїв. Серед цікавих моментів можна відзначити, що оптимізатор «Пума» та оптимізатор «Морж» мають потенціал для адаптації до мінливих умов, що дозволяє досягти значної економії енергії без втрати комфорту. Оптимізатор «Морж» забезпечив економію енергії до 20% при середньому відхиленні лише $0,4^{\circ}\text{C}$, що робить його ідеальним для умов із мінливою заповненістю приміщень. Оптимізатор «Літаюча лисиця» досяг значної економії енергії – до 22% скорочення споживання енергії, але при вищому відхиленні температури на $0,6^{\circ}\text{C}$, тому він ідеально підходить для умов, де економія енергії переважає абсолютну точність у комфорті. З іншого боку, алгоритм «Рослина водяне колесо» досяг хорошої ефективності в умовах, що реагують на погоду, скоротивши споживання енергії на 10–12% від ясних до хмарних умов. Оптимізатору «Енергетична долина» вдалося досягти балансу між енергозбереженням та загальним комфортом, оскільки система забезпечує 21% загальної економії енергії при найнижчому відхиленні середньої температури, що становить лише $0,4^{\circ}\text{C}$, тому вона посідає перше місце серед найбільш

збалансованих варіантів для управління системою опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у режимі реального часу. Результати дослідження показують, що різні алгоритми відповідають різним пріоритетам у роботі, тому майбутні дослідження повинні зосередитися на гібридних рішеннях, які використовують більше ніж одну стратегію для оптимізації.

Загалом внесок цього дослідження в архітектурну інженерію та проектування сталого будівництва полягає в інтеграції найсучасніших біоінспірованих алгоритмів із розумними системами управління енергією. Результати показали, що ці алгоритми потенційно можна застосувати в реальних розумних будівлях як основу для майбутніх робіт у більш складних і великих середовищах. Крім того, інтеграція цих алгоритмів з інтернетом речей та потоками даних із реального світу відкриває нові можливості для автоматизації управління енергією та покращення загальної ефективності будівлі [59].

3.7. Висновок до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» представлено результати моделювання, експериментального впровадження та комплексного порівняльного аналізу п'яти досліджуваних біоінспірованих алгоритмів за різних сценаріїв експлуатації. На основі проведених розрахунків оцінено здатність кожного методу забезпечувати оптимальний баланс між енергоефективністю інженерних систем та стабільністю мікроклімату в незалежних зонах будівлі. Встановлено, що максимальну загальну економію енергії забезпечує алгоритм Оптимізатор «Літаюча лисиця», який досягає показника у 22%, проте це відбувається за рахунок вищого середнього відхилення температури ($0,6^{\circ}\text{C}$) та супроводжується найбільшими обчислювальними витратами, що вимагають 750 ітерацій для збіжності. Найбільш збалансовані та стабільні результати управління системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря продемонстрував алгоритм Оптимізатор «Енергетична долина», який забезпечує 21% загального енергозбереження за

мінімального відхилення кімнатної температури ($0,4^{\circ}\text{C}$), найнижчого відхилення вологості (1,1%) та найвищої швидкості збіжності, що становить 600 ітерацій. Високу ефективність та надійність в умовах динамічної заселеності приміщень підтвердив Оптимізатор «Морж», дозволивши досягти 20% економії ресурсів при відхиленні температури лише на $0,4^{\circ}\text{C}$ за 650 ітерацій. Виявлено високу адаптивність алгоритму «Рослина водяне колесо» до мінливих метеорологічних умов, який забезпечив зниження споживання енергії на 10–12% при переході від сонячної до похмурої погоди, тоді як Оптимізатор «Пума» продемонстрував стабільну роботу з показником економії 18% та середнім відхиленням температури $0,5^{\circ}\text{C}$ за 700 ітерацій. Проведено аналіз чутливості та надійності, за результатами якого алгоритми оптимізатора «Енергетична долина» та оптимізатора «Морж» визначено як найнадійніші та найменш чутливі до динамічних коливань заповнюваності й температурного режиму. Спроектовано простори багатокритеріальних компромісів та за допомогою тривимірних точкових і поверхневих діаграм виконано багатовимірну візуалізацію взаємозв'язків між енергозбереженням, відхиленнями від комфорту, надійністю та чутливістю до погоди, що дозволило наочно продемонструвати топологію простору рішень фронту Парето та визначити зони стабільної рівноваги інтелектуальної системи енергоменеджменту.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ

Оскільки кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» присвячена дослідженню та обґрунтуванню методів обробки та аналізу даних давачів внутрішнього середовища «розумних будівель», а функціонування сучасних об'єктів автоматизації та робота обслуговуючого персоналу пов'язані з рядом технологічних небезпек, то в розділі охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях доцільно розглянути вимоги безпеки праці під час проектування та експлуатації систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря, а також розробку комплексних заходів захисту від пожеж та вибухів в інженерних системах опалення, вентиляції, освітлення та кондиціонування повітря інтелектуальних споруд.

4.1. Організація безпечних умов праці при експлуатації інженерних систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря

Відповідно до положень ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», під час проектування та розгортання відповідних кліматичних мереж необхідно реалізувати комплекс інженерно-технічних рішень для виконання таких базових критеріїв:

- підтримання регламентованих показників повітряного середовища та гранично допустимих меж вмісту домішок у житлових зонах, просторах громадських будівель, а також на адміністративно-побутових об'єктах згідно з чинними санітарно-епідеміологічними нормами;
- забезпечення стандартних параметрів мікроклімату та жорсткого контролю шкідливих виділень в атмосфері робочих місць на виробничих, дослідницьких (лабораторних) та складських майданчиках будь-яких споруд відповідно до вимог ГОСТ 12.1.005, санітарного регламенту ДСН 3.3.6.042 та правил розрахунку внутрішнього повітря;

- мінімізацію екологічного навантаження та захист атмосферного повітря від виведення забруднювачів через витяжні вентиляційні канали;
- гарантування електробезпеки, механічної надійності та дотримання правил охорони праці на всіх етапах інсталяції, пусконаладження, випробувань та поточного сервісу опалювально-вентиляційної техніки;
- запобігання ризикам виникнення пожеж чи вибухів внаслідок функціонування вузлів кліматичних [54].

Важливим чинником у формуванні безпечної та продуктивної атмосфери на виробництві виступає вентиляція. Вона являє собою цілісний комплекс технічних пристроїв та організаційних рішень, орієнтованих на утримання оптимальних фізико-хімічних властивостей повітря та комфортного температурного режиму на постійних робочих місцях згідно з державними стандартами. Зважаючи на характер циркуляції повітряних мас, виділяють природний та механічний (штучний) способи аерації [55].

Гравітаційний (природний) повітрообмін базується на різниці температур всередині й зовні будівлі, а також на природній силі вітрового тиску. При обтіканні споруди повітряними потоками з навітряного боку формується надлишковий тиск, а з завітряного – зона розрідження. Це спонукає свіжі повітряні маси проникати крізь віконні прорізи, фрамуги та технологічні щілини, тоді як відпрацьований об'єм виштовхується назовні. Головними плюсами такої схеми є відсутність енерговитрат та конструктивна простота. Ключовий мінус полягає у неможливості фільтрації припливного повітря та неконтрольованому викиді шкідливих речовин в атмосферу без попередньої очистки, що негативно впливає на екологію.

Примусова (механічна) вентиляція передбачає штучне відведення забруднених газів і подачу свіжого повітряного об'єму за допомогою спеціального силового обладнання. Така інженерна мережа об'єднує вентиляційні установки, магістралі повітроводів, блоки керування, пускову апаратуру та розподільні пристрої. Залежно від локалізації та масштабів дії

штучну вентиляцію поділяють на загальнообмінну, локальну (місцеву) та змішану (комбіновану).

Будь-яка схема повітрообміну має задовольняти низку гігієнічних та експлуатаційних регламентів, а саме: підтримувати нормативні параметри повітря у просторі перебування людей; унеможливити надходження шкідливих речовин з вулиці чи перетікання відпрацьованого повітря з сусідніх приміщень; виключати появу протягів або зон різкого переохолодження працівників; забезпечувати зручність налаштування та планового ремонту під час експлуатації. Додатково вона не повинна заважати виконанню технологічних процесів, обмежувати рух цехового транспорту, негативно впливати на якість кінцевого продукту, а її компоненти мають відповідати нормам пожежної безпеки та економічної доцільності.

У процесі експлуатації збалансованих припливно-витяжних комплексів важливо контролювати, щоб об'єм припливу не перевищував витяжку, або тримався в межах на 10–15% менше від сумарного об'єму повітря, яке видаляється через витяжні пристрої

Годинний об'єм подачі чистого повітря, необхідний для забезпечення життєдіяльності одного робітника, розраховується за такою математичною залежністю:

$$a = k / p - g, \quad (4.1)$$

де: a – шуканий об'єм припливу повітря для вентиляції, м³/год; k – об'єм двоокису вуглецю, який генерує одна особа впродовж години, л/год; p – гранично допустимий рівень CO₂ в атмосфері приміщення (приймається як 0,1% або 1,0 л на м³); g – природна концентрація вуглекислого газу у зовнішньому середовищі (становить приблизно 0,03% або 0,03 л на м³).

Нормативи швидкості повітряних потоків у витяжних пристроях диференціюються за типом забруднень:

– при виведенні газоподібних фракцій з холодних приміщень швидкість має становити 0,5–1,0 м/с, а з гарячих (тепліх) зон – у межах 1,0–1,5 м/с;

– при локалізації пилових викидів швидкість руху повітряного потоку має підтримуватися відповідно у діапазонах 0,8–1,5 м/с та 1,5–2,5 м/с.

Завданням локальних (місцевих) вентиляційних мереж є точкове коригування умов праці безпосередньо біля джерел. Вони реалізуються у вигляді припливних установок (теплові завіси, повітряні душі) або місцевих витяжок (бортові відсоси, зонти для захоплення шкідливих емісій безпосередньо у місці їх виникнення).

З метою формування та автоматичного терморегулювання стабільних або заздалегідь запрограмованих параметрів внутрішнього середовища застосовують системи кондиціонування. Кондиціонування передбачає стабілізацію та автоматичну корекцію мікроклімату за показниками температури, вологості, рухливості та чистоти повітря, незалежно від коливань зовнішньої погоди. Повітряні маси проходять технологічні етапи нагріву/охолодження, зволоження/осушення, механічної фільтрації домішок, а також за потреби – озонування, бактерицидної обробки (дезінфекції), дезодорації чи озонування.

За конструктивним виконанням і розташуванням кліматичні блоки поділяють на дві групи:

- а) центральні комплекси – монтуються у відокремлених технічних зонах поза простором перебування працівників;
- б) локальні (місцеві) блоки – встановлюються безпосередньо всередині обслуговуваних приміщень.

Проектування, конфігурація та технічне обслуговування контурів опалення мають чітко корелювати з положеннями нормативного документа ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». У разі застосування локального електроопалення для окремих зон дозволено експлуатувати виключно обігрівачі із захищеними (закритими) нагрівальними елементами, причому їхнє сумарне навантаження не повинно викликати перевантаження струму понад допустимі ліміти для даної електромережі.

Теплообмінне обладнання монтують на відкритих ділянках із мінімальним проміжком 0,1 м від стіни для вільного очищення, огляду та поточного сервісу,

категорично забороняючи їх приховане встановлення у стінових нішах. На сходових прольотах радіатори опалення групують на рівні нижніх ярусів, а у тамбурних зонах – у внутрішніх секціях, ізольованих від прямих зовнішніх дверей.

4.2. Превентивні інженерно-технічні заходи пожежо та вибухозахисту в системах опалення, вентиляції, освітлення та кондиціонування повітря

До початку опалювального періоду всі елементи теплопостачальних мереж, які змонтовані всередині споруд, включаючи калориферне обладнання, теплогенеруючі агрегати, автономні котельні, печі та інші прилади обігріву, підлягають обов'язковій ревізії та ремонтно-профілактичному обслуговуванню. Категорично забороняється вводити в експлуатацію технічно несправні засоби опалення.

Робочі поверхні теплопроводів з високою температурою, що проходять крізь приміщення із потенційною загрозою займання летких парів, вибухонебезпечних газів, дрібнодисперсного пилу чи аерозольних сумішень, необхідно захищати теплоізоляцією. При цьому конфігурація ізоляційного покриття має забезпечувати температуру на його зовнішній поверхні щонайменше на 20% нижчу за показник самозаймання навколишніх речовин[56].

Усі високотемпературні ділянки трубопроводних магістралей та супутнього обладнання, що розташовані у зонах можливого потрапляння горючих, вибухонебезпечних або легкозаймистих рідких фракцій, мають бути захищені суцільним металевим кожухом (обшивкою). Не допускається функціонування тепломереж, якщо їхнє ізоляційне покриття просочилося горючими чи легкозаймистими матеріалами. Планове видалення сажі з печей та димохідних каналів проводиться перед пуском опалення, а також систематично впродовж усього зимового сезону за таким регламентом [57]:

- кухонні плити та технологічні кип'ятильники – щомісяця;
- опалювальні агрегати безперервної дії – мінімум один раз на два місяці;

– печі періодичної дії, що функціонують на твердому або рідкому паливі – щонайменше один раз на три місяці.

Усередині приміщень автономних котелень та інших теплогенеруючих комплексів підприємств чи населених пунктів суворо забороняється:

– використовувати поверхні котлів та паропроводів для висушування робочого взуття, спецодягу чи інших сторонніх матеріалів;

– здійснювати технологічний процес за умов відсутності, вимкнення чи несправності штатних засобів автоматичного регулювання та контролю;

– запускати теплотехнічні установки без попереднього вентилявання камери згоряння;

– експлуатувати обладнання за наявності витоків газу або протікання рідких енергоносіїв із паливоподавальних контурів;

– залучати до обслуговування персонал, який не пройшов відповідну підготовку за програмою пожежно-технічного мінімуму та не має кваліфікаційних посвідчень встановленого зразка.

Не дозволяється самовільно вносити конструктивні зміни в елементи вентиляційних мереж, систем кондиціонування та опалення, якщо це знижує їхню вогнестійкість або перешкоджає локалізації поширення вогню. У пожежо- та вибухонебезпечних зонах заборонено роботу виробничого обладнання, якщо вимкнені або перебувають у несправному стані сухі чи мокрі (біля гідрофільтрів) пиловловлювачі, пилосмоки та інші аспіраційні блоки вентиляції.

Якщо вибухозахищені вентиляційні агрегати монтуються поза межами будівлі, для їхнього захисту зводять спеціальні укриття з негорючих будівельних матеріалів. Під час експлуатації вентиляційних комплексів забороняється [57]:

– запускати в роботу переповнені циклони та накопичувальні бункери;

– об'єднувати в одну аспіраційну систему локальні відсоси для видалення пилу і газів, здатних при змішуванні утворювати вибухонебезпечні сполуки;

– інтегрувати припливно-витяжні повітроводи з каналами відведення продуктів згоряння від газових колонок та інших теплогенеруючих приладів;

- залишати відчиненими технологічні двері вентиляційних камер, а також використовувати їхній простір для складування матеріалів чи інших приладів;
- блокувати чи перекривати витяжні канали та розподільні решітки.

Розгортання автономних моноблочних систем або спліт-систем кондиціонування дозволено у спорудах будь-якого цільового призначення, за винятком тих зон, де діє нормативна заборона на рециркуляцію повітряних мас. Зовнішні компресорно-конденсаторні блоки спліт-систем, холодопродуктивність яких не перевищує 12 кВт, дозволяється встановлювати у відкритих сходових прольотах, критих сполучних переходах та на незаскленіх лоджіях.

Використання промислового холодильного обладнання, що функціонує на аміачних холодоагентах, допускається в процесі модернізації систем холодопостачання кліматичних мереж виробничих зон. Таку апаратуру виносять в окремі одноповерхові прибудови, відокремлені будівлі або спеціально ізольовані зали промислових об'єктів.

Технічний сервіс та експлуатація калориферних установок вимагають дотримання таких правил [57]:

- контроль цілісності транзитних каналів, які транспортують підігріте повітря (вони не повинні мати технологічних отворів або пошкоджень, крім точок безпосередньої подачі повітря в кімнати);
- регулярне проведення очищення поверхонь нагріву від пилових наслоєнь за допомогою гідравлічних або пневматичних методів;
- недопущення утворення щілин та зазорів між калориферами і будівельними конструкціями камери (усі виявлені нещільності негайно зашпаровують негорючими сумішами);
- підтримання у працездатному та повіреному стані засобів контрольно-вимірювальної апаратури;
- дотримання просторової відстані від калориферів до конструкцій із горючих чи важкогорючих матеріалів на рівні не менше ніж 1,5 м у разі використання вогневого чи електричного нагріву, та щонайменше 0,1 м, якщо теплоносієм виступає гаряча вода чи пара.

Монтаж, прокладання живильних кабелів та налаштування пристроїв електричного захисту для ліній живлення побутових кліматичних приладів мають чітко відповідати супутній технічній документації заводу-виробника. Силову лінію до кожного окремого кондиціонера (або виділеної групи приладів) необхідно оснащувати індивідуальним автономним автоматичним вимикачем захисту, незалежно від наявності загального захисного апарату на магістральному щиті живлення.

Під час використання побутових кондиціонерів у приміщеннях загального призначення категорично заборонено [57]:

- перетинати протипожежні перешкоди та стіни трубними магістралями чи кабелями кондиціонера без облаштування спеціальних кабельних проходок із нормованою межею вогнестійкості;
- замінювати штатні триполюсні штепсельні роз'єми із заземлюючим контактом на звичайні двополюсні;
- самовільно вносити неузгоджені зміни у внутрішню електричну чи конструктивну схему кліматичного блока.

У даному розділі було детально проаналізовано комплексні вимоги безпеки праці під час безперебійної експлуатації систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря, а також сформовано перелік інженерно-технічних рішень для їхнього надійного пожежо та вибухозахисту. В контексті виконання магістерської кваліфікаційної роботи, яка присвячена обґрунтуванню методів обробки та аналізу даних сенсорів внутрішнього середовища «розумних будівель», ретельне дотримання зазначених нормативів є критично важливим чинником. Це гарантує стабільне, безпечне та стійке функціонування автоматизованих комплексів і запобігає аварійним ситуаціям при алгоритмічному управлінні інженерною інфраструктурою розумних будівель.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра проведено комплексне дослідження та порівняльний аналіз біоінспірованих алгоритмів для оптимізації енергоспоживання та підтримки параметрів мікроклімату в інтелектуальних будівлях.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр»:

- Подано комплексний теоретичний базис та обґрунтовано попит на гнучкі адаптивні підходи управління мікрокліматом, здатні в реальному часі реагувати на динамічні збурення.

- Розглянуто концептуальні засади архітектури IoT та тенденції розвитку систем автоматизації будівель у загальній інфраструктурі «розумного міста». Та висвітлено визначальний вплив параметрів внутрішнього середовища на здоров'я, працездатність мешканців та загальну енергоефективність споруд.

- Проаналізовано структуру енергоспоживання інженерних вузлів, де основними статтями витрат визначено системи HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування), штучне освітлення та побутові розетки.

- Досліджено наявні автоматизовані стратегії керування та виявлено їхні ключові недоліки при розв'язанні нелінійних багатокритеріальних задач у складних експлуатаційних умовах. Та обґрунтовано доцільність інтеграції методів штучного інтелекту та сучасних біоінспірованих алгоритмів метаевристичної оптимізації для подолання природного конфлікту між комфортом та енергозбереженням.

- Сформовано концептуальні й технічні вимоги до створення інформаційного та алгоритмічного забезпечення для інтелектуальних систем енергоменеджменту розумних будівель.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Описано методологію дослідження, математичну модель об'єкта оптимізації та структуру високодеталізованого публічного набору даних CU-BEMS із щохвилинною фіксацією параметрів.

- Досліджено математичний апарат, операційну логіку, стратегії пошуку та агентну поведінку п'яти новітніх метаевристик: оптимізатора «Пума», оптимізатора «Морж», алгоритму «Літаюча лисиця», алгоритму «Рослина водяне колесо» та оптимізатора «Енергетична долина».

- Подано порівняльний опис формалізації цільових функцій для одночасної мінімізації загальних енергетичних витрат E_{total} та максимізації інтегрального теплового й світлового комфорту C_{total} з урахуванням нормативних обмежень стандартів ASHRAE та ISO 7730.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Розроблено та реалізовано у віртуальному середовищі імітаційного моделювання п'ять динамічних експлуатаційних сценаріїв (пікове/непікове навантаження, змінна зайнятість, сезонні коливання зима/літо, варіативні тарифи) для незалежних зон будівлі.

- Запропоновано комплексну систему критеріїв оцінки ефективності алгоритмів, що включає валове енергозбереження, швидкість збіжності, прецизійність утримання мікроклімату та стійкість до збурень.

- Спроектовано простори багатокритеріальних компромісів у вигляді фронтів Парето та побудовано тривимірні поверхні взаємозв'язків між критеріями оптимізації для глибокої верифікації результатів.

- Протестовано роботу всіх п'яти еволюційних оптимізаторів, що дозволило визначити оптимізатор «Енергетична долина» лідером за балансом показників (економія енергії 21% при відхиленні температури 0,4 °C та збіжності за 600 ітерацій) та алгоритм «Літаюча лисиця» лідером за суто чистим енергозбереженням (до 22% економії).

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» проаналізовано нормативно-правові основи й стандарти безпеки праці під час проектування та експлуатації механічних систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря. Описано правила технічного планування та розробки комплексних заходів захисту від пожеж і вибухів у теплогенеруючих установках,

калориферах та лініях живлення автономних кондиціонерів об'єктів автоматизації.

Таким чином, проведене магістерське дослідження повністю підтверджує високу практичну ефективність інтеграції біоінспірованих оптимізаторів із технологіями Інтернету речей, що створює алгоритмічну основу для проектування сучасних систем автоматизації та сталого енергоменеджменту розумних будівель.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Phan, A., T. Vu, D. Nguyen, E. Sanseverino, H. Le, and V. Bui. 2022. "Data Compensation with Gaussian Processes Regression: Application in Smart building's Sensor Network." *Energies (Basel)* 15 (23): 9190. <https://doi.org/10.3390/en15239190>
2. Udendhran, R. 2023. "Smart Energy Consumption Control in Commercial Buildings Using Machine Learning and IoT." *E3S Web of Conferences*, 02003, 387. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338702003>
3. Newton, S., A. Shirazi, and P. Christensen. 2021. "Defining and Demonstrating a Smart Technology Configuration to Improve Energy Performance and Occupant Comfort in Existing Buildings: A Conceptual Framework." *International Journal of Building Pathology and Adaptation* 41 (1): 182–200. <https://doi.org/10.1108/ijbpa-04-2021-0046>
4. Aldakheel, J. 2023. "Indoor Environmental Quality Evaluation of Smart/Artificial Intelligence Techniques in Buildings – a Review." *E3S Web of Conferences*, 01101, 396. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339601101>
5. Alrahaheh, M., A. Alrahaheh and T. Slaihat. 2024. "The Impact of Adopting Social Responsibility as a Mechanism for Using Smart Sustainable Solutions in the Ministry of Public Works and Housing in Jordan." *Al-Balqa Journal for Research and Studies* 27 (SE): 88–105. <https://doi.org/10.35875/j59fme90>
6. Al-Jokhadar, A., S. Alnusairat, Y. Abubashem and Y. Soudi. 2023. "The Impact of Indoor Environmental Quality (IEQ) in Design Studios on the Comfort and Academic Performance of Architecture Students." *Buildings* 13 (11): 2883.
7. Elnaklah, R., Y. Ayyad, S. Alnusairat, H. AlWaer, and A. AlShboul. 2023. "A Comparison of Students' Thermal Comfort and Perceived Learning Performance Between Two Types of University Halls: Architecture Design Studios and Ordinary Lecture Rooms During the Heating Season." *Sustainability* 15 (2): 1142.
8. Gómez-Romero, J., C. Fernandez-Basso, M. Cambronero, M. Molina-Solana, J. Campaña, M. Ruiz, and M. J. Martin-Bautista. 2019. "A Probabilistic Algorithm for Predictive Control with Full-Complexity Models in Non-Residential

Buildings.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Access 7:38748–38765. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2906311>

9. Franco, A. 2024. “Synergy in Action: Integrating Environmental Monitoring, Energy Efficiency, and IoT for Safer Shared Buildings.” Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202403.1115.v1>

10. Adewumi, A., C. Emilia Okoli, F. Oluwadamilare Usman, K. Andrew Olu-Lawal, and O. Timothy Soyombo. 2024. “Reviewing the Impact of AI on Renewable Energy Efficiency and Management.” *International Journal of Science and Research Archive* 11 (1): 1518–1527. <https://doi.org/10.30574/ijjsra.2024.11.1.0245>

11. Onwusinkwue, S., F. Osasona, I. Ahmad Ibrahim Ahmad, A. Chigozie Anyanwu, S. Onimisi Dawodu, O. Chimezie Obi, and A. Hamdan. 2024. “Artificial Intelligence (AI) in Renewable Energy: A Review of Predictive Maintenance and Energy Optimization.” *World Journal of Advanced Research & Reviews* 21 (1): 2487–2799. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0347>

12. Şerban, A., and M. Lytras. 2020. “Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe—Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities.” *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access* 8:77364–77377. 2990123 . <https://doi.org/10.1109/access.2020>.

13. Chakravarthi, V. 2021. “Energy Efficient and Hybrid Bio-Inspired Ant-Cuckoo Algorithm for Wireless Sensor Network.” *Bioscience Biotechnology Research Communications* 14 (6): 335–338. <https://doi.org/10.21786/bbrc/14.6.69>

14. Hussain, I., M. Ullah, I. Ullah, A. Bibi, M. Naeem, M. Singh, and D. Singh. 2020. “Optimizing Energy Consumption in the Home Energy Management System via a Bio-Inspired Dragonfly Algorithm and the Genetic Algorithm.” *Electronics* 9 (3): 406. <https://doi.org/10.3390/electronics9030406>

15. Montoya, E., E. Mendoza, and E. Stamhuis. 2023. “Biomimetic Design of Turbine Blades for Ocean Current Power Generation.” *Biomimetics* 8 (1): 118. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010118>

16. Bagheri, A., K. Genikomsakis, S. Koutra, V. Sakellariou, and C. Ioakimidis. 2021. “Use of AI Algorithms in Different Building Typologies for Energy Efficiency

Towards Smart Buildings.” *Buildings* 11 (12): 613. <https://doi.org/10.3390/buildings11120613>

17. Hamid, M., and A. Ganne. 2023. “Artificial Intelligence in Energy Markets and Power Systems.” *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS35943>

18. Agouzoul, A., E. Simeu, and M. Tabaa. 2024. “Advancing Sustainable Building Practices: Intelligent Methods for Enhancing Heating and Cooling Energy Efficiency.” *Sustainability* 16 (7): 2879. <https://doi.org/10.3390/su16072879>

19. Lian, L., and H. Xie. 2022. “Occupant Seating Optimization to Reduce Lighting Energy Consumption and Improve Comfort.” *E3S Web of Conferences*, 01063, 356. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235601063>

20. Ridi, A., C. Gisler, and J. Hennebert. 2014. “A Survey on Intrusive Load Monitoring for Appliance Recognition.” *IEEE Conference on Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.1109/icpr.2014.636>

21. Chia, K., L. Amy, V. Agarwal, M. Lee, J. Ikedo, J. Wolfe, Trenbath, K. and Kleissl, J. 2023. “Integration of a Smart Outlet-Based Plug Load Management System with a Building Automation System.” *GridEdge Conference*. <https://doi.org/10.1109/gridedge54130.2023.10102749>

22. Chen, X., Q. Wang, and J. Srebric. 2015. “A Data-Driven State-Space Model of Indoor Thermal Sensation Using Occupant Feedback for Low-Energy Buildings.” *Energy & Buildings* 91:187–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.038>

23. Esnaola-Gonzalez, I., J. Bermúdez, I. Fernández, A. Arnáiz, Á. Sicilia, P. Pauwels, L. Madrazo, et al. 2018. “Semantic Prediction Assistant Approach Applied to Energy Efficiency in Tertiary Buildings.” *Semantic Web* 9 (6): 735–762. <https://doi.org/10.3233/sw-180296>.

24. Jin, M., R. Jia, and C. Spanos. 2017. “Virtual Occupancy Sensing: Using Smart Meters to Indicate Your Presence.” *IEEE Transactions on Mobile Computing* 16 (11): 3264–3277. <https://doi.org/10.1109/tmc.2017.2684806>

25. Jin, W., I. Ullah, S. Ahmad, and D. Kim. 2019. "Occupant Comfort Management Based on Energy Optimization Using an Environment Prediction Model in Smart Homes." *Sustainability* 11 (4): 997. <https://doi.org/10.3390/su11040997>
26. Pipattanasomporn, M., G. Chitalia, J. Songsiri, C. Aswakul, W. Pora, S. Suwankawin, N. Hoonchareon, and N. Hoonchareon. 2020. "CU-BEMS, Smart Building Electricity Consumption and Indoor Environmental Sensor Datasets." *Scientific Data* 7 (1): 241. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00582-3>.
27. Benavente-Peces, C., and N. Ibadah. 2020. "Buildings Energy Efficiency Analysis and Classification Using Various Machine Learning Technique Classifiers." *Energies (Basel)* 13 (13): 3497. <https://doi.org/10.3390/en13133497>
28. Shapi, M. K. M., N. A. Ramli, and L. J. Awalin. 2021. "Energy Consumption Prediction by Using Machine Learning for Smart Building: Case Study in Malaysia." *Developments in the Built Environment* 5:100037. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100037>
29. Talei, H., D. Benhaddou, C. Gamarra, H. Benbrahim, and M. Essaaidi. 2021. "Smart Building Energy Inefficiencies Detection Through Time Series Analysis and Unsupervised Machine Learning." *Energies (Basel)* 14 (19): 6042. <https://doi.org/10.3390/en14196042>
30. Ünal, F., A. Almalaq, and S. Ekici. 2021. "A Novel Load Forecasting Approach Based on Smart Meter Data Using Advance Preprocessing and Hybrid Deep Learning." *Applied Sciences* 11 (6): 2742. <https://doi.org/10.3390/app11062742>
31. Zhang, Y., and G. Augenbroe. 2018. "Optimal Demand Charge Reduction for Commercial Buildings Through a Combination of Efficiency and Flexibility Measures." *Applied Energy* 221:180–194. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.150>
32. Karim, F. K., D. S. Khafaga, M. M. Eid, S. K. Towfek, and H. K. Alkahtani. 2023. "A Novel Bio-Inspired Optimization Algorithm Design for Wind Power Engineering Applications Time-Series Forecasting." *Biomimetics* 8 (3): 321. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8030321>

33. Khan, F. A., K. Ullah, A. U. Rahman, and S. Anwar. 2023. "Energy Optimization in Smart Urban Buildings Using Bio-Inspired Ant Colony Optimization." *Soft Computing* 27 (2): 973–989. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07537-3>
34. Rajput, V., P. Mulay, and C. M. Mahajan. 2024. "Bio-Inspired Algorithms for Feature Engineering: Analysis, Applications and Future Research Directions." *Information Discovery and Delivery* 53 (1): 56–71. <https://doi.org/10.1108/IDD-06-2023-0049>
35. Zamani, H., M. H. Nadimi-Shahraki, and A. H. Gandomi. 2022. "Starling Murmuration Optimizer: A Novel Bio-Inspired Algorithm for Global and Engineering Optimization." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 392:114616. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114616>
36. Abdollahzadeh, B., M. T. Afzal, Z. Beheshti, M. Asadi, A. A. Heidari, E.-S. M. El-Kenawy, L. Abualigah, and S. Mirjalili. 2024. "Puma Optimizer (PO): A Novel Metaheuristic Optimization Algorithm and Its Application in Machine Learning." *Cluster Computing* 27 (4): 5235–5283. <https://doi.org/10.1007/s10586-023-04221-5>
37. Wang, W. C., W. C. Tian, D. M. Xu, and H. F. Zang. 2024. "Arctic Puffin Optimization: A Bio-Inspired Metaheuristic Algorithm for Solving Engineering Design Optimization." *Advances in Engineering Software* 195:103694. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2024.103694>
38. Geng, Y., Y. Li, and C. Deng. 2024. "An Improved Binary Walrus Optimizer with Golden Sine Disturbance and Population Regeneration Mechanism to Solve Feature Selection Problems." *Biomimetics* 9 (8): 501. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9080501>
39. Mohammed, H., and T. Rashid. 2023. "FOX: A FOX-Inspired Optimization Algorithm." *Applied Intelligence* 53 (1): 1030–1050. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03533-0>
40. Zhang, Z., X. Wang, and L. Cao. 2024. "FOX Optimization Algorithm Based on Adaptive Spiral Flight and Multi-Strategy Fusion." *Biomimetics* 9 (9): 524. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9090524>

41. Abdelhamid, A. A., S. K. Towfek, N. Khodadadi, A. A. Alhussan, D. S. Khafaga, M. M. Eid, and A. Ibrahim. 2023. "Waterwheel Plant Algorithm: A Novel Metaheuristic Optimization Method." *Processes* 11 (5): 1502. <https://doi.org/10.3390/pr11051502>
42. Azad, M. A., I. Sajid, S. D. Lu, A. Sarwar, M. Tariq, S. Ahmad, H.-D. Liu, C.-H. Lin, and H. A. Mahmoud. 2023. "Energy Valley Optimizer (EVO) for Tracking the Global Maximum Power Point in a Solar PV System Under Shading." *Processes* 11 (10): 2986. <https://doi.org/10.3390/pr11102986>
43. Al Mindeel, T., E. Spentzou, and M. Eftekhari. 2024. "Energy, Thermal Comfort, and Indoor Air Quality: Multi-Objective Optimization Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 202:114682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114682>
44. Amasyali, K., and N. M. El-Gohary. 2021. "Real Data-Driven Occupant-Behavior Optimization for Reduced Energy Consumption and Improved Comfort." *Applied Energy* 302:117276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117276>
45. Bansal, S. 2020. "Performance Comparison of Five Metaheuristic Nature-Inspired Algorithms to Find Near-OGRs for WDM Systems." *Artificial Intelligence Review* 53 (8): 5589–5635. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09829-2>
46. Chegari, B., M. Tabaa, E. Simeu, F. Moutaouakkil, and H. Medromi. 2021. "Multi-Objective Optimization of Building Energy Performance and Indoor Thermal Comfort by Combining Artificial Neural Networks and Metaheuristic Algorithms." *Energy & Buildings* 239:110839. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110839>
47. Zaman, H. R. R., and F. S. Gharehchopogh. 2022. "An Improved Particle Swarm Optimization with Backtracking Search Optimization Algorithm for Solving Continuous JOURNAL OF ASIAN ARCHITECTURE AND BUILDING ENGINEERING 1113 Optimization Problems." *Engineering with Computers* 38 (S4): 2797–2831. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01431-6>
48. Xue, Y., X. Cai, and F. Neri. 2022. "A Multi-Objective Evolutionary Algorithm with Interval-Based Initialization and Self-Adaptive Crossover Operator for

Large-Scale Feature Selection in Classification.” *Applied Soft Computing* 127:109420. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109420>

49. Zubair, S., A. K. Singha, N. Pathak, N. Sharma, S. Urooj, and S. R. Larguech. 2023. “Performance Enhancement of Adaptive Neural Networks Based on Learning Rate.” *Computers, Materials & Continua* 74 (1): 2005–2019. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.031481>

50. Verma, A., S. Prakash, and A. Kumar. 2023. “A Comparative Analysis of Data-Driven Based Optimization Models for Energy-Efficient Buildings.” *IETE Journal of Research* 69 (2): 796–812. <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1838347>

51. Ali, D. M. T. E., V. Motuzienė, and R. Džiugaitė-Tumėnienė. 2024. “AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings.” *Energies (Basel)* 17 (17): 4277. <https://doi.org/10.3390/en17174277>

52. Priyadarshi, R. 2024. “Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-Heuristic and Artificial Intelligence-Based Approach: A Comprehensive Review.” *Archives of Computational Methods in Engineering* 31 (4): 2109–2137. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10039-6>

53. Hassan, M. Y., A. H. Najim, K. A. M. Al-Sharhanee, M. A. Alkhafaji, R. M. Alfoudi, and W. A. Shutnan. 2023. “Enhancing Resource Allocation and Optimization in IoT Networks Using AI-Driven Firefly Optimized Hybrid CNN-BILSTM Model.” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems* 16 (6): 254–267. <https://doi.org/10.22266/ijies2023.1231.27>

54. Бедрій Я.І. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. Київ: Кондор, 2009.

55. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Інститут «УкрНДІспецбуд». 2013. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018> (дата звернення 10.06.2024).

56. Желібо Є. П. Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. К.: Каравела, 2004. 328 с.

57. Наказ КМУ про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні №1417 від 30.12.2014.

58. Ghoneim, Rehab Salaheldin, Mazin Arabasy, and Ashraf Nadheer Abdulhadi. "AI-driven optimization of indoor environmental quality and energy consumption in smart buildings: a bio-inspired algorithmic approach." *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 25.2 (2026): 1089-1113.

59. Жовнір, Ю., Грибовський, О., Орлов, М., Дуда, О., & Кунанець, Н. (2024). Методологія розроблення та супроводу інформаційних систем, базованих на технології інтернету речей. *Управління розвитком складних систем*, (60), 56-70.

60. Кібіткін, Д., Шимчук, Г., & Дуда, О. (2025). Інформаційна система електропостачання «розумної квартири». *Матеріали XIII науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології “*, 44-45.

61. Дуда, О., & Станько, А. (2023). Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст». *Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences*, 323(4), 123-130.

62. Vaskiv, R. I., et al. "Information system of street lighting control in a smart city." *Radio Electronics, Computer Science, Control* 3 (2024): 212-212.

63. Kunanets, N., Zhovnir, Y., Burov, Y., Duda, O., & Pasichnyk, V. (2025). Designing the structure and architecture of situation-aware security information systems for residential complexes. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 133(9).

64. Derevyanko V. S., Duda O. M., Skaletskyi P. O. Thermal load modeling // *Tampere*, 2024. P. 70–71.

65. Derevyanko V. S., Duda O. M., Skaletskyi P. O. Smart city energy systems // *Uzhhorod*, 2024. P. 143–144.

66. Ониськів, Д., С. Довгалюк, and О. Котлінський. "Системи спостереження показників довкілля." *Матеріали XIII науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології “* (2025): 214-214.

67. Котлінський, О., І. Вітів, and С. Довгалюк. "Розумні міста–концепти та напрямки досліджень." *Матеріали XIII науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології “* (2025): 209-209.

Додатки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

ТЕРНОПІЛЬ
2025

В. Кокайло АНАЛІЗ МЕТААСАМБЛЕВИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ ДІАГНОЗІВ V. Kokailo ANALYSIS OF META-ENSEMBLE ALGORITHMS FOR MEDICAL DIAGNOSIS CLASSIFICATION	202
Е. Приймачук ЦИФРОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ (SMART GRID) ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ (SCADA, ADMS) E. Pryimachuk DIGITAL ELECTRICITY GRIDS (SMART GRID) AND INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS (SCADA, ADMS)	203
Н. Луцьк, В. Антонюк, А. Паламар СТРУКТУРА ІОТ-СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ N. Lutsyk, V. Antoniuk, A. Palamar STRUCTURE OF AN IOT SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF ELECTRICAL NETWORKS IN RESIDENTIAL PREMISES	204
М. Боднар, Г. Вовнянка, В. Дуда ПЕРЕДОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У РОЗУМНИХ МІСТАХ M. Bodnar, H. Vovnianka, V. Duda ADVANCED DATA PROCESSING TECHNOLOGIES IN SMART CITIES	205
І. Вітів, А. Кривецький, М. Боднар БАГАТОВИМІРНЕ АНАЛІТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ I. Vitiv, A. Kryvetskyi, M. Bodnar BIG DATA MULTIDIMENSIONAL ANALYTICAL PROCESSING	206
Г. Вовнянка, Д. Ониськів, А. Кривецький ПЕРСПЕКТИВИ АНАЛІТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ РОЗУМНИХ МІСТ H. Vovnianka, D. Onyskiv, A. Kryvetskyi PROSPECTS OF ANALYTICAL PROCESSING OF SMART CITIES DATA	207
О. Котлінський, І. Вітів, С. Довгалоук РОЗУМНІ МІСТА – КОНЦЕПТИ ТА НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ O. Kotlinskyi, I. Vitiv, S. Dovhaliuk SMART CITIES – CONCEPTS AND RESEARCH DIRECTIONS	208
В. Лабчук, Р. Захарченко ДЕЗІНФОРМАЦІЯ ВОРОЖИХ СИЛ ЗАСОБАМИ SMALL DATA V. Labchuk, R. Zakharchenko DISINFORMATION OF ENEMY FORCES WITH THE HELP OF SMALL DATA	209
А. Микитишин, С. Гавриць, О. Колеснік РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ A. Mikitishin, S. Havrys, O. Kolesnik DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR CNC MACHINES	211
Р. Михайлишин, М. Приймак КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА КОНТРОЛЮ КІЛЬКОСТІ ЛЮДЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ R. Mykhailyshyn, M. Pryimak COMPUTERIZED IOT SYSTEM FOR MONITORING THE NUMBER OF PEOPLE USING CLOUD TECHNOLOGIES	212
Д. Ониськів, С. Довгалоук, О. Котлінський СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВКІЛЛЯ D. Onyskiv, S. Dovhaliuk, O. Kotlinskyi ENVIRONMENTAL INDICATORS MONITORING SYSTEMS	213

УДК 004.03

Д. Ониськів; С. Довгалиук; О. Котлінський

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВКІЛЛЯ

UDC 004.03

D. Onyskiv; S. Dovhaliuk; O. Kotlinskyi

ENVIRONMENTAL INDICATORS MONITORING SYSTEMS

Забруднення навколишнього середовища стало значною проблемою, що впливає на екосистеми, здоров'я людини та загальну стійкість. Забруднення повітря та води, зокрема, спричиняє респіраторні захворювання, серцево-судинні захворювання та хворобами, що передаються через воду – що робить високоефективні системи спостереження показників навколишнього середовища критично важливими [1]. Традиційні підходи до спостереження навколишнього середовища використовують ручний відбір проб та лабораторний аналіз, що є доволі трудомісткими та часто не забезпечують аналітичного опрацювання даних в режимі реального часу. Відповідно до цих потреб з'явилися інтелектуальні системи спостереження параметрів навколишнього середовища – це високотехнологічне рішення, що інтегрує датчі, засоби аналітичного опрацювання даних та автоматизації процесів для постійного відстеження рівня забруднення довкілля. Для підвищення ефективності процесів управління навколишнім середовищем інтелектуальні системи спостереження параметрів навколишнього середовища використовують:

- Інтернет речей (IoT).
- Штучний інтелект (AI).
- Аналітичне опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних.

Впровадження інтелектуальних систем спостереження параметрів навколишнього середовища привертає значну увагу в академічних та виробничих колах впродовж останніх років завдяки їхній здатності надавати просторові та часові дані високої роздільної здатності для спостереження та регулювання показників якості повітря та води. Спостереження та регулювання показників якості повітря за допомогою інтелектуальних технологій стає важливим для оцінки концентрації забруднювачів, як от:

- тверді частинки – PM_{2.5} та PM₁₀;
- оксиди азоту – NO_x;
- діоксид сірки – SO₂
- леткі органічні сполуки.

Системи спостереження параметрів повітря на основі Інтернету речей використовують недорогі бездротові сенсорні мережі для збору та передачі даних у режимі реального часу та зберігають дані на хмарні платформи [2], що дає змогу органам влади своєчасно вживати заходів. Моделі на базі штучного інтелекту, включаючи алгоритми машинного навчання, сприяють прогностичній аналітиці для прогнозування тенденцій забруднення на основі історичних даних

Література

1. Ramani, D. Roja, B. Ben Sujitha, and Shrikant Tangade. "Smart Environmental Monitoring Systems: IoT and Sensor-Based Advancements." *Environmental Monitoring Using Artificial Intelligence* (2025): 45-60.
2. Hassan, Ahmed K., et al. "Low-cost iot air quality monitoring station using cloud platform and blockchain technology." *Applied Sciences* 14.13 (2024): 5774.

УДК 004.03

О. Котлінський; І. Вітів; С. Довгалюк

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

РОЗУМНІ МІСТА – КОНЦЕПТИ ТА НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

UDC 004.03

O. Kotlinskyi; I. Vitiv; S. Dovhaliuk

SMART CITIES – CONCEPTS AND RESEARCH DIRECTIONS

Концепція «розумного міста» вперше виникла зосереджується на використанні інформаційних та комунікаційних технологій для покращення інфраструктури та модернізації ресурсних мереж. Широке впровадження інформаційних технологій дало містам можливість покращити безпеку, процеси управління та надання послуг. Не існує загальноприйнятого визначення «розумного міста» [1]. Натомість в науковій літературі існує обширний перелік визначень. Окремі визначення зосереджуються на використанні інформаційних та комунікаційних технологій і сучасної інфраструктури, інші підкреслюють людські ресурси та якість життя. Через відсутність єдиного комплексного визначення, термін «розумне місто» нерідко використовується для опису широкого спектру аспектів розвитку, зокрема інформаційних та комунікаційних технологій, освіти та загальної сталості розвитку міст. «Розумне місто» демонструє перспективи підвищення ефективності у шести ключових сферах:

- економіка;
- люди;
- управління;
- мобільність;
- навколишнє середовище;
- життя.

Воно розвивається завдяки стратегічному поєднанню ресурсів та дій, керованих проактивними, незалежними та поінформованими громадянами. «Розумні міста» пропонують значні економічні переваги, зокрема сприяння інноваціям, заохочення підприємництва, створення нових робочих місць та покращення конкурентної позиції міст. Вони також знижують витрати, одночасно підвищуючи ефективність комунальних послуг, виступаючи каталізатором економічного зростання. Стимулюючи швидкий розвиток, «розумні міста» сприяють зростанню ВВП, підвищують рівень зайнятості та залучають іноземні інвестиції – ключові фактори у відродженні міської економіки.

Інформаційно-технологічні проекти класу «розумне місто» сприяють покращенню стандартів життя, підвищенню конкурентоспроможності міст та подоланню перешкод, як от бідність, соціальна ізоляція чи екологічні проблеми. У сучасних наукових дослідженнях «розумне місто» розглядають з різних точок зору, які охоплюють цифровізацію, мешканців, міську владу, установи та організації, бізнес тощо [2].

Література

1. Al-Msie'deen, Ra'Fat. "Smart city: Definitions, architectures, development life cycle, technologies, application domains, case studies, challenges and opportunities." (2024).
2. Eligüzel, İbrahim Miraç, and Nazmiye Eligüzel. "A Hybrid LDA and Fuzzy CRITIC-MABAC Model for Smart City Ranking." IEEE Access (2025).