

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж»

КвРКІ. 2303212.23.03.09 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-3

  
Підпис

Владислав ТКАЧУК  
Ім'я, прізвище

Керівник к.е.н., доцент  
Науковий ступінь, вчене звання

  
Підпис

Світлана САЧЕНКО  
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент

Ольга ПАВЛОВА 

01 05 2025 р.

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

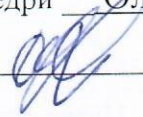
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА



“ 01 ” 09 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Владислав ТКАЧУК

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Керівник проекту (роботи) Світлана САЧЕНКО, к.е.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Аналіз відомих методів та засобів оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Процес оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж \_\_\_\_\_

Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж \_\_\_\_\_

Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

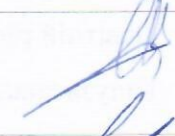


\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагиат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

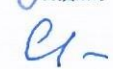
Студент

  
Підпис

Владислав ТКАЧУК

Ім'я, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Світлана САЧЕНКО

Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: «Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж»

Автор роботи: Ткачук Владислав Андрійович

Керівник роботи: Саченко С.І.

Пояснювальна записка: 70 с., 5 рис., 9 табл., 4 дод., 87 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: пристрої IoT, оптимізація, продуктивність, цільова функція, безпілотні літальні апарати.

Об'єктом дослідження є процес оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Предметом дослідження є методи та протоколи забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи забезпечення функціонування систем з IoT, методи математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

На основі проведених досліджень розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж (на Python).

У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку

У другому розділі здійснено дослідження предметної області та визначено стратегію щодо оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

У третьому розділі розроблено цільову функцію оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

У четвертому розділі здійснено розроблення метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку та програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж (на Python).

У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

## ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ .....</b>	<b>8</b>
1.1 Огляд та поняття систем інтелектуальних мереж ... ..	8
1.2 Відомі методи та існуючі засоби оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж .....	16
1.3 Постановка задачі.....	21
1.4 Висновки до першого розділу.....	21
<b>2 ПРОЦЕС ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>22</b>
2.1 Стратегія оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж ....	22
2.2 Особливості відносин для формування класу систем інтелектуальних мереж... ..	31
2.3 Висновки до другого розділу .....	41
<b>3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>43</b>
3.1 Основи застосування та оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж... ..	43
3.2 Цільова функція оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж .....	50
3.3 Висновки до третього розділу.....	64
<b>4 МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>65</b>
4.1 Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.....	65

4.2 Дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж .....	72
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	75
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>76</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>77</b>
<b>ДОДАТОК А Презентація роботи .....</b>	<b>86</b>
<b>ДОДАТОК Б Наукова праця здобувача.....</b>	<b>94</b>
<b>ДОДАТОК В Результати перевірки на плагіат.....</b>	<b>98</b>
<b>ДОДАТОК Г Програмний код моделювання зв'язків між пристроями IoT.....</b>	<b>99</b>

**СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ**

IoT Internet of Things

IT Information Technology

Wi-Fi Wireless Fidelity

БПЛА Безпілотний літальний апарат

## ВСТУП

У сучасному світі використовується широкий спектр обчислювальних систем, і в усіх цих системах енергоефективність і оптимізація продуктивності є надзвичайно важливими. Але оптимізація продуктивності означає різні речі для різних обчислювальних систем. Через відмінність природи обчислювальні системи мають різні вимоги до ефективності та оптимізації. Розподілені системи, такі як системи інтелектуальних мереж, периферійні обчислювальні середовища та системи блокчейн, зосереджені на поведінці агентів. Таким чином, застосування принципів мережевої економіки, таких як теорія ігор і теорія контрактів, може покращити роботу цих систем багатьма способами.

Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж є критично важливою для забезпечення ефективного використання енергії, надійності постачання та зменшення витрат. Інтелектуальні мережі інтегрують традиційні електричні мережі з інформаційно-комунікаційними технологіями, що дозволяє більш гнучко та ефективно управляти потоками енергії.

Актуальність роботи полягає в розробці методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
- розробити цільову функцію для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
- розробити метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА;
- здійснити дослідження методу оптимізації продуктивності систем

інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж.

Об'єктом дослідження є процес оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Предметом дослідження є методи та протоколи забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

На основі проведених досліджень розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж (на Python).

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи забезпечення функціонування систем з IoT, методи математичного моделювання.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [87] у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». (Хмельницький – 2024. – С. 303-305).

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ

## 1.1 Огляд та поняття систем інтелектуальних мереж

Інтелектуальні мережі (або Smart Grid) [1, 2] — це сучасна енергетична система, яка поєднує традиційні енергетичні мережі з цифровими технологіями для підвищення ефективності, надійності та стійкості електропостачання.

Основними характеристиками [3-5] інтелектуальних мереж є цифровізація (використання сенсорів, систем моніторингу та аналізу даних у реальному часі); автоматизація (самостійне регулювання та оптимізація роботи мережі без постійного втручання людини); інтеграція відновлюваних джерел енергії (легке підключення сонячних панелей, вітрових турбін та інших відновлюваних джерел); двосторонній обмін енергією (користувачі можуть бути як споживачами, так і виробниками енергії (проюзерами)); ефективність енергоспоживання (допомога споживачам у зменшенні витрат через інформаційні системи та оптимізоване управління).

Переваги інтелектуальних мереж [6, 7]:

- 1) зниження втрат електроенергії;
- 2) підвищення енергоефективності;
- 3) стабільність постачання навіть під час пікових навантажень;
- 4) швидке реагування на аварійні ситуації;
- 5) екологічність завдяки інтеграції "зеленої" енергії.

Приклади застосування інтелектуальних мереж у світі.

У штаті Каліфорнія широко впроваджуються інтелектуальні мережі для інтеграції великої кількості сонячної та вітрової енергії. Компанія Pacific Gas and Electric (PG&E) використовує розумні лічильники, які дозволяють користувачам відстежувати споживання енергії в реальному часі та регулювати його, щоб зменшити витрати.

У м. Мальме (Швеція, Екологічний район Hylle) створений район як приклад стійкої урбаністики. Використовуються інтелектуальні мережі для управління електроенергією, інтеграції сонячних батарей і батарей для зберігання енергії.

Система забезпечує енергопостачання, знижує викиди CO<sub>2</sub> та сприяє сталому розвитку.

У м. Сеул (Південна Корея) на острові Чеджу є тестовий полігон для новітніх технологій у сфері Smart Grid. Впроваджені системи інтеграції вітрової та сонячної енергії, зарядні станції для електромобілів і розумні лічильники. Проєкт зменшив енергоспоживання та збільшив частку відновлюваних джерел енергії.

У м. Токіо (Японія) апробується технологія автоматизованого відновлення мережі. Після землетрусу 2011 року, компанія ТЕРСО впровадила технології автоматизованого відновлення мереж. Система швидко ідентифікує пошкоджені ділянки та автоматично перенаправляє електроенергію, зменшуючи час відновлення електропостачання.

Місто Остін (США) реалізувало проєкт Austin Energy Smart Grid, який включає інтеграцію розумних лічильників, зарядних станцій для електромобілів і систем управління споживанням. Користувачі отримують можливість економити енергію завдяки динамічному тарифікуванню.

В Індії урядова програма спрямована на модернізацію електромереж через впровадження розумних лічильників та автоматизованих систем. Це дозволило суттєво знизити втрати електроенергії в мережах.

У місті Славутич (Україна) впроваджується пілотний проєкт мікрогрід, що включає сонячні панелі, акумуляторні системи та інтелектуальні рішення для управління енергоспоживанням. Це сприяє енергетичній незалежності міста.

Ці приклади демонструють, як інтелектуальні мережі допомагають забезпечити ефективно, стале та надійне енергопостачання.

Проєкт у місті Славутич (Україна) є одним із перших прикладів впровадження концепції мікрогрід в країні. Це частина ширшої ініціативи щодо інтеграції відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та забезпечення енергетичної незалежності регіонів. Мета проєкту: зменшення залежності міста від зовнішніх джерел електроенергії; використання відновлюваних джерел енергії для забезпечення сталого розвитку; впровадження сучасних технологій енергоменеджменту. Інфраструктура проєкту: сонячні панелі; акумуляторні системи;

розумні лічильники (установлені в домогосподарствах для відстеження та регулювання споживання електроенергії); мікрогрід (локальна мережа, яка може працювати автономно або бути підключеною до національної енергомережі).

В проєкті реалізуються такі інноваційні рішення: використання систем управління енергоспоживанням у реальному часі; оптимізація розподілу енергії за рахунок автоматизованих систем.

Результатами та перевагами мають стати: енергетична незалежність; скорочення викидів CO<sub>2</sub>; створення навчальних програм для поширення досвіду впровадження таких систем в інших містах України. Цей проєкт є важливим кроком для України на шляху до енергетичної незалежності та виконання міжнародних зобов'язань у сфері скорочення викидів вуглецю.

В Україні активно розвиваються проєкти, пов'язані з впровадженням мікрогрід-систем, які сприяють енергетичній незалежності та підвищенню енергоефективності. Прикладом таких ініціатив є мікрогрід-система Хмельницького національного університету. Вона включає: дахову сонячну електростанцію для генерації відновлюваної енергії; когенераційну установку для одночасного виробництва електричної та теплової енергії; газову котельню та електрогенератор для забезпечення резервного живлення; накопичувач електроенергії для зберігання надлишкової енергії; інтегровану систему управління та моніторингу для оптимізації роботи всіх компонентів.

Таким чином, перспективи розвитку інтелектуальних мереж суттєві.

У сучасному світі використовується широкий спектр обчислювальних систем [8, 9], і в усіх цих системах енергоефективність і оптимізація продуктивності є надзвичайно важливими. Але оптимізація продуктивності [10, 11] означає різні речі для різних обчислювальних систем. Через відмінність природи обчислювальні системи мають різні вимоги до ефективності та оптимізації. Розподілені системи, такі як системи інтелектуальних мереж, периферійні обчислювальні середовища та системи блокчейн, зосереджені на поведінці агентів. Таким чином, застосування принципів мережевої економіки, таких як теорія ігор і теорія контрактів, може покращити роботу цих систем багатьма способами.

Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж (Smart Grids) є критично важливою для забезпечення ефективного використання енергії [12], надійності постачання [13] та зменшення витрат [14]. Інтелектуальні мережі інтегрують традиційні електричні мережі з інформаційно-комунікаційними технологіями, що дозволяє більш гнучко та ефективно управляти потоками енергії [15].

Основні підходи до оптимізації продуктивності інтелектуальних мереж [16, 17]:

1. Моніторинг і аналіз даних в реальному часі. Збір і обробка даних з різних частин системи, включаючи дані про споживання, генерацію, стан мережевих компонентів (ліній, трансформаторів) дозволяє миттєво виявляти аномалії та вирішувати проблеми. IoT-сенсори та смарт-лічильники надають постійні оновлення про стан мережі, що дозволяє управляти навантаженнями та обсягами генерації в режимі реального часу.

2. Алгоритми оптимізації керування енергією. Розподілене управління. Застосування децентралізованих алгоритмів для оптимізації роботи окремих частин мережі (генераторів, споживачів, батарей) дозволяє уникнути перевантажень та знижувати втрати. Оптимізація розподілу навантаження (Load Balancing). Алгоритми, що враховують попит, можуть перерозподіляти енергію між різними зонами мережі для підтримки балансу та уникнення пікових навантажень. Автоматичне переключення джерел енергії. Використання відновлюваних джерел енергії (сонячних, вітрових) у поєднанні з традиційними, що дозволяє мінімізувати використання дорогих чи екологічно шкідливих джерел.

3. Прогностичне технічне обслуговування. Машинне навчання та аналітика даних дозволяють передбачати можливі поломки обладнання, аналізуючи його історичні дані. Це допомагає зменшити кількість аварій і збільшує час безперебійної роботи. Алгоритми прогнозування попиту на основі історичних даних і факторів, як погода, дозволяють краще планувати використання ресурсів.

4. Інтеграція відновлюваних джерел енергії. Оптимізація генерації з відновлюваних джерел (сонячні панелі, вітрові турбіни) з урахуванням мінливості їх виробництва. Інтеграція з системами зберігання енергії. Використання батарей або

інших засобів накопичення енергії для збереження надлишкової енергії, коли її генерація перевищує попит, та її використання під час пікових навантажень.

5. Динамічні тарифи та управління попитом (Demand Response). Запровадження тарифів на електроенергію, які змінюються в залежності від часу доби або стану мережі, стимулює споживачів до використання енергії у періоди, коли попит низький. Впровадження технологій і рішень, що дозволяють автоматично коригувати споживання енергії в пікові моменти або в разі нестачі енергії в системі.

6. Оптимізація потужності та розподільних мереж. Інтелектуальні трансформатори та перемикачі. Вони можуть автоматично адаптуватися до змін попиту і генерації, що зменшує втрати потужності і підвищує ефективність розподілу. Оптимізація топології мережі. Алгоритми можуть перебудовувати маршрути енергії через мережу, щоб мінімізувати втрати або уникнути перевантажень.

7. Кібербезпека та стійкість. Інтелектуальні мережі можуть бути вразливими до кібератак, тому необхідно впроваджувати рішення з кібербезпеки для захисту мережевих елементів, таких як лічильники, датчики і системи управління. Оптимізація повинна включати плани на випадок аварій та відновлення систем після серйозних збоїв чи кібератак.

8. Розподілена генерація та мікромережі. Локальні інтелектуальні мережі, які можуть працювати незалежно від основної енергетичної системи, забезпечуючи автономну роботу в кризових ситуаціях. Оптимізація місцевих джерел енергії (сонячних, вітрових установок), що зменшує навантаження на центральну мережу та покращує надійність постачання.

Технології для оптимізації інтелектуальних мереж [18, 19].

Штучний інтелект (AI) та машинне навчання. Використовується для прогнозування попиту та генерації, а також для управління навантаженням і розподілом енергії.

Блокчейн. Для децентралізованого управління транзакціями енергії, зокрема у випадках розподіленої генерації.

Хмарні технології та обчислення на периферії (Edge Computing). Для обробки великих обсягів даних з пристроїв IoT і забезпечення оперативності прийняття

рішень.

Оптимізація продуктивності інтелектуальних мереж передбачає використання широкого спектру технологій і підходів [20], спрямованих на забезпечення стабільного, ефективного та надійного функціонування енергетичної системи, здатної адаптуватися до сучасних викликів, таких як збільшення частки відновлюваних джерел енергії та зростання попиту на енергію.

Розгортання інтелектуальних мереж (Smart Grid) є складним процесом, який супроводжується різноманітними проблемами. Технічні виклики можна поділити на кілька основних категорій [21, 22].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Нерівномірність генерації енергії. Сонячні та вітрові електростанції генерують енергію залежно від погодних умов, що призводить до нестабільності в мережі [23, 24]. Можна використовувати акумуляторні системи (енергосховища) для згладжування піків та провалів. Реверсивний потік енергії. У розподільчих мережах ВДЕ можуть створювати зворотний потік енергії, що ускладнює балансування. Тому, потрібно удосконалення інверторів та систем управління потужністю. Сумісність із традиційною інфраструктурою. Застарілі мережі. Багато існуючих мереж не розраховані на динамічне управління або двосторонній потік енергії. Тому, необхідні оновлення трансформаторів, ліній передачі та впровадження розумних лічильників [25, 26]. Різні компоненти мереж часто використовують несумісні стандарти в контексті протоколів зв'язку. Тому, актуальним є розробка єдиних стандартів обміну даними, таких як IEC 61850. Уразливість до атак. Smart Grid використовує цифрові системи управління, що робить їх ціллю для кібератак. Потрібно використовувати шифрування, багаторівневий захист та регулярні аудити безпеки. Дані споживачів і комерційна інформація повинні бути захищені від витоку. Потрібне обов'язкове впровадження строгих політик конфіденційності [27, 28]. Масштабованість і управління даними. Великий обсяг даних. Система генерує велику кількість даних у реальному часі, що ускладнює їх обробку. Використання технологій Big Data, хмарних сервісів та машинного навчання для аналізу. Управління трафіком. Затримки в передачі даних можуть спричинити помилки в управлінні мережею. Впровадження мереж із низькою

затримкою (наприклад, 5G). Управління та стабільність системи. Реакція на аварії. Автоматичні системи повинні вчасно виявляти та реагувати на аварійні ситуації. Використання систем SCADA для моніторингу та оперативного реагування [29]. Високий рівень інтеграції ВДЕ може порушити стабільність частоти в мережі. Тому, потрібна інтеграція швидких регуляторів частоти, таких як батарейні системи. Оновлення інфраструктури потребує значних інвестицій. Залучення державних і приватних інвесторів, створення стимулів для користувачів. Інженери та технічний персонал повинні мати відповідну кваліфікацію [30, 31]. Таким чином, розгортання інтелектуальних мереж вимагає вирішення як технічних, так і організаційних завдань. Успішне впровадження можливе за умови співпраці всіх зацікавлених сторін, розробки єдиних стандартів та впровадження сучасних технологій управління.

Оптимізація продуктивності [32] систем інтелектуальних мереж (Smart Grid) є складним завданням, оскільки потребує врахування багатьох факторів, включно з технічними, економічними, екологічними та соціальними аспектами. Основні проблеми в цьому контексті можна виділити в кількох ключових сферах. Баланс між попитом і пропозицією. Інтелектуальні мережі повинні забезпечувати динамічний баланс між виробництвом електроенергії та її споживанням у реальному часі. Непередбачуваність споживання та генерації (особливо у випадку відновлюваних джерел енергії) ускладнює цей процес. Потенційним рішенням є використання алгоритмів прогнозування попиту, технологій машинного навчання та оптимізованих систем управління енергетичними ресурсами [33, 34]. Ефективне використання енергетичних ресурсів. Інтелектуальні мережі повинні мінімізувати втрати енергії під час її передачі, розподілу та зберігання. Тому, потрібно здійснити інтеграцію [35, 36] технологій розподіленої генерації (сонячні панелі, вітрові турбіни), впроваджувати високоефективні системи енергосховищ, оптимізувати маршрутизації енергії через розумні лінії передачі, управляти піковими навантаженнями. Пікові навантаження можуть перевищувати можливості системи, що призводить до перевантажень і навіть відключень. Застосування технологій управління попитом (Demand Response) [37, 38], які стимулюють споживачів змінювати графік споживання. Використання розумних лічильників для диференційованого тарифікування (підвищення тарифів у

години пікового навантаження). Оптимізація роботи систем зберігання енергії. Системи зберігання [39, 40] повинні ефективно працювати для згладжування коливань у генерації та споживанні, але їх продуктивність може знижуватись через знос, низьку енергоефективність або погане управління. Використання гібридних систем зберігання (наприклад, поєднання акумуляторів і суперконденсаторів). Алгоритми управління зарядом і розрядом для зменшення зносу батарей. Оптимізація інфраструктури передачі [41]. Мережі високої напруги та розподільчі лінії можуть мати значні втрати енергії, особливо на великих відстанях. Впровадження технологій HVDC (лінії постійного струму високої напруги) [42, 43] для передачі на великі відстані. Моніторинг стану ліній у реальному часі (технології IoT) для виявлення втрат. Обробка та аналіз даних. Інтелектуальні мережі генерують велику кількість даних, які необхідно обробляти в реальному часі для прийняття оптимальних рішень. Використання хмарних обчислень для масштабованості та доступності ресурсів. Алгоритми штучного інтелекту для швидкої обробки даних і прийняття рішень. Масштабованість системи [44, 45]. Розширення мережі (додавання нових джерел генерації, накопичувачів або споживачів) часто викликає проблеми з продуктивністю через недостатню гнучкість системи. Впровадження модульних і адаптивних архітектур. Децентралізоване управління [46, 47] мережею через локальні мікрогрід-системи. Вплив зовнішніх факторів. Зміни погоди, природні катастрофи та людський фактор можуть впливати на ефективність роботи мережі. Інтеграція технологій прогнозування погоди для управління відновлюваними джерелами. Використання автономних систем для автоматичного відновлення мережі після аварій [48, 49].

Тому, оптимізація продуктивності інтелектуальних мереж залежить від здатності ефективно управляти енергетичними ресурсами, мінімізувати втрати та забезпечувати стабільність системи навіть у несприятливих умовах. Це вимагає інтеграції сучасних технологій, таких як штучний інтелект, Big Data, IoT і розподілені системи управління.

## 1.2 Відомі методи та існуючі засоби оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Кількість енергії, що споживається обчислювальними та комунікаційними пристроями, швидко зростає. Незважаючи на те, що багато зусиль доклали на розробку енергоефективних систем, зростаюча кількість пристроїв, що використовуються, призвели до експоненціального зростання загального споживання енергоносіїв інформації та комунікацій (ІКТ) у 21 столітті [50]. Розвиток IoT (Інтернет речей) та цифрова економіка збільшили попит на ІКТ-послуги [51]. Споживання енергії за допомогою ІКТ зазвичай ділиться на чотири основні категорії: споживчі пристрої, включаючи персональні комп'ютери, мобільні телефони, телевізори та домашні розважальні системи [52, 53]: комп'ютерні мережі; обчислення та зберігання центрів обробки даних; виробництво обладнання ІКТ.

Порівняно з початком десятиліття кількість споживаних споживчих пристроїв, як прогнозується [54], буде аналогічно кількості енергії, споживаної центрами обробки даних. При цьому очікується, що споживчі пристрої дещо зменшать споживання енергії. Швидкий розвиток хмарних обчислень, а також Інтернет речей є можливими поясненнями цієї тенденції. Хоча деякі нові дані показують, що цей прогноз був завищений [55]. Доступні прогнози підтверджують, що загальна тенденція не зміниться в найближчі кілька років. Економія енергії може бути отримана багатьма способами залежно від розглянутої системи. Підходи, представлені в літературі, зазвичай стосуються одного процесора [56], центру обробки даних [57] (багатопроцесорні системи) та комп'ютерні мережі [58]. Енергія, що використовується пристроями ІКТ, залежить від їх логіки, архітектури та експлуатації. Контроль системних операцій шляхом призначення ресурсів (процесорів) виявився дуже ефективним. Більше того, методологія, розроблена в рамках теорії планування, дуже корисна в цьому контексті [59, 60].

Існує два загальних підходи [61] до економії енергії в обчислювальних системах. Перший заснований на виборі підмножини ядер, процесорів чи інших елементів інфраструктури, щоб бути активними за певний період часу, що дозволяє

решти переходити в режим сну, щоб вони не споживали енергію. Інший підхід використовує той факт, що існує взаємозв'язок між використанням електроенергії та швидкістю виконання роботи, яка може бути використана для збалансування споживання енергії та ефективності обчислень.

У роботі [62] представлено опитування математичних моделей, корисних для проектування та експлуатації систем, що знаходяться в енергетиці. Розглянуто дві проблеми, які необхідно враховувати під час моделювання обчислювальних систем, що знаходяться в енергії. Перша - це продуктивність системи. Методи, що використовуються для зменшення споживання енергії, повинні гарантувати необхідні QoS, зокрема, час обчислення. Друга - це підвищення ефективності використовуваного ресурсу, що призводить до збільшення загального споживання цього ресурсу через зменшення витрат.

У роботі [63] розгортається сторонній агент, який навчає оптимальне рішення користувача про вивантаження задачі на БПЛА та/або наземний сервер для мінімізації затримки виконання завдання та енергоспоживання користувачів, на основі комбінації алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання. Агент обмінюється інформацією з користувачами, БПЛА та сервером З ПЕРИФЕРІЙНИМИ ПРИСТРОЯМИ ДЛЯ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ, щоб вивчити оптимальну стратегію, яка в кінцевому підсумку повідомляється користувачеві.

У роботі [64] запроваджено підхід навчання з використанням кількох агентів з підкріпленням для визначення оптимального розподілу завдань користувачів на хмарний БПЛА з одночасним урахуванням взаємозалежностей обчислювальних завдань, умов зв'язку з хмарним БПЛА та енергетичних обмежень останнього. Автори розробляють алгоритм для виконання прийняття рішень про розвантаження завдання та алгоритм для зниження вартості навчання.

Проблема [65, 66] оптимального планування траєкторії БПЛА для обслуговування наземних користувачів, враховуючи при цьому кілька фізичних обмежень, таких як споживання енергії БПЛА, мобільність користувачів та пріоритет обчислень, привернула значний інтерес у сучасних дослідженнях.

У роботі [67, 68] вивчення траєкторії та асоціювання користувачів з БПЛА здійснюється шляхом максимізації загальної частоти реєстрації користувачів, головним чином зосереджуючись на вдосконаленні продуктивності зв'язку та враховуючи статичних користувачів. Ця структура була розширена для мобільних користувачів шляхом прийняття алгоритму стохастичного градієнтного підйому для визначення траєкторії БПЛА.

Новий підхід до визначення оптимальної траєкторії руху БПЛА запропоновано в [69] шляхом мінімізації середнього віку інформації даних, зібраних користувачами. Автори розглядають як обмеження час, який необхідний для того, щоб пристрої користувачів могли зібрати енергію з БПЛА. Крім того, автори в [70] вводять механізм формування коаліції на основі підкріплення серед наземних користувачів для визначення оптимальної траєкторії БПЛА шляхом вирішення оптимізаційної задачі максимізації загальної енергетичної доступності голів коаліції.

Проблема енергоефективних периферійних обчислень стає ще складнішою, якщо розглядати технології з використанням БПЛА, а також планування траєкторії польоту БПЛА. У роботі [71] розглянуто мобільних користувачів та сервери, встановлені на БПЛА, де останні виконують подвійний глибокий алгоритм Q-мережі для визначення траєкторії БПЛА відповідно до місцезнаходження користувачів та їхніх обмежень QoS. Оптимальне часткове розвантаження обчислювальної задачі розглянуто в роботі [72], де користувачі можуть вивантажити частину своїх обчислювальних завдань на БПЛА, а решту обробити локально. У напрямку визначення оптимальних стратегій розвантаження завдань користувачів вирішується проблема мінімізації загального споживання енергії користувачами, одночасно оптимізуючи розподіл даних, розподіл ресурсів і траєкторію руху БПЛА. Аналогічно в роботі [73] визначається оптимальне навантаження на обчислювальні завдання користувачів і траєкторія руху БПЛА шляхом мінімізації середньозваженого споживання енергії користувачами і БПЛА, враховуючи при цьому фізичні обмеження системи. Початкову задачу спільної оптимізації розподіляють роботи [74] на три

підзадачі (розвантаження задач, розподіл ресурсів і траєкторія польоту) і застосовують для їх вирішення підхід, заснований на Ляпунові. У роботі [75] сформульовано проблему мінімізації загального споживання енергії користувачами в умовах обмежень QoS користувачів, затримки користувачів та доступності енергії БПЛА. Технологія послідовного опуклого наближення використовується для вирішення задачі обмеженої оптимізації та визначення оптимального розвантаження завдання користувачами та траєкторії руху БПЛА. У роботі [76] навчання з підкріпленням використовується для спільної оптимізації досягнутого користувачами QoS шляхом розподілу завдань на БПЛА, а також планування шляху БПЛА. Основною новизною у роботі [77] є прийняття сигмоїдальної функції для зображення вимог користувачів до QoS і керування введеним алгоритмом навчання з підкріпленням для максимального досягнення користувачами QoS.

Апаратні прискорювачі, і особливо нейронні процесори, були включені для підтримки виконання глибоких нейронних мереж з інтенсивними обчисленнями на периферії. Основою периферійного NPU є масив 8-бітних блоків множення-накопичення, який значно прискорює обчислення, необхідні на різних етапах виконання. У роботі [78] використано наближені обчислення і запропоновано наближений прискорювач з точною конфігурацією, який використовує перенастроювані під час виконання блоків. Виходячи з вагових коефіцієнтів, вони вирішують рівень наближення, який слід ввести у виконанні множення, щоб задовольнити конкретний поріг точності, максимізуючи при цьому приріст енергії. Цей трудомісткий метод не масштабується і вимагає застосункових схем, що індукують площу над головою. Аналогічно у роботі [79] замінюють точні одиниці на більш енергоефективні наближені і контролюють введenu помилку за допомогою пошарового зіставлення шаблонів. У роботі [80] автори також використовують наближені множники, однак конструкція не піддається переналаштуванню, тому точні операції не підтримуються, а обмеження точності не завжди можуть бути задоволені. Інший підхід для наближених обчислень полягає у зменшенні кількості бітів, на яких працюють процесори.

До теперішнього часу були виконані обмежені дослідні роботи в області спільної експлуатації БПЛА [81-84] і технологій наближених обчислень для забезпечення енергоефективних рішень периферійних обчислень, з урахуванням вимог до QoS вузлів IoT [85]. Останнім часом були представлені повністю автономні повітряні системи. Деякі програми, такі як доповнена реальність, автономне водіння, розумне сільське господарство, мають конкретні мінімальні вимоги до QoS, а «сліпа» максимізація QoS призводить до енергетичної неефективності, збільшення вартості та ресурсного голодування системи. До цього часу обмежені дослідницькі зусилля були спрямовані на використання переваг ігор задоволення в комунікаціях і комп'ютерних середовищах, в той час як акцент був зроблений на вивченні традиційних проблем управління живленням на рівні доступу [86].

Складною проблемою [87] є надання енергоефективного рішення для периферійних обчислень та розумне використання ресурсів систем інтелектуальних мереж шляхом включення конкретних мінімальних вимог до вузлів IoT та їх задоволення за допомогою інтелектуальної структури ресурсів.

Таким чином, дослідження архітектури та продуктивності різних систем інтелектуальних мереж [87], тобто систем розумних ґридів, систем периферійних обчислень, систем блокчейн та цифрових контролерів для різних систем, є перспективним. Продуктивність є найважливішим аспектом дослідження. Для її забезпечення необхідно розробити моделі систем для задоволення затримок, пропускної здатності та потреб в енергії, а також оптимізувати продуктивність запропонованих архітектур та рішень. В якості дослідження будемо розглядати розумне середовище IoT, яке складається з областей інтересів (OI), де розташовані пристрої IoT, що виконують програми. Базова станція оснащена сервером для під'єднання периферійних пристроїв з множинним доступом і розташована в інтелектуальному середовищі IoT, а БПЛА автономно знаходиться над територією, щоб застосунково обслуговувати обчислювальний контролер вузлів IoT. Вузли IoT мають персоналізовані мінімальні передумови, тобто затримку, споживання енергії та прийнятний рівень падіння точності висновків.

### 1.3 Постановка задачі

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
- розробити цільову функцію для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
- розробити метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА;
- здійснити дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж.

### 1.4 Висновки до першого розділу

Проаналізовано відомі методи та засоби оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж. Встановлено недоліки і проблеми при організації забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

## 2 ПРОЦЕС ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ

### 2.1 Стратегія оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Системи інтелектуальних мереж стали невід'ємною частиною сучасного життя, тому постійне вдосконалення їх продуктивності набуває все більшого значення. Однією з ключових проблем є енергоефективність, адже системи інтелектуальних мереж можуть споживати значні обсяги енергії, що веде до високих експлуатаційних витрат і негативного впливу на довкілля. Продуктивність і енергоспоживання систем інтелектуальних мереж значно залежать від їхньої архітектури, типу виконуваних завдань, а також використаного апаратного і програмного забезпечення. Підвищити енергоефективність і продуктивність можна за допомогою оптимізації на системному рівні, зокрема через удосконалення архітектури та впровадження ефективніших алгоритмів. Завдяки високорівневій оптимізації можна одночасно досягти суттєвого зменшення енергоспоживання та покращення продуктивності.

У той же час кожна система інтелектуальних мереж має свої специфічні вимоги для досягнення ефективності. Наприклад, у розподілених системах з кількома агентами, таких як інтелектуальні енергетичні мережі, Інтернет речей або блокчейн, ключовим завданням є координація дій агентів для досягнення оптимальних результатів для всіх учасників. У системах інтелектуальних мереж важливо забезпечити баланс між економічною вигодою споживачів і ефективним споживанням енергії. У блокчейні користувачі повинні діяти чесно, щоб підтримувати ефективність системи, уникаючи зловмисних моделей поведінки. У периферійних обчисленнях мобільні пристрої, обмежені ресурсами, мають виконувати обчислювально інтенсивні завдання, що потребує спеціальних підходів до оптимізації.

Для вирішення цих завдань застосовують такі інструменти, як теорія ігор або теорія контрактів з мережевої економіки, які допомагають розробляти алгоритми для підвищення енергоефективності та продуктивності. У спеціалізованих системах, наприклад, у квантових обчисленнях, необхідні адаптовані механізми управління, що

забезпечують коректну роботу. Основний акцент у таких системах інтелектуальних мереж робиться на покращенні часу відгуку та пропускної здатності, що є вирішальними для їхньої ефективності.

Дослідження архітектури та ефективності різних типів інтелектуальних мереж, включаючи розумні ґриди, периферійні обчислення, блокчейн-системи та цифрові контролери, є перспективним напрямком. Основний акцент у цих дослідженнях робиться на продуктивності систем. Для її забезпечення необхідно створювати моделі, які відповідають вимогам щодо затримки, пропускної здатності та енергоспоживання, а також оптимізувати запропоновані архітектури та рішення.

Розглянемо у якості досліджуваного об'єкту розумне середовище IoT, що складається з зон інтересів, у яких розташовані пристрої IoT, що виконують різні завдання. У цьому середовищі базова станція, оснащена сервером, забезпечує підключення периферійних пристроїв із множинним доступом. Також, у зоні діє автономний безпілотний літальний апарат, який застосунково виконує роль обчислювального контролеру для вузлів IoT. Кожен вузол IoT має свої унікальні вимоги, зокрема щодо затримки, енергоспоживання та допустимого рівня зниження точності обчислень. Тобто, розглянемо клас задач, в якому передбачено оптимізацію продуктивності систем інтелектуальних мереж з такими складовими частинами: пристрої IoT; базова станція, яку оснащено сервером, і яка забезпечує підключення периферійних пристроїв із множинним доступом; автономний безпілотний літальний апарат в якості застосункового контролеру для вузлів IoT. Багато реальних завдань інформатизації можна привести до такої моделі систем інтелектуальних мереж. Тоді, отримані результати щодо оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в такій конфігурації архітектури можуть бути застосовні для цього розглядуваного класу. Для здійснення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж потрібно розробити метод. Але попередньо для забезпечення основ необхідним є розроблення моделі архітектури систем інтелектуальних мереж для цього визначеного класу з пристроями IoT, базовою станцією, автономним безпілотним літальним апаратом.

Схему, яка ілюструє складові загальної архітектури інтелектуальних мереж

зображено на рис. 2.1. Вона включає пристрої IoT, базову станцію із сервером для підключення периферійних пристроїв, а також автономний безпілотний літальний апарат як застосунковий контролер для вузлів IoT.

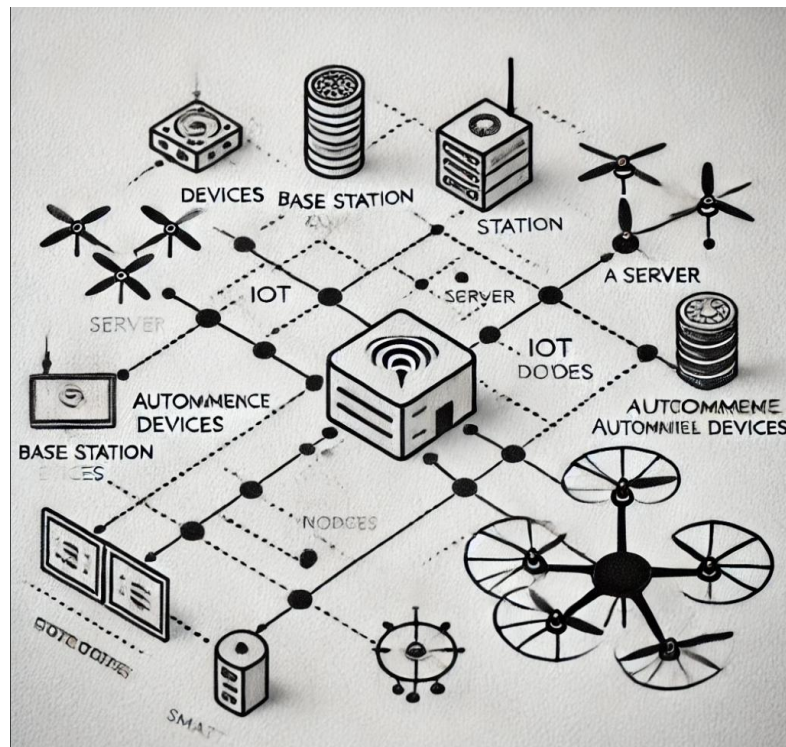


Рисунок 2.1 - Схема, яка ілюструє складові загальної архітектури інтелектуальних мереж

Загальна архітектура інтелектуальних мереж з виділеним БПЛА та сервером зображена на рис. 2.2.

Для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж із визначеною на рис. 2.2 архітектурою потрібно описати процес оптимізації та задати його цільовою функцією в якості моделі.

Задамо архітектуру розглядуваного класу систем інтелектуальних мереж моделлю так:

$$M_{in} = \langle P_{IoT}, S, D, G \rangle, \quad (2.1)$$

де  $P_{IoT}$  - пристрої IoT;  $S$  - базова станція із сервером для підключення периферійних пристроїв;  $D$  - автономний безпілотний літальний апарат;  $G$  – граф зв'язків, який включає дротовий та бездротовий зв'язок за певними топологіями.



Рисунок 2.2 - Загальна архітектура інтелектуальних мереж з виділенням БПЛА та сервером

Задача оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж сформульована для визначення оптимального часткового вивантаження завдань вузлів IoT на сервер з периферійними пристроями для множинного доступу або БПЛА, якщо останній коливається вище ОІ вузлів IoT. Рівновага визначається для забезпечення задоволення вузлами IoT своїх мінімальних вимог, якщо це можливо на основі загальних доступних обчислювальних ресурсів системи та стійкості вузлів до помилок. Крім того, враховуватимемо особливості концепції щодо узагальненої рівноваги, коли деякі вузли IoT задовольняють свої мінімальні передумови, тоді як деякі інші вузли не можуть досягти свого задоволення через обмежені обчислювальні ресурси. Останній результат живить набір алгоритмів навчання з підкріпленням, які слідує теорії машинного навчання для визначення оптимальної траєкторії БПЛА,

спрямованих на підвищення задоволеності вузлів IoT шляхом надання застосункових обчислювальних функцій і потужності.

Уся разом архітектура формуватиме інтелектуальне середовище IoT, що складається з декількох областей інтересів з периферійними пристроями для множинного доступу до серверу (рис. 2.2) і БПЛА, який літає серед ОІ, щоб доповнити обчислювальні можливості системи. Система інтелектуальних мереж використовує різні процесори, які мають різну обчислювальну точність і пропускну здатність, що дозволяє інтелектуально адаптуватися до обчислювальних даних вузлів IoT відповідно до конкретних вимог до точності.

Граф, побудований на основі останньої схеми з рис. 2.2, відображає граф  $G$  з формули (2.1) і зображений на рис. 2.3. Він показує зв'язки між сервером, базовою станцією, IoT-пристроями та безпілотним літальним апаратом.

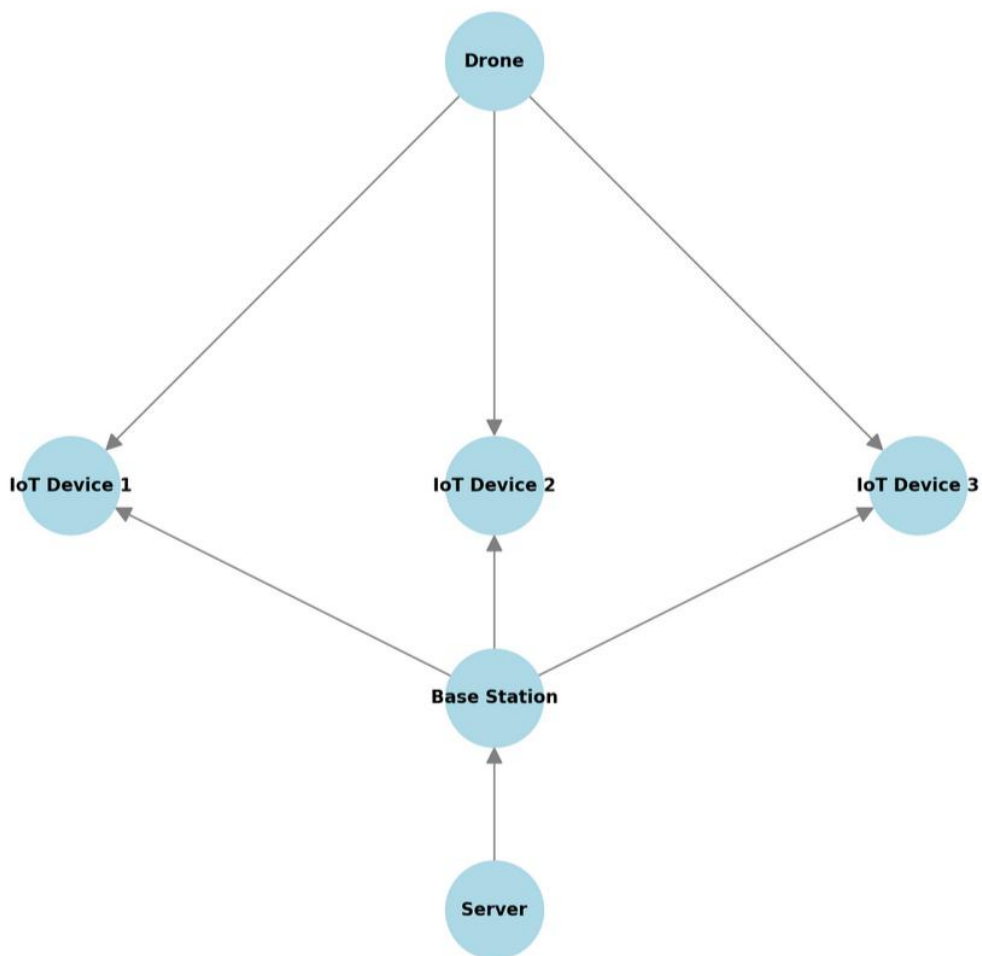


Рисунок 2.3 - граф  $G$  з формули (2.1)

Енергозберігаюче рішення для периферійних обчислень представлено згідно обчислювальних спроможностей серверу з периферійними пристроями для множинного доступу та БПЛА, компромісу між точністю та пропускнуою здатністю та мінімальними вимогами до серверів IoT. Зокрема, оптимізаційна задача формулюється серед вузлів IoT для визначення їх оптимальних рішень щодо часткового вивантаження обчислювальних завдань на сервер з периферійними пристроями для множинного доступу або на БПЛА, якщо останнє коливається вище їх ОІ. Алгоритм розподіленого навчання визначає рівновагу щодо задоволення вузлів IoT частково або повністю з їх мінімальним обмеженням затримки та споживання енергії.

Оптимальну траєкторію БПЛА визначатимемо набором алгоритмів навчання з підкріпленням градієнтного підйому. Алгоритми повинні враховувати його енергоспоживання для навігації і для обробки обчислювальних завдань вузлів IoT, а також задоволення обчислювальних потреб вузлів IoT.

З появою різноманітних мобільних послуг, таких як охорона безпеки та охорона здоров'я, інтелектуальний транспорт, моніторинг навколишнього середовища та поява Інтернету речей, було впроваджено різноманітні мережеві служби та застосунки для підтримки розумних застосунків. Такі сучасні програми стають все більш і більш вимогливими до обчислень, вимагаючи також низької затримки. Однак вузли IoT характеризуються обмеженою ємністю акумулятора та низькою обчислювальною здатністю. Таким чином, периферійні обчислення з множинним доступом були визнані перспективним рішенням для вирішення цих проблем шляхом наближення обчислювальних функціональних можливостей до вузлів IoT. На додаток до технології множинного доступу, безпілотні літальні апарати використовуються для підтримки як збільшених зв'язку та обчислювальних потреб середовищ IoT, виконуючи роль повітряних мобільних базових станцій та периферійних серверів відповідно. Крім того, вузли IoT мають різні вимоги до якості обслуговування, орієнтовані на застосунки. Таким чином, задоволення мінімальних вимог вузлів IoT до якості обслуговування з метою ефективною підтримки відповідних застосунків IoT без сліпої максимізації їх витрат може призвести до значної економії ресурсів, як для

системи IoT, так і для вузлів. Крім того, глибокі нейронні мережі (ГНМ) стали рушійною силою для вузлів IoT і, зокрема, мобільних пристроїв. Багато сервісів значною мірою покладаються на використання ГНМ, таких як виявлення об'єктів, обробка природної мови та програми віртуальної/доповненої реальності. ГНМ мають підвищену стійкість до помилок, що робить їх кандидатом для апроксимації за допомогою зменшення обчислювальної точності. Відповідно до принципу наближених обчислень, ГНМ можуть поступатися точністю обчислень, щоб ще більше скоротити час виконання та/або споживання енергії вузлами IoT. Для підтримки таких операцій гетерогенні прискорювачі ГНМ виникають як домінуюча архітектура для збалансування точності, пропускну здатності та споживання енергії. Такі прискорювачі інтегрують різні обчислювальні компоненти, адаптовані до потреб ГНМ. Тому, доцільно поєднувати ці дві концепції і використати гетерогенний наближений прискорювач ГНМ для подальшого покращення продуктивності.

Проектування енергоефективної моделі периферійних обчислень є актуальним завданням для розглядуваного класу задач згідно моделі, яку подано формулою (2.1) та схеми на рис. 2.2. З появою різноманітних мобільних послуг, таких як захист безпеки та моніторинг здоров'я, інтелектуальний транспорт та моніторинг навколишнього середовища, а також появою Інтернету речей (IoT), було впроваджено різноманітні мережеві служби та програми для підтримки розумних застосунків. Такі сучасні програми стають все більш і більш вимогливими до обчислень, вимагаючи також низької затримки. Однак вузли IoT характеризуються обмеженою ємністю акумулятора та низькою обчислювальною здатністю. Для підтримки такого середовища IoT потрібне ефективне рішення.

Розробка протоколу управління реакцією на попит для систем Smart Grid є актуальною, оскільки від якості протоколу залежить витрата електроенергії для забезпечення комунікації. У системах інтелектуальних мереж важливим питанням є проблема управління реакцією на попит щодо того, як врахувати персоналізоване споживання електроенергії та динамічну поведінку виробника. Крім того, ще більш складним завданням є забезпечення безперебійної взаємодії між ринком електроенергії, а також фіксація їхніх економічних відносин щодо обох сторін

конкуруючих інтересів та прийняття взаємоприйнятних рішень, які спільно максимізують їх прибуток.

У технології блокчейн механізм голосування більшості може сприяти стабільній поведінці виборців, оскільки виборці винагороджуються лише в тому випадку, якщо вони згодні з результатами більшості. З цієї причини для правдивого вилучення суб'єктивних даних необхідний протокол. Зокрема, алгоритм необхідний, щоб виборці були заохочені до чесного звітування. У міру розвитку обчислювальних систем зростає потреба в розробці адекватної системи управління, яка могла б безперешкодно поєднувати різні компоненти складної системи. Електричні системи керування, що використовуються для квантових обчислень, стають все більш складними, оскільки численні технології інтегрують більшу кількість кубітів і вимагають більш високої точності операцій. Хоча різні системи мають багато спільного, тривалість імпульсу, пропускну здатність, зворотний зв'язок у реальному часі та вимоги до затримки сильно варіюються залежно від типу кубіта. Найпоширеніший спосіб виконання квантових вентилів у квантовому комп'ютері з захопленими іонами використовує модульовані лазерні імпульси, які взаємодіють з іонними кубітами. Ці імпульси керуються за допомогою радіочастотних сигналів, які модулюють їх час, частоту, фазу та амплітуду за допомогою акустооптичних модуляторів. Система управління зі зворотним зв'язком необхідна для управління цими радіочастотними сигналами при аналізі даних імпульсів в режимі реального часу.

Планування траєкторії БПЛА потрібно здійснювати на основі навчання з підкріпленням. Перевагами використання механізму навчання з підкріпленням є те, що дозволяє БПЛА повністю автономно визначати свою оптимальну траєкторію. Прийнята та ж топологія інтелектуального середовища IoT, як і для постійного використання. Розглянемо фіксовані вимоги до обчислень для вузлів IoT і відсутність мобільності, щоб оцінити чисті переваги механізму навчання з підкріпленням. На кожній ітерації механізму навчання з підкріпленням БПЛА робить оптимальний вибір ОІ для відвідування і пропозиції своїх обчислювальних послуг, він отримує винагороду і оновлює ймовірність відвідування ще одного ОІ в наступній ітерації.

Якщо розумне середовище IoT залишається статичним, то БПЛА в кінцевому підсумку навчиться оптимальному вибору ОІ після проведення ретельного дослідження та використання його доступних варіантів. Крім того, на кожній ітерації БПЛА робить оптимальний вибір ОІ для відвідування на основі знань, які він отримав до цього часу, взаємодіючи з інтелектуальним середовищем IoT. Результати показують, що алгоритму потрібно більше часу для збіжності до стабільного вибору ОІ. Цей результат впливає з того факту, що він виконує більш ретельне дослідження доступних варіантів ОІ та дозволяє БПЛА ймовірно вибирати ОІ, який забезпечує найвищу винагороду. Таким чином, алгоритм виконує дуже обмежене дослідження альтернативного ОІ і швидше сходиться до стабільного вибору. Інтелектуальне середовище IoT розглядається з вузлами ОІ, що знаходяться на кожному ОІ. Вибір ОІ на основі навчання з підкріпленням, проведений БПЛА, призводить до більш високої досягнутої винагороди БПЛА порівняно з усіма іншими сценаріями. Детальні результати, отримані в результаті цього експерименту будуть відображати на основі планування траєкторії БПЛА з підтримкою навчання з підкріпленням. БПЛА досягає задоволення більшої частини вузлів IoT, обробляючи більше їх даних, задовольняючи при цьому їх вимоги до затримки та споживання енергії. Крім того, планування траєкторії на основі навчання з підкріпленням дозволяє БПЛА з точки зору переміщення між ОІ задовольняти вимоги вузлів IoT. На противагу цьому, коли БПЛА вирішує завжди відвідувати ОІ з максимальною кількістю вузлів IoT, то БПЛА досягає найнижчої винагороди.

Таким чином, отримано модель для класу систем інтелектуальних мереж, яка відрізняється тим, що включає пристрої IoT, сервер з множинним доступом та БПЛА для підтримки комунікації. Все це сукупно розглядається для цього класу систем інтелектуальних мереж в контексті оптимізації продуктивності, зокрема за критерієм енергоефективності. В результаті розроблено процес оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж. Задача оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж сформульована для визначення оптимального часткового вивантаження завдань вузлів IoT на сервер з периферійними пристроями для множинного доступу або БПЛА, якщо останній коливається вище ОІ вузлів IoT.

## 2.2 Особливості відносин для формування класу систем інтелектуальних мереж

Здійнемо аналіз масштабованості фреймворку енергоефективних периферійних обчислень для дослідження його ефективності та надійності у великомасштабному середовищі IoT. Інтелектуальне середовище IoT потрібно моделювати за допомогою великої кількості вузлів IoT, які повинні окремо знаходитись в кожному ОІ при кожній симуляції, тобто загальна кількість вузлів IoT становитиме велику кількість окремо в кожні ОІ при кожній симуляції. Тоді, можна отримати представлення загального відсотку задоволених вузлів IoT у досліджуваному інтелектуальному середовищі IoT. Повторні вимоги обчислювальних завдань вузлів IoT вважатимемо однорідними з міркувань справедливості в аналізі масштабованості. Загальний відсоток задоволених вузлів IoT повинен зменшуватись, коли відбуватиметься збільшення кількості вузлів IoT. Цей результат підтвердить надійність фреймворку у великомасштабних середовищах IoT. Також, потребують представлення порівняльні результати для різних сучасних ГНМ з різною обчислювальною складністю та алгоритмічною архітектурою, щоб продемонструвати переваги підходу в умовах різних робочих навантажень. При цьому обов'язково будуть відображені відмінності в кількості фактичних обчислень для кожної ГНМ. На шляху до демонстрації переваги теорії ігор з точки зору вирішення проблем управління ресурсами, порівнюватимемо запропоновану структуру розвантаження обчислювальних завдань з сучасним рівнем техніки. Зокрема, найбільш поширеною є теорія, яка використовується в даний час для здійснення управління ресурсами в системах зв'язку та обчислень. Це теорія максимізації мережевої корисності. Основний принцип теорії полягає в тому, що кожен користувач у складній системі прагне максимізувати її корисність або, що еквівалентно, мінімізувати її відомі витрати.

Розглянемо три порівняльні сценарії: запропонована модель (формула (2.1)) розвантаження обчислювальних завдань на основі теорії ігор; вузли IoT вирішують свій оптимальний обсяг вивантажених даних, вирішуючи задачу оптимізації за мінімумом; вузли IoT вирішують свій оптимальний обсяг вивантажених даних,

вирішуючи задачу оптимізації випадковим чином.

Кількість вивантажених даних визначається розв'язанням задачі оптимізації. Для цього потрібно представити відсоток задоволених вузлів IoT за трьома порівняльними сценаріями і з урахуванням трьох різних рівнів обчислень, які запитуються вузлами. Зокрема, для цілей порівняння на одному ОІ з вузлами IoT, і БПЛА, що зависає над цією областю. Теорія ігор дозволяє досягти кращого результату від затримки та обмежень споживання енергії вузлів IoT за рахунок економного використання доступних ресурсів загальної системи. Крім того, сценарій без БПЛА демонструватиме найгірші результати, оскільки він намагатиметься мінімізувати затримку вузлів без урахування їхніх енергетичних обмежень та спільного характеру обчислювальних ресурсів з іншими вузлами.

Розглянемо теоретико-контрактне управління відповіддю на запит у системах Smart Grid. Системи інтелектуальних мереж були впроваджені як ефективне рішення глобальної енергетичної кризи з урахуванням притаманних їм характеристик зв'язку, управління та оптимізації, що може призвести до балансу в режимі реального часу між попитом та пропозицією електроенергії. Реагування на попит стало життєво важливим і критично важливим компонентом систем інтелектуальних мереж, що дозволяє споживачам безпосередньо взаємодіяти з ринком електроенергії шляхом динамічної адаптації споживання електроенергії на основі оголошеної ціни та доступності постачання. Вгагалі на сьогодні запропоновано два основних типи реагування на попит: прямі або засновані на ціні, коли споживачі безпосередньо адаптують своє споживання електроенергії до оголошеної ціни, а комунальне підприємство має прямий контроль над їх споживанням; непряме або засноване на стимулюванні, коли динамічне ціноутворення пропонується споживачам як стимул до добровільної адаптації споживання електроенергії. З розвитком систем інтелектуальних мереж і в напрямку задоволення потреб в електроенергії, комунальні компанії використовують відновлювані джерела енергії як альтернативне рішення через відсутність доступності викопного палива. Крім того, споживачам рекомендується встановлювати невеликі вітрові турбіни або дахові сонячні фотоелектричні системи, щоб частково або повністю покрити свої потреби в

електроенергії. Крім того, надлишок електроенергії від побутових систем виробництва електроенергії зберігається в акумуляторних батареях (наприклад, літій-іонних батареях та «проточних батареях» з рідким електролітом) або в електричних транспортних засобах. Обидві альтернативи зберігання електроенергії можуть заряджатися вночі, коли ціна низька, а пропозиція висока, і продавати назад у розумну мережу, коли попит на електроенергію високий. Таким чином, традиційні споживачі перетворюються на продавців і споживачів одночасно, стаючи критично важливим компонентом безперебійної роботи систем інтелектуальних мереж.

Проблема управління реагуванням на попит вирішується впровадженням розподілених або централізованих рішень і обліку поведінкових характеристик і моделей споживання електроенергії продавцями і споживачами енергії одночасно. Між одним комунальним підприємством і декількома споживачами вводиться розподілений теоретико-ігровий підхід, де перший оголошує ціну електропередачі, а другі коригують споживання електроенергії. Ця проблема може бути розширена, якщо розглядати систему інтелектуальних мереж декількох комунальних підприємств і декількох споживачів. Споживачі обирають комунальне підприємство, в якому вони будуть купувати електроенергію, дотримуючись підходу навчання з підкріпленням, а потім пропонується двоступенева ігрово-теоретична база для визначення оптимальної ціни та споживання електроенергії. Таким чином, можна сформулювати спільну проблему щодо максимізації продуктивності споживання електроенергії та ціни та її можна вирішити за допомогою методу подвійного розкладання. Проблема максимізації прибутку комунальних підприємств також може бути вирішена у вигляді задачі марковського процесу прийняття рішень зі скінченим горизонтом. Таке рішення зменшує дисбаланс між попитом і пропозицією в інтелектуальній мережі та зменшує рахунки споживачів за електроенергію. У напрямку вирішення високої обчислювальної складності вищезазначеної проблеми може бути використано подвійний наближений підхід, який перетворює цю проблему в проблему лінійного програмування, що можна вирішити в режимі реального часу. Інтелектуальна система управління енергією в побутових приміщеннях, спрямована на зниження рахунків споживачів за електроенергію, гарантуючи при цьому

задоволення обмежень попиту на електроенергію в різних розглянутих випадках навантаження домогосподарств і постачання відновлюваних джерел енергії. Інтелектуальна оцінка навантаження, заснована на підході нейронних мереж з урахуванням температури навколишнього середовища, часу доби, ціни використання і пікових обмежень попиту, що накладаються оператором розумної мережі. Розв'язок задачі на основі аукціону визначає оптимальну кількість проданої електроенергії кожним електромобілем, а також відповідну ціну. Зосереджуючись на рішеннях, орієнтованих на споживачів, фреймворк зберігає конфіденційність, і при цьому використовується підхід навчання з підкріпленням для вивчення поведінки споживачів щодо захисту конфіденційності та вивчення їхніх вимог споживання електроенергії. Моделі споживання електроенергії з високою роздільною здатністю призначені для оцінки попиту в житлових приміщеннях шляхом кількісної оцінки поведінки споживачів щодо використання електроенергії. Таким чином, оптимальний графік роботи приладів споживачів визначається з урахуванням змінних у часі цін на електроенергію. Розподілений загальносистемний фреймворк розроблений для того, щоб динамічно адаптувати профіль навантаження системи в бік мінімізації платежів споживача, гарантуючи при цьому їх комфорт і обмеження конфіденційності. Розподілена система максимізації корисності споживачів може бути спрямована на визначення оптимальних цін і графіків попиту для того, щоб кожен споживач міг максимізувати свою чисту вигоду за умови різних обмежень споживання і потоку електроенергії. Змішана цілочисельна нелінійна задача оптимізації сформульована в напрямку визначення розкладу приладів споживачів, враховуючи при цьому ціну на електроенергію і штраф, пов'язаний з піками споживання електроенергії, і в той же час гарантуючи обмеження комфорту споживачів. Некооперативна гра неповної інформації серед споживачів сформульована і виведено байєсівське рівноважне рішення з метою мінімізації співвідношення від піку до середнього в системі розумної мережі. Систему класифікації споживачів для класифікації споживачів за двома основними типами на основі їхньої поведінки щодо споживання електроенергії, тобто поведінки, яка не шукає зеленого комфорту, і поведінки, яка спрямована на пошук зелених стимулів, можна використати для оптимізації продуктивності систем

інтелектуальних мереж.

У зв'язку з проблемою управління реакцією на попит потрібно врахувати персоналізоване споживання електроенергії та динамічну поведінку виробника в системах інтелектуальних мереж. Крім того, для забезпечення безперебійної взаємодії між ринком електроенергії та споживачами, навіть складно вловити їхні економічні відносини щодо обох сторін конкуруючих інтересів, прийшовши до взаємоприйнятних рішень, які спільно максимізують їхній прибуток. Мета архітектури полягає в тому, щоб охопити персоналізовані характеристики споживачів шляхом моделювання їх унікальних персоналізованих типів у системі розумних мереж і представити їх прибуток у відповідним чином розроблених функціях утиліти. Впроваджуватимемо систему інтелектуальних мереж, що складається з споживачів з динамічно змінними характеристиками споживання та генерації електроенергії. Прибуток споживачів та ринку електроенергії в рамках управління реагуванням на попит фіксуватимемо за допомогою цілісно розроблених функцій комунальних послуг. Принципи економіки праці використовуватимемо для фіксації взаємодії між ринком електроенергії та споживачами, дотримуючись договірно-теоретичного підходу. Останній розглядає ринок електроенергії як «роботодавця», пропонуючи споживачам персоналізовані винагороди, тобто кількість електроенергії за відповідною ціною. Споживачи виступають в ролі «працівників», пропонуючи в якості «зусиль» ринку електроенергії відповідну кількість електроенергії за оголошеною ціною, яку вони готові купити. Ринок електроенергії знає про персоніфіковані характеристики споживачів і неповну інформацію. Розв'язок договірно-теоретичної задачі оптимізації продуктивності зводиться до оптимальних контрактів, які складаються з пропонованих ринком електроенергії оптимальних винагород для стимулювання споживачів купувати електроенергію за оголошеною ціною та оптимальної кількості придбаної електроенергії споживачами для оптимізації їхнього прибутку з урахуванням їх споживання електроенергії та обмежень генерації.

Інтелектуальна мережева система для житлових приміщень розглядається з ринку електроенергії, передової вимірювальної інфраструктури, контролеру

навантаження, менеджера планування, системи відновлюваної енергії, системи зберігання та кількості приладів. Система відновлюваної енергії може складатися з дахових сонячних фотоелектричних систем або невеликих вітрових турбін для виробництва електроенергії. Вироблена електроенергія на побутовому рівні споживається для покриття потреб споживачів, а надлишок зберігається в системі зберігання. Останній складається з акумуляторних батарей, наприклад, літій-іонних. Графік роботи кожного приладу враховує споживачів та купівлю ними електроенергії на ринку електроенергії порівняно з рештою споживачів, які конкурують за той самий ресурс протягом кожного часового проміжку. Типи споживачів динамічно змінюються за певний проміжок часу, враховуючи їхні потреби в електроенергії та характеристики генерації, і характеризують кожного споживача унікальним та персоналізованим чином. Очевидно, що споживач, який може задовольнити свою особисту потребу в електроенергії без входу на ринок електроенергії протягом часового інтервалу не має типу і він не конкурує з іншими споживачами за цінний ресурс електроенергії. Принципи економіки праці прийняті відповідно до теорії контрактів для приведення досліджуваної житлової системи розумних мереж до стабільних і ефективних точок роботи. Зокрема, теорія контрактів будує засновані на економіці праці відносини між суб'єктами, що беруть участь у системі розумних мереж житлового сектору, тобто ринком електроенергії та споживачами, і стимулює їх поводитися сприятливим чином для загальної системи, надаючи відповідним чином розроблені контракти для обох операторів. Виходячи з договірно-теоретичної моделі, роботодавець пропонує працівникам персоналізовані винагороди з метою заохочення їх до демонстрації сприятливої поведінки для загальної системи, в той час як працівники пропонують свої зусилля роботодавцю в обмін. Кортеж винагорода, зусилля створює персоналізований контракт між роботодавцем і кожним працівником. Якщо обидві сторони дотримуються оптимальних контрактів, то загальна система завершується стабільним та ефективним режимом роботи. Теорія контрактів вже була застосована в декількох областях, таких як автомобільні мережі, оптимальні схеми зарядки електромобілів в інтелектуальних мережевих системах, бездротові мережі та управління ресурсами, федеративне навчання в мобільних

мережах, довіри і безпеки, системи громадської безпеки тощо.

У досліджуваній системі розумних мереж для житлових приміщень споживачі виступають в якості «працівників», що пропонують свої «зусилля» ринку електроенергії. Останній виступає в ролі «роботодавця», пропонуючи свої спроможності. Споживач, купуючи кількість електроенергії з електромережі планує свої витрати співвіднесено з попередніми періодами витрат.

Таким чином, ринок електроенергії отримає прибуток від купівлі споживачів. З іншої сторони, ринок електроенергії повинен стимулювати споживачів купувати електроенергію за оголошеною ціною протягом часового інтервалу. Таким чином, він пропонує персоналізовану винагороду пропорційну придбаній електроенергії, при цьому враховуючи її тип в системі Smart Grid.

Згідно з вищенаведеним аналізом, персоналізований контракт, який встановлюється між ринком електроенергії та кожним споживачом, є кортежем. Отримуючи винагороду кожен споживач оцінює його по-різному з огляду на потребу в електроенергії (тобто змінний або необхідний), які він охоплює для свого персоналізованого задоволення. Таким чином оціночну функцію споживача визначаємо як строго зростаючу по відношенню до зусилля споживача. Функція, що враховує вищезазначені властивості, змінить не теоретичний аналіз, представлений нижче, а проміжні похідні. Договірнотеоретична корисність кожного споживача представляє собою чисте особистісно сприйняте задоволення споживача від отриманої винагороди, враховуючи його індивідуальну вартість шляхом інвестування своїх зусиль за рахунок купівлі електроенергії у ринку електроенергії. Таким чином, договірнотеоретико-корисна функція споживача визначається наступним чином. Функція корисності споживача є необмеженою для збереження цілісної застосовності запропонованої структури. У реальному застосуванні запропонованої теоретичної бази зусилля споживачів можуть бути зіставлені, а винагорода ринку електроенергії зіставлена з грошовими одиницями (наприклад, знижка, купони). Ринок електроенергії має часткову або навіть відсутню доступну інформацію щодо пропозицій споживачів. Таким чином, пропонуючи відповідним чином розроблені винагороди, щоб спонукати споживачів купувати електроенергію за оголошеною

ціною, він має на меті неявно виявити їх типи і, отже, їх споживання електроенергії та характер виробництва. Тому, ринок електроенергії оцінює типи споживачів за допомогою проб. Тоді, облік комунальних послуг ринку електричної енергії визначається споживачами, які купують електроенергію, і полягає в тому, що перший термін позначає дохід ринку електроенергії, тоді як другий термін виражає його витрати на надання винагороди споживачам. Таким чином, він фіксує прибуток ринку електроенергії. Крім того, загальний соціальний добробут досліджуваної системи розумних мереж для житлових будинків визначається через витрати. Питання управління договірно-теоретичним управлінням попитом на випадок повної та неповної інформації ринку електроенергії про типи споживачів. В обох випадках мета полягає в тому, щоб визначити відповідні контракти, які спільно оптимізують ринок електроенергії та комунальні послуги споживачів і забезпечать стабільну та ефективну точку роботи житлової системи розумних мереж. Ідеальний випадок, коли ринок електроенергії знає типи споживачів та досліджується, головним чином, з метою порівняльного аналізу. Повна інформація про типи споживачів для ринку електроенергії дає змогу знати потенційну кількість електроенергії, яку споживачі готові купити, таким чином, він може повністю використовувати купівельну спроможність споживачів. Ринок електроенергії прагне максимізувати свою корисність, гарантуючи, що він запропонує персоналізовані винагороди споживачам, які задовольняють їх індивідуальну раціональність і, нарешті, приймуть на покупку кількість електроенергії, яка задовольнить їх потреби. Тому договірно-теоретичну проблему при повній інформації серед ринку електроенергії і кожного споживача можна сформулювати наступним чином. Ринок електроенергії має на меті максимізувати свій прибуток, гарантуючи при цьому мінімально прийнятне задоволення для споживачів з метою придбання електроенергії. Фізичний сенс оптимального контракту полягає в тому, що споживачі можуть купувати електричну енергію пропорційно своїм потребам і обернено пропорційно оголошеній ринку електричної енергії ціні. Крім того, ринок електроенергії пропонує винагороди, що відповідають особистим потребам кожного споживача в купівлі електроенергії, щоб в кінцевому підсумку стимулювати його здійснити покупку

за оголошеною ціною.

В загальному випадку розглядатимемо модель, в якій наявна неповна інформація про ринок електроенергії і компанії не знають типів споживачів, а отже, не знають потенційної кількості електроенергії, яку вони зацікавлені купити. Цей сценарій є найбільш реалістичним у системі розумних мереж для житлових потреб, де ринок електроенергії спрямований на стимулювання споживачів купувати електроенергію за оголошеною ціною. Тоді, мета - визначити оптимальний контракт серед ринку електроенергії та кожного споживача в сторону максимізації прибутку ринку електроенергії, гарантуючи при цьому оптимальне задоволення потреб споживачів в електроенергії. Кожен споживач повинен як мінімум отримувати позитивну комунальну вигоду, купуючи при цьому електроенергію на ринку електроенергії, щоб бути стимульованим до здійснення покупки. Це обмеження фіксує індивідуальну раціональність кожного споживача. Крім того, кожен споживач прагне досягти оптимальної корисності, яка відображає його особисті характеристики споживання та генерації електроенергії, отримуючи винагороду від ринку електроенергії за здійснення її придбання. Це обмеження фіксує стимулюючу сумісність кожного споживача. Характеристики споживання і генерації вловлюються за допомогою його типу. За винятком обмежень, які повинні бути справедливими для укладення оптимальних договорів, повинні бути задоволені деякі застосункові властивості і умови. Споживач вищого типу, тобто готовий купувати більше електроенергії на ринку електроенергії, повинен бути винагороджений більш високою винагородою в цілях справедливості. Споживач вищого типу, який буде рівномірно купувати більше електроенергії, буде відчувати більшу корисність, оскільки покриває більше потреб в електроенергії. Умови та обмеження індивідуальної раціональності, сумісності стимулів, справедливості, монотонності та раціональності повинні бути справедливими для того, щоб споживачи були стимульовані та готові купувати оптимальну кількість електроенергії на ринку електроенергії. Таким чином, договірно-теоретична задача формулюється як задача максимізації корисності ринку електроенергії при гарантуванні споживачам обмежень. Щоб зменшити обмеження неопуклої задачі оптимізації спочатку

розглянемо зменшення обмеження. Ринок намагатиметься використати максимальну вигоду від купівельної спроможності споживачів. Тоді мета полягає в тому, щоб зменшити обмеження. Далі використовуємо термінологію обмежень ІС вниз і вгору серед споживачів.

Розглянемо детальну чисельну оцінку для вивчення продуктивності та невід'ємних атрибутів запропонованої системи управління відповіддю на попит у системах інтелектуальних мереж. Спочатку розглядатимемо роботу фреймворку при повному і неповному інформаційних сценаріях. Споживач вищого типу отримує більш високу винагороду. Послаблення справедливості щодо власності тільки коли купує більше електроенергії, дотримуючись властивості монотонності, тим самим досягаючи більшої корисності, що ґрунтується на властивості раціональності. Також зауважується, що у випадку, якщо ринок електроенергії знає характеристики споживання та генерації електроенергії споживачами, тобто види за повним інформаційним сценарієм, то він може повною мірою використовувати їх купівельну спроможність. Таким чином, споживачі заохочуються більшою винагородою для придбання більшої кількості електроенергії. Крім того, враховуючи, що ринок електроенергії знає типи споживачів, то він пропонує їм мінімально можливі винагороди на основі придбаної ними електроенергії, щоб хоч трохи задовольнити їх раціональність. Крім того, споживач вищого типу користується більшою корисністю, а контракт, який явно розроблений для його типу, робить висновок про найкраще досягнуту корисність. Сукупна корисність ринку електроенергії та сукупний соціальний добробут системи інтелектуальних мереж у загальному обсязі свідчать, що за сценарієм повної інформації досягається краща ефективність, проте загальний соціальний добробут системи в середньому знижується, тоді як для більших популяцій це значення стає ще меншим. Останнє спостереження вказує на те, що запропонована структура поводиться прийнятним чином для реалістичних реалізацій з повною відсутністю інформації про характеристики споживачів. Загалом вибиратимемо три орієнтовні типи споживачів: споживач виробляє багато електроенергії і має низьку потребу в електроенергії; споживач має як середню здатність виробляти електроенергію, так і потребу в електроенергії; споживач

виробляє невелику кількість електроенергії, але його потреба в електроенергії висока. Відповідно, нормалізується куплена електроенергія за певний проміжок часу. Аналіз трьох класів споживачів свідчить, що споживачі першого типу можуть покривати власні потреби в електроенергії за рахунок виробленої нею електроенергії без надходження на ринок електричної енергії. Споживачі другого типу мають більший дохід порівняно з споживачами другого типу. Тому, ринок електричної енергії отримує менший прибуток, що призводить до зниження значень корисності ринку електричної енергії.

Таким чином, проаналізовані користувачі систем інтелектуальних мереж та відносини між ним, які впливають на формування таких систем. В результаті обґрунтовано корисність споживачів, сукупну корисність ринку електроенергії та сукупний соціальний добробут системи розумних мереж відповідно. Результати показують, що запропонована база явно вигідна споживачам з урахуванням індивідуального ставлення та заохочення, які вони відчують. Крім того, зосереджуючись на соціальному добробуті системи, встановлено, що запропонована структура перевершує висновок про стабільну та ефективну точку роботи для загальної досліджуваної системи інтелектуальних мереж. Задача сформульована як задача максимізації прибутку ринку електроенергії з урахуванням обліку оптимізації прибутку споживачів за їх типами. Проблема вирішується у випадках отримання повної та неповної інформації з точки зору ринку електричної енергії щодо того, знають чи не знають відповідно типи споживачів, а також визначаються оптимальні договори між обома сторонами з конкуруючими інтересами. Оптимальні контракти складаються з кількості електроенергії, купленої споживачами, і відповідних пропонованих винагород ринком електричної енергії для їх стимулювання.

### 2.3 Висновки до другого розділу

Розроблено модель для класу систем інтелектуальних мереж, яка відрізняється тим, що включає пристрої IoT, сервер з множинним доступом та БПЛА для підтримки комунікації. Все це сукупно розглядається для цього класу систем інтелектуальних

мереж в контексті оптимізації продуктивності, зокрема за критерієм енергоефективності. Задача оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж сформульована для визначення оптимального часткового вивантаження завдань вузлів IoT на сервер з периферійними пристроями для множинного доступу або БПЛА, якщо останній коливається вище ОІ вузлів IoT. Проаналізовані користувачі систем інтелектуальних мереж та відносини між ним, які впливають на формування таких систем.

## **3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ**

### **3.1 Основи застосування та оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж**

Інтелектуальна мережа забезпечує швидшу реакцію та вирішення проблем у разі перебоїв у постачанні електроенергії споживачам. Система інтелектуальних мереж забезпечує також зберігання енергії та дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії в мережу. Розглянемо характеристики розумної електромережі.

Підвищена ефективність та надійне електропостачання споживачів мають вирішальне значення для енергосистеми, яка оцінює впровадження енергосистеми. Таким чином, розумна електромережа має швидке виявлення несправностей і забезпечує самовідновлення. У міру того, як розміри і складність електромереж продовжують зростати, стає складно оцінити надійність електромереж, але надійність сучасних енергосистем може бути реалізована зусиллями багатьох дослідників. Часто використовують баєсові мережі для оцінки надійності мережі за допомогою алгоритму інтелектуального аналізу даних, який розпізнає структуру мережі на основі необроблених попередніх даних. Більш висока ефективність досягається за рахунок моніторингу гібридних поколінь у віддаленому регіоні і автоматичного управління нестабільним розподілом. Розвиток інтелектуальних мереж з використанням технологій онлайн-моніторингу, збору даних тощо становить загрозу безпеці системи. Однак проблеми вирішуються шляхом удосконалення моделі загроз безпеці інтегрованих інтелектуальних мереж. Крім того, проблеми вирішуються шляхом встановлення вимог і політик щодо загроз кібербезпеці для інтелектуальних мереж. Розумна електромережа дозволяє інтегрувати розподілену генерацію, що підвищить ефективність і надійність системи. Крім того, завдяки впровадженню інформаційних технологій в інтелектуальні мережеві системи дані в режимі реального часу можуть записуватися і зберігатися для використання при визначенні ефективності та надійності системи.

Завдяки інтеграції розподіленої генерації в розумні мережі замовник може

управляти власним навантаженням в залежності від структури споживання клієнта, що підвищить ефективність і надійність системи. Інформаційні технології в інтелектуальних мережах надаватимуть дані про ціни на енергію в режимі реального часу. Це дозволить клієнтам керувати своїм навантаженням та цінами.

Кількість електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії, змінюється щосекунди, залежно від вхідних параметрів, таких як сонячне випромінювання, швидкість вітру тощо. Зберігання енергії також є обов'язковим у розумних мережах, оскільки дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії. Система накопичення зберігає надлишкову енергію, вироблену з відновлюваних джерел енергії. Енергія з систем накопичення подається тоді, коли потреба в електроенергії зростає. Системи накопичення енергії включають акумуляторні батареї, маховики, зберігання стисненого повітря, зберігання ультраконденсаторів та гідроакумулятори.

Невеликі джерела енергії, які задовольняють постійну потребу місця в електроенергії та допомагають нам перейти від традиційної мережі до розумної мережі. Розподілена генерація, яка є відновлюваним джерелом енергії, спрямована на зменшення втрат поставок викопного палива та скорочення викидів. До розподілених генераторів відносяться фотоелектричні та вітрові електростанції, а також акумуляторні системи, що поєднують теплові та електричні транспортні засоби. Інтеграція систем розподіленої генерації в електромережу вимагає управління та обробки великого обсягу даних, для яких необхідна певна архітектура.

Розумний лічильник в інтелектуальній мережі забезпечує двосторонній зв'язок між лічильниками та комунальними службами. Розумні лічильники не тільки надають точні рахунки, але й дозволяють клієнтам контролювати споживання енергії. Розумний лічильник складається з датчиків, сповіщень про відключення електроенергії та моніторингу якості електроенергії. Контроль розподілу підключається до розумного лічильнику. Завдяки вдосконаленню передової інфраструктури обліку комунальні підприємства можуть легше збирати інформацію про клієнтів, що сприяє вдосконаленню мереж, де можлива інтеграція електромобілів, перетворювачів, контролю подачі живлення та ізоляції

несправностей. Прикладом автоматизації розподілу є система автоматизації підстанцій, яка усуває перевантаженість енергосистеми та менше обмежує інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Розумні прилади – це пристрої, які можуть підключатися до електромережі, відключати живлення в години пік та розумно змінювати споживання електроенергії. Розумні пристрої зазвичай встановлюються на стороні користувача, що включає розумні будівлі, і допомагають відокремити попит на електроенергію домогосподарств від пікових годин.

Компоненти електромережі повинні працювати разом, щоб надійно доставляти енергію споживачам від електростанції. Тому, сумісність пристроїв дуже важлива для проектування та реалізації архітектури систем інтелектуальних мереж.

Розумні прилади можуть приймати рішення про споживання енергії. Це призводить до зниження пікового навантаження, що впливає на витрати на виробництво електроенергії. Розумна будівля з різноманітною розумною побутовою технікою може заощадити витрати на ціноутворення в режимі реального часу, а піковий попит може бути зменшений, оскільки розумні прилади можуть працювати на основі попередньо встановлених даних споживачів. Розумні прилади допомагають вирівняти криву навантаження, тим самим зменшуючи ймовірність збоїв в електромережі.

Розумні лічильники стануть найважливішою технологією для переходу від традиційних електромереж до розумних мереж. Розумний лічильник фіксує споживання енергії щогодини або частіше та зв'язується з комунальним підприємством, яке виконує виставлення рахунків та технічне обслуговування. Він забезпечує двосторонній зв'язок між утилітою та кінцевим користувачем для автоматичного збору платіжних даних, виявляє несправності обладнання та набагато швидше відправляє команди з ремонту/обслуговування на точне місце несправності. Впровадження інтелектуальних лічильників дозволить зменшити випадки крадіжки енергії і, таким чином, збільшити доходи постачальників послуг або комунальних підприємств. Крім того, інтелектуальні лічильники збільшують обчислювальну потужність для локальної обробки для підтримки розподіленого керування

майбутніми моделями роботи кластерів мікромереж.

Підстанція зазвичай контролює та контролює робочі дані для критичних та некритичних навантажень, таких як стан живлення, енергетична безпека, показники коефіцієнта потужності, вимикач та трансформатор. Інтелектуальна підстанція складається з складних високовольтних пристроїв на первинній стороні і об'єднаних в мережу вторинних пристроїв. Протокол зв'язку використовується в інтелектуальних підстанціях для обміну інформацією та взаємодії інтелектуальних електричних пристроїв. Розумні підстанції трансформують кілька напруг у різних місцях, щоб забезпечити безпечне та надійне електропостачання. Надпровідні кабелі можуть передавати електроенергію на великі відстані з мінімальними втратами. Вони мають механізовані інструменти моніторингу та аналізу, здатні або самостійно виявляти несправності, або прогнозувати несправність на основі даних у реальному часі та історії відмов. Надпровідні кабелі мають високу здатність до передачі струму і низькі втрати при передачі. Основний недолік надпровідних кабелів полягає в тому, що в даний час їм не вистачає зрілого практичного застосування в умовах кімнатної температури, але майбутнє розумних мереж залежить від надпровідних кабелів. Інтегрований зв'язок є базовою потребою сучасної електромережі, необхідною і необхідною для інших ключових технологій. Це створить динамічну та спільну мега-інфраструктуру для обміну інформацією та енергією в режимі реального часу. Специфікації інтелектуальних мереж, такі як програмоване логічне управління, диспетчерське управління і збір даних, а також бездротові, стільникові і широкопasmові лінії електропередач поєднують в собі технології зв'язку. Простота впровадження, пропускна здатність передачі даних, стандарти, покриття мережі, затримка та безпечна система – це фактори, які необхідно враховувати для інтегрованих комунікацій.

Зв'язок відіграє важливу роль у роботі енергосистем у режимі реального часу. Для застосування в розробці інтелектуальних мереж розробляються різні типи комунікаційних технологій, такі як дротові, наприклад, волоконно-оптичні та телефонні, та бездротові, тобто які працюють у різних частотних діапазонах. Бездротові технології мають застосункові переваги перед дротовими, такі як низька

вартість установки, швидке розгортання, простота використання тощо, і ідеально підходять для ізольованих застосунків. Спочатку дротові системи, такі як телефони, використовуються для передачі інформації про використання лінії диспетчерському центру та диспетчерським операторам, які виконують комутаційні операції на підстанціях. У зв'язку з низкою обмежень електромережі, таких як обмеження напруги, теплові перевантаження та інші складнощі дротового підключення до електромереж, мережі зв'язку в інтелектуальних мережах ускладнюються з кожним днем, оскільки все більше інтегруються в електромережі. Таким чином, успіх впровадження розумної мережі залежить від впровадження надійної та економічно ефективної системи зв'язку для цілей вимірювання, контролю та моніторингу.

Безпека інтелектуальних мереж дуже важлива, оскільки інтелектуальні мережі обмінюються електроенергією та інформацією в режимі онлайн за допомогою різних технологій. Вразливості розумних мереж більш популярні в інтелектуальних лічильниках, інтелектуальних електронних системах і компонентах. Численні типи загроз безпеці інтелектуальних мереж, такі як фізичні атаки та кібератаки, що призводять до порушення конфіденційності споживачів, крадіжки енергії, відключення електроенергії, збою інфраструктури та захисту операційного персоналу, повинні враховуватись при проєктуванні систем інтелектуальних мереж. Обов'язково повинні включатись критерії оцінки кібербезпеки для інтелектуальних мереж, оцінка ризиків безпеки для програмно-визначених, захист на основі місцезнаходження для застосунків інтелектуальних мереж, механізми конфіденційності в інтелектуальних мережах з використанням кільцевої архітектури зв'язку, моделі загроз безпеці інтегрованих систем, кібербезпеку електромережі, аналіз комунікаційної інфраструктури інтелектуальних мереж та кібербезпеку інтелектуальних мереж, та інформаційної безпеки для захисту сховищ даних. Інтелектуальна мережа має переваги в енергозбереженні, низькому забрудненні навколишнього середовища, більш високій енергоефективності, властивостях самовідновлення і двонаправленому зв'язку.

Проблеми розумних мереж, які також є потенційними напрямками досліджень: проєктування маршрутизації інтелектуальних мереж; забезпечення кібербезпеки;

впровадження відновлюваних джерел енергії; сумісність інтелектуальних пристроїв, зв'язку та стандартів реєстрації даних; безпека при обробці та вивченні великих даних; автоматизація розподіленої системи і розподіленої генерації в системі розподілу; стандарт сумісності; функційна та кібербезпека, вразливості передових систем обліку.

Інтелектуальні мережі започаткувались термінологічно в кінці 1980-х років після появи першого звіту про розумні лічильники. З тих пір впроваджуються і розвиваються різні технології, системи, процедури і процеси для модернізації електромережі.

Основні елементи потенційної системи інтелектуальних мереж: акумуляторна система зберігання; хмарне зберігання та обробки даних; інтеграція електромобілів в розумні мережі; інтеграція відновлюваних джерел енергії в інтелектуальні мережі; нові технології зв'язку та системи самовідновлення мережі для підвищення стабільності та енергетичних досліджень; широкомасштабна інтеграція відновлюваних джерел енергії в інтелектуальну мережу. Технології інтелектуальних мереж включають розумні прилади, інтелектуальні лічильники, надпровідні кабелі та блок вимірювання. Крім того, системи інтелектуальних мереж можуть використовувати технології блокчейну. А також самі технології блокчейну на рівні реалізації можуть бути побудовані згідно концепції інтелектуальних мереж. Технологія розподіленого реєстру, або технологія блокчейн, є перспективною завдяки своїм невід'ємним ключовим характеристикам, таким як децентралізація, стійкість, анонімність та можливість контролю. Ці характеристики забезпечують підвищену безпеку транзакцій, що відбуваються між вузлами-учасниками або розподіленими сутностями. Спочатку блокчейн був представлений як публічна книга, що полегшує монетарні транзакції. Однак в даний час технологія блокчейн здатна підтримувати широкий спектр застосунків за рахунок використання смарт-контрактів. Для виконання смарт-контрактів зазвичай потрібна інформація, зовнішня по відношенню до системи блокчейн. Коли необхідна зовнішня інформація, перевірка та консенсус щодо інформації мають вирішальне значення для загальної безпеки системи. В іншому випадку це зменшить переваги розподіленого реєстру та неминуче

становитиме загрозу безпеці всієї системи.

Серед дослідницьких робіт в області протоколів протоколи для блокчейн складають серію пропозицій децентралізованих блокчейн-протоколів. Протоколи збирають інформацію від учасників, тобто виборців або верифікаторів, за допомогою механізмів голосування за допомогою стейкінгу, які не залежать від механізмів консенсусу блокчейну, гарантуючи при цьому інклюзивну участь виборців. Основною перевагою таких протоколів є їх низька складність і детерміновані механізми збору інформації та винагороди. Для того, щоб визначити результат запиту, поданого протоколу, а також розподілити винагороди серед виборців, то обидва протоколи приймають голосування більшістю голосів, тобто засноване виключно на популярності конкретної відповіді. Однак такий підхід може призвести до ряду небажаних наслідків. Однією з можливих небажаних форм поведінки під час голосування є ліниве голосування, коли виборець завжди голосує за або проти. Щоб запобігти такій поведінці, протокол парних питань був введений поверх першого протоколу. Він вимагає, щоб заявники подали протилежні пари пропозицій, таким чином, очікувано буде рівна кількість істинних і хибних пропозицій. Однак є два основних недоліки у цієї методики. По-перше, виборці можуть збільшити очікувану винагороду. Якщо вони вважають, що їхня справжня думка належить до групи меншин, то вони відповідатимуть протилежним своєму переконанню. По-друге, протокол парних запитань не може захистити систему від атак, тобто виборці створюють кілька фальшивих ідентичностей. Якщо кількість контрольованих ідентичностей досить значна, то зловмисник зможе зробити свою думку домінуючою. Атаки можуть бути пом'якшені шляхом збільшення вартості створення ідентичності. Перший протокол вводить лінійну вартість до кількості ідентичностей або права голосу в якості ставки. Протокол парних запитань ще більше збільшує вартість, присуджуючи зловмиснику лише тоді, коли протилежні запитання мають різні результати більшості. Однак виборці все ще залишаються байдужими до того, чи повідомляти про це через кілька ідентичностей чи одну особу. Проблема спільного вилучення правдивої інформації за допомогою децентралізованих протоколів, а також проблема захисту системи блокчейн від атак не були успішно вирішені.

Тому, потребує розроблення протокол на основі однорангового прогнозування з нелінійним масштабуванням для підтримки роботи та вилучення перевіреної інформації децентралізованими протоколами. В результаті потрібно розробити нове правило легкого оцінювання, яке б вирішувало питання щодо винагороди для виборців таким чином, що раціональні виборці правдиво повідомляють про свої приватні думки. Вага голосу повинна масштабуватись сублінійним чином, а частина винагороди слідувати функції щодо поданої ставки, що, відповідно, зменшує стимул до створення кількох ідентичностей. Зокрема, для кожного голосування протокол збирає два типи звітів від виборця: бінарний інформаційний звіт і звіт про прогнозування популярності. Результатом протоколу щодо конкретного питання є зважена більшість на основі пов'язаної частки, скоригованої функцією звітів про двійкову інформацію. Крім того, кожному звіту присвоюється оцінка з урахуванням точності прогнозування та ступеня згоди в групах виборців. Згодом протокол винагороджує лише тих, хто набрав найбільшу кількість балів, тоді як частка винагороди визначається їхньою часткою, скоригованою функцією. Потенційними перевагами такого протоколу, який сприяє отриманню достовірної інформації, були б такі: стимул виборців, які мають думку меншості, висловлювати свою справжню думку, надаючи їм максимальну очікувану винагороду за чесне голосування; нелінійна схема масштабування часток стимулювала б чесних виборців робити більше ставок на один звіт, оскільки збільшується штраф для виборця, який намагається спотворити результат протоколу за допомогою атаки.

### 3.2 Цільова функція оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж передбачає визначення параметрів та процесів, які дозволяють забезпечити максимальну ефективність функціонування мережі. Це може включати розподіл ресурсів, мінімізацію затримок, оптимізацію енергоспоживання тощо.

Одним із основних підходів є використання функції цільової оптимізації, яка описує продуктивність мережі у вигляді математичної моделі. Загальна формула

залана у вигляді функції цільової оптимізації може бути задана так:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot D(x) - w_3 \cdot E(x), \quad (3.1)$$

де  $x$  — вектор параметрів мережі (розподіл ресурсів, маршрутизація, частоти тощо);  $f(x)$  — функція цільової продуктивності мережі;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, пропускна здатність, якість обслуговування, кількість оброблених запитів);  $D(x)$  — функція затримок або часу виконання;  $E(x)$  — функція енергоспоживання мережі;  $w_1, w_2, w_3$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

Функція корисності  $U(x)$  відображає бажану продуктивність системи. Наприклад, це може бути кількість даних, які передаються за одиницю часу, або кількість обслуговуваних користувачів. Функція затримок  $D(x)$  враховує час, необхідний для передачі інформації через мережу, час обробки запитів або затримки через перевантаження. Функція енергоспоживання  $E(x)$  визначає витрати енергії, які виникають у процесі роботи системи, зокрема через передачу даних, роботу обладнання тощо. Вагові коефіцієнти  $w_1, w_2, w_3$  дають змогу налаштувати оптимізацію залежно від пріоритетів. Наприклад, у разі пріоритету зниження енергоспоживання буде більшим, ніж решта коефіцієнтів.

Оптимізація продуктивності може стосуватись ресурсів. Наприклад, розподіл пропускної здатності між вузлами мережі. Також, це може стосуватись маршрутизації в інтелектуальних мережах, зокрема вибір оптимального шляху для передачі даних. Мінімізація споживання енергії при забезпеченні достатньої продуктивності. Цю формулу можна адаптувати до конкретної задачі, додаючи або змінюючи функції для інших аспектів роботи мережі.

Розглянемо абстрактний приклад інтелектуальної мережі. Розумна енергомережа— це інтелектуальна мережа, яка інтегрує інформаційні технології з енергосистемами для оптимізації виробництва, розподілу і споживання енергії. У такій мережі є вузли (генератори, споживачі, батареї), інтелектуальні лічильники,

контролери та системи передачі даних. Основні компоненти інтелектуальної мережі: генератори енергії (відновлювані джерела (сонячні панелі, вітрові турбіни) та традиційні електростанції); системи зберігання енергії (акумуляторні батареї, енергетичні сховища); споживачі (побутові та промислові пристрої з розумним управлінням); системи передачі даних (IoT-пристрої, інтелектуальні лічильники). Алгоритмами управління можуть бути такі: нейронні мережі, оптимізаційні методи, машинне навчання.

Мета цільової функція оптимізації продуктивності для інтелектуальної мережі - максимізувати ефективність використання енергоресурсів, мінімізувати витрати енергії та втрати під час її передачі. Цільова функція може бути представлена як:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot L(x) - w_3 \cdot C(x), \quad (3.2)$$

де  $x$  — вектор  $x$  (розподіл енергії між вузлами, режими роботи пристроїв, маршрутизація енергії тощо);  $f(x)$  — функція цільової продуктивності;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, баланс між попитом і пропозицією енергії);  $L(x)$  — функція втрат енергії під час передачі або зберігання;  $C(x)$  — функція загальних витрат на енергоспоживання, включаючи витрати на виробництво та зберігання енергії;  $w_1, w_2, w_3$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

Розглянемо приклад застосування цільової функції оптимізації продуктивності інтелектуальної мережі.

Функцію корисності задамо так:

$$U(x) = \sum_{i=1,2,\dots,N_{U(x),gen}} P_i^{gen} - \sum_{j=1,2,\dots,N_{U(x),spog}} P_j^{spog}, \quad (3.3)$$

де  $P_i^{gen}$  — вироблена потужність генератору  $i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N_{U(x),gen}$ ;  $N_{U(x),gen}$  — кількість генераторів;  $P_j^{spog}$  — спожита потужність вузлом  $j$ ;  $N_{U(x),spog}$  — кількість вузлів;  $j = 1, 2, \dots, N_{U(x),spog}$ .

Функцію втрат енергії під час передачі або зберігання задамо так:

$$L(x) = \sum_{(i,j) \in E} R_{i,j} \cdot I_{i,j}^2, \quad (3.4)$$

де  $R_{i,j}$  – опір лінії між вузлами  $i$  та  $j$ ;  $I_{i,j}$  – сила струму в лінії  $(i, j)$ ;  $E$  – матриця топології зв'язків між вузлами;  $i = 1, 2, \dots, N_{R_{i,j}}$ ;  $N_{R_{i,j}}$  – кількість вузлів;  $j = 1, 2, \dots, N_{N_{R_{i,j}}}$ .

Матриця  $E$  топології зв'язків між вузлами є бінарною. Якщо між вузлами наявне з'єднання, тоді вона містить відповідний одиничний елемент, інакше нульовий.

Функцію  $C(x)$  загальних витрат на енергоспоживання, включаючи витрати на виробництво та зберігання енергії, задамо так:

$$C(x) = \sum_{i=1,2,\dots,N_{U(x),gen}} \alpha_i \cdot (P_i^{gen})^2 + \beta_i \cdot P_i^{gen} + \gamma_i, \quad (3.5)$$

де  $P_i^{gen}$  – вироблена потужність генератору  $i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N_{U(x),gen}$ ;  $N_{U(x),gen}$  – кількість генераторів;  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – коефіцієнти витрат на генерацію для вузла.

Отримані аналітичні вирази (формули (3.2)-(3.5)) дають змогу оптимізувати продуктивність інтелектуальних мереж під час пікових навантажень. Метою оптимізації є забезпечення всіх споживачів енергією, мінімізуючи втрати і витрати. Параметрами для оптимізації є обсяг енергії, що генерується кожним генератором та розподіл енергії між вузлами. Оптимізацію можна виконати за допомогою методів: лінійного або квадратичного програмування; алгоритмів машинного навчання для прогнозування попиту на енергію; алгоритмів генетичної оптимізації для складних мереж. Ця модель (формула (3.2)) адаптується до реальних умов шляхом налаштування параметрів і функцій.

Для деталізації формули та її змінних аргументів представимо адаптований варіант цільової функції конкретної розумної енергомережі. Вхідні змінні аргументи:

1) генератори енергії (G), які характеризуватимемо величинами потужності  $i$ -того генератору  $P_i^{gen}$ , коефіцієнтами витрат  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  на генерацію для  $i$ -того генератору;

2) споживачі енергії (D), які характеризуються потребами в енергії  $j$ -го споживача (Вт);

3) лінії передачі (E), які характеризуються опором  $R_{i,j}$  лінії передач між вузлами  $i$  та  $j$  (Ом), силою струму  $I_{i,j}$  у лінії  $(i, j)$ ;

4) функцією  $L(x)$  втрат енергії під час передачі або зберігання, значення якої обчислюється за формулою (3.4).

Приклад розрахунків подано в табл. 3.1 та табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Приклад розрахунків (частина 1)

Генератор/Споживач	Потужність (Вт)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Генератор 1	1000	0.01	2.5	10
Генератор 2	1500	0.015	2.8	15
Споживач 1	800	-	-	-
Споживач 2	1200	-	-	-

Таблиця 3.2

Приклад розрахунків (частина 2)

Лінія передачі	Опір ( $R_{i,j}$ , Ом)	Струм ( $I_{i,j}$ , А)
Генератор 1 $\rightarrow$ Споживач 1	0.5	10
Генератор 2 $\rightarrow$ Споживач 2	0.6	12

Проведемо обчислення згідно даних табл. 3.1 та табл. 3.2 за формулами (3.2)-(3.5) для отримання значення цільової функції.

Корисність ( $U(x)$ ):

$$U(x) = (1000 + 1500) - (800 + 1200) = 500 \text{ Вт.}$$

Втрати ( $L(x)$ ):

$$L(x) = (0.5 \cdot 10^2) + (0.6 \cdot 12^2) = 50 + 86.4 = 136.4 \text{ Вт.}$$

Витрати ( $C(x)$ ):

$$C(x) = (0.01 \cdot 1000^2 + 2.5 \cdot 1000 + 10) + (0.015 \cdot 1500^2 + 2.8 \cdot 1500 + 15);$$

$$C(x)=(10,000+2500+10)+(33,750+4200+15)=50,475 \text{ Вт.}$$

Цільова функція ( $f(x)$ ) при вагових коефіцієнтах  $\alpha_i = 1, \beta_i = 0,5, \gamma_i = 0,3$ :

$$f(x)=1 \cdot 500 - 0.5 \cdot 136.4 - 0.3 \cdot 50,475;$$

$$f(x)=500 - 68.2 - 15,142.5 = -14,710.7.$$

Результати обчислень подано в табл. 3.3.

Проаналізуємо результати подані в табл. 3.3. Від'ємне значення цільової функції вказує на те, що система має значні витрати, які перевищують корисний ефект. Для підвищення продуктивності можна зменшити втрати ( $L(x)$ ) шляхом оптимізації маршрутизації; знизити витрати ( $C(x)$ ) шляхом модернізації генераторів; переглянути вагові коефіцієнти для балансу між складовими цільової функції.

Таблиця 3.3

## Результати обчислень

Параметр	Значення
Корисність ( $U(x)$ )	500 Вт
Втрати ( $L(x)$ )	136.4 Вт
Витрати ( $C(x)$ )	50,475 Вт
Цільова функція ( $f(x)$ )	-14,710.7

Деталізуємо цільову функцію  $\operatorname{argmax}_x f(x)$  з формули (3.1) для інтелектуальної мережі, яка складається з таких компонентів: периферійні пристрої, сенсори або IoT-пристрої, які збирають дані й передають їх до серверу (наприклад, для моніторингу температури, трафіку чи об'єктів); сервер з множинним доступом (Multi-Access Edge Computing, MEC), тобто центральний вузол для обробки даних із периферійних пристроїв та управління мережею; дрон для підтримки зв'язку, який використовується для забезпечення додаткового каналу передачі даних у разі перевантаження або віддаленості периферійних пристроїв.

Формалізація постановки задачі передбачає досягнення мети, яка полягає в тому, щоб мінімізувати затримки передачі даних ( $D(x)$ ), втрати зв'язку ( $L(x)$ ) та енергоспоживання ( $E(x)$ ), забезпечуючи високу корисність мережі ( $U(x)$ ). Цільову

функцію в означених термінах задамо так:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot D(x) - w_3 \cdot L(x) - w_4 \cdot E(x), \quad (3.6)$$

де  $x$  — параметр оптимізації, який характеризує розподіл потужності серверу, маршрутизації трафіку, енергію БПЛА;  $f(x)$  — функція цільової продуктивності мережі;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, пропускна здатність, якість обслуговування, кількість оброблених запитів);  $L(x)$  — функція втрат енергії під час передачі або зберігання;  $D(x)$  — функція затримок або часу виконання;  $E(x)$  — функція енергоспоживання мережі;  $w_1, w_2, w_3, w_4$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

Розглянемо змінні аргументи.

Периферійні пристрої (P):  $N_p$  - кількість пристроїв;  $D_p$  - обсяг даних від пристрою рр (МБ).

Сервер МЕС (S):  $P_s$  - потужність серверу (кількість оброблених даних за секунду, МБ/с);  $E_s$  - енергоспоживання серверу на одиницю даних (Дж/МБ).

БПЛА (D):  $E_d$  - енергоспоживання дрона (Дж/с);  $R_d$  - швидкість передачі БПЛА (МБ/с);  $T_d$  - час польоту (с).

Затримки ( $D(x)$ ): час передачі даних до сервера та обробку.

Втрати ( $L(x)$ ): залежність від ненадійності каналів зв'язку.

Енергоспоживання ( $E(x)$ ): енергоспоживання периферійних пристроїв, серверу та БПЛА.

Дані для обчислень подано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

## Дані для обчислень

Компонент	Значення
Кількість пристроїв	$N_p=10$
Обсяг даних ( $D_p$ )	20 МБ/пристрій
Потужність серверу	$P_s=100$ МБ/с
Енергоспоживання сервера ( $E_s$ )	0.5 Дж/МБ
Енергоспоживання БПЛА ( $E_d$ )	50 Дж/с
Швидкість передачі дрона ( $R_d$ )	50 МБ/с
Час польоту БПЛА ( $T_d$ )	60 с

Проведемо обчислення згідно даних табл. 3.5 за формулою (3.6) для отримання значення цільової функції.

Корисність ( $U(x)$ ):

$$U(x) = \sum_{p \in P} D_p = N_p \cdot D_p = 10 \cdot 20 = 200 \text{ МБ.}$$

Затримка ( $D(x)$ ):

$$D(x) = \frac{\sum_{p \in P} D_p}{P_s + P_d} = \frac{200}{100 + 50} \approx 1,33 \text{ с.}$$

Втрати ( $L(x)$ ) розглядати за припущення, втрати зв'язку становлять 5% від загального обсягу даних, тоді:

$$L(x) = 0.05 \cdot \sum_{p \in P} D_p = 0.05 \cdot 200 = 10 \text{ МБ.}$$

Енергоспоживання ( $E(x)$ ):

$$E(x) = E_s \cdot \sum_{p \in P} D_p + E_d \cdot T_d;$$

$$E(x) = 0.5 \cdot 200 + 50 \cdot 60 = 100 + 3000 = 3100 \text{ Дж.}$$

Цільова функція ( $f(x)$ ) при  $w_1 = 1, w_2 = 0,4, w_3 = 0,3, w_4 = 0,2$ :

$$f(x) = 1 \cdot 200 - 0.4 \cdot 1.33 - 0.3 \cdot 10 - 0.2 \cdot 3100;$$

$$f(x) = 200 - 0.532 - 3 - 620 = -423.532.$$

Результати обчислень подано в табл. 3.6.

## Результати обчислень

Параметр	Значення
Корисність ( $U(x)$ )	200 МБ
Затримка ( $D(x)$ )	1.33 с
Втрати ( $L(x)$ )	10 МБ
Енергоспоживання ( $E(x)$ )	3100 Дж
Цільова функція ( $f(x)$ )	-423.532

Проаналізуємо результати подані в табл. 3.6. Від'ємне значення цільової функції свідчить про перевищення енергоспоживання над корисним ефектом. Для покращення системи можна: зменшити затримки ( $D(x)$ ), тобто збільшити потужність серверу або пропускну здатність БПЛА; оптимізувати втрати ( $L(x)$ ), тобто покращити надійність каналів зв'язку; мінімізувати енергоспоживання ( $E(x)$ ), тобто зменшити енергоспоживання БПЛА або час його роботи.

Графіки компонентів цільової функції зображено на рис. 3.1.

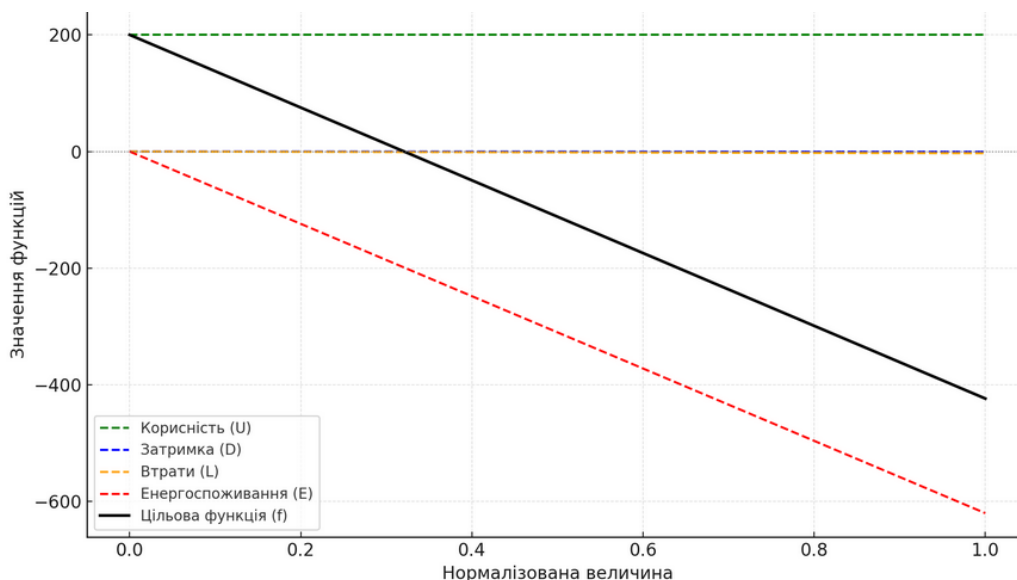


Рисунок 3.1 - Графіки компонентів цільової функції

На графіку рис. 3.1 зображено компоненти цільової функції та їхній вплив на

загальний результат. Корисність ( $U$ ) впливає позитивно і її значення постійне. Затримка ( $D$ ) зменшує значення цільової функції пропорційно до вагового коефіцієнта  $w_2$ . Втрати ( $L$ ) також мають негативний вплив, але менш значний, ніж енергоспоживання. Енергоспоживання ( $E$ ) дає найбільш суттєвий негативний внесок впливу на значення цільової функції через велику вагу  $w_4$  та велике значення  $E$ . Цільова функція ( $f$ ) є як комплексний результат, який враховує всі компоненти. Її зменшення демонструє домінування енергоспоживання над іншими параметрами. Цей графік дає наочне уявлення про те, які саме фактори найбільше впливають на продуктивність системи і потребують налаштування.

Розглянемо опис системи з розумними лічильниками. Розумні лічильники — це пристрої, які автоматично вимірюють споживання енергії та передають ці дані в реальному часі до центральної системи управління. Вони є частиною інтелектуальних енергомереж. Метою цільової функції оптимізації продуктивності інтелектуальної мережі є мінімізація витрат на передачу даних, втрати енергії та енергоспоживання лічильників, забезпечення точності вимірювань і надійності зв'язку.

Цільова функція враховує такі аспекти: корисність ( $U(x)$ ) відображає кількість переданих даних з розумних лічильників; втрати ( $L(x)$ ), які враховують втрати енергії у мережі; енергоспоживання ( $E(x)$ ), яке складається з енергоспоживання лічильників та енергоспоживання мережі; затримка ( $D(x)$ ), тобто час, необхідний для передачі даних з лічильників до центральної системи.

Тоді, цільова функція буде визначатись так:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot L(x) - w_3 \cdot E(x) - w_4 \cdot D(x), \quad (3.7)$$

де  $x$  — параметр оптимізації, який характеризує маршрутизацію даних, енергоефективність лічильників тощо;  $f(x)$  — функція цільової продуктивності мережі;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, обсяг даних, що передається в системі);  $L(x)$  — функція втрат енергії під час передачі або зберігання;  $D(x)$  — функція затримок або часу виконання;  $E(x)$  — функція енергоспоживання

лічильників і мережі;  $w_1, w_2, w_3, w_4$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

Розглянемо змінні аргументи цільової функції.

Лічильники (M):  $N_m$  - кількість лічильників;  $D_m$  - обсяг даних від одного лічильника (МБ);  $E_m$  - енергоспоживання одного лічильника на одиницю передачі даних (Дж/МБ).

Мережа (N):  $P_n$  - потужність передачі мережі (МБ/с);  $E_n$  - енергоспоживання мережі на одиницю передачі даних (Дж/МБ).

Втрати (L(x)): втрати енергії при передачі даних.

Затримка (D(x)): відношення обсягу даних до потужності мережі.

Дані для обчислень подано в табл. 3.7.

Проведемо обчислення згідно даних табл. 3.7 за формулою (3.7) для отримання та аналізу значення цільової функції.

Корисність (U(x)):

$$U(x) = \sum_{m \in M} D_m = N_m \cdot D_m = 50 \cdot 5 = 250 \text{ МБ.}$$

Втрати (L(x)) на передачу даних:

$$L(x) = 0,1 \cdot U(x) = 0,1 \cdot 250 = 25 \text{ МБ.}$$

Енергоспоживання (E(x)) включає енергію для лічильників та для мережі:

$$E(x) = E_m \cdot U(x) + E_n \cdot U(x) = 0,1 \cdot 250 + 0,05 \cdot 250 = 25 + 12,5 = 37,5 \text{ Дж.}$$

Таблиця 3.7

Дані для обчислень

Компонент	Значення
Кількість лічильників ( $N_m$ )	505050
Обсяг даних ( $D_m$ )	5 МБ/лічильник
Енергоспоживання лічильника ( $E_m$ )	0.1 Дж/МБ
Потужність мережі ( $P_n$ )	300 МБ/с
Енергоспоживання мережі ( $E_n$ )	0.05 Дж/МБ
Втрати (L(x))	10% від загального обсягу даних

Затримка ( $D(x)$ ):

$$D(x) = \frac{U(x)}{P_n} = \frac{250}{300} \approx 0,833 \text{ с.}$$

Цільова функція ( $f(x)$ ) при  $w_1 = 1, w_2 = 0,4, w_3 = 0,3, w_4 = 0,2$ :

$$f(x) = 1 \cdot 250 - 0,4 \cdot 25 - 0,3 \cdot 37,5 - 0,2 \cdot 0,833.$$

$$ff(x) = 250 - 10 - 11,25 - 0,167 \approx 228,583.$$

Результати обчислень подано в табл. 3.8.

Графіки компонентів цільової функції зображено на рис. 3.2.

Графіки на рис. 3.2 зображують компоненти цільової функції для системи розумних лічильників: корисність ( $U(x)$ ) постійна й відображає обсяг даних, який передається системою; втрати ( $L(x)$ ) мають негативний вплив на продуктивність; енергоспоживання ( $E(x)$ ) має значний негативний внесок, враховуючи енерговитрати лічильників і мережі; затримка ( $D(x)$ ) впливає менш значно завдяки високій пропускній здатності мережі.

Інтегральний результат щодо цільової функції ( $f(x)$ ) такий, що вона зменшується під впливом втрат, енергоспоживання та затримки.

Розглянемо систему інтелектуальних мереж з використанням блокчейн. Блокчейн-система передбачає розподілену базу даних для запису транзакцій у формі блоків, що забезпечує децентралізовану роботу і високий рівень безпеки. У таких системах важливо оптимізувати продуктивність, враховуючи енергоспоживання, затримки обробки транзакцій, пропускну здатність мережі та обсяг даних.

Таблиця 3.8

#### Результати обчислень

Параметр	Значення
Корисність ( $U(x)$ )	250 МБ
Втрати ( $L(x)$ )	25 МБ
Енергоспоживання ( $E(x)$ )	37,5 Дж
Затримка ( $D(x)$ )	0,833 с
Цільова функція ( $f(x)$ )	228,583

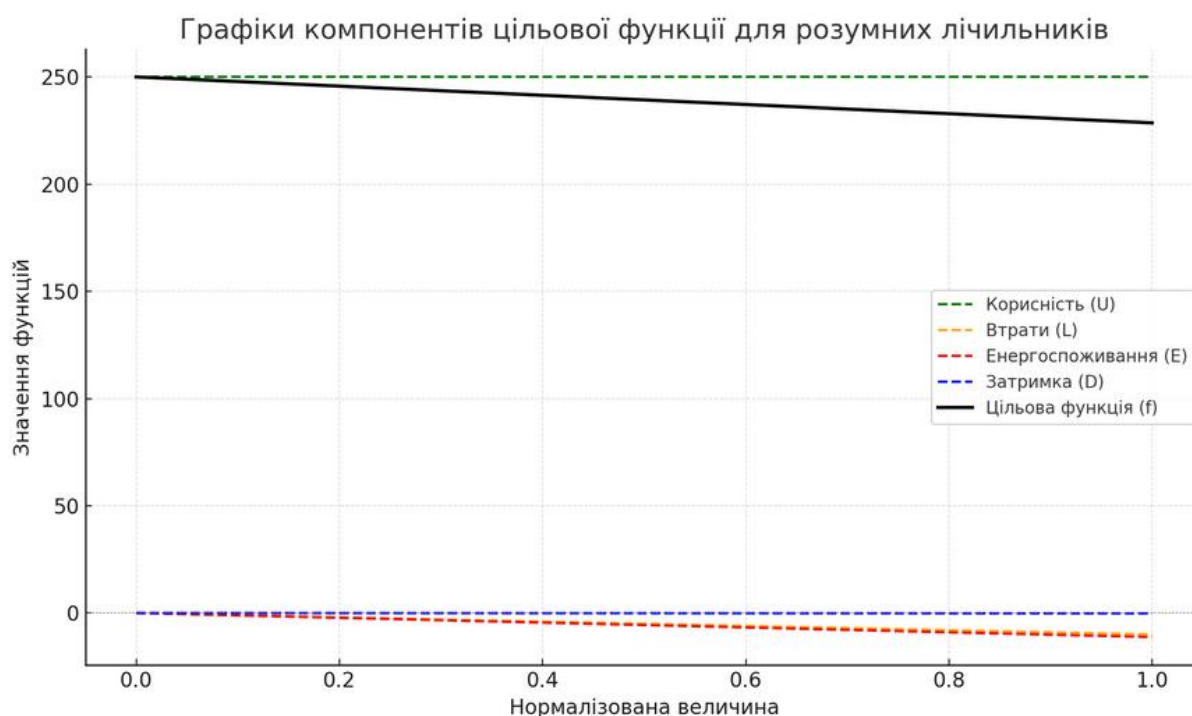


Рисунок 3.2 - Графіки компонентів цільової функції для систем  
з розумними лічильниками

Формулювання цільової функції задамо так, щоб вона враховувала такі показники: корисність ( $U(x)$ ), тобто кількість успішно оброблених транзакцій у системі; втрати ( $L(x)$ ), тобто невдалі транзакції (наприклад, через конфлікти в блоках); енергоспоживання ( $E(x)$ ), тобто енергоспоживання вузлів мережі, враховуючи майнінг і передачу даних; затримку ( $D(x)$ ), тобто час підтвердження транзакцій.

Тоді, цільову функцію задамо так:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot L(x) - w_3 \cdot E(x) - w_4 \cdot D(x), \quad (3.8)$$

де  $x$  — параметр оптимізації, який характеризує обсяг оброблюваних даних, потужність вузлів, складність майнінгу тощо;  $f(x)$  — функція цільової продуктивності мережі;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, кількість успішно оброблених

транзакцій у системі);  $L(x)$ — функція втрат через невдалі транзакції (наприклад, через конфлікти в блоках);  $D(x)$  — функція затримок або часу підтвердження транзакцій;  $E(x)$  — функція енергоспоживання вузлів мережі, враховуючи майнінг і передачу даних;  $w_1, w_2, w_3, w_4$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

Розглянемо змінні аргументи цільової функції для блокчейну.

Система блокчейн (B):  $N_b$  - кількість вузлів у мережі;  $D_b$  - середній розмір транзакції (МБ);  $E_b$  - енергоспоживання одного вузла за одиницю обробки (Дж/МБ).

Втрати ( $L(x)$ ): частка невдалих транзакцій.

Затримка ( $D(x)$ ): середній час підтвердження блоку.

Дані для обчислень подано в табл. 3.9.

Проведемо обчислення згідно даних табл. 3.9 за формулою (3.8) для отримання та аналізу значення цільової функції.

Таблиця 3.9

Дані для обчислень

Компонент	Значення
Кількість вузлів ( $N_b$ )	100
Середній розмір транзакції ( $D_b$ )	0.5 МБ
Енергоспоживання вузла ( $E_b$ )	0.2 Дж/МБ
Частка втрат ( $L(x)$ )	5% від загального обсягу даних
Середній час підтвердження ( $D(x)$ )	2 с

Корисність ( $U(x)$ ):

$$U(x) = \sum_{b \in B} D_b = N_b \cdot D_b = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ МБ.}$$

Втрати ( $L(x)$ ) на передачу даних:

$$L(x) = 0,05 \cdot U(x) = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ МБ.}$$

Енергоспоживання ( $E(x)$ ) включає енергію для лічильників та для мережі:

$$E(x) = E_0 \cdot U(x) = 0,2 \cdot 50 = 10 \text{ Дж.}$$

Затримка ( $D(x)$ ):

$$D(x) = 2 \text{ с.}$$

Цільова функція ( $f(x)$ ) при  $w_1 = 1, w_2 = 0,3, w_3 = 0,4, w_4 = 0,2$ :

$f(x) = 50 - 0.75 - 4 - 0.4 = 44.85$ . Результати обчислень подано в табл. 3.8.

Таблиця 3.10

## Результати обчислень

Параметр	Значення
Корисність ( $U(x)$ )	50 МБ
Втрати ( $L(x)$ )	2.5 МБ
Енергоспоживання ( $E(x)$ )	10 Дж
Затримка ( $D(x)$ )	2 с
Цільова функція ( $f(x)$ )	44.85

Значення цільової функції для блокчейну згідно табл. 3.10 є додатнім, що означає досягнення мети та, відповідно, оптимізації продуктивності інтелектуальних мереж блокчейну.

Таким чином, розроблена цільова функція для систем інтелектуальних мереж адекватно відповідає процесам і об'єктам та відображає розв'язок оптимізаційної задачі щодо продуктивності.

### 3.3 Висновки до третього розділу

Розроблена цільова функція, яку подано аналітичним виразом, що є математичною моделлю оптимізаційної задачі щодо продуктивності систем інтелектуальних мереж, адекватно відображає процеси і об'єкти для оптимізації їх за критеріями продуктивності. Проведені дослідження цільової функції для загального випадку, розумних лічильників, БПЛА та блокчейну є основою для їх узагальнення та розроблення методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.

## 4 МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ

### 4.1 Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Розроблення методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж вимагає структурованого підходу. Визначимо основні етапи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж так:

#### 1. Визначення цілей оптимізації.

Конкретизація задачі включає визначення об'єктів і процесів, які потрібно оптимізувати. Наприклад, це можуть бути пропускна здатність, затримки, енергоефективність, безпека, вартість. Також, потрібно встановити показники ефективності, тобто визначити метрики, за якими оцінюватиметься продуктивність системи.

Наприклад, потрібно мінімізувати затримки передачі даних у мережі 5G для забезпечення роботи автономних автомобілів. Для інтелектуальних лічильників електроенергії в контексті оптимізації може бути мінімізація енергоспоживання та збільшення тривалості роботи батарей.

#### 2. Аналіз архітектури системи.

Потрібно здійснити моделювання системи. Для цього необхідно розробити математичну або симуляційну модель інтелектуальної мережі. На цьому етапі треба оцінити параметри. Для розглядуваної предметної області такими характеристиками можуть бути такі: топологія мережі; пропускна здатність каналів; алгоритми маршрутизації.

Наприклад, можна використати UML-діаграми для візуалізації структури мережі. Наприклад, IoT-система включає сенсори, шлюзи, сервери обробки даних. Для мережі автономних автомобілів необхідно моделювати зв'язок між вузлами, які передають дані про розташування, використовуючи технології V2X.

#### 3. Ідентифікація обмежень.

Для всіх об'єктів та процесів, які включено до моделі, необхідно встановити технічні обмеження. Наприклад, такими можуть бути в контексті розглядуваної

предметної області: пропускна здатність; затримки; обсяги пам'яті; енергоспоживання. Реальні обмеження можуть включати такі: вартість; доступність обладнання; вимоги до безпеки. Регуляторні обмеження як правило включають такі: дотримання стандартів і норм.

Наприклад, максимальна пропускна здатність каналу Wi-Fi становить 1 Гбіт/с. Вбудовані сенсори мають обмежену потужність батареї (2000 мАг). Вартість додаткового обладнання не повинна перевищувати певної грошової суми. Дотримання стандартів безпеки, наприклад, IEEE 802.11. У системах розумного будинку потрібно забезпечити шифрування переданих даних, дотримуючись певного стандарту.

#### 4. Вибір методів оптимізації.

Для вибору методів оптимізації, як правило здійснюють підбір базових алгоритмів оптимізації. Вони можуть бути різними і стосуватись різних елементів і компонентів моделі об'єкту чи процесу. До глобальних алгоритмів оптимізації, які можна використати, віднесемо такі: генетичні алгоритми; еволюційні стратегії; рій часток. Локальні алгоритми оптимізації можуть бути такі: градієнтні методи; методи Ньютона. Також, можна використати алгоритми і методи машинного навчання: використання моделей штучного інтелекту (наприклад, нейронних мереж) для адаптивної оптимізації. Використовують, також, ітеративні підходи, які полягають в тому, що задача розбивається на етапи з поступовим покращенням розв'язку на кожному етапі.

Наприклад, потрібно використовувати генетичний алгоритм для оптимізації розташування базових станцій. Мінімізувати затримки передачі за умов заданої пропускної здатності. Застосовувати нейронні мережі для передбачення пікових навантажень у мережі. Використовувати методи кластеризації для групування сенсорів у мережі. У системах 5G застосовувати генетичні алгоритми для оптимізації розподілу частот.

#### 5. Розроблення моделі оптимізації.

Для розроблення моделі оптимізації здійснюють математичну постановку задачі дослідження, яка полягає в розробленні цільової функції та формалізації

обмеження. Після розроблення першого варіанту моделі здійснюють її моделювання в симуляційних середовищах з метою її покращення та досягнення точності. Для цього етапу використовують такі симулятори: MATLAB; NS3; OMNeT++; Python із бібліотеками, такими як TensorFlow або PyTorch).

Наприклад, використовувати Python (бібліотека SciPy) для реалізації алгоритмів оптимізації. У мережах IoT створити модель розташування сенсорів, яка мінімізує загальну відстань передачі даних.

#### 6. Валідація та тестування.

Для перевірки роботи системи здійснюють емуляцію її функціонування, наприклад, так: тестування на симуляційних моделях. Також, необхідно здійснити на реальних або згенерованих наборах даних тестування системи. Обов'язковим елементом є виконання порівняння так: зіставлення продуктивності з іншими підходами.

Наприклад, моделювати роботу мережі за допомогою спеціалізованих середовищ моделювання, які загальновідомі та результати моделювання з використанням яких приймаються рештою дослідників з належним ступенем довіри. Перевіряти зменшення затримки при оптимізації маршрутизації. Також, потрібно провести експерименти з реальною мережею. Наприклад, оцінити вплив оптимізації на мережу розумного міста. Потрібно, також, використовувати симуляції, щоб перевірити, як зміниться пропускна здатність мережі при збільшенні кількості вузлів.

#### 7. Ітеративне вдосконалення.

Для вдосконалення моделі потрібно здійснити аналіз результатів тестування, удосконалення алгоритмів на основі аналізу слабких місць, повторне тестування та валідацію.

Наприклад, потрібно визначити відповідність результату оптимізації, який очікується. Якщо результат вважається недостатнім, то потрібно встановити причини або використати алгоритми розв'язання задач з невизначеністю, наприклад, метод Монте-Карло. Також, можна змінювати параметри алгоритмів, наприклад, коефіцієнти мутації в генетичному алгоритмі. Після початкового тестування змініть вагові коефіцієнти в нейронній мережі для більш точної оптимізації.

## 8. Впровадження у реальну мережу.

На етапі впровадження у реальну мережу потрібно виконати інтеграцію: впровадження у реальне середовище. Також, виконати моніторинг роботи системи з урахуванням розробленої моделі оптимізації: налаштування систем моніторингу для оцінки продуктивності. Обов'язковим кроком є адаптація, тобто постійне оновлення параметрів у відповідь на зміни у мережі.

Потрібно налаштувати автоматизовані системи оптимізації. Наприклад, впровадити хмарну платформу для централізованого управління IoT-пристроями. Для візуалізації продуктивності мережі використати спеціалізовані засоби. Також, налаштувати автоматичне оновлення програмного забезпечення для підтримки змін у мережі. Наприклад, у розумному місті впровадити моніторинг у режимі реального часу для оцінки затримок у системі управління транспортом.

## 9. Документація та поширення результатів.

Розробка технічної документації необхідна для забезпечення фіксування отриманих результатів роботи з метою отримання можливості подальших удосконалень.

Наприклад, потрібно описати цільову функцію, обмеження, алгоритми та результати у вигляді технічного звіту.

Таким чином, розроблені етапи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж, здійснено деталізацію розробки кожного з етапів із прикладами для розроблення методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж. Цей підхід забезпечує систематичний процес оптимізації продуктивності.

Розглянемо адаптацію цих етапів безпосередньо для розроблення методу оптимізації продуктивності системи інтелектуальних мереж, що включають пристрої IoT, сервер із множинним доступом і БПЛА як комунікаційний вузол.

Визначення цілей оптимізації. Основна задача полягає у забезпеченні ефективної взаємодії між IoT-пристроями, МЕС-сервером і БПЛА з урахуванням: мінімізації затримок передачі даних; збільшенні енергоефективності IoT-пристроїв та БПЛА; максимізації пропускної здатності. Ключові показники ефективності: середня

затримка передачі даних; середня пропускна здатність мережі; споживана енергія IoT-пристроїв; час польоту БПЛА.

Аналіз архітектури системи. Компоненти системи такі: IoT-пристрої (сенсори, камери, трекери, що передають дані); сервер (використовується для локальної обробки даних з IoT-пристроїв); БПЛА (тимчасовий вузол для підсилення сигналу або збирання даних у важкодоступних місцях). Особливості зв'язків: передача на сервер з IoT-пристроїв через БПЛА або безпосередньо в сервер; синхронізація результатів обробки даних на сервері і в хмарі; БПЛА працює як ретранслятор або збирач даних.

Ідентифікація обмежень. Технічні обмеження пов'язані з потужністю батарей IoT-пристроїв, часом польоту БПЛА, пропускною здатністю бездротового каналу. Обмеження на маршрутизацію такі: БПЛА може обслуговувати лише певну кількість пристроїв; сервер з множинним доступом обмежений обсягом обробки даних.

Вибір методів оптимізації. Алгоритми для задачі базуються на розподіленні обчислень. Зокрема, наявне в системі використання БПЛА для передавання лише важливих даних на сервер. Оптимізація траєкторії БПЛА здійснюватиметься із застосуванням алгоритмів ройового інтелекту. Мінімізація енергоспоживання досягатиметься, наприклад, з використанням генетичних алгоритмів або методу градієнтного спуску для налаштування параметрів пристроїв IoT. Машинне навчання може бути використано згідно моделей глибокого навчання для прогнозування затримок у передачі даних. Кластеризація IoT-пристроїв здійснюватиметься, наприклад, за географічною близькістю для оптимізації роботи БПЛА.

Розроблення моделі оптимізації. Математична постановка сфокусована на розробленні цільової функції, яка може базуватись на мінімізації сумарної затримки на основі обсягу даних IoT-пристрою; пропускної здатності каналу; обчислювального навантаження; обмеження енергоспоживання IoT-пристроїв та тривалості польоту БПЛА. Алгоритми, які можуть використані, такі: ройовий інтелект для траєкторії БПЛА; частинки як можливі траєкторії польоту; функції придатності як сума затримок передачі даних; генетичний алгоритм для розподілу обчислювального навантаження між сервером і хмарою.

Валідація та тестування. Симуляція системи для моделювання мережі та

використання Python (бібліотеки SciPy, TensorFlow) для оптимізації. Тести на основі параметрів затримки передачі даних при змінній кількості IoT-пристроїв, впливу змін траєкторії БПЛА на загальну продуктивність. Реальні дані використовувати щодо мобільності БПЛА та трафіку IoT-пристроїв з реальних систем. Ітеративне вдосконалення базуватимемо на визначенні вузьких місць, наприклад, перенавантаження БПЛА. Вдосконалення алгоритмів здійснюватимемо на основі регулювання параметрів (інерційна вага, швидкість частинок).

Впровадження у реальну мережу здійснюватимемо згідно рис. 2.2 на основі інтеграції основних компонентів системи з встановленням серверів у ключових точках мережі, налаштуванні БПЛА на автоматичний зліт у години пікового навантаження та встановлення системи моніторингу для відстеження продуктивності системи в реальному часі.

Документація та поширення результатів базуватимемо на основі результатів експерименту з системою інтелектуальних мереж

Згідно розроблених етапів оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА і розробленої математичної моделі оптимізації продуктивності у вигляді цільової функції задамо основні кроки методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж такими основними кроками:

1. Ініціалізуйте параметри системи.
2. Визначте функцію розрахунку затримки.
3. Впровадити оптимізацію рою частинок (PSO):
4. Оптимізуйте траєкторію безпілотників.
5. Виведіть оптимізовану траєкторію безпілотників.
6. Візуалізуйте результати.

Деталізуємо кожен з основних кроків методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж так.

Ініціалізація параметрів системи повинна включати визначення кількості пристроїв IoT та розмір поля, випадково згенеровані координати для пристроїв IoT та розмірів даних, визначення параметрів БПЛА (швидкість, акумулятор, вихідне

положення), визначення ємності серверу з множинним доступом.

Визначення функції розрахунку затримки включатиме для кожного пристрою IoT обчислення мінімальної відстані до шляху БПЛА, обчислення часу передачі та поширення, підсумовування цього часу, щоб отримати загальну затримку.

Впровадження оптимізації рою частинок вимагає ініціалізації частинки з випадковими траєкторіями навколо початкового положення БПЛА, встановлення швидкості частинок до нуля, встановлення локальних та глобальних найкращих рішень на основі початкової затримки.

Оптимізація траєкторії безпілотників повинна бути здійснена для кожної ітерації на основі оновлення швидкості за рахунок інерції, когнітивних та соціальних компонентів, оновлення положення частинок, оновлення затримки нових позицій, оновлення особистих даних БПЛА при покращенні затримки, оновленні глобальних змінних при будь-якій кращій затримці частинки.

Виведення оптимізованої траєкторії БПЛА базується на відображенні глобальної найкращої траєкторії, пристроях IoT, стартовому положенні БПЛА та оптимізованій траєкторії.

Візуалізацію результатів необхідно здійснювати використовуючи графік розсіювання для пристроїв IoT та будуючи оптимізований шлях безпілотника.

Таким чином, розроблено етапи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА. Етапи деталізовано до рівня пристроїв IoT, серверу та БПЛА. Результати щодо розроблених етапів оптимізації є основою для розроблення методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.

Згідно розроблених етапів оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА і розробленої математичної моделі оптимізації продуктивності у вигляді цільової функції.

## 4.2 Дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Симуляція та моделювання інтелектуальних мереж з пристроями Інтернету речей (IoT), сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку є складним завданням, що потребує врахування багатьох технічних аспектів. Розглянемо основні етапи реалізації такої симуляції:

Спочатку потрібно здійснити формулювання задачі дослідження щодо методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж. Далі визначити ключові параметри системи. Типи пристроїв IoT: датчики, камери, розумні пристрої. Характеристики серверу такі: пропускна здатність; затримка; енергоспоживання. Роль БПЛА: реле зв'язку; моніторинг; забезпечення мережі у віддалених зонах. Топологія мережі: стаціонарні вузли; мобільні пристрої; зони покриття. Також, важливим елементом такого дослідження через симуляцію є встановлення цілі моделювання: оптимізація енергоспоживання; мінімізація затримок; підвищення пропускної здатності.

Наступним кроком є вибір інструментів для симуляції. Для моделювання таких систем підходять спеціалізовані програмні пакети. NS-3 (Network Simulator 3) - для моделювання мережевої взаємодії. MATLAB/Simulink - для аналітичного моделювання та оптимізації. OMNeT++ - для імітації роботи розподілених систем. Simu5G - для роботи з мережами 5G. Gazebo або AirSim - для симуляції поведінки БПЛА в реальному середовищі.

Інтеграція компонентів відіграє ключову роль, бо недостатня інтеграція призведе до розбалансування всієї інтелектуальної мережі. В IoT-пристроях головним із завдань в контексті симуляції є моделювання обміну даними. Для цього необхідно використовувати протоколи MQTT, CoAP або HTTP/HTTPS та врахувати енергоспоживання, тобто для цього треба розрахувати енергозатрати залежно від кількості переданих даних і частоти зв'язку. Сервер з множинним доступом може поєднувати хмарні або периферійні обчислення (Edge/Fog Computing) та повинен враховувати особливості розподілу ресурсів для моделювання алгоритмів

балансування навантаження. Для БПЛА треба врахувати траєкторію польоту (оптимізація за допомогою алгоритмів штучного інтелекту), мережевий зв'язок (використання технологій LTE, Wi-Fi або 5G).

Алгоритми оптимізації повинні використовувати сучасні підходи для оптимізації роботи системи. Наприклад, штучний інтелект (AI). Тому, потрібно застосовувати методи машинного навчання для адаптації мережі до змінних умов, еволюційні алгоритми (наприклад, генетичні алгоритми для оптимального маршруту БПЛА), математичне програмування (для мінімізації енергоспоживання або затримки).

Етапи симуляції розпочинають з ініціалізації, тобто налаштування всіх вузлів, серверів і моделей БПЛА. Далі, запуск сценарію, тобто моделювання типових сценаріїв (наприклад, аварійного зв'язку, збору даних). Аналіз результатів включає візуалізацію затримок, пропускну здатності, стабільності мережі.

Нарешті, оцінка продуктивності обчислюється після моделювання та включає потребу оцінити ключові показники: затримку передачі даних; відсоток втрати пакетів; покриття мережі; тривалість роботи пристроїв на одній батареї; практичне значення.

Ця симуляція є корисною для розвитку сучасних систем зв'язку в міських умовах (розумне місто), військових і рятувальних операціях, а також для покращення роботи IoT у віддалених районах.

Розробимо в контексті симуляції програму (Додаток Б). Створення повної програми, яка реалізує метод оптимізації для описаної системи (IoT, сервер, БПЛА), потребує реалізації кількох компонентів: симуляції роботи мережі; оптимізаційних алгоритмів (наприклад, PSO або генетичних); моніторингу ключових показників. Спрощений приклад на Python (Додаток Б), що демонструє базову ідею оптимізації траєкторії БПЛА та розподілу обчислень.

Основні компоненти програми. IoT-пристрої для генерації випадкових даних. БПЛА для дослідження оптимізації траєкторії для збору даних. Сервер для моделювання обробки даних. Оптимізація здійснена в контексті пошуку оптимальної траєкторії БПЛА для мінімізації затримки.

Програма генерує випадкові IoT-пристрої, оптимізує траєкторію БПЛА для мінімізації затримок передачі даних, візуалізує результати.

Система контролює загальний потік польоту моделювання багато БПЛА і багато сценаріїв їх обльоту території, що складається з контролера польоту та плагіну симулятора БПЛА. Контролер польоту інтерпретує сценарій, розбираючи сценарій, який містить набір команд, написаних користувачем, а потім передає команду до плагіну симулятора БПЛА, який працює як інтерфейс фактичного симулятора польоту БПЛА. Плагін симулятора БПЛА може завантажувати один або кілька симуляторів польоту, коли починається моделювання. Якщо використовуваний симулятор польоту може імітувати лише одиночні БПЛА, для моделювання багато БПЛА і багато сценаріїв їх обльоту території потрібні лише симулятори та плагіни.

Розташування та зміну стану літаючих БПЛА отримують симуляторний двигун, який враховує такі фактори навколишнього середовища, як турбулентність та перешкоди, та фактори контролю, такі як команди користувачів та фізичні особливості. Потім контролер польоту отримує стан БПЛА з симулятора і надсилає пакети, що додають часову позначку через мережу.

Моделювання польоту БПЛА та результат моделювання залежать від параметрів, отриманих з фізичного кадру та специфікацій БПЛА, тобто, з фіксованого крила або багаторічного ротора, кількості роторів та його компонентів польотної системи, таких як контролер польоту та стек польоту програмного забезпечення. Це означає, що ряд моделей БПЛА та контролерів польотів підтримують власні симулятори польоту та обладнання в циклі або програмне забезпечення в модулях. Налаштовуючи джерела, користувачі можуть імітувати будь-який механізм управління польотом.

Сервер з множинним доступом може підключитися та моделювати мережеве середовище для отримання поточного стану мережі. Він забезпечує інтерфейс для екземплярів мережевого моделювання. Коли він встановлює мережеве з'єднання, то він закликає метод мережі для налаштування середовища моделювання мережі на основі числових параметрів, таких як розмір мережі (кількість вузлів), початкове положення БПЛА та будь-які параметри БПЛА мережі (протоколи, карта перешкод ,

тощо). Сервер відкриває нитку для кожного з'єднання з пристроями IoT та БПЛА і генерує екземпляр мережевого моделювання. Кожна нитка працює на моделювання за допомогою команди, яку викликають. Між викликом команд він керує мережевим симулятором і відображає зміни розташування одного або декількох БПЛА, що надсилаються з центру системи через плагін мережевого симулятора.

Через зміни мережі, що використовуються за змінами розташування, мережевий симулятор не повинен просунути свій час моделювання, оскільки місце розташування БПЛА може бути змінено в цей час просування. Порушення цієї залежності викликає невідповідність та неточність виходу моделювання. Для уніфікування часової шкали моделювання пропонується алгоритм управління часом, який дотримується схеми управління часом протоколу для синхронізації інформації, чутливої до часу паралельно.

Таким чином, здійснено дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями Інтернету речей (IoT), сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж. Розроблено програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж на Python (Додаток Б).

#### 4.3 Висновки до четвертого розділу

Розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА. Кроки розробленого методу деталізовано до рівня пристроїв IoT, серверу та БПЛА.

Здійснено дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж. Розроблено програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж на Python.

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено новий метод [87] метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку та отримано такі результати.

1. Проаналізовано відомі методи та засоби оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.

2. Розроблено цільову функцію для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.

3. Розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА.

4. Здійснено дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж. Також, розроблено програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж на Python.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Yan Z., Shi R., Yang Z. ICT Development and Sustainable Energy Consumption: A Perspective of Energy Productivity. *Sustainability* 2018, 10, 2568. <https://doi.org/10.3390/su10072568>
2. Józefowska J., Nowak M., Różycki R., Waligóra G. Survey on Optimization Models for Energy-Efficient Computing Systems. *Energies*. 2022; 15(22):8710. <https://doi.org/10.3390/en15228710>
3. Wang L., Zhu T. Will the Digital Economy Increase Energy Consumption?—An Analysis Based on the ICT Application Research. *Chin. J. Urban Environ. Stud.* 2022, 10, 2250001. <https://doi.org/10.1142/S2345748122500014>
4. Lange S., Santarius T., Pohl J. Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand? *Ecol. Econ.* 2020, 176, 106760.
5. Andrae, A.S. New perspectives on internet electricity use in 2030. *Eng. Appl. Sci. Lett.* 2020, 3, Pp. 19–31.
6. Lorincz J., Capone A., Wu J. Greener, Energy-Efficient and Sustainable Networks: State-Of-The-Art and New Trends. *Sensors*. 2019, 19, 4864.
7. Nafus D., Schooler E.M., Burch K.A. Carbon-Responsive Computing: Changing the Nexus between Energy and Computing. *Energies*. 2021, 14, 6917.
8. Pruhs K. Green Computing Algorithmics. In *Computing and Software Science: State of the Art and Perspectives*. Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2019. Pp. 161–183.
9. Fagas G., Gallagher J.P., Gammaitoni L., Paul D.J. Energy Challenges for ICT. In *ICT—Energy Concepts for Energy Efficiency and Sustainability*; Fagas, G., Gammaitoni, L., Gallagher, J.P., Paul, D.J., Eds.; *IntechOpen*: Rijeka, Croatia, 2017; Chapter 1.
10. Bourhnane S., Abid M., Zine-dine K., El Kamoun N., Benhaddou D. High-Performance Computing: A Cost Effective and Energy Efficient Approach. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020, 5, Pp. 1598–1608.

11. Xiang Z., Zheng Y., He M., Shi L., Wang D., Deng S., Zheng Z. Energy-effective artificial internet-of-things application deployment in edge-cloud systems. *Peer-Netw. Appl.* 2022, 15, Pp. 1029–1044.
12. Vashisht P., Kumar V. A Cost Effective and Energy Efficient Algorithm for Cloud Computing. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.* 2022, 7, 681–696.
13. Yin G., Chen R., Zhang Y. Effective task offloading heuristics for minimizing energy consumption in edge computing. In *Proceedings of the 2022 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics)*, Espoo, Finland, 22–25 August 2022. Pp. 243–249.
14. Błażewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Sterna M., Weglarz J. Handbook on Scheduling. *Springer*: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019.
15. Różycki R., Waligóra G. Scheduling identical jobs with linear resource usage profile to minimize schedule length. In *Proceedings of the 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, Miedzyzdroje, Poland, 26–29 August 2019.
16. Jaschke D., Montangero S. Is quantum computing green? An estimate for an energy-efficiency quantum advantage. *arXiv* 2022, arXiv:2205.12092.
17. Aifer M., Deffner S. From quantum speed limits to energy-efficient quantum gates. *New J. Phys.* 2022, 24, 055002, DOI 10.1088/1367-2630/ac6821.
18. Toosi A. N., Agarwal C., Mashayekhy L., Moghaddam S.K., Mahmud R., Tari Z. GreenFog: a framework for sustainable fog computing. *Int. Conf. Serv. -Oriented Comput.* (2022), pp. 540-549.
19. Natgunanathan I., Fernando N., Loke S.W., Weerasuriya C. Bluetooth low energy mesh: applications, considerations and current state-of-the-art. *Sensors*, 23 (2023), p. 1826.
20. Hijji M., Ahmad B., Alam G., Alwakeel A., Alwakeel M., Abdulaziz Alharbi L., *et al.* Cloud servers: resource optimization using different energy saving techniques. *Sensors*, 22 (2022), p. 8384.

21. Yao W., Wang Z., Hou Y., Zhu X., Li X., Xia Y. An energy-efficient load balance strategy based on virtual machine consolidation in cloud environment. *Future Gener. Comput. Syst.*, 146 (2023), pp. 222-233.
22. Kavitha J., Rao P.S., Babu G.C. Energy efficient resource utilization of cloud computing environments for deployment models. in: *Proceedings of the Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, 2023 (2023), pp. 1111-1119.
23. Sadashiv N. Load balancing in fog computing: a detailed survey. *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, 13 (2023), pp. 729-750.
24. Khan L.U., Yaqoob I., Tran N.H., Kazmi S.A., Dang T.N., Hong C.S.. Edge-computing-enabled smart cities: a comprehensive survey. *IEEE Internet Things J.*, 7 (2020), pp. 10200-10232
25. Avasalcai C., Murturi I., Dustdar S.. Edge and fog: a survey, use cases, and future challenges. *Fog Comput. Theory Pract.* (2020), pp. 43-65.
26. Ullah A., Nawi N.M., Ouham S. Recent advancement in VM task allocation system for cloud computing: review from 2015 to 2021. *Artif. Intell. Rev.* (2022), pp. 1-45.
27. Guo M., Li Q., Peng Z., Liu X., Cui D. Energy harvesting computation offloading game towards minimizing delay for mobile edge computing. *Comput. Netw.*, 204 (2022), Article 108678.
28. Chen Y., Zhao F., Lu Y., Chen X. Dynamic task offloading for mobile edge computing with hybrid energy supply. *Tsinghua Sci. Technol.*, 28 (2022), pp. 421-432.
29. Herath H., Prematilake R., Madhusanka B. Integration of Fog Computing and IoT-Based Energy Harvesting (EHIoT) Model for Wireless Sensor Network. *Energy Conserv. Solut. Fog-Edge Comput. Paradig.* (2022), pp. 215-231.
30. Jahangard L.R., Shirmarz A. Taxonomy of green cloud computing techniques with environment quality improvement considering: a survey. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 13 (2022), pp. 1247-1269.
31. Zhang K., Zhang Y., Liu J., Niu X. Recent advancements on thermal management and evaluation for data centers. *Appl. Therm. Eng.*, 142 (2018), pp. 215-231.

32. Park B.R., Choi Y.J., Choi E.J., Moon J.W. Adaptive control algorithm with a retraining technique to predict the optimal amount of chilled water in a data center cooling system. *J. Build. Eng.*, 50 (2022), Article 104167.
33. Iftikhar S., Ahmad M.M.M., Tuli S., Chowdhury D., Xu M., Gill S.S., *et al.* HunterPlus: AI based energy-efficient task scheduling for cloud–fog computing environments. *Internet Things*, 21 (2023), Article 100667.
34. Ilager S., Mralidhar R., Ramamohanarao K., Buyya R. A data driven frequency scaling approach for deadline-aware energy efficient scheduling on graphics processing units (GPUs). *Proceedings of the 20th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Internet Computing (CCGrid 2020)*. 2020; 579-588.
35. Dulac-Arnold G., Levine N., Mankowitz D.J. *et al.* An empirical investigation of the challenges of real world reinforcement learning. *CoRR abs/2003.11881*, 2020.
36. Yuan H., Bi J., Zhou M. Energy-efficient and QoS-optimized adaptive task scheduling and management in clouds. *IEEE Trans Autom Sci Eng.* 2022; 19(2): 1233-1244.
37. Kim T., Lee S. Evolution of phase-change memory for the storage-class memory and beyond, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, no. 4, pp. 1394-1406, Apr. 2020.
38. Luo Q. *et al.* 8-layers 3D vertical RRAM with excellent scalability towards storage class memory applications, *Proc. Int. Electron Devices Meeting*, pp. 2.7.1-2.7.4, 2018.
39. Mittal S., Vetter J. S. A survey of software techniques for using non-volatile memories for storage and main memory systems, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 27, no. 5, pp. 1537-1550, May 2016.
40. Izraelevitz J. *et al.* Basic performance measurements of the Intel Optane DC persistent memory module, 2019, [online] Available: <http://arxiv.org/abs/1903.05714>.
41. Foong A., Hady F. Storage as fast as rest of the system, *Proc. IEEE 8th Int. Memory Workshop*, pp. 1-4, 2016.
42. Yang J. *et al.* An empirical guide to the behavior and use of scalable persistent memory, *Proc. USENIX Conf. File Storage Technol.*, pp. 169-182, 2020.
43. Xiao T. P. *et al.* Analog architectures for neural network acceleration based on non-volatile memory, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 7, no. 3, 2020.

44. Qureshi M. K., Kim D. H., Khan S., Nair P. J., Mutlu O. AVATAR: A variable-retention-time (VRT) aware refresh for DRAM systems, *Proc. Int. Conf. Dependable Syst. Netw.*, pp. 427-437, 2015.
45. Chang K. K. W. et al. Improving DRAM performance by parallelizing refreshes with accesses, *Proc. Int. Symp. High-Perform. Comput. Archit.*, pp. 356-367, 2014.
46. Ha H., Pedram A., Richardson S., Kvatinsky S., Horowitz M. Improving energy efficiency of DRAM by exploiting half page row access, *Proc. Annu. Int. Symp. Microarchit.*, pp. 1-12, 2016.
47. Kim S., Kwak W., Kim C., Baek D., Huh J. Charge-aware DRAM refresh reduction with value transformation, *Proc. IEEE Int. Symp. High Perform. Comput. Archit.*, pp. 663-676, 2020.
48. Chatterjee N. et al. Architecting an energy-efficient DRAM system for GPUs, *Proc. Int. Symp. High-Perform. Comput. Archit.*, pp. 73-84, 2017.
49. O'Connor M. et al. Fine-grained DRAM: Energy-efficient DRAM for extreme bandwidth systems. *Proc. IEEE/ACM 50th Annu. Int. Symp. Microarchit.*, pp. 41-54, 2017.
50. Lee D. et al. Simultaneous multi-layer access: Improving 3D-stacked memory bandwidth at low cost. *ACM Trans. Archit. Code Optim.*, vol. 12, no. 4, pp. 1-29, 2016.
51. Bera R. et al. Hermes: Accelerating long-latency load requests via perceptron-based off-chip load prediction, *Proc. IEEE/ACM 55th Int. Symp. Microarchit.*, pp. 1-18, 2022.
52. Mittal S. A survey of recent prefetching techniques for processor caches. *ACM Comput. Surveys*, vol. 49, no. 2, pp. 1-35, 2016.
53. Mittal S., Vetter J. S. A survey of architectural approaches for data compression in cache and main memory systems. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 27, no. 5, pp. 1524-1536, May 2016.
54. Li D. et al. Priority-based cache allocation in throughput processors. *Proc. IEEE 21st Int. Symp. High Perform. Comput. Archit.*, pp. 89-100, 2015.
55. Xie X. et al. CRAT: Enabling coordinated register allocation and thread-level parallelism optimization for GPUs. *IEEE Trans. Comput.*, vol. 67, no. 6, pp. 890-897, Jun. 2018.

56. Ojala T. Oksanen P. Ministry of Transport and Communications. ISBN 978-952-243-595-8. *In: Climate and Environmental Strategy for the ICT Sector*, 2021.

57. Freitag C., Berners-Lee M., Widdicks K. et al. The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*. 2021;2:100340

58. Ferrebeouf H. Lean ICT: Towards Digital Sobriety. The Shift Project: *Technical report*, March 2019

59. Koot M., Wijnhoven F. Usage impact on data center electricity needs: a system dynamic forecasting model. *Appl Energy*. 2021;291:1.

60. Liu Y., Wei X., Xiao J. et al. Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers. *Global Energy Interconnection*. 2020;3: 272–82

61. Wang P. Zhong P. Yu M. et al. Trends in energy consumption under the multi-stage development of ICT: evidence in China from 2001 to 2030. *Energy Rep*. November 2022;8:8981–95.

62. Andrae 2021, Anders SG. Andrae Internet's handprint. *Engineering and Applied Science Letter*. 2021;4:80–97

63. Jagroep E.A., van der Werf J.M., Brinkkemper S. et al. Software energy profiling: comparing releases of a software product. *In: Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE), IEEE*, May 2016, 523–32.

64. Hennessy J.L., Patterson D.A. A new golden age for computer architecture. *Commun ACM*. 2019;62:48–60

65. Nielsen J. Nielsen's Law of Internet Bandwidth. <https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/> (Retrieved 24.5.2022)

66. Anders S.G. Andrae, prediction studies of electricity use of global computing in 2030. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2019;8:27–33.

67. Pereira R., Couto M., Ribeiro F. et al. Energy Efficiency across Programming Languages. *In: Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering*, October 2017, 2017, 256–67.

68. Manotas I, Bird C, Zhang R et al. An empirical study of practitioners' perspectives on green software engineering. *In: 38th International Conference on Software Engineering, ACM, New York City, USA, 2016, 237–48.*
69. Schuler A., Anderst-Kotsis G. Characterizing Energy Consumption of Third-Party API Libraries using API Utilization Profiles. *In: Proceedings of the 14th ACM / IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM), IEEE, New York City, USA, October 2020, 1–11*
70. Sharma Y., Javadi B., Si W., Sun D. Reliability and energy efficiency in cloud computing systems: survey and taxonomy. *J Netw Comput Appl.* 2016;74:66–85
71. Pärssinen M., Kotila M., Cuevas R. et al. Environmental impact assessment of online advertising. *Environ Impact Assess Rev.*2018;73:177–200
72. Strubell E., Ganesh A., McCallum A. Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research. *In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 34, AAAI Press, California, USA, 2020.*
73. Gupta U., Kim Y.G., Lee S. et al. Chasing carbon: the elusive environmental footprint of computing. *IEEE Micro.* 2022;42:37–47
74. Gossart C. Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. *In: ICT Innovations for Sustainabilit. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2014, 435–48*
75. Lannelongue L., Grealey J., Inouye M. Green algorithms: quantifying the carbon footprint of computation. *Advanced science.* 2021;8:2100707
76. Prieto B., Escobar J.J., Gómez-López J.C., Díaz A.F., Lampert T. Energy Efficiency of Personal Computers: A Comparative Analysis. *Sustainability.* 2022; 14(19):12829. <https://doi.org/10.3390/su141912829>
77. European Commission, 2030 Climate & Energy Framework. Available online: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en) (accessed on 30 January 2024).
78. Landré D., Nicod J.-M., Christophe V. Optimal standalone data centre renewable power supply using an offline optimization approach. *Sustain. Comput. Inform. Syst.* 2022, 34, 100627.

79. Zhao M., Yu J.J., Li W.T., Liu D., Yao S., Feng W., She C., Quek T.Q. Energy-aware task offloading and resource allocation for time-sensitive services in mobile edge computing systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2021, 70, 10925–10940.

80. Qureshi B., Alwehaibi S., Koubaa A. On Power Consumption Profiles for Data Intensive Workloads in Virtualized Hadoop Clusters. *In Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Atlanta, GA, USA, 1–4 May 2017; pp. 42–47.

81. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A., Lysyi A. Thermal and RGB Images Work Better Together in Wind Turbine Damage Detection. *International Journal of Computing*, 2025. № 23(4), Pp. 526-535. <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3752>

82. Melnychenko O., Savenko O., Radiuk P. Apple detection with occlusions using modified YOLOv5-v1. *in Proc. 12th IEEE Int. Conf. Intell. Data Acquisition Adv. Comput. Syst.: Technol. Appl. (IDAACS'2023)*, Dortmund, Germany, Sep. 7–9, 2023. New York, NY, USA: IEEE, Inc., 2023. Pp. 107–112, <https://doi.org/10.1109/idaacs58523.2023.10348779>.

83. Melnychenko O., Scislo L., Savenko O., Sachenko A., Radiuk P. Intelligent integrated system for fruit detection using multi-UAV imaging and deep learning. *Sensors*, vol. 24, № 6, p. 1913, Mar. 2024, <https://doi.org/10.3390/s24061913>.

84. Melnychenko O., Savenko O. A self-organised automated system to control unmanned aerial vehicles for object detection. *in Proc. 4th Int. Workshop Intell. Inf. Technol. & Syst. Inf. Secur. (IntellITSIS'2023)*, Khmelnytskyi, Ukraine, Mar. 22–24, 2023. Aachen: CEUR-WS.org, 2023, pp. 589–600. Accessed: Aug. 27, 2024. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper40.pdf>

85. Green500 List June 2022. Available online: <https://www.top500.org/lists/green500/list/2022/06/> (accessed on 26 August 2024).

86. Khan K.N., Hirki M., Niemi T., Nurminen J.K., Ou Z. RAPL in action: Experiences in using RAPL for power measurements. *ACM Trans. Modeling Perform. Eval. Comput. Syst.* 2018, 3, 9. <https://doi.org/10.1145/3177754>

87. Ткачук В.А., Ковальчук В.К., Лигун О.О. Метод оптимізації продуктивності

систем інтелектуальних мереж / Збірник наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». Хмельницький, 2024, С. 502-504. <https://kn.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2024-corpuspaper.pdf>

Додаток А  
Презентація роботи

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Метод оптимізації  
продуктивності систем  
інтелектуальних мереж

Виконав: студент 2 курсу,  
група КІ2М-23-2  
Владислав ТКАЧУК

Керівник: канд. екон. наук,  
доцент Світлана САЧЕНКО

2

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Актуальність роботи полягає в розробці методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Дослідження, представлені у кваліфікаційній роботі, проводились в рамках студентської наукової роботи кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету.

## Перелік публікацій

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [87] у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». (Хмельницький – 2024. – С. 303-305).

“

- ▶ Метою кваліфікаційної роботи магістра є оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.
- ▶ Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:
  - ▶ - проаналізувати відомі методи оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
  - ▶ - розробити цільову функцію для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж;
  - ▶ - розробити метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА;
  - ▶ - здійснити дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж.

”

“

Об'єктом дослідження є процес оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Предметом дослідження є методи та протоколи забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено новий метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

На основі проведених досліджень розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж (на Python).

- ▶ Інтелектуальні мережі (або Smart Grid) [1, 2] — це сучасна енергетична система, яка поєднує традиційні енергетичні мережі з цифровими технологіями для підвищення ефективності, надійності та стійкості електропостачання.
- ▶ Основними характеристиками [3-5] інтелектуальних мереж є цифровізація (використання сенсорів, систем моніторингу та аналізу даних у реальному часі); автоматизація (самостійне регулювання та оптимізація роботи мережі без постійного втручання людини); інтеграція відновлюваних джерел енергії (легке підключення сонячних панелей, вітрових турбін та інших відновлюваних джерел); двосторонній обмін енергією (користувачі можуть бути як споживачами, так і виробниками енергії (проюзерами)); ефективність енергоспоживання (допомога споживачам у зменшенні витрат через інформаційні системи та оптимізоване управління).

Дослідження архітектури та продуктивності різних систем інтелектуальних мереж, тобто систем розумних ґридів, систем периферійних обчислень, систем блокчейн та цифрових контролерів для різних систем, є перспективним. Продуктивність є найважливішим аспектом дослідження. Для її забезпечення необхідно розробити моделі систем для задоволення затримок, пропускної здатності та потреб в енергії, а також оптимізувати продуктивність запропонованих архітектур та рішень. В якості дослідження будемо розглядати розумне середовище IoT, яке складається з областей інтересів (OI), де розташовані пристрої IoT, що виконують програми. Базова станція оснащена сервером для під'єднання периферійних пристроїв з множинним доступом і розташована в інтелектуальному середовищі IoT, а БПЛА автономно знаходиться над територією, щоб застосунково обслуговувати обчислювальний контролер вузлів IoT. Вузли IoT мають персоналізовані мінімальні передумови, тобто затримку, споживання енергії та прийнятний рівень падіння точності висновків.

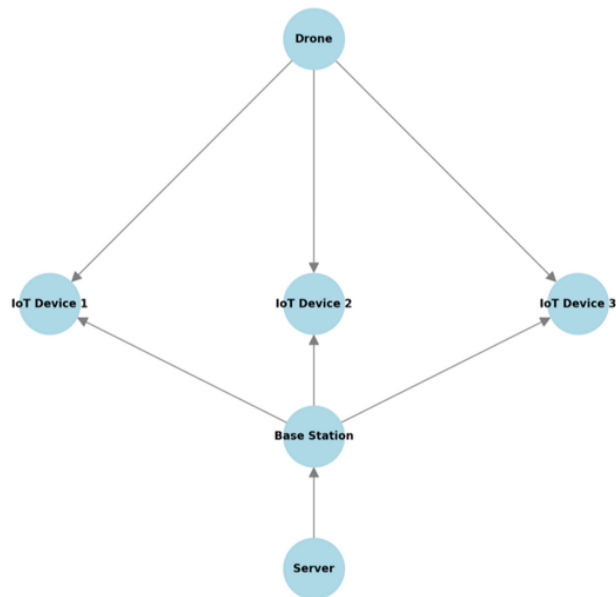


Рисунок 2.2 - Загальна архітектура інтелектуальних мереж з виділеним БПЛА та сервером

Задамо архітектуру розглянутого класу систем інтелектуальних мереж моделлю так:

$$M_{in} = \langle P_{IoT}, S, D, G \rangle, \quad (2.1)$$

де  $P_{IoT}$  - пристрої IoT;  $S$  - базова станція із сервером для підключення периферійних пристроїв;  $D$  - автономний безпілотний літальний апарат;  $G$  - граф зв'язків, який включає дротовий та бездротовий зв'язок за певними топологіями.

Рисунок 2.3 - граф  $G$  з формули (2.1)

Мета цільової функція оптимізації продуктивності для інтелектуальної мережі - максимізувати ефективність використання енергоресурсів, мінімізувати витрати енергії та втрати під час її передачі. Цільова функція може бути представлена як:

$$\operatorname{argmax}_x f(x) = w_1 \cdot U(x) - w_2 \cdot L(x) - w_3 \cdot C(x), \quad (3.2)$$

де  $x$  — вектор  $x$  (розподіл енергії між вузлами, режими роботи пристроїв, маршрутизація енергії тощо);  $f(x)$  — функція цільової продуктивності;  $U(x)$  — функція корисності (наприклад, баланс між попитом і пропозицією енергії);  $L(x)$  — функція втрат енергії під час передачі або зберігання;  $C(x)$  — функція загальних витрат на енергоспоживання, включаючи витрати на виробництво та зберігання енергії;  $w_1, w_2, w_3$  — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного із компонентів.

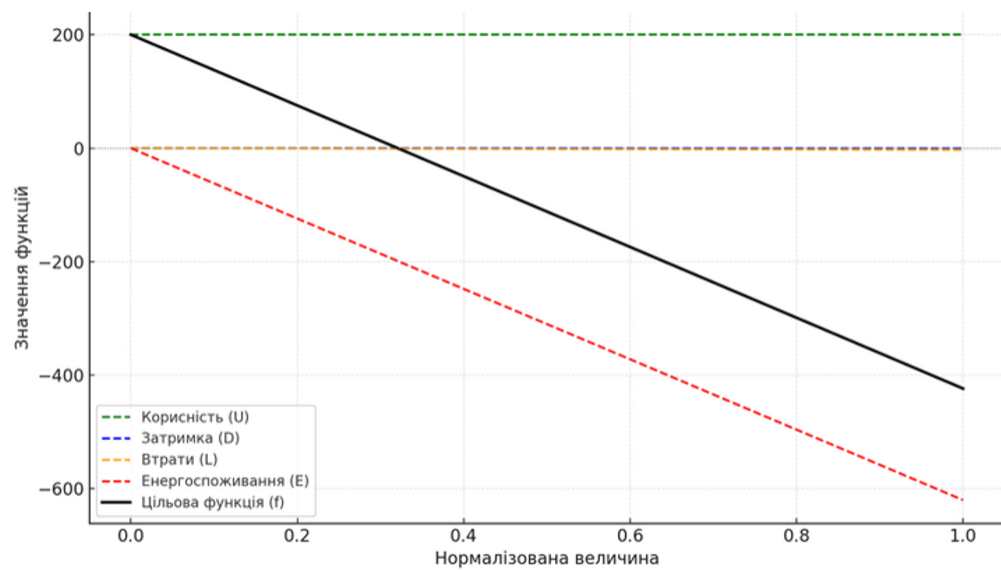


Рисунок 3.1 - Графіки компонентів цільової функції

Згідно розроблених етапів оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА і розробленої математичної моделі оптимізації продуктивності у вигляді цільової функції задамо основні кроки методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж такими основними кроками:

1. Ініціалізуйте параметри системи.
2. Визначте функцію розрахунку затримки.
3. Впровадити оптимізацію рою частинок (PSO):
4. Оптимізуйте траєкторію безпілотників.
5. Виведіть оптимізовану траєкторію безпілотників.
6. Візуалізуйте результати.

## ВИСНОВКИ

- ▶ У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено новий метод [87] метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку та отримано такі результати.
- ▶ 1. Проаналізовано відомі методи та засоби оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.
- ▶ 2. Розроблено цільову функцію для забезпечення оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж.
- ▶ 3. Розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж в складі пристроїв IoT, серверу та БПЛА.
- ▶ 4. Здійснено дослідження методу оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку на основі симуляції та моделювання інтелектуальних мереж. Також, розроблено програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж на Python.

Додаток Б  
Наукова праця здобувача



Міністерство освіти і науки України  
Хмельницький національний університет

## СЕРТИФІКАТ



### Ткачук Владислав Андрійович

учасник XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції  
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024»  
24 години участі (0,8 ECTS credits)

Голова оргкомітету АПКН-2024

**Олег СИНЮК**

проректор Хмельницького національного  
університету з наукової роботи,  
доктор технічних наук, професор

м. Хмельницький  
15-16 листопада 2024

E-mail: [apkt.khnu@gmail.com](mailto:apkt.khnu@gmail.com)

УДК 004.4

Ткачук В.А., Ковальчук В.К., Лигун О.О.

*Хмельницький національний університет***МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ**

*У цій роботі представлено дослідження архітектури та продуктивності різних обчислювальних систем, тобто систем розумних мереж, систем периферійних обчислень, систем блокчейну та цифрового контролера для обчислювальних систем. Їх визначено через частини систем, де продуктивність є найважливішим аспектом, розроблено моделі систем, щоб задовольнити потреби в затримці, пропускну здатності й енергії, визначено продуктивність запропонованих архітектур і рішень.*

*This paper explores the architecture and performance of various computing systems, including smart networks, peripheral computing systems, blockchain systems and digital controllers for computing processes. The key components of these systems are analyzed, where productivity is crucial, as well as models to ensure optimal indicators of delay, bandwidth and energy efficiency. The performance of the proposed architectures and decisions for compliance with these requirements has been evaluated.*

У сучасному світі використовується широкий спектр обчислювальних систем [1], і в усіх цих системах енергоефективність і оптимізація продуктивності є надзвичайно важливими. Але оптимізація продуктивності [2] означає різні речі для різних обчислювальних систем. Через відмінність природи обчислювальні системи мають різні вимоги до ефективності та оптимізації. Розподілені системи, такі як системи інтелектуальних мереж, периферійні обчислювальні середовища та системи блокчейн, зосереджені на поведінці агентів. Таким чином, застосування принципів мережевої економіки, таких як теорія ігор і теорія контрактів, може покращити роботу цих систем багатьма способами.

Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж (Smart Grids) є критично важливою для забезпечення ефективного використання енергії [3], надійності постачання та зменшення витрат. Інтелектуальні мережі інтегрують традиційні електричні мережі з інформаційно-комунікаційними технологіями, що дозволяє більш гнучко та ефективно управляти потоками енергії.

Метою роботи є розробка методу Оптимізація продуктивності систем інтелектуальних мереж.

Основні підходи до оптимізації продуктивності інтелектуальних мереж:

1. Моніторинг і аналіз даних в реальному часі. Збір і обробка даних\*\* з різних частин системи, включаючи дані про споживання, генерацію, стан мережевих компонентів (ліній, трансформаторів) дозволяє миттєво виявляти

аномалії та вирішувати проблеми. IoT-сенсори та смарт-лічильники\*\* надають постійні оновлення про стан мережі, що дозволяє управляти навантаженнями та обсягами генерації в режимі реального часу.

2. Алгоритми оптимізації керування енергією. Розподілене управління. Застосування децентралізованих алгоритмів для оптимізації роботи окремих частин мережі (генераторів, споживачів, батарей) дозволяє уникнути перевантажень та знижувати втрати. Оптимізація розподілу навантаження (Load Balancing). Алгоритми, що враховують попит, можуть перерозподіляти енергію між різними зонами мережі для підтримки балансу та уникнення пікових навантажень. Автоматичне переключення джерел енергії. Використання відновлюваних джерел енергії (сонячних, вітрових) у поєднанні з традиційними, що дозволяє мінімізувати використання дорогих чи екологічно шкідливих джерел.

3. Прогностичне технічне обслуговування. Машинне навчання та аналітика даних дозволяють передбачати можливі поломки обладнання, аналізуючи його історичні дані. Це допомагає зменшити кількість аварій і збільшує час безперебійної роботи. Алгоритми прогнозування попиту на основі історичних даних і факторів, як погода, дозволяють краще планувати використання ресурсів.

4. Інтеграція відновлюваних джерел енергії. Оптимізація генерації з відновлюваних джерел (сонячні панелі, вітрові турбіни) з урахуванням мінливості їх виробництва. Інтеграція з системами зберігання енергії. Використання батарей або інших засобів накопичення енергії для збереження надлишкової енергії, коли її генерація перевищує попит, та її використання під час пікових навантажень.

5. Динамічні тарифи та управління попитом (Demand Response). Запровадження тарифів на електроенергію, які змінюються в залежності від часу доби або стану мережі, стимулює споживачів до використання енергії у періоди, коли попит низький. Впровадження технологій і рішень, що дозволяють автоматично коригувати споживання енергії в пікові моменти або в разі нестачі енергії в системі.

6. Оптимізація потужності та розподільних мереж. Інтелектуальні трансформатори та перемикачі. Вони можуть автоматично адаптуватися до змін попиту і генерації, що зменшує втрати потужності і підвищує ефективність розподілу. Оптимізація топології мережі. Алгоритми можуть перебудовувати маршрути енергії через мережу, щоб мінімізувати втрати або уникнути перевантажень.

7. Кібербезпека та стійкість. Інтелектуальні мережі можуть бути вразливими до кібератак, тому необхідно впроваджувати рішення з кібербезпеки для захисту мережевих елементів, таких як лічильники, датчики і системи управління. Оптимізація повинна включати плани на випадок аварій та відновлення систем після серйозних збоїв чи кібератак.

8. Розподілена генерація та мікромережі. Локальні інтелектуальні мережі, які можуть працювати незалежно від основної енергетичної системи, забезпечуючи автономну роботу в кризових ситуаціях. Оптимізація місцевих джерел енергії

(сонячних, вітрових установок), що зменшує навантаження на центральну мережу та покращує надійність постачання.

Технології для оптимізації інтелектуальних мереж.

1. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання. Використовується для прогнозування попиту та генерації, а також для управління навантаженням і розподілом енергії.

2. Блокчейн. Для децентралізованого управління транзакціями енергії, зокрема у випадках розподіленої генерації.

3. Хмарні технології та обчислення на периферії (Edge Computing). Для обробки великих обсягів даних з пристроїв IoT і забезпечення оперативності прийняття рішень.

Оптимізація продуктивності інтелектуальних мереж передбачає використання широкого спектру технологій і підходів, спрямованих на забезпечення стабільного, ефективного та надійного функціонування енергетичної системи, здатної адаптуватися до сучасних викликів, таких як збільшення частки відновлюваних джерел енергії та зростання попиту на енергію.

Отже, представлено дослідження архітектури та продуктивності різних обчислювальних систем, тобто систем розумних мереж, систем периферійних обчислень, систем блокчейну та цифрового контролера для обчислювальних систем.

#### **Перелік посилань**

1. Wu, Y.; Liu, D.; Chen, X.; Ren, J.; Liu, R.; Tan, Y.; Zhang Z. MobileRE: A replicas prioritized hybrid fault tolerance strategy for mobile distributed system. *Journal of Systems Architecture*, 2021, vol 118, N102217. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102217>
2. Rawat, A.; Sushil, R.; Agarwal, A.; Sikander, A.; Bhadoria, R.S. A New Adaptive Fault Tolerant Framework in the Cloud. *IETE Journal of Research*, 2021, pp 113 117. DOI: 10.1080/03772063.2021.1907231
3. Du, D.; Xu, S.; Cocquempot V. Observer Based Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control for Switched Systems. *Series: Studies in Systems, Decision and Control*. Springer: Singapore, 2021; vol 280, p 81. DOI 10.1007/978 981 15 9073 3

# Додаток В

## Результати перевірки на плагіат

Tue Apr 15 14:22:24 EEST 2025, Медзатій Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

### Anti-Plagiarism v-15.260 Educational

Максимальне співпадіння з одним документом 9.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 229489 Назва: МКР Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж Додано в БД: 2025-04-15 Автора: Владислав ТКАЧУК Керівники: Світлана САЧЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	133434	956	12391 (9%)	84 (9%)

ID	Джерело плагіату Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми



Дата звіту 4/15/2025

Дата редагування 4/15/2025

## Звіт подібності

### метадані

Назва організації

**Khmelnytskyi National University**

Заголовок

**ТКАЧУК\_Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж**

Автор

**Владислав ТКАЧУК**Науковий керівник / Експерт

підрозділ

**Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем**

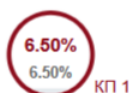
### Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових слотворень. Ці слотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Слотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		1
Інтервали		0
Мікропробіли		167
Білі знаки		1
Парафрази (SmartMarks)		61

### Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



18637

Кількість слів

147548

Кількість символів

## Додаток Г

## Програмний код моделювання зв'язків між пристроями IoT

```

import numpy as np
import random
from scipy.optimize import minimize

# ----- 1. Налаштування IoT пристроїв -----
NUM_DEVICES = 10 # Кількість IoT-пристроїв
FIELD_SIZE = 100 # Розмір області (100x100)

# Генерація координат IoT-пристроїв
np.random.seed(42)
iot_devices = np.random.rand(NUM_DEVICES, 2) * FIELD_SIZE

data_sizes = np.random.randint(1, 10, NUM_DEVICES) # Дані від 1 до 10 МБ

# ----- 2. Моделювання БПЛА -----
DRONE_SPEED = 10 # Швидкість БПЛА (одиниць/сек)
DRONE_BATTERY = 100 # Максимальний час роботи (одиниць)

# Початкова позиція БПЛА
drone_start = np.array([50, 50])

# ----- 3. MEC-сервер -----
MEC_CAPACITY = 100 # Максимальна обробка даних (МБ/с)

# ----- 4. Оптимізація траєкторії дрона (PSO) -----

def calculate_latency(drone_path, iot_devices, data_sizes, mec_capacity):

```

```
"""
```

Обчислення затримки передачі даних для заданої траєкторії дрона.

```
:param drone_path: Координати точок траєкторії дрона.
```

```
:param iot_devices: Координати IoT-пристроїв.
```

```
:param data_sizes: Розміри даних пристроїв.
```

```
:param mec_capacity: Пропускна здатність МЕС-сервера.
```

```
:return: Сумарна затримка.
```

```
"""
```

```
total_latency = 0
```

```
for device, data in zip(iot_devices, data_sizes):
```

```
    distances = np.linalg.norm(drone_path - device, axis=1)
```

```
    min_distance = np.min(distances) # Найближча точка траєкторії до
```

пристрою

```
    transmission_time = data / mec_capacity
```

```
    propagation_time = min_distance / DRONE_SPEED
```

```
    total_latency += transmission_time + propagation_time
```

```
return total_latency
```

```
# PSO для оптимізації траєкторії дрона
```

```
# Ініціалізація частинок
```

```
NUM_PARTICLES = 20
```

```
MAX_ITER = 50
```

```
particles = [drone_start + np.random.uniform(-10, 10, size=(5, 2)) for _ in
range(NUM_PARTICLES)]
```

```
velocities = [np.zeros_like(p) for p in particles]
```

```
# Локальні та глобальні найкращі рішення
```

```
personal_best = particles.copy()
```

```
global_best = min(personal_best, key=lambda p: calculate_latency(p, iot_devices,
data_sizes, MEC_CAPACITY))
```

```
# Параметри PSO
```

```
w = 0.5 # Інерційна вага
```

```
c1 = 1.5 # Когнітивний коефіцієнт
```

```
c2 = 1.5 # Соціальний коефіцієнт
```

```
for iteration in range(MAX_ITER):
```

```
    for i, particle in enumerate(particles):
```

```
        # Оновлення швидкості
```

```
        velocities[i] = (w * velocities[i] +
                        c1 * random.random() * (personal_best[i] - particle) +
                        c2 * random.random() * (global_best - particle))
```

```
        # Оновлення позиції
```

```
        particles[i] += velocities[i]
```

```
        # Обчислення нової затримки
```

```
        latency = calculate_latency(particles[i], iot_devices, data_sizes,
MEC_CAPACITY)
```

```
        if latency < calculate_latency(personal_best[i], iot_devices, data_sizes,
MEC_CAPACITY):
```

```
            personal_best[i] = particles[i]
```

```
        # Оновлення глобального найкращого рішення
```

```
        global_best = min(personal_best, key=lambda p: calculate_latency(p, iot_devices,
data_sizes, MEC_CAPACITY))
```

```
# Виведення результатів кожної ітерації
```

```

    print(f'Ітерація {iteration + 1}: Найкраща затримка =
{calculate_latency(global_best, iot_devices, data_sizes, MEC_CAPACITY):.4f}')

```

```

# ----- 5. Результати -----

```

```

print("Найкраща траєкторія дрона:")

```

```

print(global_best)

```

```

# Візуалізація

```

```

import matplotlib.pyplot as plt

```

```

plt.scatter(iot_devices[:, 0], iot_devices[:, 1], label="ІоТ-пристрої")

```

```

plt.plot(global_best[:, 0], global_best[:, 1], label="Траєкторія дрона", color="red")

```

```

plt.scatter(drone_start[0], drone_start[1], label="Початкова позиція дрона",
color="green")

```

```

plt.legend()

```

```

plt.title("Оптимізована траєкторія дрона")

```

```

plt.xlabel("X")

```

```

plt.ylabel("Y")

```

```

plt.grid()

```

```

plt.show()

```

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Автор: Владислав ТКАЧУК

Спеціальність: 123 – Компютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Світлана САЧЕНКО, к.е.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:




- окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10-40 джерелами на один фрагмент речення;
- всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає менше 6,5% і адресується до джерел з інтернету та бібліотеки, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру завдання і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Світлана САЧЕНКО

Олег САВЕНКО

Ольга ПАВЛОВА

Завідувачу кафедри КПС,  
доктору філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Владислав ТКАЧУК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

25 квітня 2025 року



## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Владислав ТКАЧУК

**Співавтор:**

**Назва:** ТКАЧУК\_Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 6.5%

**Коефіцієнт подібності 2:** 1%

**Мікропробіли:** 167

**Заміна букв:** 1

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-04-15 13:16:51.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-04-15

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Владислав ТКАЧУК

Тема: Метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень -; кількість сторінок записки \_\_\_\_\_

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розроблено метод та засоби координації точок доступу в мережах Wi-Fi

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У вступі подано об'єкт та предмет дослідження, мету, наукову новизну та практичну цінність роботи, а також характеристику структури роботи.

У першому розділі проведено аналіз відомих рішень щодо оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку

У другому розділі здійснено дослідження предметної області та визначено стратегію щодо оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

У третьому розділі розроблено цільову функцію оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

У четвертому розділі здійснено розроблення метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку та програмне забезпечення симуляції оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж (на Python). У висновках підведено підсумки досягнення результатів з розв'язання завдань дослідження.

4. Позитивні сторони роботи: \_\_\_\_\_

5. Негативні сторони роботи: немає.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: \_\_=\_\_\_\_

---

---

---

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному рівні.

---

---

---

---

---

8. Інші зауваження: —

---

---

---

---

---

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4,00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Корецька Людмила Олександрівна, к.т.н., доцент кафедри АКІТР ХНУ

“ 1 ” травня 2025р.

  
\_\_\_\_\_