

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління»

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ТКС-22м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

Кеу Ксьондз Н.О.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ

Васильківський М.В.  
«7» 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.  
«11» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.  
«12» 12 2023 р.



Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)

Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**  
"19" 09 2023 року

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ксьондз Назарію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 09 2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року



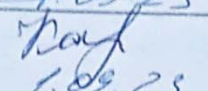
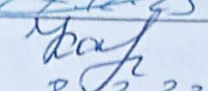
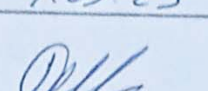
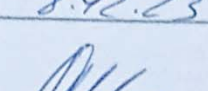
3. Вихідні дані до роботи Швидкість передавання даних - 9 Мбіт/с; частота процесора БПЛА-МЕС - 500 МГц; частота процесора сервера граничних розрахунків - 10 ГГц; кількість обчислювальних завдань - 15; кількість IoT вузлів (наземних датчиків) - 5; площа покриття - 1000 кв.м; кількість циклів CPU - 1900 Cycle/s; об'єм переданих даних - 30 Мбайт; тривалість затримки передавання - 0,002 с.

4. Зміст текстової частини: аналіз наявних рішень у галузі інтеграції ресурсів БПЛА і наземних мереж зв'язку; аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж; дослідження моделей трафіку для мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь; особливості інтеграції ресурсів БПЛА та програмно-конфігурованих мереж з використанням технологій граничних обчислень

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) ієрархічна мультиконтролерна мережа SDN; системна модель; мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у наземному сегменті; мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у літаючому сегменті; алгоритм k-середніх для БПЛА; алгоритм FOREL для БПЛА; системна модель



## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 8.09.23	 8.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 8.12.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 8.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

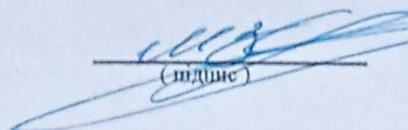
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Аналіз наявних рішень у галузі інтеграції ресурсів БПЛА і наземних мереж зв'язку	17.09.2023р.	
3.	Аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж	06.10.2023р.	
4.	Дослідження моделей трафіку для мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь	27.10.2023р.	
5.	Особливості інтеграції ресурсів БПЛА та програмно-конфігурованих мереж з використанням технологій граничних обчислень	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Ксьондз Н.О.

Керівник роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Васильківський М.В.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Ксьондз Н. О. Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 141 – стор., 45 – рис., 23 – табл., 43 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління.

Виконано дослідження складних систем і методів, які можуть бути використані в різних областях, включаючи мережі IoT, AR, та програмно-конфігуровані мережі. Запропоновано модель, яка об'єднує трафік Інтернету Речей (IoT), Тактильного Інтернету (TI) і доповненої реальності (AR).

Рівень передавання даних реалізовано на групах БПЛА, об'єднаних у кластери, які виконують функції комутаторів мережі SDN. Рівень управління реалізовано на окремих прив'язних БПЛА, які виконують функції контролерів мережі SDN.

Алгоритм кластеризації на основі методу k-середніх дозволяє знайти раціональні координати для розміщення контролерів з точністю до 100 м у квадраті 1км на 1км. Удосконалено метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА. Вивантаження може бути безпосередньо на БПЛА або через БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на сервер наземної мережі. Використано алгоритм динамічного програмування для вивантаження трафіку. Відстань Хемінга використовується як критерій для завершення роботи алгоритму. Значення затримки визначає розмір групи БПЛА для оптимізації затримки вивантаження трафіку.

Ключові слова: програмно-конфігурована мережа; безпілотний літальний апарат; алгоритм динамічного програмування; відстань Хемінга; затримка вивантаження трафіку.

## ABSTRACT

UDC 621.391

Ksyondz N. O. Software-configurable flying networks of the fifth generation - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2023 - 141 p., 45 figs., 23 tables, 43 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to study methods of creating networks based on the joint use of UAV technologies, software-defined networks and edge computing to meet the requirements for quality of service in fifth-generation communication networks.

A study of complex systems and methods that can be used in various fields, including IoT, AR, and software-configurable networks, is carried out. A model is proposed that combines the traffic of the Internet of Things (IoT), Tactile Internet (TI) and Augmented Reality (AR).

The data transmission layer is implemented on groups of UAVs grouped into clusters that act as SDN switches. The control layer is implemented on individual tethered UAVs that act as SDN controllers.

The clustering algorithm based on the k-means method allows to find the rational coordinates for the placement of controllers with an accuracy of 100 m in a 1 km by 1 km square. The method of offloading traffic from the terrestrial network to UAVs has been improved. Uploading can be done directly to the UAV or through a UAV equipped with a repeater to transmit information to the ground network server. A dynamic programming algorithm is used for traffic offloading. The Heminge distance is used as a criterion for completing the algorithm. The delay value determines the size of the UAV group to optimise the traffic offloading delay.

Keywords: software-configurable network; unmanned aerial vehicle; dynamic programming algorithm; Heming distance; traffic offloading delay.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
<b>1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ ІНТЕГРАЦІЇ РЕСУРСІВ БПЛА І НАЗЕМНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Огляд досліджень у галузі мереж зв'язку п'ятого покоління та безпілотних літальних апаратів .....	12
1.2 Класифікація безпілотних літальних апаратів .....	15
1.3 Використання БПЛА для підтримки бездротових мереж.....	17
1.3.1 Використання БПЛА для збору інформації з бездротових сенсорних мереж .....	17
1.3.2 Особливості використання БПЛА для збору інформації з мереж Інтернету речей.....	19
1.4 Особливості використання БПЛА для забезпечення зв'язності в наземних мережах зв'язку.....	21
1.4.1 Додаткова повітряна базова станція на основі БПЛА.....	22
1.4.2 Ретранслятор радіомережі на основі БПЛА .....	23
1.4.3 Літаючий бездротовий транзитний вузол для базових станцій наземної мережі на основі БПЛА .....	24
1.5 Використання БПЛА як вузла граничних обчислень і для кешування .....	26
1.5.1 Граничні обчислення на базі БПЛА.....	26
1.5.2 Використання БПЛА для кешування контенту.....	28
1.6 Висновки до розділу 1 .....	29
<b>2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>30</b>
2.1 Архітектура програмно-конфігурованих мереж.....	31
2.3 Програмно-конфігуровані мережі з одним контролером .....	34
2.3 Програмно-конфігуровані мережі з кількома контролерами .....	37
2.4 Програмно-конфігуровані мережі та БПЛА.....	43

	3
2.5 Висновки до розділу 2 .....	45
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТРАФІКУ ДЛЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ТА НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ.....	47
3.1 Аналіз концепцій Інтернету Речей, Тактильного Інтернету та доповненої реальності.....	49
3.1.1 Концепція Інтернету Речей .....	49
3.1.2 Концепція Тактильного Інтернету .....	51
3.1.3 Концепція доповненої реальності .....	52
3.2 Аналіз моделей інформаційного трафіку .....	53
3.2.1 Моделі трафіку для традиційних послуг мереж зв'язку.....	53
3.2.2 Системи масового обслуговування .....	56
3.3 Комплексна модель трафіку для реалізації на мережі послуг інтернету речей, тактильного інтернету та доповненої реальності .....	59
3.3.1 Системна модель .....	59
3.3.2 Аналітична модель .....	60
3.3.3 Імітаційна модель .....	61
3.3.4 Результати моделювання.....	65
3.4 Висновки до розділу 3 .....	69
4 ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ РЕСУРСІВ БПЛА ТА ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ГРАНИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....	70
4.1 Архітектура мережі БПЛА для сенсорних мереж .....	72
4.2 Застосування SDN у мережах БПЛА .....	73
4.3 Метод вивантаження інформаційного трафіку з наземної мережі на БПЛА .....	75
4.4.1 Алгоритми кластеризації k-середніх та FOREL.....	77
4.4.1.1 Алгоритм k-середніх .....	77
4.4.1.2 Алгоритм кластеризации FOREL .....	79
4.4.2 Постановка задачі кластеризації.....	81
4.4.3 Результати моделювання.....	86

4.5	Метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА при розміщенні на БПЛА вузла МЕС і при використанні БПЛА як ретранслятора .....	87
4.5.1	Мобільні граничні обчислення МЕС і БПЛА.....	88
4.5.2	Системна модель та сценарій.....	90
4.5.3	Обчислювальна модель .....	91
4.5.4	Постановка завдання.....	94
4.5.5	Алгоритм вивантаження.....	94
4.5.6	Результати моделювання.....	96
4.6	Висновки до розділу 4 .....	100
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	102
5.1	Оцінювання наукового ефекту.....	102
5.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	105
5.2.1	Витрати на оплату праці.....	106
5.2.2	Відрахування на соціальні заходи .....	109
5.2.3	Сировина та матеріали.....	109
5.2.4	Розрахунок витрат на комплектуючі.....	111
5.2.5	Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	112
5.2.6	Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт .....	113
5.2.7	Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....	114
5.2.8	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей .....	115
5.2.9	Службові відрядження.....	116
5.2.10	Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації .....	117
5.2.11	Інші витрати.....	117
5.2.12	Накладні (загальновиробничі) витрати.....	118
5.3	Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи .....	119
5.4	Висновок до розділу 5.....	121
6	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	122



6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт .....	122
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	125
6.2.1 Мікроклімат .....	125
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	125
6.2.3 Виробниче освітлення.....	126
6.2.4 Виробничий шум.....	127
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	128
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії загрозливих факторів НС .....	129
6.3.1 Дія радіації на живі організми .....	129
6.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії радіації.....	130
6.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії надзвичайних ситуацій.....	132
6.4 Висновки до розділу 6 .....	133
ВИСНОВКИ.....	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	137
ДОДАТКИ.....	142
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА .....	143
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень .....	148

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – Безпілотний літальний апарат  
uRLLC – Високо надійні мережі з ультра малими затримками  
WSN – Бездротові сенсорні мережі  
UAV-BS – Літаюча базова станція  
D2D – Взаємодія пристрій-пристрій  
MEC – Концепція граничних обчислень  
QoE – якість обслуговування  
LoS – Лінія зв'язку прямої видимості  
IoT – Інтернет Речей  
SDN – Програмно-конфігурована мережа  
QoE – Якість сприйняття  
API – Південний інтерфейс  
DAL – Абстрактний рівень пристроїв і ресурсів  
SAL – Абстрактний рівень послуг  
VNE – Алгоритм віртуальних мереж  
DMM – Розподілений мобільний менеджмент  
FUSN – Літаюча всепроникна сенсорна мережа  
M2M – Міжмашинна взаємодія  
TI – Тактильний інтернет  
AR – Доповнена реальність  
MSE-T – Сектор Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку  
IP – Інтернет-протокол  
RFID – Методи радіочастотної ідентифікації  
NFC – Зв'язок ближньої дії  
СМО – Система масового обслуговування  
БС – Базова станція  
UE – Обладнання користувача

RLAA – Алгоритм взаємодії та розподілу ресурсів

RL – Навчання з підкріпленням

НДР – Науково-дослідна робота

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Розвиток мереж зв'язку нині відбувається в напрямку створення гетерогенних мереж. Починаючи мереж зв'язку четвертого покоління, стало зрозуміло, що тільки при використанні всіляких ресурсів різноманітних мережевих технологій можливо надати необхідні послуги користувачам мережі з необхідними характеристиками якості обслуговування. У мережах зв'язку п'ятого покоління гетерогенність мережі стала вже однією з основних характеристик, а під час подальшого впровадження мереж зв'язку шостого покоління вже сьогодні з'явилася концепція інтегрованих мереж зв'язку SAGSIN (Space - Air - Ground – Sea Integrated Networks). Поява мереж зв'язку Космос - Повітря - Земля - Море є логічним продовженням розвитку мереж зв'язку всіх останніх поколінь. При цьому завершується розвиток мереж зв'язку на основі теорії конвергенції, що відбувався з 1997 року, і з'являються передумови до створення Єдиної мережі зв'язку, що об'єднує ресурси всіх мереж, які функціонують у всіляких середовищах.

У магістерській роботі досліджуються питання спільного використання ресурсів наземної та повітряної мережі з використанням таких нових технологій телекомунікацій як програмно-конфігуровані мережі SDN (Software-Defined Networks), граничні обчислення MEC (Mobile Edge Computing) і безпілотні літальні апарати UAV (Unmanned Aerial Vehicles).

Використання такої трійки має допомогти забезпечити обслуговування гетерогенного трафіку мереж зв'язку п'ятого покоління з використанням при необхідності ресурсів усіх зазначених технологій. Одночасно в МКР треба було розв'язати і ще одне завдання, пов'язане з відсутністю в наявних моделях трафіку характеристик агрегованого трафіку Інтернету Речей IoT (Internet of Things), Тактильного Інтернету ТІ (Tactile Internet) і Доповненої реальності AR (Augmented Reality). З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.



*Аналіз останніх досліджень.* У галузі мереж зв'язку п'ятого покоління, БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень існує низка робіт учених А.А.А. Ateya, M. Dohler, M. Maier, та інших [1-3].

Роботи зазначених вище авторів зробили вагомий внесок у дослідження в галузі мереж зв'язку п'ятого покоління, гетерогенного трафіку, програмно-конфігурованих мереж, граничних обчислень і мереж БПЛА. Однак до теперішнього часу практично не приділялося уваги спільному використанню зазначених вище технологій для вирішення проблем обслуговування гетерогенного трафіку мереж зв'язку п'ятого покоління. Складність цієї проблеми визначається суттєвою новизною архітектурних і системних рішень при побудові інтегрованих мереж зв'язку, в яких для забезпечення якості обслуговування використовуються різні нові технології, що функціонують до того ж у різних середовищах простору. Усе це загалом і визначає мету, завдання, об'єкт і предмет магістерської кваліфікаційної роботи. При цьому вирішується таке наукове завдання дослідження та розробки рішень щодо створення мереж зв'язку на основі спільного використання технологій мереж зв'язку, технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень [4-5].

*Мета і завдання роботи.* Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження методів створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз перспектив розвитку мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь,
- аналіз використання технологій БПЛА для розвитку мереж зв'язку,
- аналіз використання технологій програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень для розвитку мереж зв'язку,
- розробка моделі трафіку для агрегованого трафіку Інтернету Речей, Тактильного інтернету і доповненої реальності та дослідження характеристик такої моделі,

- розроблення методу побудови мережі з використанням БПЛА, у якому елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовані на БПЛА, а рівень передавання даних реалізовано на групах БПЛА, об'єднаних у кластери, що виконують функції комутаторів мережі SDN, рівень управління реалізовано на окремих прив'язних БПЛА, що виконують функції контролерів мережі SDN.

- розроблення алгоритму кластеризації для групи БПЛА на основі методу k-середніх, що дає змогу знайти раціональні координати для розміщення контролерів.

- дослідження методу вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА за умови того, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний та/або хмарний сервер наземної мережі.

- дослідження алгоритму вивантаження трафіку для запропонованого методу для визначення значення затримки для вибору розміру групи БПЛА, за якого затримка для вивантаження трафіку з наземної мережі на групу БПЛА буде меншою, ніж у разі використання БПЛА як ретранслятора для граничного/хмарного сервера.

*Об'єктом дослідження є мережі зв'язку п'ятого покоління.*

*Предметом дослідження є методи спільного використання технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень.*

*Методи досліджень базуються на використанні: методів теорії телетрафіку та теорії масового обслуговування, теорії ймовірностей, математичної статистики.*

*Новизна одержаних результатів:*

1. На відміну від відомих моделей трафіку було запропоновано модель, у якій до трафіку Інтернету Речей і трафіку Тактильного Інтернету додається трафік доповненої реальності. При цьому було встановлено, що ймовірність втрат пакетів для трафіку AR більша, ніж для трафіку IoT і менша, ніж для трафіку TI, а вхідний агрегований потік трафіку IoT, TI і AR є самоподібним із параметром Херста  $H = 0,7$ .

2. Досліджений метод побудови мережі з використанням БПЛА, у якому елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовані на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що рівень передавання даних реалізовано на групах БПЛА, об'єднаних у кластери, які виконують функції комутаторів мережі SDN, а рівень управління реалізовано на окремих прив'язних БПЛА, що виконують функції контролерів мережі SDN. При цьому кожен із контролерів взаємодіє з головним вузлом свого кластера БПЛА, передбачено також взаємодію контролерів між собою.

3. Запропонований алгоритм кластеризації для групи БПЛА на основі методу k-середніх дозволив знайти раціональні координати для розміщення контролерів, що відрізняються від вихідних на величину до 100 м у квадраті 1 км на 1 км.

4. Використаний метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА відрізняється від відомих тим, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний та/або хмарний сервер наземної мережі.

5. Алгоритм вивантаження трафіку для запропонованого методу, заснований на алгоритмі динамічного програмування, що використовує відстань Хеммінга як критерій для завершення своєї роботи і визначено значення затримки для вибору розміру групи БПЛА, за якого затримка для вивантаження трафіку з наземної мережі на групу БПЛА буде меншою, ніж у разі використання БПЛА як ретранслятора для граничного/хмарного сервера.

*Апробація роботи* та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» у 2023 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 3 наукових публікаціях, зокрема 1 статті у фаховому журналі, що входить до переліку ВАК України та 2 тезах науково-технічної конференції.

# 1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ ІНТЕГРАЦІЇ РЕСУРСІВ БПЛА І НАЗЕМНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Огляд досліджень у галузі мереж зв'язку п'ятого покоління та безпілотних літальних апаратів

Бездротові мережі та системи зв'язку значно покращилися за останні кілька років завдяки інноваціям, технічним та академічним дослідженням. В даний час основна увага приділяється розвитку мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь. Ці мережі принципово відрізняються від існуючих не тільки за рахунок високих швидкостей, а й за рахунок переходу до реалізації концепцій Інтернету Речей [1, 2] і Тактильного Інтернету [3, 4]. Останні передбачають абсолютно нові характеристики мереж: надщільність і ультра малі затримки [5, 6]. І тільки цим особливості мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь не вичерпуються. Ці мережі стають гетерогенними в широкому сенсі цього слова, що призведе до створення на етапі розгортання мереж зв'язку шостого покоління так званих мереж SAGSIN (Space, Air, Ground, Sea Integrated Network) [7, 8], які будуть являти собою єдину мережу для всіх користувачів. Слід зазначити, що ці нові технології переносять світ за межі проектування мереж з мобільних пристроїв на системи, які можуть підключатися до різних пристроїв на високих швидкостях [9, 10].

Зупинимося більш детально на мережах зв'язку п'ятого покоління, широкомасштабне впровадження яких очікується в найближчому майбутньому. Мережі зв'язку п'ятого покоління будуть багат шаровими [11, 12], масштабованими, як уже зазначалося гетерогенними, а також динамічно змінюваними. Крім того, мережі зв'язку 5G підтримують високу зв'язність і гарантований рівень якості обслуговування QoS для дуже великої кількості пристроїв (надщільна мережа). При цьому, природно, виникають і нові науково-дослідні завдання, наприклад, за великими даними. Однак не тільки завдання, пов'язані з надщільністю та/або ультра малими затримками, утворюють безліч



науково-дослідних завдань під час розроблення та впровадження мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь. Велика кількість завдань утворюється за рахунок гетерогенності цих мереж і необхідності використання різних технологій. В магістерській роботі далі буде досліджено проблему застосування безпілотних літальних апаратів для реалізації послуг користувачам у мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь, що посідає важливе місце в дослідженнях уже сьогодні і є однією з пращурів мереж SAGSIN [7, 8].

У 2023 році обсяг мобільних даних, що передаються через мережі зв'язку, перевищить 100 екзабайт на місяць від 31,6 мільярда пристроїв, що майже в 2 рази перевищує наявний рівень. Ці результати багато в чому визначаються технологіями мереж зв'язку п'ятого покоління, впровадження яких стрімко набирає темп. Хоча середня кількість ресурсів на користувача не настільки велика, безпрецедентне зростання числа цих пристроїв вимагає оптимізації мережевої структури і розподілу ресурсів [13]. Грунтуючись на результатах досліджень Міжнародного Союзу Електрозв'язку, можна виділити три таких важливих технологічних системних рішень під час впровадження мереж зв'язку п'ятого покоління [14]:

- Розширений мобільний широкопasmовий зв'язок eMBB (Enhanced Mobile Broadband) забезпечує істотно більшу пропускну здатність, а також поліпшення характеристик затримки в мережах також поліпшення характеристик затримки в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь. Це сприятиме розвитку використання мобільного широкопasmового доступу та швидкості передачі даних, яка буде достатньою для задоволення потреб у доступі до високошвидкісних даних для нових послуг, таких як передача відео, 3D, UHD (Ultra-High-Definition), AR/VR. Крім того, такі рішення будуть дуже корисні для районів з більш інтенсивним рухом, таких як міста, стадіони та концертні майданчики.

- Масивний взаємозв'язок машинного типу MTC (Massive machine-type communication). Метою цієї технології є забезпечення з'єднань в умовах високої щільності для дуже великої кількості пристроїв (до 200,000 пристроїв/кв. км) з

низьким енергоспоживанням (тривалість життєвого циклу батареї до 15 років) і невеликою швидкістю передачі (1-100 кбіт/с на пристрій). Ця технологія відноситься до таких додатків як сенсорні мережі, Інтернет Речей, розумні міста, носимі пристрої тощо.

- Понад високо надійні мережі з ультра малими затримками uRLLC (ultra-reliable low latency communication) [15, 16]. Ця технологія передбачає забезпечення затримки величиною в 1мс і коефіцієнта готовності мережі 0,999999. Прикладами додатків для таких мереж є Тактильний Інтернет, управління потягами на високій швидкості, безпілотні автомобілі з мережевою підтримкою, управління роботами тощо.

Одним із найважливіших додатків у мережах зв'язку п'ятого покоління є використання для забезпечення послугами користувачів і зв'язності мережі безпілотних літальних апаратів БПЛА. Використання БПЛА в мережах зв'язку п'ятого покоління може бути досить різноманітним як для комерційного, так і громадського застосування. Як приклади послуг, що надаються можна навести пошукові роботи на місцевості, картографування, забезпечення зв'язком в умовах стихійних лих, підтримання необхідного рівня зв'язності мережі, управління трафіком тощо. Крім того, БПЛА можуть бути ефективно використані в необхідних випадках для забезпечення ультра малої затримки, характеристик надійності, обслуговування пікового навантаження тощо.

БПЛА можуть також бути ефективно використані для тимчасового розширення мережі базових станцій для забезпечення покриття і розподілу ресурсів мережі, під час масових заходів на стадіонах і в інших місцях скупчення людей, для мережевої підтримки мереж Інтернету Речей, бездротових сенсорних мереж тощо. Не випадково тому, що БПЛА стають невід'ємною частиною архітектури сучасних мереж зв'язку.

## 1.2 Класифікація безпілотних літальних апаратів

Для створення будь-яких літаючих мереж або телекомунікаційних платформ найважливішим є вибір типу використовуваного БПЛА [17]. Вибір типу БПЛА визначається різними вимогами до створюваної мережі або платформи, такими як необхідний рівень QoS, характеристики енергоспоживання, зовнішні умови, регуляторні норми [18]. Існують різні класифікації БПЛА за такими характеристиками як висота польоту, вага, що піднімається, метод керування, клас повітряного судна, рівень автономності польоту, прив'язні БПЛА [19] тощо. Ґрунтуючись на відомих класифікаціях, використовуємо для класифікації БПЛА з мережевої точки зору таку: низьколітаючі БПЛА, висотні БПЛА та супутники.

Низькополітні БПЛА являють собою квазістаціонарні високомобільні БПЛА (наприклад, дрони) з високим ступенем мобільності і висотою польоту нижче стратосфери [20, 21]. Розгортання таких БПЛА може бути здійснено дуже швидко і найпростішим шляхом. Властивості низьколітаючих БПЛА роблять їх незамінною мережевою складовою при реалізації концепції ширококутового супутникового зв'язку [22], а також при використанні в мережах 3G, 4G, 5G, B5G і навіть 6G. Низькополітні БПЛА, в основному, забезпечують взаємозв'язок у зоні прямої видимості, що мінімізує енергетичні витрати. Крім того, мобільність низьколітаючих БПЛА дає змогу гнучко змінювати місце розташування та максимізувати покриття з одночасним зменшенням споживання енергії. У разі відмови якого-небудь з низьколітаючих БПЛА він може бути досить легко замінений, якщо це потрібно.

Висотні БПЛА (дирижаблі) являють собою іншу безпілотну повітряну платформу, яка також становить інтерес для розвитку бездротових телекомунікацій. Висотні БПЛА розглядаються як безпілотні платформи з меншою мобільністю, але з можливістю розміщення в стратосфері [23]. Висотні БПЛА можуть забезпечити такі можливості як великомасштабне покриття географічних площ, менші порівняно із супутниками затримки, високі швидкості

обміну інформацією і, природно, більший час функціонування, ніж БПЛА, що летять низько [24]. Їх розгортання може забезпечити, наприклад, тривалу зв'язність між регіонами [25]. Однак, є й ціла низка недоліків у висотних БПЛА: велике споживання енергії, високі економічні витрати та велика інтерференція.

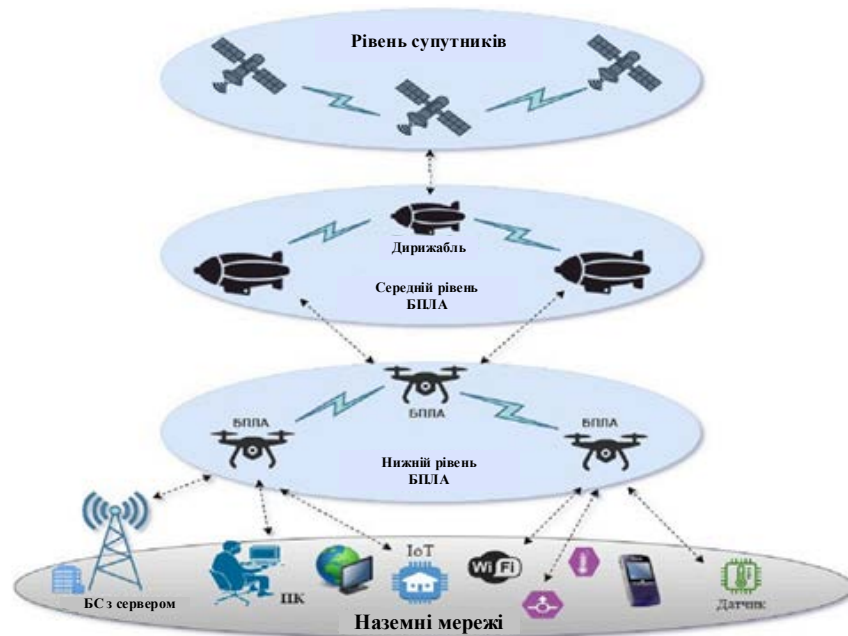


Рисунок 1.1 – Класифікація БПЛА в мережах зв'язку

Супутники можна розглядати як безпілотні літальні апарати, розташовані в космічному просторі на орбітах навколо земної кулі [26]. Вони можуть бути розгорнуті для проведення наукових досліджень, у комерційних цілях, для забезпечення функціонування глобальних систем позиціонування тощо [27]. Нині навколо Землі обертається велика кількість супутників. Однак з точки зору наземних користувачів рухливість супутників вважається стаціонарною. Як правило, супутники живляться від сонячної енергії, важать багато тонн і обходяться непомірно дорого.

Залежно від висоти польоту супутники можна розділити на низькоорбітальні (700-2000 км), середньо орбітальні (8000-20000 км), геостационарні (35786 км) і такі, що мають високі навколоземні орбіти (до 42000 км) [28]. На додаток до існуючих послуг, що надаються користувачам



спутниками, сучасні послуги також можуть бути реалізовані з використанням супутників у майбутній бездротовій мережі. Супутники можуть забезпечувати транзитний або безпосередній зв'язок як з висотними, так і з БПЛА, що летять низько. Однак варто зазначити, що таке рішення може не підходити для деяких додатків. Дуже велика відстань, яка відокремлює супутники від низьколітаючих БПЛА або висотних БПЛА, призводить до значної затримки, яка не підходить для додатків, чутливих до затримки таких, як Тактильний Інтернет.

### 1.3 Використання БПЛА для підтримки бездротових мереж

Широкий спектр використання БПЛА (дронів) для бездротових сенсорних мереж може бути поділений на два основні напрямки: БПЛА функціонує як частина інфраструктури бездротової мережі та БПЛА функціонує як мобільний термінал. У першому випадку БПЛА може розглядатися, наприклад, як мобільна базова станція для підтримки наземних пристроїв. У другому випадку БПЛА розглядається як призначене для користувача обладнання, розташоване в повітряній масі, що генерує навантаження відповідно до необхідних для БПЛА додатків.

#### 1.3.1 Використання БПЛА для збору інформації з бездротових сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі WSN (Wireless sensor networks) являють собою мережі сенсорів та/або актуаторів, які збирають і генерують дані про навколишнє середовище, процеси, явища тощо. Дані передаються на відповідні сервери для подальшого опрацювання. Сенсорні вузли являють собою мініатюрні пристрої, які володіють обмеженими ресурсами і не можуть передавати дані на значні відстані. Таким чином, БПЛА можуть бути ефективно використані для збору даних із сенсорних мереж і їх передавання, володіючи істотно кращими енергетичними характеристиками, ніж наземні сенсорні мережі. Бездротова

сенсорна мережа з підтримкою БПЛА зображена на рисунку 1.2. Як бачимо, збирання даних і передавання їх на віддалену базову станцію здійснюються в процесі польоту БПЛА над бездротовою сенсорною мережею, хоча використовується й інший варіант - доставка даних безпосередньо на пункт управління польотом БПЛА.

Ідея розгортання БПЛА над сенсорними мережами (або сенсорними полями) розглядалася багатьма дослідниками. Автори в [28] запропонували протокол маршрутизації для WSNs, заснований на підтримці мережі з боку БПЛА. Стратегія маршрутизації була адоптована до наземної бездротової сенсорної мережі для створення кластерів і забезпечення збору даних з наземних сенсорних вузлів. У [29] автори оптимізували спільно розклад пробудження і засинання наземних сенсорних вузлів і траєкторію польоту БПЛА з метою мінімізації енергоспоживання наземних елементів мережі та одночасної максимізації обсягу даних, що збираються з кожного наземного сенсорного вузла.

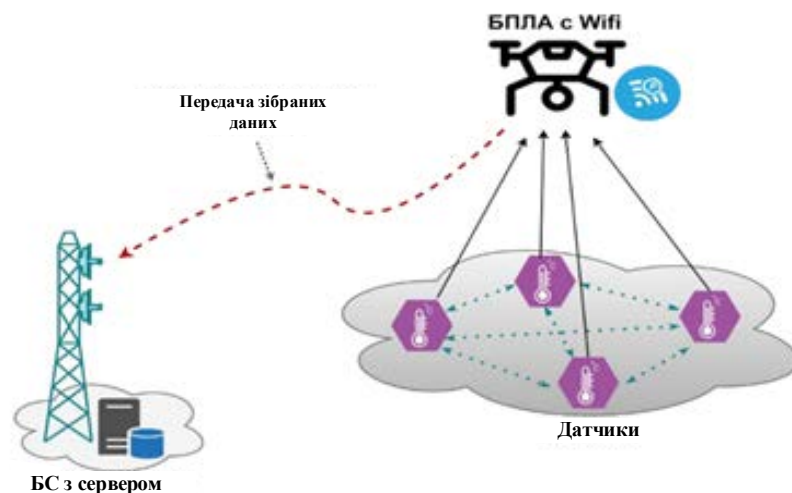


Рисунок 1.2 – Збір даних із сенсорних полів із використанням БПЛА

При цьому передбачалося, що БПЛА здійснює проліт на одній і тій самій висоті. У [30] було запропоновано енергетично ефективний протокол збирання даних з використанням БПЛА. При цьому БПЛА розгорталися в просторі над

сенсорним полем, організованим у кластери. Такий підхід далі широко використовувався для бездротових сенсорних мереж. За такої стратегії обирали оптимальний шлях для збирання даних за допомогою БПЛА, коли дані збирали тільки з головних сенсорних вузлів.

### 1.3.2 Особливості використання БПЛА для збору інформації з мереж Інтернету речей

Точно так само, як і для бездротових сенсорних мереж пристрої Інтернету Речей являють собою найчастіше мініатюрні вироби, що мають обмежені ресурси батареї для збору даних. Ці IoT пристрої не можуть забезпечити транзит даних на великі відстані через обмежені можливості енергетичних ресурсів. Як правило, цей транзит даних здійснюється або через численні транзитні вузли мережі Інтернету Речей, або через ретранслятори, що призводить до збільшення затримок і помилок [31]. При цьому взаємодія з БПЛА може забезпечити як безпосередньо збір даних, так і передачу даних на головний сервер [32]. При цьому взаємодія між БПЛА і IoT пристроями для збирання та передавання даних може бути забезпечена в реальному часі. Таким чином, безпосередня взаємодія БПЛА та Інтернет речей зменшує необхідну енергію для передачі інформації за допомогою використання відстані між IoT пристроєм і найближчим БПЛА замість відстані до базової станції, що знаходиться досить далеко, що збільшує в свою чергу тривалість життєвого циклу бездротової сенсорної мережі [3, 4]. Крім того, мережа БПЛА може бути розгорнута в різноманітному місці розташування, переносючи при цьому відповідне навантаження, у будь-який час і скрізь. Існуючі переваги взаємодії БПЛА і IoT включають в себе також більш низьку вартість, кращу зв'язність і доставку даних з високою якістю обслуговування. БПЛА починають відігравати провідну роль у забезпеченні послуг доставки даних в мережах Інтернету Речей і збору даних з пристроїв. При цьому БПЛА самі обладнуються пристроями Інтернету Речей, які можуть включати сенсори, цифрові камери, актуатори і телекомунікаційні технології, такі як Wi-Fi.

Це обладнання ефективно використовується для віддаленого управління пристроями, збору даних і послуг доставки. Як бачимо, БПЛА можуть збирати дані від IoT пристроїв за допомогою обладнання, яке створює додаткове навантаження на сам БПЛА. Послуги доставки даних здійснюються БПЛА через бездротові технології, такі як WiFi, LTE і 5G. Мережі 4G/5G при цьому мають найкращі можливості для підвищення ефективності використання БПЛА, обладнаних сенсорами, камерами, приймачами GPS, ГЛОНАСС. Використовуючи БПЛА як ретранслятор для IoT можна істотно поліпшити характеристики надійності та енергоспоживання.

Дійсно, БПЛА дає змогу під час збирання даних із наземних пристроїв IoT мінімізувати потужність передавачів, забезпечуючи при цьому кращу надійність. Крім того, в таких сценаріях енергоспоживання IoT пристроїв суттєво зменшується і БПЛА можуть обслуговувати наземні пристрої протягом тривалого часу. Крім того, БПЛА можуть також збирати інформацію з таких невеликих пристроїв як обладнання моніторингу здоров'я, сенсори навколишнього середовища тощо. [5-7]. Розумні БПЛА, обладнані пристроями IoT, здатні збирати, зберігати й обробляти дані для комплексного розв'язання завдань з підвищення ефективності таких мереж. Обробка і зберігання даних на IoT пристроях вимагає високих енергетичних витрат, що не є можливим. Тому використання БПЛА для зазначених цілей дає змогу зменшити витрату енергії та підтримувати активність і сон вузлів Інтернету Речей в інтересах зелених технологій. Існує ще ціла низка сценаріїв, де використання БПЛА може дати значний ефект: управління в позаштатних і надзвичайних ситуаціях, громадська безпека, сільське господарство тощо. Використання БПЛА для збору, обробки та зберігання інформації залишається об'єктом пильної уваги дослідників. У [38] автори запропонували структуру оптимізації мобільності та тривимірного розгортання мережі БПЛА для ефективного збору даних з наземного сегмента мережі Інтернету Речей. Було доведено, що використання БПЛА суттєво покращує зв'язність та енергетичну ефективність мережі Інтернету Речей. Крім того, БПЛА можуть бути використані для збору даних в розумних містах для

безлічі додатків таких, як динамічна координація і маршрутизація даних, моніторинг інцидентів, інтелектуальні транспортні системи, відновлення після надзвичайних ситуацій, ретрансляція даних від ізольованих сегментів сенсорної мережі на базову станцію тощо. Крім того, збір даних за допомогою БПЛА може допомогти в галузі сільського господарства, для багатьох додатків послуг, наприклад, моніторинг якості води, виявлення позаштатних ситуацій, раннє попередження про надзвичайну ситуацію тощо.

При цьому взаємодія БПЛА IoT для збору даних може здійснюватися двома способами: БПЛА збирає дані з наземних пристроїв IoT і забезпечує доставку даних на найближчу базову станцію; БПЛА обладнується пристроями IoT і збирає дані з пристроїв IoT у розумних містах.

#### 1.4 Особливості використання БПЛА для забезпечення зв'язності в наземних мережах зв'язку

Як один із найважливіших додатків БПЛА в мережах зв'язку може розглядатися підтримка зв'язності між пристроями мережі в умовах відсутності інфраструктурної зв'язності внаслідок тих чи інших подій у районі функціонування мережі зв'язку. Бездротову мережу зв'язку з підтримкою з боку БПЛА можна використовувати і за умови недостатнього покриття мережі або в умовах малої щільності населення, а також у важкодоступних районах [9].

Розглянемо різні варіанти використання БПЛА, що забезпечують поліпшення характеристик мереж зв'язку.

#### 1.4.1 Додаткова повітряна базова станція на основі БПЛА

Цей сценарій розглядається як один із ключових сценаріїв використання БПЛА в мережах майбутнього. БПЛА функціонує як літаюча базова станція UAV-BS, при цьому БПЛА, природно, оснащується обладнанням для приймання, оброблення та передавання сигналів, які допомагають існуючій стільниковій мережі забезпечити необхідну додаткову ємність мережі в умовах будь-яких тимчасових заходів. Крім того, БПЛА може бути використаний для реконфігурації телекомунікаційної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій і ситуацій, що загрожують громадській безпеці, і навіть тоді, коли наявна мережа зв'язку повністю виведена з ладу. Базові станції повітряного базування на БПЛА можуть забезпечити послуги з дуже високою якістю обслуговування в умовах прямої видимості. Їхнє розміщення може бути оптимізовано для забезпечення необхідного покриття і пропускну здатності. Приблизний сценарій функціонування БПЛА як мережі базових станцій повітряного базування наведено на рисунку 1.3, на якому кожен із БПЛА оснащений бездротовими приймачами-передавачами, що дають їм змогу взаємодіяти як із наземною мережею, так і з іншими БПЛА. У цьому сценарії може бути використаний і одиночний БПЛА, і рій БПЛА. Застосування БПЛА як літаючих базових станцій забезпечує істотно кращі показники в частині покриття, балансування навантаження, спектральної ефективності та користувацького обслуговування порівняно з наявними наземними базовими станціями. Характеристики ліній доступу до БПЛА як до літаючої базової станції, зокрема й загасання, інтенсивно досліджуються в літературі. У [4] автори визначають імовірність покриття та аналізують функціонування для сценарію, коли БПЛА використовується як базова станція для низхідної лінії до наземних користувачів, беручи до уваги інтерференцію, яка виникає при використанні взаємодії пристрій-пристрій D2D (device-to-device). В цій роботі знайдено оптимальну висоту розташування БПЛА, що показує зменшення цієї висоти зі збільшенням щільності користувачів D2D. Крім того, у роботі запропоновано

структуру визначення мінімального числа точок зупинки БПЛА, яке необхідне для покриття заданої зони з мінімально необхідною потужністю передачі. Було доведено, що точки зупинки потрібні для кожного БПЛА з метою збільшення ймовірності покриття наземних користувачів.

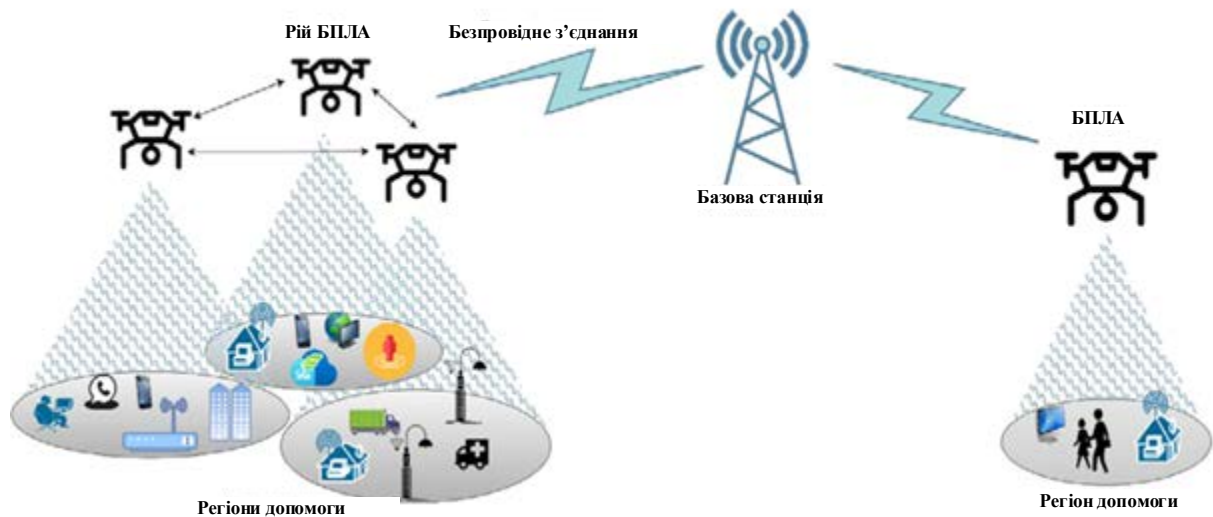


Рисунок 1.3 – Схема використання БПЛА як базової станції повітряного базування у заданій зоні наземної мережі

#### 1.4.2 Ретранслятор радіомережі на основі БПЛА

У цьому сценарії БПЛА використовується як ретранслятор, що забезпечує взаємодію між віддаленим користувачем і базовою станцією, з метою подолання перешкод, наприклад, гірської гряди, як це показано на рисунку 1.4. Як мобільний ретранслятор БПЛА має кілька просунутих функцій порівняно зі звичайними стаціонарними ретрансляторами.

Природно, що мобільний ретранслятор на основі БПЛА ефективний економічно і може бути легко введений в дію в умовах необхідності, наприклад, важливої події. Крім того, для високо мобільного БПЛА можна вибрати найбільш ефективне місце для забезпечення ретрансляції з урахуванням конкретних умов у конкретний час.



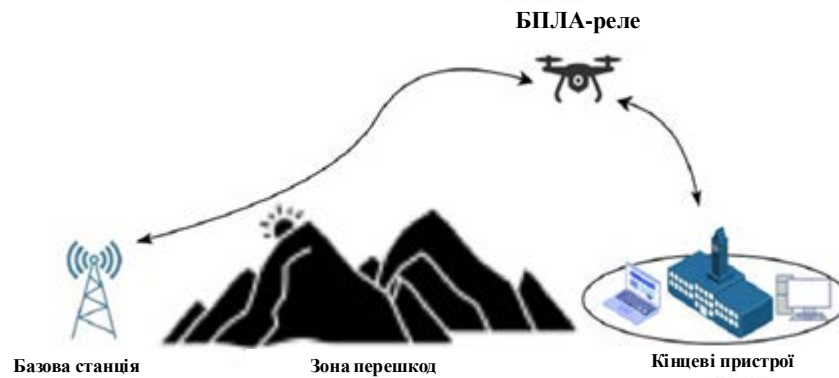


Рисунок 1.4 – Мобільний ретранслятор на основі БПЛА

Ретрансляція на базі БПЛА є ефективним рішенням для збільшення пропускної здатності мережі, характеристик надійності, збільшення радіуса охоплення мережі. Ці можливості використання БПЛА як ретранслятора досить широко вивчаються в сучасній літературі. У [1] автори представляють експериментальні результати польового тестування при використанні малих БПЛА як ретрансляторів для стільникових мереж зв'язку. У цій роботі доведено, що пікова пропускна здатність і ring time можуть бути істотно збільшені при інтеграції БПЛА як бездротового ретранслятора у сучасні стільникові мережі. Потенційні можливості використання БПЛА як ретранслятора проаналізовано в роботах [2-7].

#### 1.4.3 Літаючий бездротовий транзитний вузол для базових станцій наземної мережі на основі БПЛА

Дротова транзитна передача - це поширений підхід при підключенні базових станцій до ядра мережі в наземних мережах. Однак провідні з'єднання можуть бути досить дорогими або нереалізованими через присутність географічних обмежень, особливо під час роботи зі стільниковими мережами з високою щільністю. Хоча бездротова транзитна передача є гнучким і економічним рішенням, вона страждає від блокувань і перешкод, які знижують ефективність мережі радіодоступу. У таких випадках БПЛА можуть відігравати ключову роль,

забезпечуючи вертикальний транзитний зв'язок [8]. Транзитні вузли можуть бути встановлені на БПЛА і з'єднувати наземні або навіть базові станції повітряного базування з ядром мережі на землі. При цьому БПЛА можуть зіграти ключову роль у забезпеченні рентабельної, надійної та високошвидкісної бездротової транзитної мережі для наземних мереж [9]. Зокрема, безпілотні літальні апарати можуть бути оптимально розміщені, щоб уникнути перешкод і забезпечити надійний зв'язок по лінії прямої видимості. Зокрема, використання БПЛА з можливостями зв'язку в діапазоні міліметрових хвиль (mmWave) може забезпечити бездротові транзитні з'єднання з високою швидкістю передачі даних, яка необхідна для задоволення високих вимог до трафіку в районах з високим навантаженням з боку користувачів [10]. БПЛА також можуть створювати реконфігуровану мережу в небі і забезпечувати можливості бездротового транзиту по лінії зв'язку прямої видимості з кількома ділянками. На рисунку 1.5 показано приклад бездротового транзиту на основі БПЛА для двох базових станцій, які або розгорнуті на великій відстані, або мають пошкоджений дротовий транзит, або не мають можливості бути з'єднані по лініях прямої видимості. Таким чином, гнучкі транзитні мережі на основі БПЛА можуть значно підвищити надійність, пропускну здатність і зменшити експлуатаційні витрати на транзит у наземних мережах.

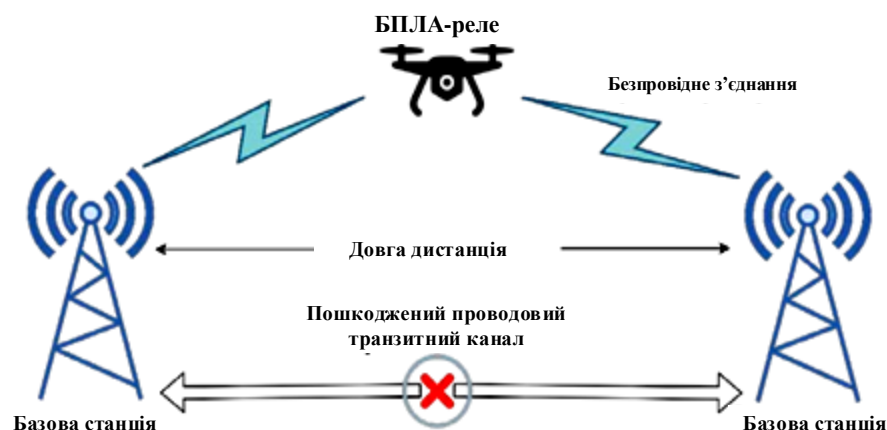


Рисунок 1.5 – БПЛА як транзитний вузол для двох базових станцій

## 1.5 Використання БПЛА як вузла граничних обчислень і для кешування

У бездротовій мережі 5G передбачені різноманітні ресурси для підтримки масивного трафіку та різних послуг. В основі цих рішень лежить теорія конвергенції зв'язку, обчислень і кешування [11]. Будучи невід'ємною частиною мереж 5G, БПЛА може виступати в якості платформи граничних обчислень для надання гнучких і відмовостійких послуг наземним користувачам з обмеженими можливостями обробки, таким як IoT, а також може забезпечити кешування популярного контенту для зниження транзитного трафіку і, відповідно, затримки в період пікового навантаження.

### 1.5.1 Граничні обчислення на базі БПЛА

Через обмежений заряд батареї та низькі обчислювальні можливості пристроям з обмеженими ресурсами, наприклад, Інтернету Речей, складно надавати послуги в реальному часі. Принципове вирішення таких проблем стало можливим з появою концепції граничних обчислень МЕС (Mobile Edge Computing) [12]. З розгортанням МЕС обчислювальні завдання можуть бути перенесені якомога ближче до межі мережі, що дає змогу забезпечити такі можливості:

- Скорочення часу виконання програми, якщо віддалений пристрій не має достатніх обчислювальних ресурсів.
- Збільшення тривалості життєвого циклу батареї пристрою, оскільки додаток виконується на сервері МЕС.

У мережах із використанням БПЛА пристрої з обмеженими ресурсами можуть використовувати для розв'язання своїх ресурсомістких завдань літаючий БПЛА, який має достатні обчислювальні ресурси і, крім того, гнучкі можливості з підключення на межі мережі, тим самим заощаджуючи енергію пристроїв і знижуючи трафік на стаціонарні хмарні сервери. Як бачимо, БПЛА, що виконує функції МЕС, пропонує багатообіцяючі додаткові можливості

порівняно зі звичайною наземною стільниковою мережею з фіксованими базовими станціями. Структуру граничних обчислень із використанням БПЛА наведено на рисунку 1.6, де кожен мобільний пристрій може вирішувати: чи використовувати локальні обчислення, чи проводити обчислення з використанням системи граничних обчислень на БПЛА.

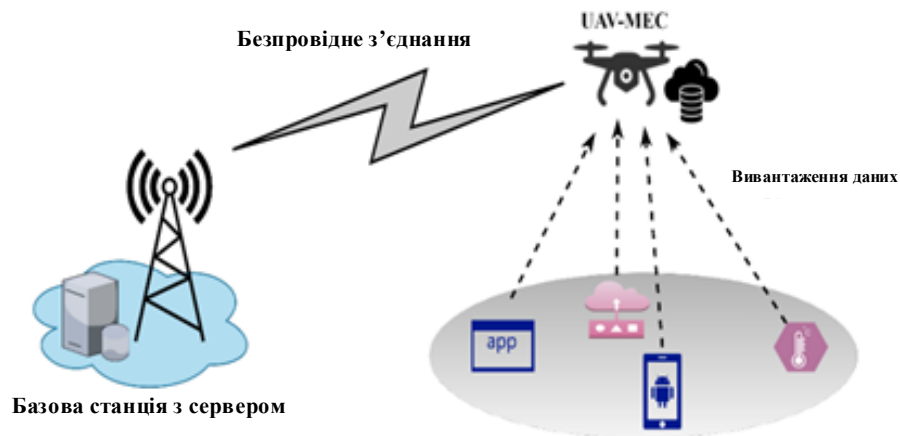


Рисунок 1.6 – БПЛА як платформа граничних обчислень

У реальності кожен мобільний пристрій пов'язаний із найближчим БПЛА, у якого на цей момент достатньо заряду батареї та обчислювальних ресурсів. Варто зазначити, що якщо бортовому процесору БПЛА не вистачає обчислювальних ресурсів через невеликий розмір БПЛА, це буде обмежуватиме ефективне виконання складних додатків.

Енергетичні та обчислювальні можливості БПЛА можуть бути віртуально поліпшені за рахунок перенесення обчислень на віддалені граничні сервери бездротовим каналом. Таким чином, БПЛА-MEC має можливість або сам обробляти додаток, використовуючи свої власні ресурси, або відправляти обчислювальні завдання на граничний сервер наступного рівня для обробки відповідно до вимог щодо якості обслуговування QoS для реалізованої послуги. Ідею встановлення процесора граничних обчислень безпосередньо на БПЛА від самого початку висунули Чжон та ін. у роботі [13], у якій було запропоновано

рішення щодо перенесення обчислень на безпілотний літальний апарат. Автори в даній роботі розглянули мобільний пристрій і БПЛА з метою мінімізації енергоспоживання мобільного пристрою за рахунок оптимізації розподілу бітів для висхідного/нисхідного зв'язку за умови заданої траєкторії БПЛА. Після цього Чжон та ін. у роботі [14] представили поліпшене рішення для групи мобільних пристроїв, проблему оптимізації розподілу бітів і траєкторії БПЛА були вирішені для мінімізації споживання енергії мобільними пристроями з урахуванням затримки та обмежень енергетичних характеристик БПЛА.

### 1.5.2 Використання БПЛА для кешування контенту

БПЛА можуть ефективно надавати послуги мобільним користувачам, забезпечуючи кешування контенту і відстежуючи їх переміщення відповідно до шаблону руху [15]. Кешування на базових станціях стало одним із нових підходів до підвищення пропускної здатності та зменшення затримки.

Однак кешування на фіксованій базовій станції наземної мережі може виявитися неефективним при обслуговуванні мобільних користувачів у разі частих перемикань. Отже, для підвищення ефективності кешування необхідно розгортати базові станції, які можуть відстежувати мобільність користувача для ефективного доставки необхідного контенту, що і робиться на основі БПЛА. Насправді використання БПЛА з підтримкою кешування є перспективним рішенням для вивантаження трафіку в бездротових мережах [16, 17]. У цьому разі, використовуючи інформацію, орієнтовану на користувача, таку як розподіл запитів контенту і шаблони мобільності, БПЛА з підтримкою кешування можна близьким до оптимального рішення переміщати і розгортати для надання необхідних послуг користувачам. Ще одна ключова перевага розгортання БПЛА з підтримкою кешування полягає в тому, що складність кешування може бути значно знижена в порівнянні зі звичайним випадком фіксованої базової станції наземної мережі. Таким чином, розгортання БПЛА з можливістю кешування

може поліпшити якість обслуговування (QoE) користувачів, мінімізувати споживання енергії та зменшити ймовірність перевантаження в мережі [18, 19].

## 1.6 Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз можливості інтеграції безпілотних літальних апаратів БПЛА і наземних мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь. Природно, взаємодія повітряної мережі з наземною мережею в мережах зв'язку п'ятого і наступних поколінь робить ці мережі гнучкішими і надає користувачам послуги з кращою якістю за рахунок інтеграції ресурсів наземної та повітряної мережі. Не випадково, в даний час одним з найбільш перспективних напрямків розвитку мереж зв'язку є створення інтегрованої мережі SAGSIN на етапі розгортання в майбутньому мереж зв'язку шостого покоління. При цьому наразі можна виділити три основні переваги інтеграції наземних мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь і мереж зв'язку повітряного базування на основі БПЛА:

1. Мережі зв'язку при використанні БПЛА можуть бути розгорнуті набагато швидше, що робить їх особливо придатними для надзвичайних ситуацій та інших подібних явищ, а також в умовах важкодоступної місцевості і малонаселених районів.

2. За допомогою БПЛА, що летять низько, у більшості сценаріїв можуть бути встановлені лінії зв'язку прямої видимості (LoS), що потенційно призводить до значного поліпшення якості обслуговування

3. Гнучкість у розгортанні мережі при використанні БПЛА відкриває нові можливості для підвищення продуктивності мережі та використання її ресурсів за рахунок можливості динамічної зміни положення БПЛА та його телекомунікаційних можливостей для найкращої відповідності існуючим у конкретний момент часу характеристикам простору оточення мережі зв'язку.

## 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

Безпрецедентне зростання нових послуг і трафіку в мережах зв'язку, поява концепції віртуалізації мережі поряд з використанням мобільних пристроїв у сучасному мережевому середовищі, що постійно розширюється використанням мобільних пристроїв у сучасному мережевому середовищі показали основні проблеми традиційної архітектури мереж зв'язку. Традиційна мережева архітектура мереж зв'язку першого і другого десятиліть 21 століття є досить статичною, оскільки спочатку вона була задумана для обслуговування цілком певного типу трафіку від цілком певних груп користувачів користувачів, що робить цю архітектуру неефективною для сучасних інтерактивних і динамічних мультимедійних потоків, що генеруються дедалі більш вимогливими користувачами. Широке ж поширення Інтернету Речей (IoT) і, як наслідок, мереж, що самоорганізуються, принципово змінило вимоги до мереж зв'язку. Крім того, Тактильний Інтернет також вніс свою лепту у формування нової архітектури та вимог до мереж зв'язку. Дійсно, затримка величиною в 1мс децентралізує мережі зв'язку і вимагає швидкої обробки інформації на досить потужних для цього обчислювальних ресурсах. Усе це викликає необхідність гнучкої зміни можливостей мережі та перерозподілу її ресурсів аж до переходу до мікро сервісної архітектури та міграції ресурсів. При цьому дедалі важливішим стає використання для побудови мереж зв'язку програмно-конфігурованих мереж SDN (Software Defined Networks), які органічно вписуються в системні рішення зі створення та розвитку мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь.

Програмно-конфігуровані мережі (SDN) по суті своїй призначені для диференціації мережі на площину даних і площину управління, що дає змогу не тільки оптимізувати витрати на побудову мережі, а й в умовах надщільних мереж і мереж зв'язку з ультра малими затримками забезпечити виконання вимог за



параметрами якості обслуговування QoS і якості сприйняття QoE [20] щоб гарантувати QoE користувача.

Однак використання тільки одного контролера SDN призводить до цілої низки проблем, пов'язаних із зайвою централізацією функцій управління трафіком в єдиному контролері. Проблеми можуть виникати з гнучкістю побудови мережі, балансуванням навантаження, але найголовніша проблема – це характеристики надійності такої системи. Добре відомо, що найбільш ненадійною структурою є радіальна, що і спостерігається при використанні одного контролера. У зв'язку з викладеним, останніми роками ведуться інтенсивні дослідження в галузі мультиконтролерних мереж SDN [21]. Природно, що така структура ставить велику кількість нових завдань, досить складних з урахуванням необхідності розподілу ресурсів між безліччю контролерів і безліччю комутаторів. Для вирішення таких завдань використовуються мета евристичні методи, наприклад, оптимізація структури мультиконтролерної мережі з використанням характеристик рою сальп.

## 2.1 Архітектура програмно-конфігурованих мереж

Програмно-конфігуровані мережі SDN є однією з базових технологій, на яких будуються мережі зв'язку п'ятого і наступних поколінь. Їх використання дає змогу раціональним чином побудувати систему управління трафіком на мережі та зменшити мережеві затримки. Застосування SDN також дає можливість зменшити капітальні та експлуатаційні витрати на мережу за рахунок оптимізації її структури та суттєвого збільшення гнучкості мережі для використання її у вирішенні практичних завдань. Спочатку ідеї про побудову програмно-конфігурованих мереж були висловлені в університетах Стенфорда і Берклі в 2006 році. Відтоді минуло досить багато часу, основні рішення з побудови мереж SDN стандартизовані в MCE-T, ONF, IETF, ETSI тощо.

Відповідно до документів ONF програмно-конфігуровані мережі є адаптивною мережевою структурою з можливостями, що динамічно

змінюються. При цьому рівень передавання даних відокремлений від рівня управління і, крім того, рівень управління мережею є програмованим, а рівень додатків і послуг відокремлений від мережевої інфраструктури [20, 21].

IETF, своєю чергою, розглядає SDN як мережу, що є основою для безпосереднього управління мережами зв'язку та їхніми ресурсами за допомогою власних обчислювальних ресурсів, програмованого управління та адміністрування мереж на основі відкритих інтерфейсів, ізольованих від мережевого рівня [22]. Порівняно з традиційною побудовою мереж SDN є краще керованою та більш зручною для мережевих елементів, оскільки надає краще управління від контролерів.

Для кращого розуміння концепції побудови програмно-конфігурованих мереж розглянемо функціональні діаграми взаємодії елементів мереж SDN. Функціональне представлення мереж SDN може відображено трьома різними способами: розподілом за рівнями мережевої структури, через інтерфейси мережі і, нарешті, за допомогою використання абстрактної архітектури [20, 21].

Рівень додатків відповідає за надання послуг користувачам і контролює функціонування мережі. До завдань рівня послуг входить забезпечення моніторингу мережі, оптимізація її функціонування, мережева безпека, підтримання заданого рівня якості обслуговування QoS, контролери SDN відповідають за рівень управління мережею і його функціонування. При цьому послуги та додатки забезпечуються рівнем додатків на основі інформації про трафік даних, що обслуговується елементами мережі SDN відповідно до вимог щодо його передавання.

Рівень управління повинен керувати програмно-конфігурованою мережею, ефективно розподіляючи трафік і завдання по пристроях мережі з урахуванням поточного навантаження і відмов у мережі. Метою цього рівня є також забезпечення надійності функціонування мережі. Рівень управління також генерує таблиці потоків, які розміщуються на пристроях мережі та використовуються для передавання пакетів даних. Основні функції рівня управління виконуються контролерами SDN. Контролер відповідає також за всі

протоколи, необхідні для функціонування мережі. Як уже зазначалося вище, рівень управління може бути розподілений між кількома контролерами.

Рівень даних відповідає за передачу пакетів даних кінцевим користувачам, використовуючи мережеві пристрої - комутатори та маршрутизатори. Передача даних здійснюється відповідно до інструкцій рівня управління. Слід зазначити, що під час коригування передачі даних через мережу мережеві пристрої мають бути відповідальними за перенаправлення пакетів.

Технології відкритих мереж передбачають для SDN два інтерфейси контролера: північний відкритий інтерфейс API і південний відкритий інтерфейс [20-22].

Південний інтерфейс API забезпечує з'єднання мережевих ресурсів і комутаторів. Інтерфейс дає змогу забезпечити гнучку взаємодію між контролерами і комутаторами, і маршрутизаторами рівня передавання даних мережі, а також у необхідних випадках швидко реконфігурацію мережі. Найбільш часто використовуване сімейство протоколів називається OpenFlow. Ці протоколи стандартизовані ONF і представляють основу для взаємодії рівнів передачі даних і управління. Під час передачі даних у програмно-конфігурованих мережах під час використання південного інтерфейсу комутатори зобов'язані підтримувати протокол OpenFlow. Слід зазначити, що існує багато пропрієтарних рішень крім OpenFlow для взаємодії рівня управління і рівня передачі даних на південному інтерфейсі.

Північний інтерфейс API забезпечує взаємодію між рівнем управління і рівнем додатків мережі SDN. На північному інтерфейсі здійснюється логіка бізнес-рішень відповідно до інструкцій мережі. Бізнес-додатки передають дані контролеру, який може їх використовувати для перепрограмування мережі. Крім того, використовуючи північний інтерфейс, додатки та послуги забезпечуються інформацією про передачу даних або маршрутизації від рівня управління або рівня передачі даних.

Використовуючи абстрактну модель поділу рівнів в архітектурі мережі SDN, можна отримати не тільки гнучку архітектуру та різні додатки, а й і

збільшити ефективність побудови мережі загалом. Абстрактна архітектура SDN може бути поділена на два рівні абстракції:

а. Абстрактний рівень пристроїв і ресурсів DAL (Device and Resource Abstraction Layer). Цей рівень дає змогу відокремити рівень передавання даних від рівня керування та моніторингу. Крім того, абстрактний рівень DAL дає змогу стандартизувати інтерфейси.

б. Абстрактний рівень послуг SAL (Service Abstraction Layer). Цей рівень застосовується для:

- абстрактного представлення конфігурації рівня передачі даних відповідно до правил передачі пакетів,
- представлення архітектури мережі у вигляді графа,
- забезпечення можливості для рівня управління зі збору інформації про поточний стан мережі.

### 2.3 Програмно-конфігуровані мережі з одним контролером

SDN з єдиним контролером являє собою централізований варіант побудови програмно-конфігурованої мережі, який теоретично є найпростішим. Така мережа SDN з одним контролером показана на рисунку 2.1. Однак система з простим контролером досить погано масштабована і не може ефективно підтримувати розвиток мережі.

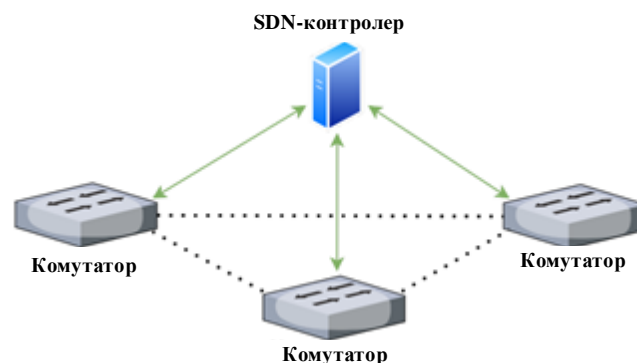


Рисунок 2.1 – SDN з одним контролером

Нині існує кілька підходів до реалізації програмно-конфігурованої мережі з одним контролером. У [23] запропоновано рішення для реалізації такої системи в рамках робіт зі створення мереж зв'язку п'ятого покоління, зокрема для транспортної мережі. Автори пропонують структуру мережі, побудовану на базі SDN з використанням граничних обчислень. У [24] запропоновано використовувати мережеве кодування разом з SDN для зменшення затримки в мережах зв'язку п'ятого покоління. Мережеве кодування здійснюється в програмному маршрутизаторі, який виконує функції віртуальної мережі. Запропоноване рішення анонсується як рішення для мереж зв'язку п'ятого покоління та Інтернету Речей.

У [25] автори представляють програмну соту для мереж зв'язку, для якої передбачається, що оператор мережі має високий рівень досягнень у наданні послуг користувачам. Запропонована система зменшує розміри таблиць маршрутизації та комбінує трафік для кількох заздалегідь визначених комутаторів у мережі. Система використовує доступ комутаторів до базових станцій, які представляються як програмні комутатори. Комутатори доступу можуть класифікувати пакети послуг для базових станцій, наприклад, за необхідною пропускну здатністю. Додатки технології SoftCell використовують компоненти традиційних стільникових мереж. Paketне ядро мережі, що еволюціонує, представляє для контролера ядро мережі зі спеціальними функціями. Крім того, оскільки контролери встановлюють правила для комутаторів і сигналізації, також використовуються і можливості ядра. Технологія заснована на можливостях існуючих мереж тривалої еволюції LTE. Це рішення є досить гнучким і масштабованим для мобільних мереж систем тривалої еволюції LTE. Основна проблема запропонованого рішення полягає в продуктивності мережевого контролера і в забезпеченні захисту шлюзів SGW, PGW у ядрі мережі.

У [26] оптимізується структура віртуальної мережі з метою зменшення затримки з кінця в кінець для мобільних мереж LTE-A. Централізований контролер розташовується в центрі мережі та використовується для розподілу

фізичних ресурсів. Автори використовують алгоритм віртуальних мереж VNE (Virtual Network Embedding) для розподілу ресурсів віртуальної мережі по підмережах. Системна модель містить у собі граничні маршрутизатори та прості шлюзи. Граничні маршрутизатори відповідають за мобільний менеджмент, базуючись на концепції розподіленого мобільного менеджменту DMM (Distributed Mobility Management). Запропоноване рішення дає змогу оптимізувати маршрутизацію та використання віртуальної мережі. Система забезпечує кращі значення для затримки, водночас характеристики мобільності користувача також поліпшуються. На жаль, можливості мобільних граничних обчислень MEC не використовуються, а запропонована система може бути застосовна тільки для систем тривалої еволюції LTE-A.

У [27] запропоновано архітектуру мережі зв'язку п'ятого покоління на основі використання програмно-конфігурованих мереж для мереж зі щільним розташуванням вузлів. Автори пропонують при цьому розміщувати контролери в ядрі мережі. При цьому іншою важливою функцією контролерів є розподіл радіо ресурсів на мережі та розв'язання проблем гетерогенності мережі - використання безлічі технологій у радіочастині. Запропонована система, в основному, зменшує затримку, що, природно, дуже важливо в умовах майбутнього повсюдного впровадження мереж зв'язку з ультра малими затримками.

Контролер використовує три програмовані інтерфейси, які забезпечують прогнозування можливого переміщення користувача щодо системи  $i$ , таким чином, сприяють зменшенню часу, що витрачається на хендовер. Кожна з перерахованих вище робіт присвячена дослідженню застосування централізованого контролера в ядрі мережі. Усі запропоновані системи при цьому забезпечують збільшення ефективності мережі за швидкістю і затримками.

### 2.3 Програмно-конфігуровані мережі з кількома контролерами

У мультиконтролерній SDN мережі кількість контролерів залежить від масштабу мережі та трафіку, що надходить на неї. При цьому основною проблемою для мультиконтролерної мережі є необхідна кількість контролерів і їхній розподіл по мережі. Ця проблема відома як проблема розміщення ресурсів контролерів [28]. Завдання розміщення контролерів у мережі має на меті зменшення затримок, підвищення енергетичної ефективності, балансування навантаження та поліпшення надійності мережі [29]. Зауважимо, що капітальні та експлуатаційні витрати (CAPEX і OPEX) для мережі також істотною мірою залежать від необхідної кількості контролерів [30]. Таким чином, визначення оптимального числа контролерів і оцінка їх найкращого розподілу по мережі є найважливішим завданням при плануванні мультиконтролерних програмно-конфігурованих мереж. Важливо також зазначити, що і кількість контролерів, і їхній розподіл по мережі може динамічно змінюватися залежно від змін у розмірі мережі та в обсязі трафіку, що надходить.

Динамічна зміна в обсязі трафіку, що надходить, може призвести, природно, до зміни числа контролерів, залучених до процесу обслуговування трафіку. Коли трафік зростає, нові контролери можуть бути активовані, а коли трафік зменшується, певну кількість контролерів може бути деактивовано. Частота зміни трафіку є супутнім процесом в активації та деактивації контролерів для обслуговування SDN мережі. Сплячі контролери можуть розглядатися як альтернативна опція для процесу активації та деактивації контролерів [31]. Рішення про використання того чи іншого зі сплячих контролерів про використання для поліпшення характеристик обслуговування може бути прийнято, зокрема, на основі експериментальних оцінок.

Проблема розміщення контролерів по мережі та розподілу ресурсів по ним має дуже велике значення для ефективного функціонування SDN мереж. Цим питанням присвячено безліч досліджень у сфері розподілу ресурсів у програмно-конфігурованих мережах.



Фізичний і логічний розподіл ресурсів у мережах SDN може розглядатися як для неієрархічного розподілу контролерів, так і в ієрархічному випадку. У разі неієрархічного розподілу контролерів кожен контролер є головним для якоїсь частини мережі, і контролери кооперують свої ресурси, ґрунтуючись на деякому заздалегідь передбаченому механізмі.

Неієрархічна структура мультиконтролерної мережі SDN наведена на рисунку 2.2, при цьому кожен контролер керує підмережею або доменом загальної мережі. Кілька контролерів, об'єднаних у таку мережу, дають змогу зменшити затримку в мережі та поліпшити її надійність. Існує дві стратегії для розподіленої архітектури мультиконтролерної мережі. Локальна стратегія передбачає, що кожен контролер має свою власну локальну мережу, а кожна прилегла локальна мережа абстрагується як логічний вузол. Глобальна стратегія передбачає, що кожен контролер є частиною загальної мережі. В обох випадках контролери потребують взаємодії по каналах контролер-контролер для забезпечення необхідною інформацією про стан сусідніх доменів.

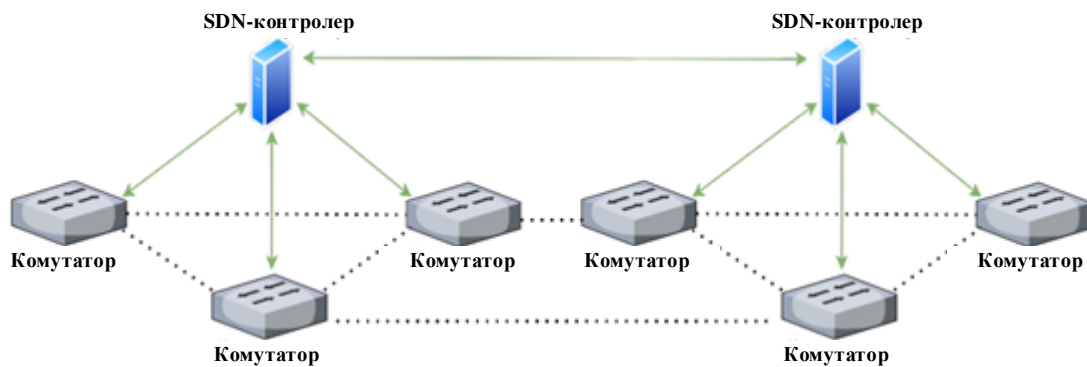


Рисунок 2.2 - Неієрархічна мультиконтролерна мережа SDN

Протокол HyperFlow [32] є логічним продовженням руху від централізованої архітектури до розподіленої та продовженням протоколу OpenFlow. У HyperFlow автори використовують локальні контролери, які обслуговують вимоги у своїй власній зоні. Це реально реалізовано в системі, відомій як NOX [7] додаток, який відповідальний за: (а) глобальну мережеву

синхронізацію між контролерами, (b) взаємодію з комутаторами, керованими іншими контролерами, і (c) управління відповідями, що приходять від інших елементів мережі до оригінального контролера. Система "публікація/підписка", що є класичною системою з очікуванням, використовується для виконання цих завдань через контролери з різних сайтів. У [4] автори пропонують нову розподілену мережеву платформу під назвою "Onix" для великомасштабних мереж з урахуванням наявних проблем, таких як, наприклад, забезпечення узгодженого розподілу ресурсів по мережі, глобальне представлення мережі в цілому серед мережевих додатків, механізми відновлення після відмови тощо в системах управління мережами. Елементи Onix передають стан мережі іншим елементам, щоб мати можливість масштабувати мережі якомога більшою мірою. Автори дотримуються таких підходів до поліпшення масштабованості мережі: (1) розподіл мережевої інформаційної бази (NIB) за контролерами, (2) агрегація кластерів для ієрархічної структури та (3) сумісність і стійкість станів мережі для додатків. Подібна система Software Transactional Networking (STN) [5] також пропонує забезпечити взаємодію площини розподіленого управління з використанням міжрівневого програмного продукту для узгодженості політики обслуговування трафіку між розподіленим контролером і площиною даних. У той час як система Onix очікує, що розробники додатків нададуть необхідну логіку для виявлення і вирішення конфліктів стану мережі через паралельне керування кількома контролерами, система STN пропонує механізми використання узгоджених паралельних політик для різних контролерів. Тамм та ін. у [6] вивчають можливість використання декількох контролерів для поліпшення масштабованості без наявності уявлень про глобальну мережу та обмеженої інформації про топологію мережі, яка міститься в контролерах.

При цьому використовується методика маршрутизації потоку, щоб побачити доцільність використання того чи іншого контролера, і два підходи для реалізації: шлях-частина шляху і частина шляху-шлях для взаємодії. У [7] автори пропонують розподілену архітектуру контролерів на основі кластеризації і структуру для забезпечення взаємодії між контролерами в разі масштабування

мережі. Ця кластерна архітектура забезпечує гнучкість мережі при додаванні або видаленні контролерів, оскільки вона не вимагає використання при цьому мережеских додатків. Контролери вибирають головний контролер, який відповідає за розмежування завдань між контролерами, а також між контролерами та комутаторами. Архітектури розподілених контролерів пропонуються для вирішення проблем масштабованості мереж SDN. Однак будь-яка архітектура розподілених контролерів може не забезпечити необхідну масштабованість мережі через відсутність балансування навантаження на контролери. Система ElastiCon [8] дає змогу рівномірно розподіляти навантаження по контролерах на основі створюваного пулу контролерів. Ця система динамічно розподіляє навантаження між контролерами, додаючи або видаляючи контролери з пулу контролерів і/або перерозподіляючи навантаження на окремі контролери на основі порогових значень навантаження. Феміус та ін. у [9] запропонували структуру розподіленої площини управління SDN "DISCO" (Distributed SDN Control plane), що складається з декількох контролерів, які керують різними доменами SDN і спільно використовують агреговану загальномережеву інформацію для сумісного подання мережі на кожному з контролерів. Структура DISCO складається з двох основних частин.

Всередині доменна частина відповідає за функції власного домену контролера, а міждоменна частина управляє потоками в розподілених мережах шляхом обміну агрегованою інформацією про стан мережі, такою як резервування, топологія тощо. Відмінність платформи DISCO від інших розподілених архітектур полягає в її здатності розділяти внутрішню доменну і міждоменну інформацію поряд із різнорідними міждоменними з'єднаннями, такими як, наприклад, тунелі MPLS і з'єднання SATCOM. Барі та ін. [80] пропонують рішення з розгортання кількох розподілених контролерів у великомасштабній глобальній мережі. Розглядається архітектура, у якій передбачено можливість коригування взаємодії активних контролерів із приєднаними комутаторами відповідно до поточної динаміки мережі з тим, щоб скоротити час налаштування потоку повідомлень, горизонтальні витрати за

часом між контролерами і вертикальні витрати за часом між контролерами і комутаторами. У запропонованій архітектурі існує можливість призначення комутаторів для обслуговування конкретних контролерів у певні моменти часу.

Ієрархічна архітектура SDN наведена на рисунку 2.3 у припущенні, що рівень управління у вертикальному плані є багаторівневим залежно від необхідних послуг. Відповідно до [8] ієрархічна організація рівня управління може поліпшити масштабованість і продуктивність SDN. Для поліпшення масштабованості автори в [2] пропонують ієрархічну дворівневу структуру управління, яка розділяє функції управління на локальні та глобальні. Там же пропонується зменшити загальне навантаження на площину управління без необхідності модифікації комутаторів OpenFlow. При цьому в дворівневій ієрархічній площині управління часті події, що відбуваються на площині передавання даних, обробляються нижнім рівнем ієрархії (локальні контролери без міжмережевої взаємодії, що забезпечують виконання локальних додатків), а мережеві події, що вимагають загальномережевого подання, обробляються верхнім рівнем ієрархії (логічно централізований контролер, що виконує мережеві додатки та керує локальними контролерами).

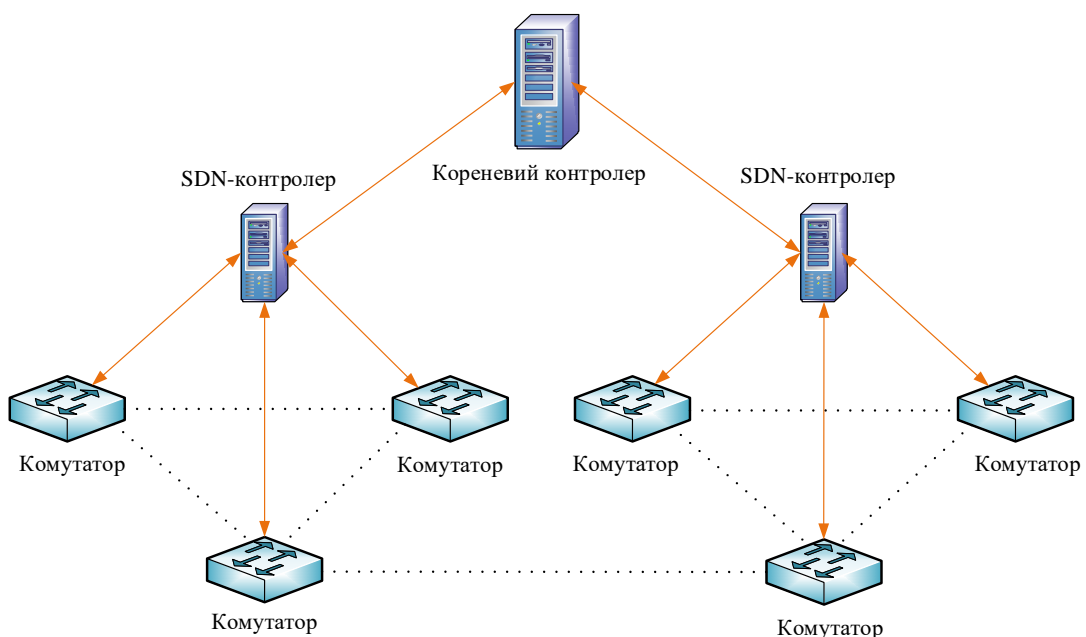


Рисунок 2.3 - Ієрархічна мультиконтролерна мережа SDN

У [3] запропоновано системне рішення відоме як "Logical xBar". Останній є модулем, який використовують для побудови централізованої абстрактної ієрархічної площини управління. При цьому площина управління складається з двох модулів: 1) Власне Logical xBar, який є програмованим об'єктом і може перенаправляти пакети між портами і 2) Logical Server, який керує таблицею маршрутизації, а також забезпечує обчислення на площині управління. У запропонованій архітектурі сама мережа не обов'язково має бути фізично ієрархічною, замість цього агрегація логічних xBar і логічних серверів створює абстрактну ієрархію у мережі.

Природно, що і неієрархічні, і ієрархічні структури рівня управління мають певні проблеми. У неієрархічній архітектурі площини управління контролери можуть зіткнутися з проблемою зростаючої обчислювальної складності внаслідок масштабування мережі. З іншого боку, ієрархічні архітектури мають проблему великих відстаней між елементами мережі [4]. У [5] автори пропонують систему "Оріон", ієрархічну площину управління для великомасштабних мереж, керованих водночас одним і тим самим адміністратором, щоб полегшити вищезгадані дві проблеми. Оріон має три шари: нижній шар складається з мережевих пристроїв, середній рівень складається із зональних контролерів, а верхній рівень містить контролери доменів. Контролери доменів мають глобальні мережеві уявлення для своїх доменів і синхронізують цю інформацію один з одним за розподіленим протоколом. У [5] автори представляють децентралізовану мережу Decentralize-SDN (D-SDN), архітектурне рішення, яке розподіляє площину управління не тільки фізично, а й логічно. D-SDN використовує ієрархію контролерів, у якій основні контролери (верхній рівень) делегують управління вторинним контролерам (нижній рівень) для управління певними мережевими пристроями. У [6] пропонується архітектура "FlowBroker" для кращої взаємодії між кількома доменами з точки зору балансування навантаження та продуктивності мережі. Архітектура FlowBroker використовує ідею ієрархії з контролерами доменів і одним або кількома суперконтролерами, які називають брокерами, розташованих на рівні

поверх них. Кожен контролер домену може підключатися до кількох брокерів відповідно до їхніх характеристик відповідно до їхніх характеристик, які включають продуктивність брокера щодо балансування навантаження і надійності. У [7] запропоновано мережеву архітектуру на основі ієрархії, а також підхід до маршрутизації з гарантованим рівнем якості обслуговування QoS. Автори використовують ідею рівнів, на одному з яких розташовані контролери мереж. Існує також основний контролер, який працює як брокер поверх мереж, щоб забезпечувати стійкість мережі в цілому. Експериментальні результати показують, що мережевий контролер в ієрархічному середовищі обробляє на 50 % менше трафіку, ніж мережевий контролер у неієрархічному середовищі.

#### 2.4 Програмно-конфігуровані мережі та БПЛА

Мережі безпілотних літальних апаратів на основі SDN останнім часом привертають дедалі більшу увагу дослідників у всьому світі [8]. Архітектура SDN може забезпечити гнучке управління мережами БПЛА [9]. Розгортання технології SDN у мережах БПЛА дає змогу останнім ефективно виконувати завдання у встановлені терміни. У цьому розділі розглянемо різні архітектурні рішення на основі SDN, відомі з літератури щодо мереж БПЛА.

Рамапрасат та ін. [10] запропонували систему на основі SDN для управління зв'язком між БПЛА. Основна мета цієї системи - поліпшити використання мережевих ресурсів, зменшити затримку та збільшити пропускну здатність мережі БПЛА. Контролер SDN відіграє роль централізованого керуючого пристрою, який забезпечує зберігання, обробку та необхідне управління в мережі. Пріоритети пакетів контролюються відповідно до різних рівнів пріоритету для підтримки стійкості мережі. Пакети можуть проходити через серію переприймань, які відстежуються і управляються контролером SDN з використанням площини управління для досягнення пакетом приймача або контролера SDN. В останньому випадку для завершення процесу передачі пакетів, контролер SDN ретранслює їх адресату.

Кью та ін. у роботі [11] запропонували алгоритм централізованої диференціальної маршрутизації трафіку (TDR) на основі двох різних контролерів: контролера координації та контролера кластера SDN. TDR спрямований на забезпечення необхідного рівня якості обслуговування QoS і характеристик надійності для з'єднань, чутливих до затримок. Як зазвичай, БПЛА організовані у вигляді декількох кластерів. У кожному кластері контролер SDN кластера керує передачею даних, плануванням мережевих ресурсів і взаємодією з усіма БПЛА в кластері. На наступному рівні розташований прив'язний дирижабль, який контролює всі області, в яких всі БПЛА повинні знати своє положення і швидкість. Для прогнозу доступності каналу передбачається, що максимальна дальність зв'язку всіх БПЛА та їхнє відповідне місце розташування заздалегідь відомі.

Нове рішення для маршрутизації пакетів запропоновано в [12] на основі гібридної технології SDN, розгорнутої серед групи БПЛА та пристроїв IoT. Деякі БПЛА можуть належати мережі SDN і враховувати правила переадресації SDN відповідно до топології мережі. У цих БПЛА також є можливість переходу з SDN на розподілений традиційний протокол маршрутизації.

Сечінті та ін. у роботі [13] запропонували структуру багатошляхової маршрутизації на основі SDN для мереж БПЛА. Контролер SDN використовується поверх цієї структури, щоб уникнути перекриття маршрутів. БПЛА, у свою чергу, працюють як програмні комутатори і можуть виконувати команди з передачі даних відповідно до директив контролера. Багатошарова графова модель використовується для представлення багатошляхової маршрутизації в тривимірному просторі з метою забезпечення стійкості мережі.

Юань та ін. у роботі [14] запропонували архітектуру мережі мобільних датчиків на основі SDN для надійного передавання даних у роях БПЛА. Метою цієї архітектури є подолання обмежень мереж БПЛА, таких як обчислювальні проблеми та обмежений розподіл ресурсів каналу. Централізований сервер SDN надає операторам і постачальникам послуг БПЛА можливість управління мережею для великомасштабного управління роями БПЛА з метою підтримки

топології глобального рою. При цьому кожен БПЛА відстежує умови зв'язку, а також швидкість польоту своїх сусідніх БПЛА. Потім ця інформація надсилається на сервер SDN для управління змінами топології та планування мережевих ресурсів. Ці процеси значно знижують навантаження від БПЛА.

Кубал та ін. у роботі [15] розробили архітектуру на основі SDN для мереж БПЛА як для прогнозування мережевих збоїв, так і для забезпечення максимальної доступності мережі. При цьому централізований контролер може передбачати майбутні позиції БПЛА. Це дає змогу в запропонованій архітектурі перемикає радіоканали і змінювати маршрути потоків заздалегідь і до будь-яких збоїв у мережі. Зазначимо, що використання предиктивної SDN максимально збільшує доступність мережі.

Киричок Р.В. та ін. у роботі [16] запропонували архітектуру на основі SDN для літаючої всепроникної сенсорної мережі (FUSN), у якій БПЛА розгортаються як програмні комутатори та контролери. Мета цієї архітектури - налагодити ефективний збір даних за допомогою БПЛА з мобільних датчиків, розташованих на землі (тобто з наземних сегментів або сенсорних полів). У цій роботі зроблено висновок про те, що прийнята архітектура SDN зводить до мінімуму обсяг маршрутизованого трафіку і підвищує його стійкість до змін топології. У статті [17] пропонується, щоб мережа могла бути сформована шляхом встановлення площини даних або комутаторів OpenFlow на БПЛА та засобів управління на централізованому наземному контролері.

## 2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено аналіз технологій програмно-конфігурованих мереж і можливості їх інтеграції з мережами безпілотних літальних апаратів БПЛА. Програмно-конфігуровані мережі - це багатообіцяюча нова архітектура для багатьох мережевих середовищ, таких як мережі зв'язку загального користування, центри обробки даних, корпоративні мережі, кампусні мережі, хмарні мережі та глобальні мережі. Основними перевагами SDN є її



програмованість і гнучкість. У другому розділі було отримано такі основні результати:

1. Проаналізовано рішення з SDN з одним контролером у ядрі мережі та мультиконтролерні SDN. На основі цього аналізу було розглянуто рішення щодо використання SDN у БПЛА.

2. Використання SDN спільно з БПЛА дає великі переваги при розгортанні мережі БПЛА, які можуть як підвищити ефективність мережевої структури БПЛА в цілому, так і знизити енергоспоживання БПЛА, а також прискорити розгортання мережі та зменшити її вартість.

## З ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТРАФІКУ ДЛЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ТА НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ

Випереджальний розвиток нових телекомунікаційних технологій призвів до суттєвих змін у мережах і системах зв'язку, що сприяло значному збільшенню обсягу трафіку. При цьому домінуючі сьогодні сценарії, орієнтовані на людину як користувача мережі, будуть доповнені величезною кількістю машин, що спілкуються між собою і з людиною. Співіснування людино-орієнтованих і машинних додатків призведе до великої різноманітності мережевих послуг [18]. Технологія 5G уже підтримує такі ресурсомісткі послуги, як масивний міжмашинний зв'язок, наднадійний зв'язок і зв'язок з ультрамалою затримкою, які вимагають високої швидкості передачі даних, низької затримки в одиниці мілісекунд, а також підключення мільйонів пристроїв на квадратний кілометр [19]. Водночас треба забезпечити високий рівень якості обслуговування (QoS), що відіграє важливу роль у технології 5G. Інтернет речей (IoT) являє собою міжмашинну (M2M) взаємодію, яка вимагає зв'язку з малою затримкою і може з'єднати мільярди датчиків, а також розширити розуміння для сенсорного сприйняття в різнорідних середовищах.

Розвиток IoT - надзвичайно важливий крок, що зачіпає практично всі сфери людської діяльності. Поширення IoT сприятиме доступності дедалі більшої кількості інформації, розвитку аналітичних можливостей, ухваленню рішень і дій на основі результатів мережі.

Ще одна технологія, що вимагає ультрамалих затримок і високого QoS, - це тактильний інтернет (TI), створений на ідеї віддаленого управління роботами аватарами, роботами маніпуляторами тощо в режимі реального часу [20]. TI використовуватиме традиційний дротовий інтернет, мобільний інтернет і IoT як наскрізну транспортну інфраструктуру. Крім того, можна передбачити, що TI відкриває нову перспективу для взаємодії людини з машиною завдяки ультрамалій затримці при побудові кооперативних систем у реальному часі [21].

Третьою важливою технологією, широкомасштабне впровадження якої намічено в мережах 5G, є доповнена реальність (AR), що також вимагає зв'язку з ультрамалою затримкою і використовується в багатьох додатках: управління роботами, безпілотними літальними апаратами (БПЛА), медицина, технічне обслуговування і ремонт складного обладнання, ігрова і розважальна індустрія, управління і моніторинг у мережах зв'язку [22-23]. Вимога доставки даних між великою кількістю пристроїв, що значно перевищують число абонентів наявних мереж зв'язку, ставить завдання забезпечення доступності, QoS, надійності та стабільності роботи мереж зв'язку в таких умовах.

Трафік, створюваний пристроями IoT, може обслуговуватися і збиратися разом із трафіком інших комунікаційних послуг. Насправді характер трафіку IoT загалом відрізняється від трафіку інших послуг, що вимагає його досліджень та оцінки впливу на QoS [104]. У [25] представлено дослідження моделей міжмашинного трафіку (M2M) і введено визначення типів потоків трафіку для масових подій. Крім того, у [26] наведено модель обслуговування і шаблон трафіку для доповненої реальності, об'єднані з концепцією IoT, і розроблено метод оцінки QoS. Крім того, в [27] запропоновано систему черг (QS) як модель для оцінювання QoS під час спільного використання технологій IT та IoT.

У даній роботі запропоновано комплексну аналітичну модель для потоків трафіку IT, AR та IoT для оцінювання QoS за параметрами ймовірності втрати пакетів і затримки доставки. Пропонується модель для аналізу потоків трафіку в мережах 5G і наступних поколінь: тактильного інтернету (TI), доповненої реальності (AR) та інтернету речей. При цьому ключовою вимогою при реалізації AR і TI є забезпечення ультрамалої затримки. Оцінюється вплив такого різноманітного трафіку на основні показники якості обслуговування, що відображають імовірність втрати пакетів і затримку доставки за часом. Як модель мережі зв'язку використовується система масового обслуговування з комбінованою дисципліною обслуговування.

### 3.1 Аналіз концепцій Інтернету Речей, Тактильного Інтернету та доповненої реальності

У цьому розділі будуть розглянуті концепції технологій, що використовуються в моделі. У розділі 3.1.1 - аналіз концепції Інтернету Речей, Тактильний Інтернет - у розділі 3.1.2, у розділі 3.1.3 - доповнена реальність.

#### 3.1.1 Концепція Інтернету Речей

Концепція Інтернету речей, розроблена Сектором Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т) на початку другого десятиліття ХХІ століття, являє собою концептуальний погляд на використання речей як однорангових терміналів мереж зв'язку [21]. Сама ідея Інтернету речей дуже проста. Уявімо, що всі предмети і пристрої, які нас оточують предмети і пристрої (побутова техніка та посуд, продукти, автомобілі, промислове обладнання тощо) забезпечені мініатюрними сенсорними (чутливими) пристроями, а також мають адресу в мережі зв'язку загального користування. За наявності необхідних каналів зв'язку з ними можливо не тільки відстежувати ці об'єкти та їхні параметри в просторі та часі, а й керувати ними, а також включати інформацію про них у загальну "розумну планету". У найзагальнішому вигляді, з інфокомунікаційної точки зору, Інтернет речей можна записати у вигляді символічної формули:

$$\text{Інтернет речей} = \text{датчики} + \text{дані} + \text{мережі} + \text{послуги}$$

У вужчому сенсі слова Інтернет речей - це глобальна мережа комп'ютерів, датчиків і виконавчих механізмів, які спілкуються один з одним за допомогою інтернет-протоколу IP (Internet Protocol) або інших протоколів [22, 23]. Зазначимо, що внаслідок необхідності малого енергоспоживання для зв'язку між

Інтернет речами можуть використовуватися і протоколи ZigBee, наприклад, у межах одного й того самого сенсорного поля.

Концепція IoT відіграє вирішальну роль у подальшому розвитку інфокомунікаційної галузі. Це підтверджується і позицією Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ). І хоча на міжнародному рівні ця концепція вже набуває рис усталеної технології, для неї, як і раніше, проводять активну роботу в галузі стандартизації архітектури, технічних компонентів, додатків, тестування [24].

Мережі IoT складаються з мільйонів і мільярдів недорогих датчиків з низьким енергоспоживанням, низькою обчислювальною потужністю і невеликим обсягом пам'яті.

Як технологічні рішення під час реалізації концепції Інтернету Речей набули широкого поширення методи радіочастотної ідентифікації RFID (Radio Frequency Identification), бездротові сенсорні мережі WSN (Wireless Sensor Network), зв'язок ближньої дії NFC (Near Field Communication) і міжмашинний зв'язок M2M (Machine-to-Machine) [25]. Технологія міжмашинної взаємодії являє собою взаємодію бездротових і дротових систем і пристроїв без втручання користувача.

Число таких пристроїв за прогнозами буде значно збільшуватися, внаслідок чого на мережі та системи зв'язку витратиметься результаті чого на мережі та системи зв'язку трафік IoT може сформувати істотний вплив. Цей трафік являє собою потік повідомлень у вигляді пакетів, оскільки для мережі міжмашинного зв'язку, в основному, використовує метод комутації пакетів [9, 11].

Інтернет речей заснований на трьох основних принципах. По-перше, це всепроникна інфокомунікаційна інфраструктура; по-друге, здійснюється глобальна ідентифікація кожного об'єкта; і по-третє, існує можливість для кожного об'єкта надсилати й отримувати дані через Інтернет або іншу мережу, до яких він підключений. У загальному вигляді під Інтернетом речей розуміють сукупність різних пристроїв, датчиків, об'єднаних у мережу будь-якими доступними каналами зв'язку, що використовують різні протоколи взаємодії один з одним і загальний протокол IP для виходу в глобальну мережу.

Застосування концепції Інтернету речей для передачі тактильних відчуттів, зокрема для робототехнічних систем, зажадало принципово інших затримок при наданні послуг, а саме 1мс замість існуючих 100мс [14, 15]. Ці тактильні послуги сформували ще одну нову концепцію - Тактильний Інтернет, яка буде детально обговорюватися в наступному розділі.

### 3.1.2 Концепція Тактильного Інтернету

Тактильний Інтернет уперше був визначений MCE-T як мережева архітектура, що поєднує ультра малу затримку з надзвичайно високою доступністю, надійністю і безпекою. Як випливає з назви, Тактильний Інтернет спрямований на передачу в реальному часі тактильних відчуттів [22]. В даний час вже зрозуміло, що Тактильний Інтернет дасть змогу надати широкий спектр нових додатків, які суттєво розширять перелік послуг, пропонований сьогоденнішніми мережами. Інтерактивні тактильні додатки в реальному часі становитимуть основну частину цих додатків, і вони відіграватимуть ключову роль у поліпшенні повсякденного життя. Дистанційно керовані системи можуть стати ключовими для функціонування декількох дуже важливих галузей діяльності людини, таких як охорона здоров'я (наприклад, теледіагностика, телехірургія), промисловість (наприклад, небезпечні та важкодоступні середовища), віртуальна і доповнена реальність (наприклад, система навчання пожежників), дорожній рух (наприклад, автоматизоване або спільне водіння), освіта і багато інших [20, 21]. Тактильні застосунки висувають низку суворих вимог до затримки і надійності. Тактильний Інтернет вимагає ультра малої затримки, оскільки він повинен забезпечувати зворотний зв'язок у реальному часі і контроль над фізичними об'єктами [23]. Це означає, що час між надсиланням користувачем введення та отриманням зворотного зв'язку має бути, як якомога меншим. Для цього затримка має бути величиною в 1 мс і менше.

### 3.1.3 Концепція доповненої реальності

Доповнена реальність (AR) визначається як інтерактивний досвід у реальному середовищі, в якому об'єкти, що знаходяться в реальному світі, доповнюються віртуальною інформацією, такою як текст, зображення, анімація, тривимірні моделі в режимі реального часу [26-29]. Її також можна описати як стан, за якого контекст реального світу динамічно накладається на віртуальну інформацію в заданий час у заданому місці розташування. У цьому сенсі AR дозволяє користувачам перебувати в імерсивному середовищі, що об'єднує реальний і віртуальний світи.

Метою надання послуг доповненої реальності є забезпечення розширених можливостей взаємодії з мережею, які можуть задовольнити потреби людей і зробити їхнє життя кращим. Послуги доповненої реальності (AR) розширюють можливості користувача щодо сприйняття та взаємодії з фізичним світом. З іншого боку, технологія віртуальної реальності (VR) або віртуальне середовище [24] повністю занурює користувачів у віртуальний світ, не дозволяючи їм бачити реальний світ, на відміну від технології AR, яка посилює відчуття реалізму за рахунок накладення віртуальних об'єктів та інформації в режимі реального часу на реальний світ. Крім того, найістотніша відмінність між VR і AR полягає в тому, що AR не обмежується конкретним типом технології відображення. Ба більше, доповнена реальність здатна поліпшити всі почуття, включно з нюхом, дотиком і слухом. Послуги AR можна використовувати для поліпшення або заміни відсутніх почуттів користувачів за допомогою сенсорної заміни, використовуючи, наприклад, звукові сигнали для поліпшення зору сліпих користувачів або використовуючи візуальні сигнали для поліпшення слуху глухих користувачів. За затримкою мережі з наданням послуг доповненої реальності належать до мереж зв'язку з ультра малими затримками - відповідно до рекомендацій МСЕ-Т значення затримки не повинно перевищувати 5мс.

## 3.2 Аналіз моделей інформаційного трафіку

### 3.2.1 Моделі трафіку для традиційних послуг мереж зв'язку

Традиційні моделі трафіку в мережі зв'язку загального користування можна проаналізувати шляхом вивчення типів використовуваних послуг, обсягу трафіку, що генерується кожною послугою та часу доби, коли трафік є максимальним.

Типи послуг, що використовуються в мережі зв'язку загального користування, можуть різнитися залежно від їхнього призначення. Широко відомі послуги включають перегляд веб-сторінок, електронну пошту, обмін файлами, потокове мультимедіа, VoIP (голос поверх IP) і відеоконференції.

Обсяг трафіку, що генерується кожною послугою, можна визначити шляхом вимірювання кількості байтів, відправлених і отриманих за певний період. Ці дані можна використовувати для визначення того, які послуги генерують найбільше трафіку, а які найменше.

Час доби, коли трафік є найвищим, також можна визначити шляхом вимірювання кількості байтів, відправлених і отриманих у різний час протягом дня. Ці дані можуть допомогти визначити періоди пікового використання для певних послуг або використання мережі загалом. Це також може допомогти визначити будь-які потенційні проблемні місця в мережі, які, можливо, буде потрібно модифікувати.

Потік запитів (потік трафіку) - це послідовність запитів, які виконує користувач під час взаємодії з сайтом або додатком. Потік запитів починається, коли користувач робить запит на сервер, який потім обробляє запит і надсилає відповідь. Відповіддю може бути HTML-сторінка, зображення або інші дані. Потім користувач вивчає відповідь, що може ініціювати додаткові запити та відповіді доти, доки завдання користувача не буде вирішено відповідно до вимог щодо якості обслуговування.



Основним завданням моделювання трафіку в мережах зв'язку є імітація поведінки мережевого трафіку та прогнозування продуктивності мережі в різних умовах. Це включає в себе аналіз впливу різних факторів, таких як користувацький попит, топологія мережі, характеристики трафіку та їхній вплив на продуктивність мережі. Моделі трафіку також можна використовувати для оцінки різних варіантів планування мережі, виявлення потенційних проблемних ділянок або елементів мережі та проблемних ділянок або елементів мережі та оптимізації її продуктивності.

Потік запитів може бути, як випадковим, так і детермінованим. Випадкові потоки трафіку можуть надходити з будь-якого джерела в будь-який час. З іншого боку, детерміновані потоки трафіку є регулярними і передбачуваними, що надходять з певного джерела через заздалегідь визначені інтервали часу.

Функція розподілу  $F(t)$  часових інтервалів між запитами представляє потік трафіку або може бути задана функцією розподілу числа запитів за інтервал часу. Потік трафіку може бути як однорідним, так і неоднорідним. Однорідні потоки трафіку - це потоки, ідентичні за своєю природою і мають однаковий тип даних або інформації. Гетерогенні потоки трафіку - це ті, що розрізняються за своєю природою і мають різні типи даних або інформації.

Одним із найбільш відомих потоків трафіку є найпростіший потік, для якого характерні такі властивості:

1) стаціонарний - потік називається стаціонарним, якщо ймовірність отримання певної кількості запитів за будь-який проміжок часу визначається тільки тривалістю цього інтервалу і не залежить від моменту його початку;

2) ординарність - звичайний потік - це потік, у якому ймовірність отримання більше одного запиту за короткий проміжок часу нехтувано мала порівняно з ймовірністю отримання одного запиту;

3) без післядії - потік запитів називається потоком без післядії, якщо ймовірність надходження запитів у момент часу  $t$  не залежить від попередніх подій.

Потік, що має властивості ординарності та відсутності післядії, називається потоком Пуасона. Цей потік не є стаціонарним.

Потік, що має властивості стаціонарності та відсутності післядії, називається груповим пуасонівським потоком.

Найпоширеніша, найкорисніша і найпростіша модель - це модель найпростішого потоку. Його головна особливість полягає в тому, що кількість запитів, що надходять за певний інтервал, є випадковою величиною, що підпорядковується розподілу Пуасона. Часові інтервали між запитами є випадковими і підпорядковуються експоненціальному розподілу.

Для опису трафіку, що генерується безліччю незалежних джерел запитів, зазвичай використовують найпростішу модель потоку. Наприклад, трафік у мережах із комутацією каналів. У мережах із комутацією пакетів властивості потоків не завжди описуються властивостями найпростішого потоку. Дослідження трафіку показали, що ці потоки часто мають властивості фрактальних процесів. Для цього вводяться додаткові характеристики, такі як параметр Херста. На підставі значень параметра Херста потоки класифікуються як антиперсистентні або самоподібні.

Самоподібність зазвичай спостерігається в інтернет-трафіку, де кількість відправлених і отриманих даних відносно зберігається з постійною швидкістю в часі. Цей тип трафіку може бути корисним у мережах, оскільки він забезпечує ефективне використання смуги пропускання і зниження перевантаження.

Діапазон значень параметра Херста для самоподібного потоку становить від 0,5 до 1. Самоподібність розглядається як властивість трафіку зберігати свій характер при зміні масштабу часу. Параметр Херста є мірою довготривалої пам'яті самоподібного потоку. Він використовується для вимірювання ступеня кореляції між послідовними значеннями даних у часовому ряду. Прогнозування значень трафіку і тенденцій у структурі трафіку можна визначити за параметром Херста. Високе значення параметра Херста означає, що існує сильна кореляція між послідовними значеннями даних, а це означає, що характеристики трафіку, ймовірно, залишаться незмінними в часі. І навпаки, низьке значення параметра

Херста вказує на те, що кореляція між послідовними значеннями даних незначна або відсутня, а це означає, що характеристики трафіку можуть бути більш нестійкими та непередбачуваними. Існує кілька методів оцінки параметра Херста [25]. Самоподібні потоки характеризуються значно більшим розкидом часових інтервалів між надходженнями запитів, ніж для найпростішого потоку. При цьому розподіл часового інтервалу між запитами відрізняється від експоненціального розподілу [26].

Прийнятну модель трафіку можна використовувати під час вибору моделі системи його обслуговування. Оскільки основними завданнями є: вибір обсягу ресурсів та оцінка якості функціонування, модель СМО, що використовується для цього має бути адекватною моделі, обраній для представлення потоку.

### 3.2.2 Системи масового обслуговування

Запити, як правило, надходять у випадковий час. Мережа використовує певну кількість ресурсів під час обслуговування кожного запиту. Коли на момент отримання запиту в мережі немає вільних ресурсів, запит поміщається в чергу або йому відмовляють в обслуговуванні відповідно до використовуваної дисципліни обслуговування. Є дві основні дисципліни обслуговування: з очікуванням і з відмовами.

У мережах із комутацією каналів використовується дисципліна обслуговування з відмовами, а в мережах з комутацією пакетів (повідомлень) - комбінована дисципліна обслуговування, що допускає як втрати, так і очікування.

Можливе використання дисциплін із пріоритетним обслуговуванням, коли різні запити можуть мати різні пріоритети. У цьому разі запит із більш високим пріоритетом поміщається в чергу перед запитом із нижчим пріоритетом.

Мережа зв'язку може бути представлена у вигляді системи масового обслуговування СМО. Функціонування СМО визначається властивостями та параметрами трафіку, пропускною спроможністю і може бути описане

параметрами якості обслуговування (затримкою в буфері та ймовірністю втрат). Моделі якості обслуговування традиційно визначають відповідно до класифікації Кендала-Башаріна [27].

У теорії масового обслуговування час між надходженнями та обсяг трафіку є двома найважливішими поняттями, і вони утворюють природну подвійність. Час між надходженнями запитів розуміють як інтервал часу між надходженням двох послідовних пакетів. Він розраховується для кожного пакета даних після першого і часто усереднюється для отримання середнього часу між надходженнями пакетів.

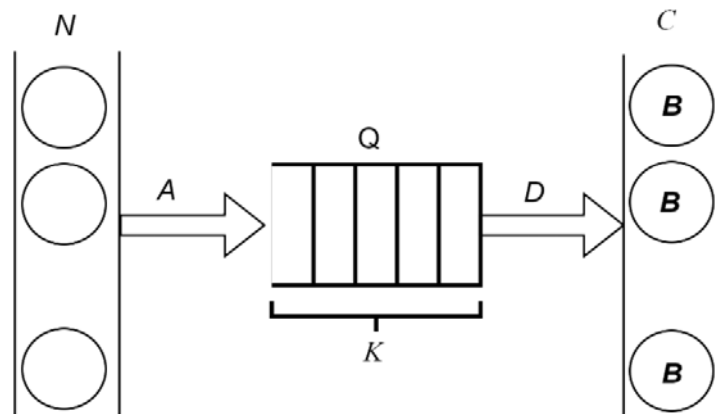


Рисунок 3.1 - Система масового обслуговування

На рисунку 3.1 показано приклад системи масового обслуговування з  $N$  джерелами трафіку.

$N$  - кількість джерел трафіку

$A$  - потік, що надходить

$Q$  - буфер

$K$  - кількість місць для очікування

$C$  - кількість обслуговуючих пристроїв

$B$  - тривалість обслуговування

$D$  - дисципліна черги

Д. Кендал запропонував такі позначення для моделей систем з очікуванням [22]:

$$A/B/n$$

A = потік, що надходить

B = розподіл тривалості обслуговування

n = кількість обслуговуючих пристроїв

Як правило, моделі масового обслуговування описуються такими нотаціями:

M/M/n - це система з пуассонівським потоком надходження, експоненціально розподіленим часом обслуговування і числом n обслуговуючих пристроїв.

G/G/1 - це система з довільним потоком, що надходить, і одним обслуговувальним пристроєм.

У конкретних випадках може знадобитися додаткова інформація:

$$A / B / n / K / N / D$$

де:

K = ємність системи в цілому або можливе число місць у черзі,

N = розмір пакета

D = дисципліна очікування

Дисципліни очікування класифікуються таким чином:

1. FCFS Першим прийшов - першим обслужений. Має також назву справедливої черги. Дуже часто позначається також як FIFO: Першим прийшов - першим покинув чергу.

2. LCFS Останнім прийшов - першим обслужений. Дисципліна також відома під назвою LIFO: Останнім прийшов - першим покинув чергу.

3. SIRO Обслуговування у випадковому порядку. Усі пакети, що перебувають у черзі, мають одну й ту саму ймовірність обслуговування. Також має назву RANDOM або RS (Випадковий вибір).

3.3 Комплексна модель трафіку для реалізації на мережі послуг інтернету речей, тактильного інтернету та доповненої реальності

### 3.3.1 Системна модель

У цій роботі, системна модель включає три види генераторів трафіку: тактильного трафіку, позначеного як H2H+TI (H2H - Human to Human, TI - тактильний інтернет), трафіку доповненої реальності (AR) і генератора трафіку IoT, що імітує один або кілька пристроїв IoT. Усі ці генератори об'єднуються в один вузол і об'єднаний потік надходить у систему масового обслуговування (СМО) з комбінованою дисципліною обслуговування, як показано на рисунку 3.2.

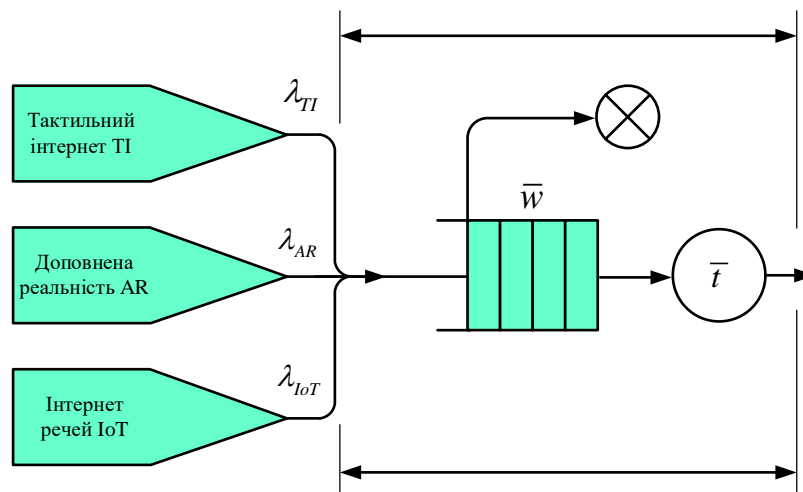


Рисунок 3.2 - Системна модель

Трафік, що генерується пристроями IoT поділяється на три характерних типи трафіку [15, 18]:

- a) детермінований;
- b) службовий;
- c) опосередкований.

Трафік, що генерується пристроями IoT, може обслуговуватися разом із трафіком інших послуг зв'язку. Оскільки характер трафіку IoT зазвичай відрізняється від трафіку інших послуг мережі, необхідно оцінювати його характеристики, а також вплив на QoS інших послуг під час планування мереж зв'язку [17].

У цій роботі QoS системи визначатимемо ймовірністю відмови в обслуговуванні (втрати пакетів)  $p$  і затримкою пакетів, де затримка виникає через час очікування  $w$  у черзі та час обслуговування пакетів із середньою тривалістю обслуговування  $\bar{t}$  (рисунок 3.2). На вході в систему характеристики змішаного потоку визначаються властивостями всіх потоків. Тому, в цілому потік відрізняється від властивостей потоків як трафіку IoT, так і традиційного трафіку.

Нижче наведено оцінки показників QoS окремо для тактильного потоку інтернет-трафіку (H2H+TI), потоків трафіку доповненої реальності та IoT.

### 3.3.2 Аналітична модель

Розглянемо аналітичну модель для оцінки ймовірності втрат і затримки пакетів за рахунок часу очікування в черзі та тривалості обслуговування, представлену моделлю  $G/G/1/k$ .

Для оцінки ймовірності втрати пакетів за відомих параметрів розподілу, що описують трафік і процес обслуговування пакетів [17, 19], може бути використано вираз:

$$p = \frac{1-p}{2} p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b} \frac{2}{1-p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b + 1}} \quad (3.1)$$

де  $p$  - завантаження системи;  $n_b$  - розмір буфера;  $C_a^2$  і  $C_s^2$  - квадратичні коефіцієнти варіації розподілів розподілу вхідного потоку і тривалості обслуговування відповідно.

Рівняння для оцінки часу доставки пакетів [10, 11]:

$$T = \frac{p\bar{t}}{2(1-p)} \left( \frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left( \frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (3.2)$$

де  $\sigma_a^2$  і  $\sigma_s^2$  - значення дисперсій інтервалу часу між надходженням пакетів і тривалості обслуговування відповідно;  $\bar{a}$  - середнє значення інтервалу між пакетами;  $\bar{t}$  - середня тривалість обслуговування.

Відомо, що потоки трафіку TI і AR мають властивості самоподібних потоків. Трафік же IoT можна віднести до детермінованих потоків [15, 18], оскільки найчастіше в додатках IoT цей трафік формується шляхом періодичного процесу надсилання даних системи моніторингу та/або диспетчерського управління [16].

### 3.3.3 Імітаційна модель

Середовище моделювання було реалізовано на Anylogic. При цьому, поперше, необхідно було визначити типи розподілів кожного трафіку. Як зазначено вище, перші два типи трафіку (TI і AR) мають властивості самоподібного потоку і вимагають генерації послідовності незалежних подій і випадкової зміни часових інтервалів між ними. Трафік H2H + TI має розподіл Парето відповідно до [12, 14] з функцією щільності ймовірності



$$f(x) = \begin{cases} kx_m^a & x \geq x_m \\ x^{a+1} & x < x_m \\ 0 & \end{cases} \quad (3.3)$$

де  $x_m$  і  $a$  - параметри розподілу.

Математичне очікування і дисперсія визначаються таким чином:

$$E(x) = \frac{ax_m}{a-1} \quad (3.4)$$

$$V(x) = \left( \frac{ax_m^2}{(a-1)^2(a-2)} \right) \quad (3.5)$$

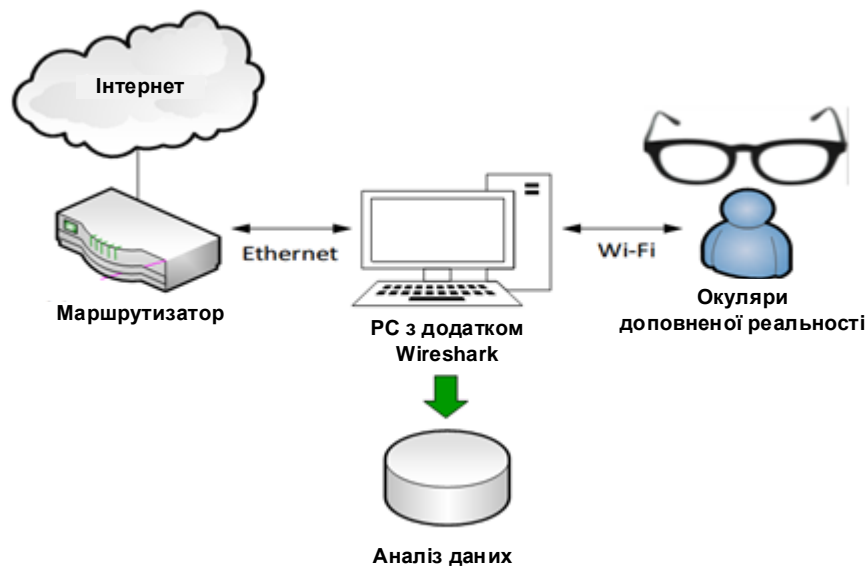


Рисунок 3.3 - Моделювання трафіку доповненої реальності

Моделювання трафіку AR було виконано за допомогою окулярів доповненої реальності, підключених до інтернету через Wi-Fi, і програми Wireshark для аналізу даних про трафік і визначення характеру розподілу (рисунок 3.3).

Функція щільності ймовірності тривалості обслуговування для AR показана на рисунку 3.4.

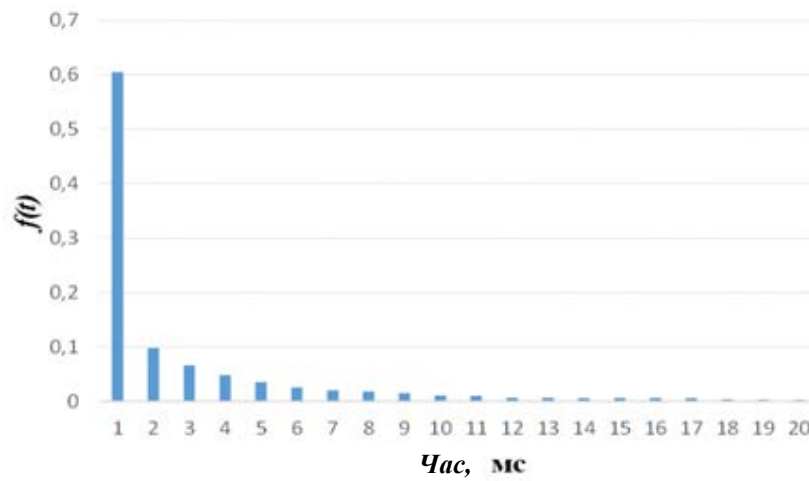


Рисунок 3.4 - Функція щільності ймовірності тривалості обслуговування AR

Приклади реалізації самоподібного потоку для використовуваної моделі з коефіцієнтом Херста  $H = 0,88$  і найпростішого потоку з  $H = 0,5$  представлені на рисунку 3.5.

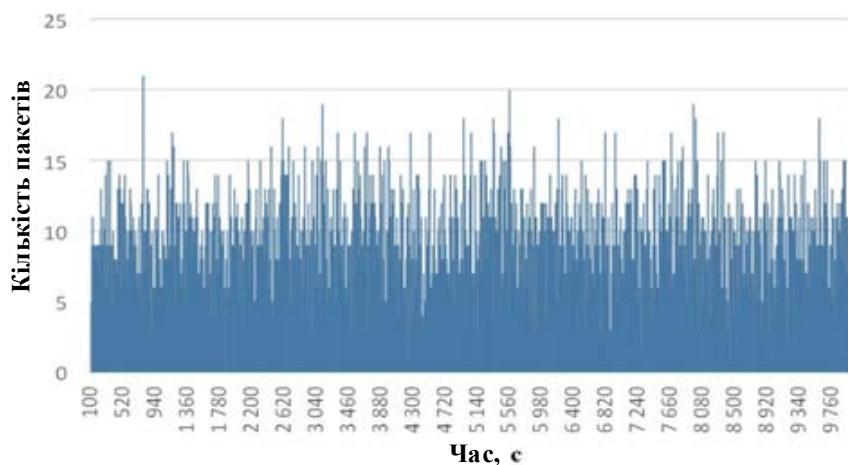


Рисунок 3.5 - Самоподібний і найпростіший потоки трафіку

Приклад реалізації агрегованих потоків трафіку для TI, AR і IoT з коефіцієнтом Херста  $H = 0,6$  наведено на рисунку 3.6.

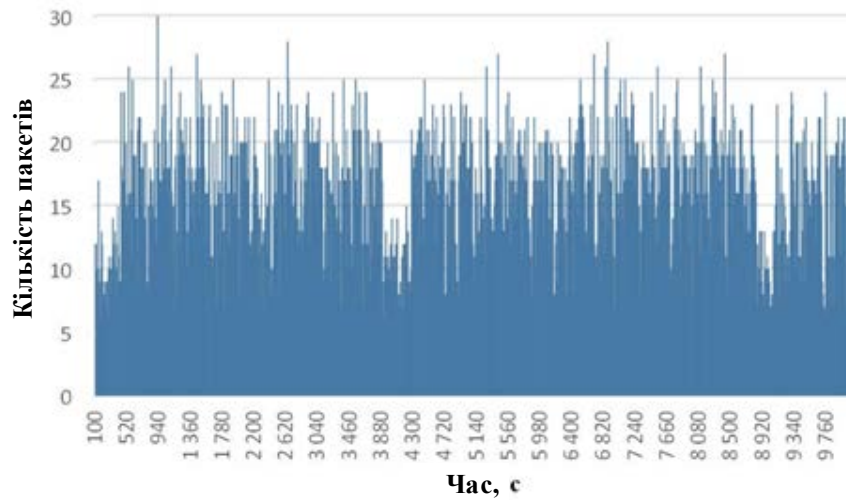


Рисунок 3.6 - Агреговані потоки трафіку

Коефіцієнти Херста оцінювали шляхом оцінки зміни дисперсії. Діаграми залежності дисперсії для вхідних і вихідних потоків з інтервалами агрегованих потоків показано на рисунку 3.7.

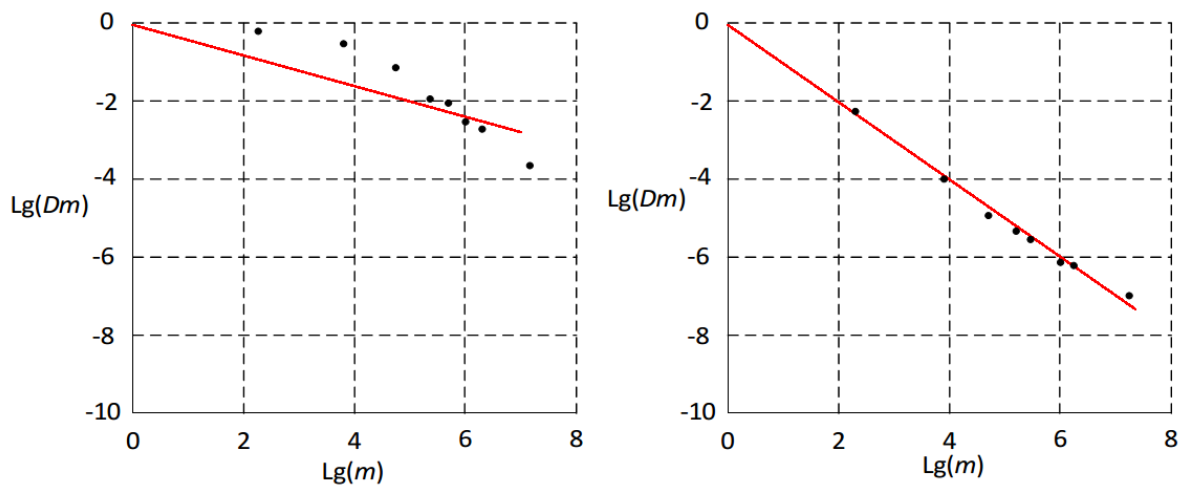


Рисунок 3.7 - Коефіцієнти Херста для вхідного ( $H = 0,731$ ) і вихідного ( $H = 0,515$ ) потоків

### 3.3.4 Результати моделювання

Розглянемо результати моделювання з використанням Anylogic, а також математичної моделі, представленої в рівняннях (3.1) і (3.2).

На рисунках 3.8 і 3.9 наведено оцінку ймовірності втрат залежно від інтенсивності навантаження  $\rho$  за різних розмірів буфера  $n = 2$  і  $10$ . Штрихові криві - результати, отримані за формулою (3.1), а суцільні - оцінки моделювання на Anylogic. Для детермінованого потоку ймовірність втрати пакетів залежно від інтенсивності навантаження отримана для трафіку IoT, чорні пунктирні та суцільні криві на рисунках 3.8 і 3.9 показують результати для розмірів буфера 2 і 10. Видно, що обчислення, проведені за (3.1), дають дещо завищений коефіцієнт втрат в обох випадках для розмірів  $n = 2$  і  $10$ .

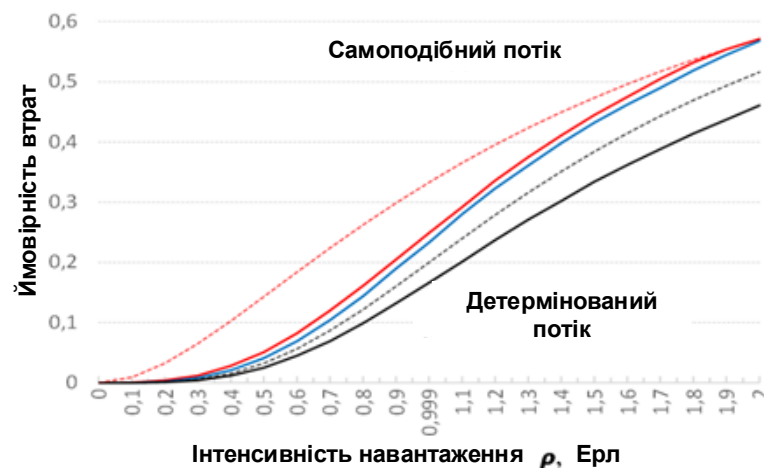


Рисунок 3.8 - Ймовірність втрат залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера ( $n = 2$ )

Крім того, для самоподібного потоку наведено ймовірності втрати пакетів залежно від інтенсивності навантаження для тактильного трафіку (червона крива) і трафіку AR (синя), отримані під час моделювання на Anylogic з розмірами буфера 2 і 10, червона пунктирна лінія відповідає обчисленням за формулою (3.1). Як бачимо, обчислення за формулою (3.1) також дають дещо

завищений коефіцієнт втрат за розміру буфера  $n = 2$ . У той же водночас для розміру буфера  $n = 10$  результати обчислень дають дещо занижене значення коефіцієнта втрат при використанні формули (3.1). Зауважимо також, що ймовірність втрат із погляду AR дещо нижча за ймовірності втрат для ТІ і вища, ніж для IoT-трафіку.

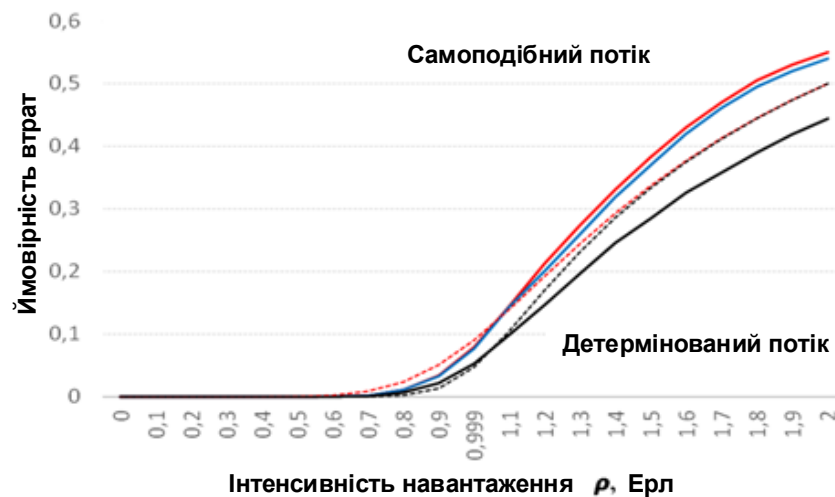


Рисунок 3.9 - Ймовірність втрат залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера ( $n = 10$ )

Видно що, при розміру буфера  $n = 10$  результати обчислень дають значення коефіцієнта втрат менше ніж коефіцієнта втрат у разі розміру буфера  $n = 2$ .

На рисунках 3.10 і 3.11 представлені залежності затримки доставки пакетів від інтенсивності навантаження  $\rho$  для самоподібного потоку (чорна та червона пунктирні криві) і детермінованого (синя крива), а також для агрегованої моделі (сіра) за формулою (3.2) з буфером розмірами  $n = 2$  і 10.

Для детермінованого потоку час затримки доставки при інтенсивності навантаження менший, ніж час затримки для самоподібного потоку, ТІ і AR в обох випадках розміру буфера. Крім того, час доставки для трафіку AR (штрихова червона крива) за розміру буфера, що дорівнює  $n = 2$ , трохи менше, ніж час затримки ТІ (чорна крива). Тоді як при розмірі буфера  $n = 10$  затримка AR майже дорівнює затримці ТІ.

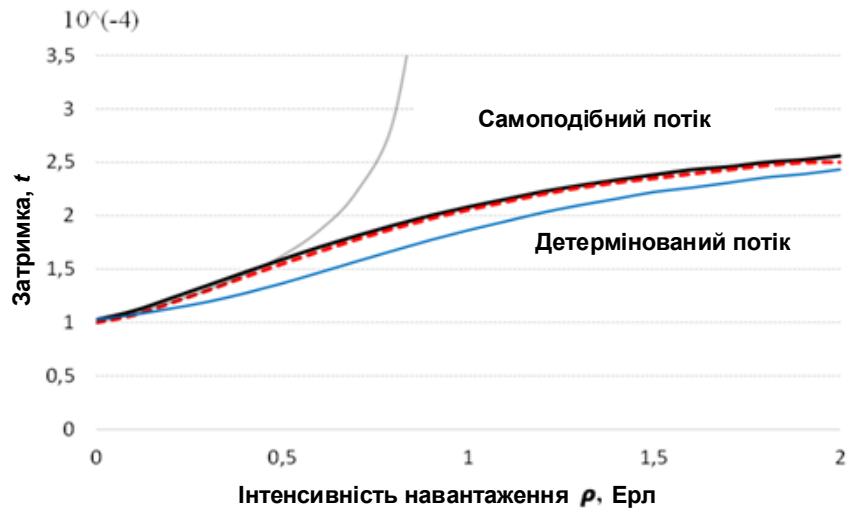


Рисунок 3.10 - Затримка доставки пакетів залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера ( $n = 2$ )

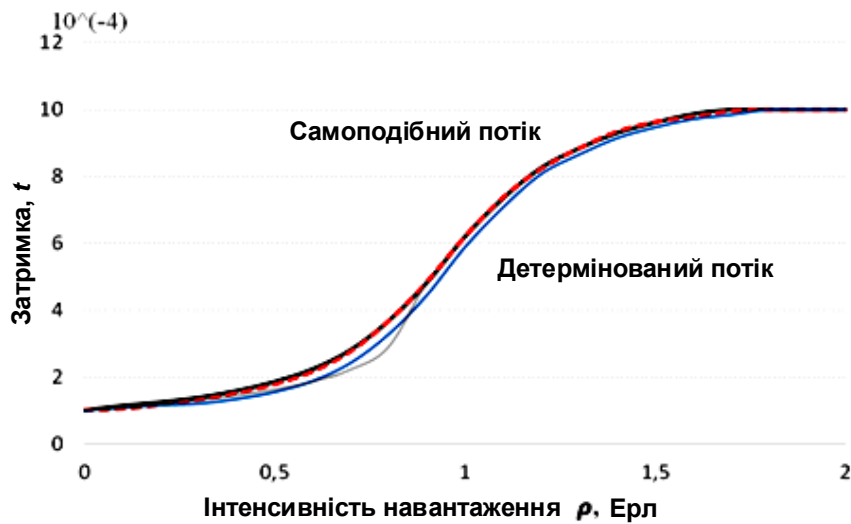


Рисунок 3.11 - Затримка доставки пакетів залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера ( $n = 10$ )

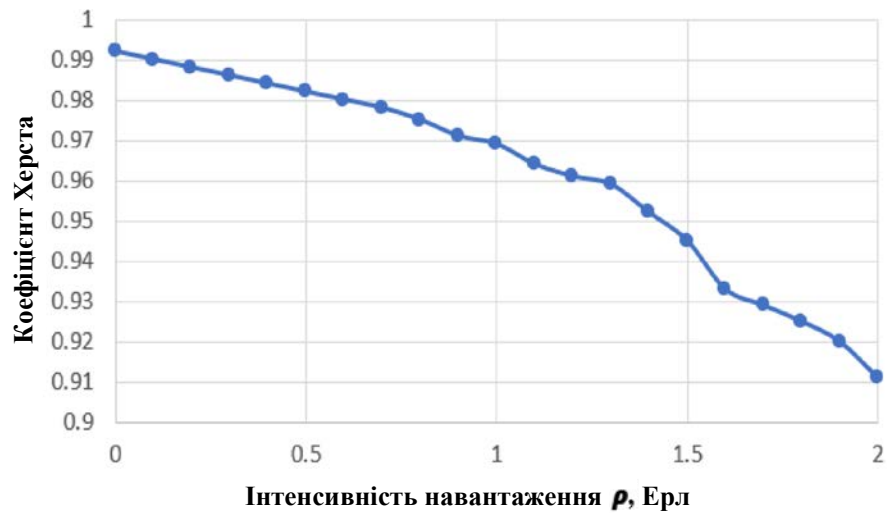


Рисунок 3.12 - Коефіцієнт Херста обслуженого потоку залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера  $n = 2$



Рисунок 3.13 - Коефіцієнт Херста обслуженого потоку залежно від інтенсивності навантаження, розмір буфера  $n = 10$

Залежності коефіцієнтів Херста від інтенсивності навантаження показано на рисунках 3.12 і 3.13 за різних розмірів буфера. З рисунків видно, що в обох випадках ( $n = 2$  і  $10$ ) коефіцієнти Херста обслуженого потоку зменшуються при збільшенні інтенсивності завантаження  $\rho$  СМО.

### 3.4 Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено дослідження сучасних моделей трафіку для мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь. При цьому було отримано такі основні результати:

1. На відміну від відомих моделей трафіку було запропоновано модель, у якій до трафіку Інтернету Речей і трафіку Тактильного Інтернету додається трафік доповненої реальності. При цьому було встановлено, що ймовірність втрат пакетів для трафіку AR більша, ніж для трафіку IoT і менша, ніж для трафіку TI, а вхідний агрегований потік трафіку IoT, TI і AR є самоподібним із параметром Херста  $H = 0,7$ .

2. Запропонована модель дає можливість оцінити не тільки якість обслуговування об'єднаного потоку трафіку послуг інтернету речей, тактильного інтернету та доповненої реальності, але також затримку доставки та ймовірність втрати пакета. Застосування моделі дало змогу вивчити залежність якості обслуговування від властивостей об'єднаних потоків трафіку і залежність властивостей обслуженого потоку від інтенсивності навантаження. Збільшення інтенсивності навантаження призводить до домінування впливу властивостей системи обслуговування, а її зниження - до домінування властивостей вхідного потоку.

3. Результати моделювання показали, що параметри якості обслуговування трафіків інтернету речей та інших сучасних додатків помітно відрізняються при обслуговуванні сукупного потоку. Під час вивчення обслуговування агрегованого трафіку (H2H+TI та AR) встановлено, що для нього ймовірність втрати пакета більша, ніж для трафіку інтернету речей. Крім того, ця різниця стає більш істотною при збільшенні інтенсивності навантаження, що надходить.

4. Гетерогенний характер трафіку в мережах зв'язку п'ятого і наступних поколінь для забезпечення характеристик якості обслуговування та якості сприйняття вимагає використання всіх доступних ресурсів для обслуговування трафіку таких мереж, зокрема й ресурсів безпілотних літальних апаратів (БПЛА).



#### 4 ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ РЕСУРСІВ БПЛА ТА ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ГРАНИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Нині з'являється дедалі більше й більше нових технологій, здатних спростити й автоматизувати повсякденну діяльність людини. Однією з таких перспективних технологій, застосованих у мережах зв'язку п'ятого покоління зв'язку 5G/IMT-2020, є мережі безпілотних літальних апаратів [28].

Безпілотні літальні апарати є найважливішою складовою підтримки наземних мереж. Тому, вони можуть зробити значний внесок у забезпечення додаткової функціональної різноманітності при підтримці мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь. Більш того, через простоту розгортання мереж БПЛА їх можна використовувати в різних комерційних додатках і цивільних цілях, таких як зйомка і картографування, повітряні базові станції, пошук і рятувальні операції, а також моніторинг, забезпечення підключення, управління трафіком тощо. Крім того, критерії продуктивності мереж 5G у контексті підвищеної надійності, низької затримки, пікової пропускну здатності, високої швидкості та низького енергоспоживання роблять БПЛА одним із найважливіших системних рішень для досягнення всіх цілей, згаданих вище [27, 28].

У першому розділі згадувалося безліч варіантів використання БПЛА, які загалом можна розділити на два важливі напрями: БПЛА, що працює як частина інфраструктури бездротового зв'язку, і БПЛА, що функціонує як мобільний термінал. Крім того, пропускна здатність наземних базових станцій може бути збільшена з використанням БПЛА. Тією ж мірою це стосується і покриття території базовою станцією. Крім того, БПЛА можуть виконувати функції тимчасових головних вузлів кластерів для бездротових сенсорних мереж і мереж Інтернету Речей, ефективно використовуватися при вирішенні завдань розумних міст [32]. Рої БПЛА доцільно використовувати і для вирішення завдань повітряних мереж зв'язку [23]. Природно, що використання як одиночних БПЛА,

так і роїв БПЛА може забезпечити в необхідних випадках вимоги щодо надійності та якості обслуговування [24]. Загалом, використання БПЛА в мережах зв'язку дає змогу реально підійти до вирішення проблеми створення комбінованих наземно-повітряних мереж зв'язку [25].

Розвиток мереж БПЛА уможливив збір даних із сенсорних пристроїв. Так з'явилися літаючі всепроникні сенсорні мережі FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Networks) [29, 30]. Цей тип мереж широко використовується в багатьох сферах життєдіяльності людини, наприклад, у сільському господарстві, під час стихійних лих тощо. [30]. Найбільш ефективними є такі сценарії використання мереж БПЛА, як зазначалося в першому розділі:

1. Збільшення зони покриття. БПЛА в даному сценарії можна використовувати як для розвантаження певних ділянок мережі зі збільшеним числом користувацьких пристроїв

(у цьому випадку ділянки мережі можуть бути перевантажені великими обсягами користувацького трафіку), так і для швидкого відновлення зв'язку на територіях, де мережева інфраструктура була повністю або частково

пошкоджена через виникнення різних стихійних лих.

2. Передача інформації від віддалених користувачів. БПЛА може використовуватися для передачі даних між досить віддаленими один від одного користувачами в тих випадках, коли обмін даними неможливо здійснити з використанням стандартної архітектури мережі зв'язку.

3. Збір даних із сенсорних полів. У цьому сценарії БПЛА використовуються для збору інформації з наземних сенсорних пристроїв.

У цьому розділі, досліджуються проблеми інтеграції мережі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і програмно-конфігурованих мереж (software-defined networks, SDN). Представлено два способи побудови мереж БПЛА з технологією SDN: коли базова станція виконує функції контролера SDN і коли БПЛА використовуються як контролери SDN. Детально розглянуто метод організації мережі БПЛА для збирання даних із сенсорних полів. При цьому мережева структура БПЛА розподілена за кількома кластерами, що, у свою чергу, вимагає

вибору головного вузла для взаємодії з контролером SDN. Усі питання розглядаються в ув'язці з наміченим широким застосуванням у мережах зв'язку технологій граничних обчислень.

При цьому досліджуються також проблеми вивантаження трафіку під час використання літаючого вузла граничних обчислень, розташованого на БПЛА. Крім цього, розглядається і варіант використання БПЛА як ретранслятора.

#### 4.1 Архітектура мережі БПЛА для сенсорних мереж

Мережі БПЛА для сенсорних мереж являють собою бездротові літаючі сенсорні мережі, які складаються з двох сегментів [29]:

- літаючий сегмент, який може бути організовано як поодинокими БПЛА, так і їхніми групами (питання побудови роїв БПЛА розглянуто в [31, 32]);
- наземний сегмент, як пристрої якого можна розглядати різні сенсорні вузли, які можуть створювати мережі, що самоорганізуються (наприклад, сенсорні вузли, що взаємодіють між собою за протоколами 6LoWPAN і ZigBee).

Крім того, наземний і літаючий сегменти можуть бути архітектурно реалізовані як однорангові та ієрархічні (або кластерні) мережі. Також БПЛА можуть виступати як тимчасові головні вузли кластерів наземних сегментів [23].

Однією з переваг мереж БПЛА є можливість організувати зв'язок у режимі реального часу без необхідності надання будь-якої інфраструктури. Основні проблеми мереж БПЛА пов'язані зі значними втратами пакетів даних, великими затримками або можливістю порушення процесу передачі інформації через високу мобільність БПЛА. Обмежені енергоресурси БПЛА також можуть спричиняти збої та порушення в роботі мережі. Тому забезпечення зв'язку (особливо між окремими БПЛА), а також зниження енергоспоживання є важливими завданнями в мережах БПЛА.

Щоб організувати нормально функціонуючу мережу БПЛА, необхідно визначити, яким чином БПЛА буде взаємодіяти з наземним сегментом.

Взаємодія декількох БПЛА також потребуватиме організації в літаючому сегменті мережі зв'язку між окремими безпілотними літальними апаратами [24].

Безпілотні літальні апарати в мережі можуть взаємодіяти один з одним за допомогою наземних станцій управління. У даній роботі пропонується розглянути такі три архітектури: централізовану, кластерну та стільникову.

1. Централізована архітектура. У цьому випадку БПЛА обмінюються інформацією з однією наземною базовою станцією (БС), іншими словами, коли БПЛА взаємодіють один з одним, усі пакети даних передаються через наземну БС. Переваги цієї архітектури: відмовостійкість у разі відмови окремих БПЛА, паралельне виконання завдань, поліпшення обчислювальних і запам'ятовувальних характеристик. Недоліки: пропорційність пропускну здатності мережі щільності БПЛА, великі затримки, а також уразливість наземних БС.

2. Архітектура кластеризації. У цій архітектурі літаючий сегмент розділений на кілька кластерів, у яких один із БПЛА обраний в якості головного вузла. Цей головний вузол забезпечує взаємодію всіх БПЛА всередині одного кластера і взаємодію БПЛА кластера з наземною БС. Перевага цієї архітектури: підтримка БПЛА з різними комунікаційними і льотними характеристиками [25]. Недоліки: неможливість взаємодії БПЛА одного кластера з БПЛА іншого кластера при частковому або повному пошкодженні БС.

3. Стільникова архітектура. Ця архітектура ділить літаючий сегмент на кілька комірок, кожна з яких використовує свою унікальну смугу пропускання для запобігання виникненню перешкод від інших осередків. БПЛА можуть взаємодіяти один з одним за допомогою базових станцій або без них.

#### 4.2 Застосування SDN у мережах БПЛА

SDN - це мережева структура з можливостями адаптивного та динамічного управління, в якій площину даних відокремлено від площини управління, а також дає змогу здійснювати програмне управління мережею та абстрагування

рівня додатків і сервісів (мережових сервісів) від рівня мережевої інфраструктури [26].

SDN розглядають як підхід до проектування мережі, заснований на прямому управлінні мережами та їхніми ресурсами, який за допомогою власної обробки, програмного управління та адміністрування через відкриті мережеві інтерфейси та ізоляцію від мережевого рівня забезпечує розподіл ресурсів мереж [26].

Розглянемо далі можливості використання технологій програмно-конфігурованих мереж для мереж БПЛА.

Насамперед, зазначимо, що на даний момент під час проектування мереж БПЛА, крім описаних вище проблем, виникає й низка інших, зокрема [27]:

- високий попит на певний тип трафіку, що, у свою чергу, призводить до можливого перевантаження мережі та збільшення споживання електроенергії;

- переривання зв'язку між БПЛА і фрагментація мережі, викликана високою мобільністю БПЛА;

- необхідність знання глобального уявлення про мережу для забезпечення високої ефективності розгортання БПЛА;

- обмежені ресурси мережі БПЛА і можливості забезпечення взаємодії БПЛА з наземним сегментом мережі (наприклад, взаємодія БПЛА з БС або вузлами сенсорних полів).

Концепція SDN мереж завдяки низці її переваг, таких як гнучке централізоване управління мережею, можливість налаштування програмного забезпечення, відокремлення рівня управління від рівня передавання даних, незалежність мережевої інфраструктури від постачальників обладнання та використання відкритих стандартів, може вирішити ці проблеми. При цьому БПЛА можуть розглядатися як комутатори SDN, а базові станції, які збирають інформацію з БПЛА і контролюють певні аспекти роботи мережі - як контролери SDN.

Таким чином, застосування концепції SDN у мережах БПЛА дасть змогу:

- 1) Оптимізувати балансування навантаження між БПЛА та базовими станціями.

2) Організувати централізоване управління мережею, що дасть можливість не тільки більш ефективно використовувати ресурси, а й поліпшити якість обслуговування.

3) Зменшити втрату пакетів і навантаження на мережу, а також надати можливість гнучкого розподілу радіоресурсів і переналаштування мережі (ця функція програмно-конфігурованих мереж може бути реалізована з використанням одного або декількох контролерів SDN).

4) Динамічно регулювати рух БПЛА в тривимірному просторі. Також варто зазначити, що якщо протокол OpenFlow розглядається як основний протокол "Південного інтерфейсу" для передачі пакетів у мережі БПЛА (як уже згадувалося раніше, БПЛА в мережі з технологіями SDN виконуватимуть функції комутаторів SDN), то під час розгортання мережі необхідно враховувати вирішення таких проблем:

- Адаптація контролера до зміни масштабу мережі та обсягу переданого трафіку.
- Уразливість контролерів для сервісних атак.
- Забезпечення динамічного управління всією мережевою структурою.
- Відсутність синхронізації між часом встановлення правил і часом прибуття пакетів, а також відсутність узгодженості в обробці одних пакетів даних і встановлення правил для зміни, відкидання і передачі інших.

#### 4.3 Метод вивантаження інформаційного трафіку з наземної мережі на БПЛА

На рисунку 4.1 показано архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технології програмно-конфігурованих мереж, у якій окремі БПЛА діють як комутатори SDN, а базові станції наземного сегмента мережі БПЛА працюють як контролери SDN. На рисунку показано систему, в якій безпілотні літальні апарати можуть використовуватися для збору даних із сенсорних полів.

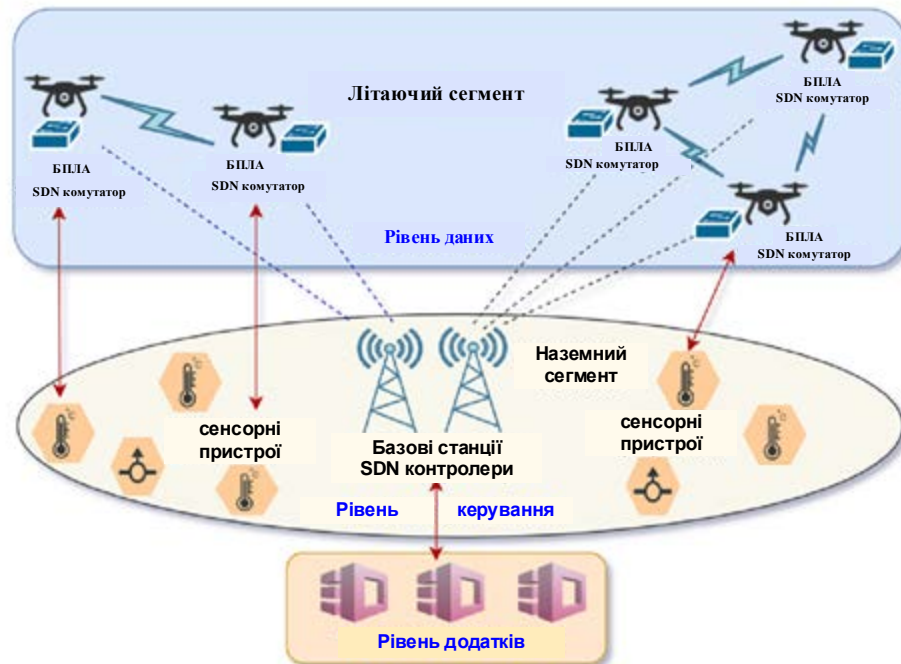


Рисунок 4.1 - Мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у наземному сегменті

На рисунку 4.2 також показано архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технологій SDN, однак замість базових станцій в якості контролера SDN використовуються прив'язні БПЛА, які належать до повітряного сегменту мережі і мають можливість взаємодіяти один з одним. Також у цій архітектурі БПЛА розділені на кластери, у кожному з яких один БПЛА відіграє роль головного вузла, через який члени цього кластера взаємодіють із БПЛА з іншого кластера. Іншими словами, взаємодія БПЛА з різних кластерів здійснюється за допомогою обміну інформацією між головними вузлами кластерів, які, своєю чергою, можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо через наземні БС або через прив'язні БПЛА.

Обмін даними між БПЛА в даній архітектурі всередині одного кластера може здійснюватися безпосередньо без участі головного вузла. Крім того, на рівні додатків у мережі, як показано на рисунку 4.2, мережеві функції можуть бути представлені у вигляді програмних модулів [28].

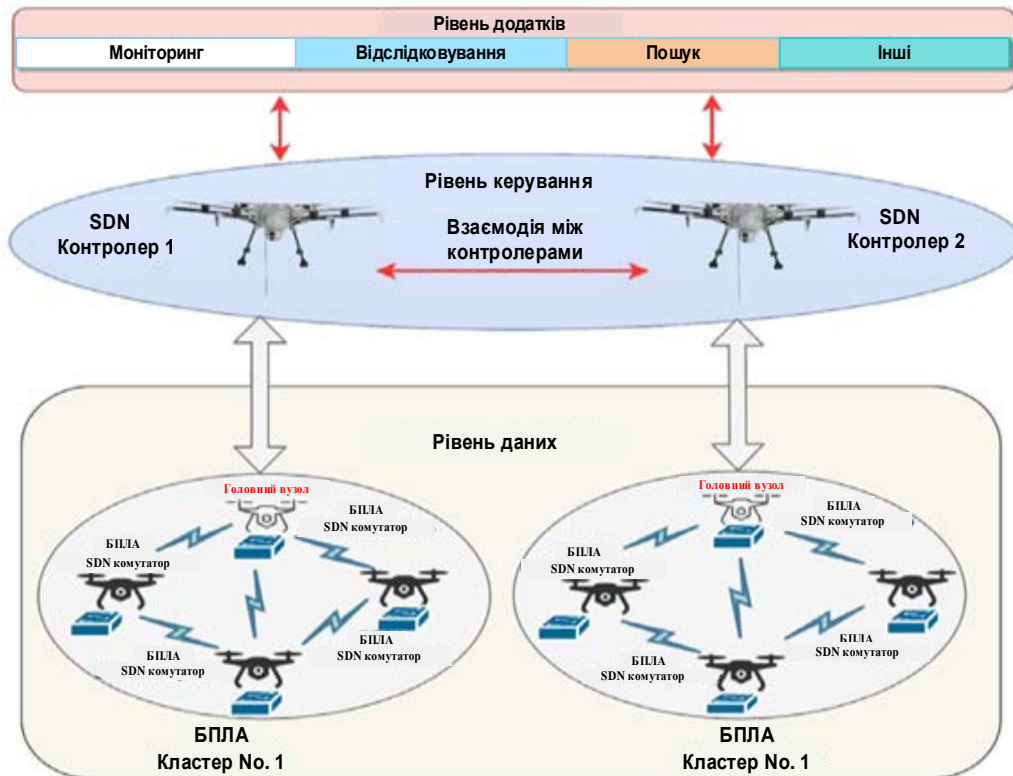


Рисунок 4.2 - Мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у літаючому сегменті

У наступному підрозділі буде розглянуто два методи кластеризації, а саме алгоритм кластеризації k-середніх (k-means) та Формальний Елемент (Foreign Element FOREL) для реалізації цього завдання.

#### 4.4.1 Алгоритми кластеризації k-середніх та FOREL

##### 4.4.1.1 Алгоритм k-середніх

Дія алгоритму полягає в тому, що він прагне мінімізувати сумарний квадрат відхилення елементів кластерів від центрів цих кластерів.

Мінімізована функція записана як:



$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2 \quad (4.1)$$

де  $k$  - кількість кластерів;

$S_i$  - множина елементів  $i$ -го кластера;

$\mu_i$  - координати центру мас  $i$ -го кластера;

$x_j$  - координати центру мас  $j$ -го елемента кластера.

$(x_j - \mu_i)$  - представляє евклідову відстань між елементом кластера і центром мас кластера.

Для двовимірного простору, кожен елемент розглядається як точка на площині і характеризується своїми координатами  $(x_j, y_j)$ .

Координати центру мас  $i$ -го кластера визначаються як:

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, \quad y_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j \quad (4.2)$$

де  $n_i$  - представляє кількість точок даних в  $i$ -му кластері.

Кроки алгоритму:

1. Нехай  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  набір точок даних,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  набір центрів кластерів, і необхідного числа кластерів ( $k$ );

2. Розрахувати відстань між кожною точкою даних і центрами кластерів з використанням евклідової метрики відстані:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2} \quad (4.3)$$

3. Призначати точку даних центру кластера, чия відстань від центру кластера є мінімальною серед усіх центрів кластера.

4. Перерахунок нового центру кластера з використанням (4.2).

5. Перерахувати відстань між кожною точкою даних і новими отриманими центрами кластерів.

6. Якщо жодна точка даних не була перепризначена, зупиніться, в іншому разі повторіть із кроку 3.

Перевагами алгоритму  $k$ -середніх є швидкість виконання та простота реалізації, але в нього є й недоліки:

- перед запуском алгоритму необхідно вказати кількість кластерів, також необхідно правильно визначити кількість кластерів, оскільки від цього залежать результати кінцевого розбиття;

- він чутливий до вибору початкових точок для кластерних центрів (передбачається, що центри кластерів на початковому етапі будуть вибиратися випадковим чином, що, своєю чергою, може виступати джерелом помилки).

Алгоритм не може розв'язати проблему, якщо об'єкт можна віднести до кількох кластерів з однаковою перевагою або немає можливості віднести об'єкт до будь-якого з можливих утворених кластерів.

#### 4.4.1.2 Алгоритм кластеризації FOREL

Алгоритм FOREL (Formal Element) також використовується для розв'язання задачі кластерного аналізу шляхом мінімізації сумарного квадратичного відхилення елементів кластера від центрів мас цих кластерів.

У FOREL алгоритмі визначається розмір кластера  $R$ , а не число кластерів як в алгоритмі  $k$ -середніх. У двовимірній задачі на геометричній площині, під  $R$  розуміється максимальна відстань від елемента кластера до його центру мас (радіус). Кожен елемент також розглядається як точка на площині і характеризується своїми координатами  $(x_j - y_j)$ .

Координати центру мас  $i$ -го кластера визначаються згідно з (4.2).

Кроки алгоритму:

1. Задано центри кластерів, випадковим чином обравши  $k$  точок даних із набору даних.

2. Розрахувати відстань між кожною точкою даних і центрами кластерів.
3. Призначати кожну точку даних найближчому центру кластера.
4. Перерахувати нові центри кластерів, взявши середнє значення всіх точок даних, призначених цьому центру кластера.
5. Повторювати кроки 2-4 доти, доки не перестануть змінюватися призначення кластерів або не буде досягнуто максимальної кількості ітерацій.

Переваги методу FOREL:

- можливість більш точного опису кластерів довільної форми;
- через зміну радіуса  $R$  можна описувати кластери, які мають різні призначення;
- можливість вимоги до деталізації (більш високе значення  $R$  для сферичної форми кластерів, більш низьке значення  $R$  для кластерів, нижче значення для складних форм);
- надання можливостей для виконання операцій над центрами кластерів, перевірки гіпотез кластерів, перевірки гіпотез компактності та подібності, обчислення функціоналів проміжної якості;
- більш наочне відображення процесу кластеризації.

Недоліки методу FOREL:

- низька продуктивність;
- нестабільність, що залежить від об'єктів, обраних на самому початку алгоритму;
- ускладнення застосування методу, якщо складно реалізувати поділ об'єктів на кластери;
- перед запуском алгоритму необхідно визначити радіус утворених кластерів.

#### 4.4.2 Постановка задачі кластеризації

Запропоновано спосіб організації мережі БПЛА для збирання даних із сенсорних полів, коли стаціонарні прив'язні БПЛА виконують функції контролерів SDN, як це було показано на рисунку 4.2.

Крім того, ця мережева структура БПЛА розподілена по декількох кластерах, що, своєю чергою, вимагає вибору головного вузла для взаємодії з прив'язними БПЛА. Припустимо, що такому рою БПЛА необхідно зібрати дані із сенсорних вузлів із певної області. При цьому як групи БПЛА, так і сенсорні поля по території будуть розподілені з різною щільністю.

У реальних умовах група БПЛА може збирати дані з декількох сенсорних полів. Отже, для раціонального збирання даних з усієї зони поширення сенсорних пристроїв також необхідно визначити маршрут руху БПЛА [19, 20]. Оскільки БПЛА розподілені за кількома кластерами, то область збору інформації з сенсорних пристроїв буде визначатиметься не площею одного БПЛА, а площею всього кластера.

Управління потоками передавання даних і, отже, управління передачею пакетів даних у мережі буде здійснюватися стаціонарними прив'язними БПЛА [31]. Таким чином, у мережі БПЛА з інтеграцією технології SDN прив'язний БПЛА виступатиме в ролі контролера SDN. Як зазначалося раніше, у цій мережі БПЛА в рамках технології програмно-конфігурованих мереж виконуватимуть функції комутаторів SDN. Усі БПЛА одного кластера пропонується підключати до прив'язного БПЛА, відстань між яким і головним вузлом кластера буде мінімальною. Відстань між прив'язним БПЛА і головним вузлом було обрано як критерій для вибору прив'язного БПЛА, оскільки вся інформація управління потоком буде проходитиме через головний вузол.

Передбачається, що всередині одного кластера БПЛА можуть вільно взаємодіяти один з одним. Для передачі даних сенсорних вузлів в іншу мережу або кінцевому користувачеві зібрані дані з окремих БПЛА передаються в головний вузол кластера, а від головного вузла - на прив'язний БПЛА. Слід

значити, що взаємодія БПЛА з різних кластерів також буде здійснюватиметься через головні вузли кластерів і прив'язний БПЛА. Також передбачається, що для передачі інформації прив'язні БПЛА матимуть можливість обміну даними один з одним і з наземною інфраструктурою. Під час організації мережі із впровадженням прив'язних БПЛА як контролерів SDN необхідно враховувати такі завдання:

- 1) формування кластерів БПЛА;
- 2) вибір головних вузлів у кожному кластері;
- 3) визначення шляху руху груп БПЛА для оптимального збору даних з декількох сенсорних полів.

Для розв'язання всіх цих завдань, використовуємо алгоритми:

а) Алгоритм  $k$ -середніх для формування кластерів БПЛА. Оскільки в реальних умовах розміри кластерів і щільність розподілу між ними можуть відрізнятися для різних груп кластерів, тому цей алгоритм найбільш підходить для формування кластерів різного розміру;

б) Алгоритм FOREL для визначення шляху руху груп БПЛА. Алгоритм дає змогу формувати кластери заданих радіусів. Центри визначених кластерів будуть точками, з яких кластери БПЛА зможуть найбільш оптимальним чином збирати дані з вузлів сенсорної мережі. Таким чином, центри кластерів, визначені під час виконання алгоритму FOREL, задаватимуть точки руху групи БПЛА. Алгоритм пропонується виконувати окремо для кожної групи БПЛА (сформованого кластера БПЛА). Через це список сенсорних полів, які обслуговуються групами БПЛА, може відрізнятися, а отже, і маршрут руху для різних груп буде різним.

Наприклад, на певній місцевості можуть бути розміщені сенсорні поля, які будуть опитуватися двома групами БПЛА, а також сенсорні поля, дані від яких збирає тільки одна група. Оскільки область збору даних для кластерів БПЛА залишиться незмінною, FOREL є найбільш підходящим алгоритмом для вирішення завдання визначення маршруту руху груп БПЛА.

Вихідними даними для алгоритму  $k$ -середніх будуть кількість сформованих кластерів, координати передбачуваних центрів кластерів і координати БПЛА.

Ми розглядаємо випадок, коли кількість кластерів, що утворюються, відома заздалегідь. Алгоритм  $k$ -середніх показано на рисунку 4.3.

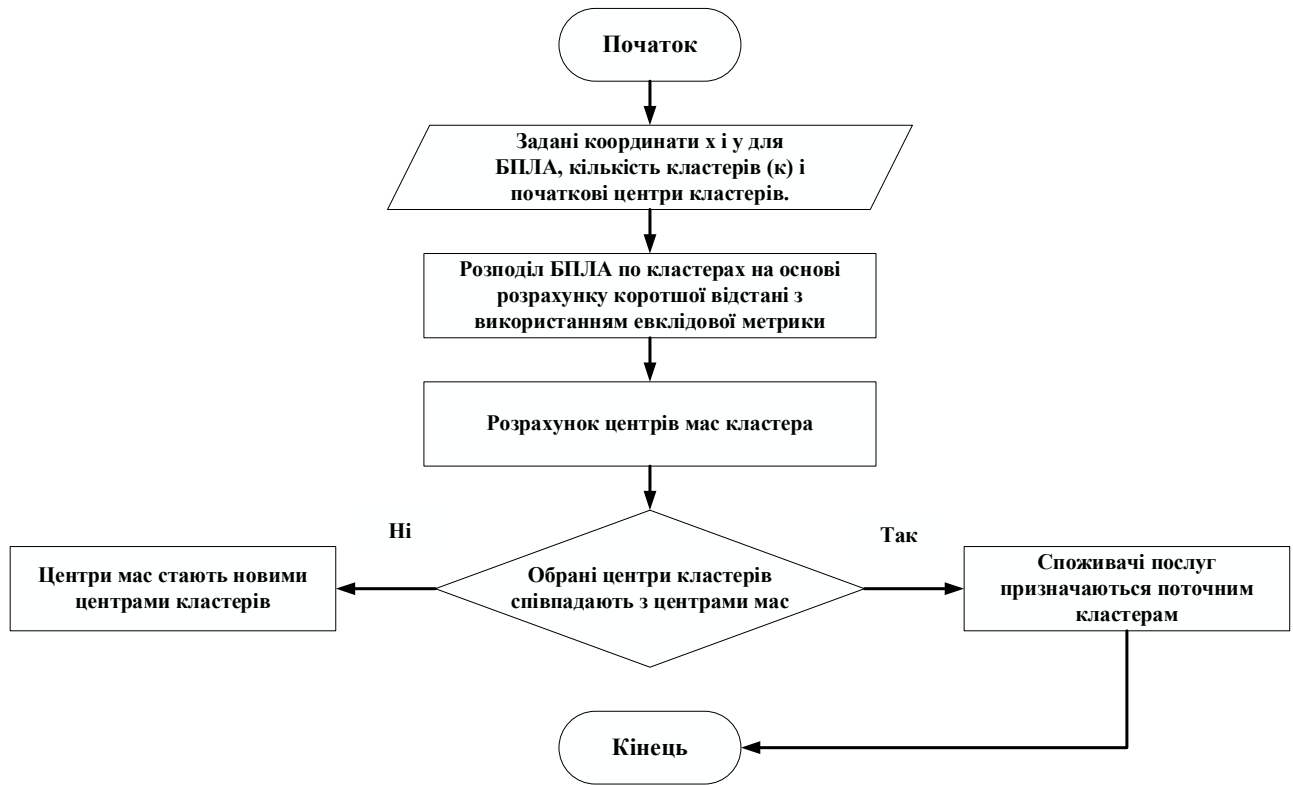


Рисунок 4.3 - Алгоритм  $k$ -середніх для БПЛА

Вихідними даними для алгоритму FOREL є радіус кластерів, координати передбачуваних центрів кластерів і координати сенсорних пристроїв. Розмір зони покриття кластерної групи буде вважатися радіусом кластера. Іншими словами, радіус кластерів для алгоритму FOREL буде залежати від області збору кластерів, сформованих під час виконання алгоритму  $k$ -середніх. Алгоритм FOREL показано на рисунку 4.4.

Для спрощення моделювання пропонується також заздалегідь визначити радіуси зон збирання даних від сенсорних пристроїв.

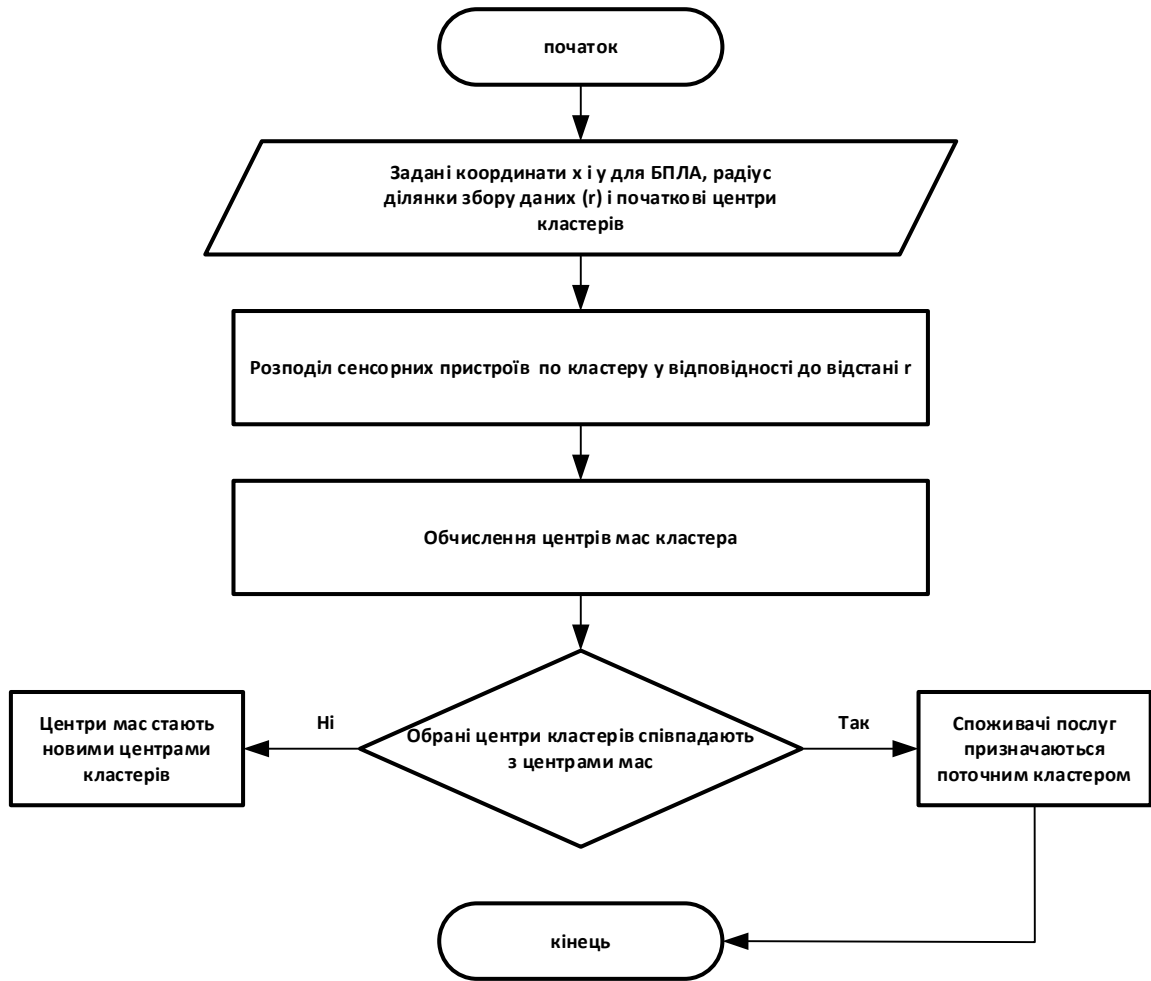


Рисунок 4.4 - Алгоритм FOREL для БПЛА

Вибір головного вузла в кожному кластері БПЛА запропоновано здійснювати за значенням суми параметрів БПЛА: як головний вузол буде обрано той БПЛА, сумарне значення параметрів якого в межах одного кластера буде найбільшим.

Сумарне значення параметрів визначається таким чином:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i \quad (4.4)$$

де  $S$  - загальний параметр;

$W_i$  - вага  $i$ -го параметра;

$R_i$  - значення  $i$ -го параметра;  $n$  - кількість параметрів.

Будемо використовувати такі чотири параметри: CPU, пам'ять, батарея, ємність мережі. Відповідно до значень параметрів CPU, пам'ять, батарея (залишкова енергія БПЛА) для пропускної здатності мережі пропонується враховувати тільки ту частину цих параметрів, яка може бути використана в даний момент часу для виконання певних завдань у мережі БПЛА. Значення вагового коефіцієнта необхідне для розрахунку загального значення параметрів БПЛА.

Значення вагових коефіцієнтів для кожного параметра БПЛА наведено в таблиці 4.1, усі вони задаються у відсотках. На практиці значення параметрів будуть розраховуватися як відношення значення одного параметра певного БПЛА в даний момент часу до максимально можливого значенням цього параметра. Значення параметрів БПЛА також буде виражено у відсотках. Під час моделювання всі чотири параметри задавали у діапазоні від 20 до 75%.

Таблиця 4.1 - Значення ваг для кожного параметра БПЛА

Ресурс пристрою, $R$	Ваговий коефіцієнт, $W$
Батарея	0,34
CPU	0,22
Пам'ять	0,22
Ємність мережі	0,22

Таким чином, алгоритм (послідовність дій) для мережі БПЛА з інтеграцією технологій SDN матиме такий вигляд:

1. Формування кластерів БПЛА з використанням алгоритму кластеризації  $k$ -середніх.
2. Початковий вибір головного вузла в кожному кластері за чотирма значеннями параметра БПЛА.
3. Визначення області збору інформації для кожного кластера БПЛА.
4. Визначення маршруту руху для кожного кластера з використанням алгоритму FOREL для збору даних з певних сенсорних полів. Область збору даних вибирається як радіус кластера.



5. Для передачі даних мережею БПЛА кластери підключаються через головний вузол до найближчого прив'язного БПЛА, який діє як контролер SDN. Цей пункт необхідно повторювати через регулярні проміжки часу.

6. Якщо рівень заряду батареї головного вузла падає нижче певного значення, необхідно вибрати новий головний вузол.

#### 4.4.3 Результати моделювання

Роботу було реалізовано в середовищі Matlab. У таблиці 4.2 і на рисунку 4.5 наведено результати моделювання.

Таблиця 4.2 - Параметри кластерів БПЛА

Група БПЛА	1	2
Початкові координати центрів (x,y) м	299,6884 499,5166	700,5088 500,2622
Знайдені координати центри кластерів (x,y) м	315,18 495,27	695,03 494,89
БПЛА з найбільшими параметрами	3	1
Сумарне значення найбільшого параметра	61,0600	67,5000
Найближчий номер контролера SDN	1	16
Координати найближчого контролера SDN (x,y) м	319,55 502,19	774,91 517,23

Контролери SDN розташовувалися довільно за двома групами згідно координат (300,500) і (800,500) по 10 пристроїв у кожній групі.

Опис елементів, що відображаються на рисунках 4.5 і 4.6:

- рожевий овал - зона збору 1 групи БПЛА;
- блакитний овал - зона збору 2 групи БПЛА;
- лініями відображено маршрут пересування групи БПЛА;
- зелені хрестики - центри зон збору даних із сенсорних полів 1-3;
- червоні хрестики - центри зон збору даних із сенсорних полів 4-6;
- чорні хрестики - центри груп БПЛА;
- рожеві квадратики - сенсорні пристрої сенсорних полів 1-3;
- блакитні квадратики - сенсорні пристрої сенсорних полів 4-6;

- блакитні кружечки - БПЛА;
- жовті плюси - SDN контролери;
- червоний кружок - найближчий SDN контролер до певної групи БПЛА;
- червона зірочка - БПЛА з найкращими параметрами.

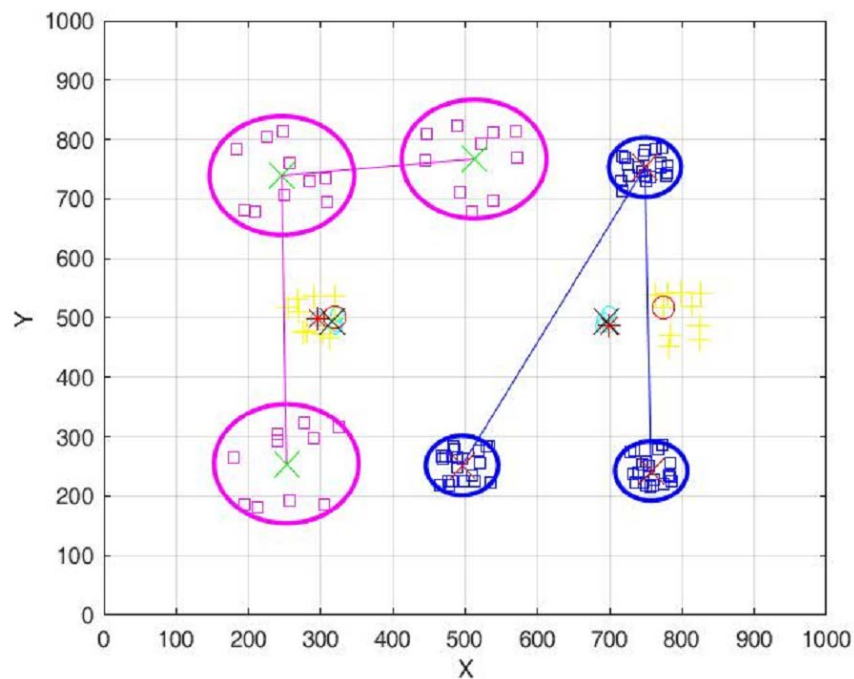


Рисунок 4.5 – Схема мережі БПЛА після виконання алгоритму

4.5 Метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА при розміщенні на БПЛА вузла МЕС і при використанні БПЛА як ретранслятора

У цьому розділі досліджується проблема літаючих мобільних граничних обчислень на основі UAV-МЕС для забезпечення підтримки наземних вузлів обчислень на основі UAV-МЕС для забезпечення підтримки наземних вузлів, наприклад, IoT, які генерують дані за результатами вимірювань у навколишньому середовищі. Пристрої IoT можуть вирішувати тільки прості обчислення та обробку даних через обмежені ресурси [26]. У традиційних методах обчислення реалізуються шляхом передачі даних на центральну базу

станцію із сервером, що забезпечує обчислення найчастіше через множинні переходи і ретрансляції, що призводить до затримок і помилок [27]. Для таких проблем літаючі обчислення на основі UAV-МЕС відіграють життєво важливу роль для виконання обчислювальних завдань від імені пристроїв IoT шляхом вивантаження даних з вузлів IoT (наземних датчиків) на найближчий літаючий БПЛА [28, 29]. Крім того, ефективна взаємодія між БПЛА і пристроями IoT для оброблення і вивантаження даних можна використовувати в режимі реального часу. Таким чином, літаючі обчислення на основі UAV-МЕС можуть скоротити час затримки виконання пристроями IoT за рахунок розвантаження даних для обробки (пристрій IoT на найближчий БПЛА, а не пристрій IoT на віддалену базову станцію). Це подовжує життєвий цикл бездротової сенсорної мережі або мережі Інтернету Речей [30].

МЕС на базі БПЛА являє собою обладнання бортових пристроїв, включно з пам'яттю, цифровими камерами, датчиками, технологіями зв'язку та виконавчими механізмами [31].

#### 4.5.1 Мобільні граничні обчислення МЕС і БПЛА

У цьому підрозділі подано результати аналізу найактуальніших робіт, у яких вивчали проблеми інтеграції БПЛА і МЕС. У дослідженні [26] розв'язується задача мінімізації сумарної потужності для мережі МЕС з підтримкою БПЛА. Запропоновано алгоритм розв'язання невивпуклої задачі мінімізації ступеня суми шляхом ітеративного розв'язання трьох підзадач.

Пропонується можливе рішення для цього ітеративного алгоритму, алгоритм кластеризації нечітких с-середніх. У [27] розглядається децентралізований механізм оптимізації між серверами МЕС і користувачами. Механізм призначення полягає в тому, щоб БПЛА допомагали різноманітним користувачам вибирати різні ресурси МЕС у розподіленому середовищі. Було змодельовано ефективний механізм схеми вивантаження обчислень для оптимізації ціни та енергоспоживання в умовах обмеженої затримки. Крім того,

у дослідженні [28] вивчалася стратегія кешування і вивантаження завдань для МЕС, в якій визначається, які завдання слід кешувати і скільки завдань слід вивантажити. Запропонований алгоритм мінімізує загальну енергію, споживану мобільними пристроями при дотриманні вимог мережі до затримки. Запропоновано енергетично ефективну процедуру вивантаження обчислень для систем UAV-МЕС з акцентом на забезпечення безпеки на фізичному рівні. Оптимальні результати, що забезпечуються сформульованими завданнями, у роботі визначено як для активних, так і для пасивних підслуховувальних пристроїв. Алгоритм вивантаження з урахуванням необхідної енергії та забезпечуваної затримки, запропонований у [30], пропонує два методи вивантаження трафіку на БПЛА. Перший метод - це вивантаження в межах повітряної мережі, за якої БПЛА може передати свої обчислювальні завдання найближчим БПЛА, що мають доступні обчислювальні та енергетичні ресурси. Другий метод вивантаження - це наземне вивантаження, що дає змогу вивантажувати задачі на граничний хмарний сервер із багаторівневих граничних хмарних пристроїв, під'єднаних до наземних станцій. Алгоритм обирає виконавчий пристрій і метод вивантаження на основі обмежень щодо затримки та енергії. Крім того, у дослідженні [31] розглядалися мобільні граничні обчислення (МЕС) з підтримкою декількох БПЛА, які можуть бути розгорнуті як літаюча платформа МЕС для забезпечення обчислювальних ресурсів для наземного користувацького обладнання (UE). Використовується цілочисельне нелінійне програмування для розв'язання двох проблем: по-перше, як домогтися взаємодії між кількома UE і БПЛА, по-друге, як домогтися розподілу ресурсів від БПЛА до UE. Крім того, там же запропоновано алгоритм взаємодії та розподілу ресурсів (RLAA) на основі навчання з підкріпленням (RL) для ефективного і дієвого вирішення цієї проблеми.

#### 4.5.2 Системна модель та сценарій

Запропонована системна модель включає в себе набір вузлів IoT (наземні сенсори), які розподілені для прикладу на розумній фермі та генерують дані, необхідні для обробки. Крім того, системна модель включає два БПЛА, один з яких обладнаний сервером граничних обчислень, а інший - ретранслятором. Крім того, віддалена базова станція також має граничний сервер, як це показано на рисунку 4.6.

Дані будуть оброблятися або на найближчих вузлах Інтернету речей за допомогою літаючого граничного обчислювального сервера UAV-МЕС, або віддалено - на центральному граничному сервері хмарних обчислень.

Перший сценарій - це літаюча мобільна гранична обчислювальна система, в якості МЕС при цьому використовується БПЛА, куди дані будуть вивантажуватимуться від вузлів IoT (на найближчий БПЛА-МЕС), який оснащений обчислювальними ресурсами. При цьому він має можливість зберігання, оброблення та аналізу даних [22, 32].

Другий сценарій являє собою віддалену обчислювальну систему, де БПЛА як ретранслятор використовується для передачі даних від вузлів IoT на центральний граничний сервер хмарних обчислень по бездротовому каналу, як це показано на рисунку 4.6.

Вузли IoT у загальному випадку генерують  $N$  незалежних завдань обчислень, які необхідно обробити. Для виконання цих завдань дані будуть вивантажені й оброблені або на БПЛА-МЕС, коли рішення про розвантаження двійкових обчислень  $\alpha_i$  дорівнює "1", або віддалено на центральний граничний хмарний сервер шляхом передачі завдань через БПЛА-ретранслятор, коли рішення про розвантаження бінарних обчислень  $\alpha_i$  дорівнює "0":

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{на UAV - МЕС} \\ 0 & \text{на граничному хмарному сервері} \end{cases}$$

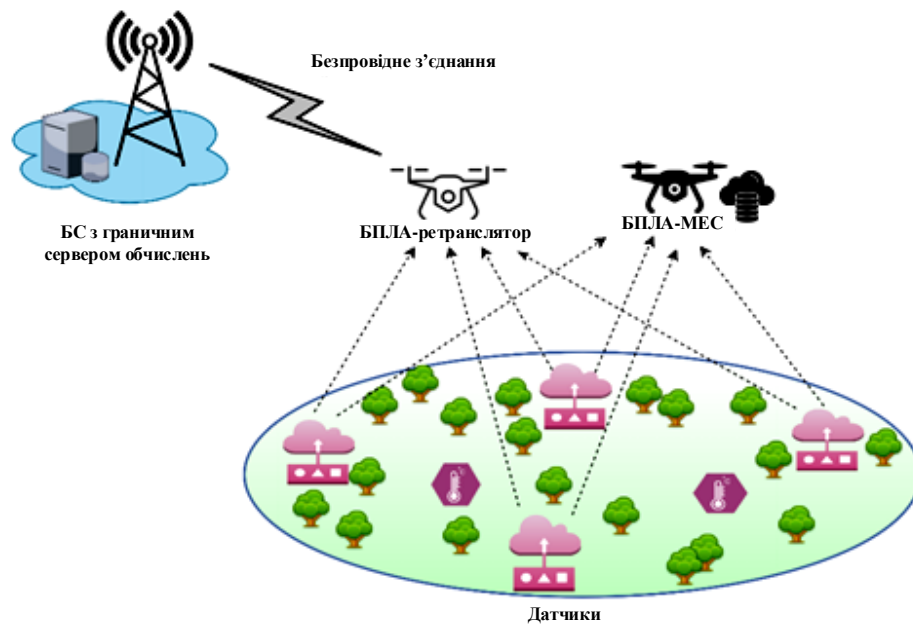


Рисунок 4.6 – Системна модель

Наступне рівняння дає змогу визначити максимальну швидкість висхідної лінії, коли дані для розв'язання задач передають бездротовим каналом [24]:

$$D_{IoT,UAV} = w * \log_2 \left( 1 + \frac{P_{IoT,UAV} G_{IoT,UAV}}{\sigma W} \right) \quad (4.5)$$

де  $w$  являє собою смугу пропускання каналу;  $G_{IoT,UAV}$  - загасання каналу між вузлом IoT і UAV, а також граничним сервером;  $P_{IoT,UAV}$  - потужність передачі для взаємодії між БПЛА та пристроєм Інтернету Речей, а  $\sigma$  є щільність потужності перешкод.

#### 4.5.3 Обчислювальна модель

У цьому підрозділі представлено модель вивантаження обчислень. По-перше, вузли IoT (наземні датчики) мають  $N$  незалежних обчислювальних завдань, які потребують виконання. Кортеж  $\{S_i, C_i, T_i^{\text{constraint}}\}$  представляє завдання, необхідне для кожного обчислювального завдання  $i$ , де  $S_i$  - розмір

даних, необхідних для передачі,  $C_i$  - загальна кількість циклів ЦП, а  $T_i^{\text{constraint}}$  - крайній термін, необхідний для вирішення завдання I.

А) Обчислення на БПЛА.

У разі обчислень на БПЛА, коли обчислювальне завдання і вивантажується і обробляється в UAV-МЕС, вузли IoT (наземні датчики) шукають БПЛА-МЕС, щоб перевірити наявність ресурсів для виконання завдання чи ні.

Затримка передачі обчислювального завдання і від вузла IoT (наземні датчики) до БПЛА-МЕС може бути виражена як:

$$T_{IoT-UAV}^{trans} = \frac{S_i}{D_{IoT}}, \quad (4.6)$$

а тривалість обробки обчислень для задачі і на UAV-МЕС може бути знайдена з такого виразу:

$$T_{UAV-MEC}^{process} = \frac{C_i}{F_{UAV}} \quad (4.7)$$

де  $F_{UAV}$  - обчислювальні можливості UAV-МЕС. Загальна тривалість обробки на UAV-МЕС тоді визначається як:

$$T_{UAV-MEC}^{total} = T_{IoT-UAV}^{trans} + T_{UAV-MEC}^{process} \quad (4.8)$$

$$T_{UAV-MEC}^{total} = \frac{S_i}{D_{IoT}} + \frac{C_i}{F_{UAV}} \quad (4.9)$$

В) Граничні хмарні обчислення на віддаленому сервері.

У разі граничних хмарних обчислень на віддаленому сервері, коли обчислювальне завдання і вузлів IoT (наземних датчиків) передаватиметься на

граничний хмарний сервер через БПЛА-ретранслятор і там буде оброблятися, затримку передачі від БПЛА-ретранслятора на граничний хмарний сервер обчислювальної задачі і вузла IoT (наземні датчики) можна виразити як:

$$T_{UAV-server}^{trans} = \frac{S_i}{D_{UAV}} \quad (4.10)$$

Затримка передачі обчислювального завдання і від вузла IoT (наземні датчики) до граничного хмарного сервера може бути виражена як:

$$T_{server}^{process} = \frac{C_i}{F_{server}} \quad (4.11)$$

де  $F_{server}$  - обчислювальні можливості граничного хмарного сервера.

Нарешті, загальна тривалість передачі інформації для граничного хмарного сервера та тривалості обробки становитиме хмарного сервера і тривалості обробки становитиме на основі підсумовування (4.6), (4.10) и (4.11):

$$T_{server}^{total} = T_{IoT-UAV}^{trans} + T_{UAV-server}^{trans} + T_{server}^{process} \quad (4.12)$$

$$T_{server}^{total} = \frac{S_i}{D_{IoT}} + \frac{S_i}{D_{UAV}} + \frac{C_i}{F_{server}} \quad (4.13)$$

Загальну тривалість з урахуванням використання літаючого сегмента можна визначити таким чином:

$$T_i^{total} = \alpha T_{UAV-MEC}^{total} + (1 - \alpha_i) T_{server}^{total} \quad (4.14)$$



#### 4.5.4 Постановка завдання

У цьому розділі розглядається досягнення ефективної затримки під час вивантаження обчислень на основі літаючої обчислювальної системи.

Проблема вивантаження обчислень формулюється у вигляді такої задачі оптимізації з обмеженнями:

$$\min \sum_{i=1}^N T_i^{total} \quad (4.15)$$

$$T_i^{total} \leq T_i^{constraint} \quad C1$$

$$\alpha_i \in \{0,1\} \quad C2$$

Метою цього дослідження є мінімізація зваженої суми затримок шляхом оптимального розподілу вивантаження завдань. Обмеження C1 являють собою верхні межі за витратами часу. Обмеження C2 є гарантією того, що ухвалені рішення про вивантаження є бінарними значеннями.

#### 4.5.5 Алгоритм вивантаження

Алгоритм вивантаження для літаючих обчислень заснований на "алгоритмі динамічного програмування, що використовує відстань Хемінга як критерій для завершення своєї роботи (DPH)" [25].

Алгоритм забезпечує інклюзивний процес пошуку рішень оптимального вивантаження для літального обчислювального комплексу. Спочатку вузли IoT (наземні датчики) розвантажують завдання і на найближчий БПЛА UAV-МЕС, коли  $\alpha_i=1$ , або на граничний хмарний сервер, коли  $\alpha_i=0$ . Динамічне програмування лежить в основі пропонованого алгоритму, заснованого на використанні таблиці  $N \times N$  (де  $N$  - число завдань, які необхідно обробити). Таблиця використовується для зберігання бітового потоку, щоб гарантувати, яке завдання буде оброблятися на найближчому UAV-МЕС, а які завдання будуть

виконуватися віддалено на граничному сервері Edge-Cloud. В таблиці випадкові бітові потоки, що генеруються, заповнюються одиницями (1) в горизонтальній комірці. Нулі (0s) заповнюються у вертикальній комірці. Перша комірка завжди порожня. Коли перший біт дорівнює 1, то початкова комірka має вигляд (1, 2). Коли перший біт дорівнює 0, то початкова комірka дорівнює (2, 1). Щоб проілюструвати процес заповнення таблиці згенерованим випадковим бітовим потоком, припустимо, що  $N = 8$ , перший випадковий бітовий потік  $\alpha_i$  дорівнює 00110100 (червоні біти), а другий випадковий бітовий потік дорівнює 10101101 (чорні біти). Тоді (2, 1) - це початкова комірka першого потоку, де перший біт дорівнює 0. З іншого боку, (1, 2) - це початкова комірka другого потоку, якщо перший біт дорівнює 1. Дотримуючись цього правила, результуючий потік показано в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Випадковий бітовий потік

	1				
0	0	1			
0	1	1/0	1	1	
		0	1	0	1
			0		
			0		

На основі даних таблиці розраховується затримка для кожного завдання.

При цьому кожна комірka має 0 с для випадку літаючих обчислень і кожна комірka має 1 с для випадку обчислень на граничному хмарному сервері.

Алгоритм вивантаження обчислень, запропонований у магістерській роботі, наведено нижче.

Алгоритм для вивантаження трафіку при використанні літаючих мереж.

1. Initialize Time matrixes and set the Completion deadline ( $T_i^{\text{constraint}}$ ) and Transmission Rate
2. generate a task (randomly)
3. Loop iteration
4. generate a random bit stream
5. calculate delay for tasks of IoT nodes (ground sensors) (at UAV-MEC, at edge-cloud server)
6. check the first bit to specify the starting cell in the first table
8. loop  $i$  to  $N-1$
9. if  $\text{bit}(i) == 1$  in the table (UAV-MEC)
  10. regenerate random bit (0 or 1)
  11. end if
  12. Put each bit of the bit stream in the correct position in table
  13. if this specific cell in tables is visited before compare the new Total delay of this cell with the previous one
    14. if the new Total delay of the cell is less than the previous one
      15. Replace the total delay of this cell with the new calculated amounts.
      16. Calculate the delay of the remaining bits of the new bit stream
      17. else
        18. Keep the previous total delay in the cell.
        19. Calculate the delay of the remaining cells of the new stream based on the existing amount of this cell
    20. end if
    21. end if
    22. end Loop
    23. if Number of bits in tables =  $N$  &  $T_{\text{total}} < T_i^{\text{constraint}}$  & hamming distance criterion is met
      24. return  $T_{\text{total}}$
      25. end if
      26. end Loop

#### 4.5.6 Результати моделювання

Моделювання було виконано з використанням пакета програм Matlab. Вихідні дані для моделювання наведено в таблиці 4.6.

Число завдань встановлено рівним  $N = 15$ , а число IoT вузлів (наземних датчиків) - 5. Частоти процесорів БПЛА-МЕС і сервера граничних обчислень становлять 500 МГц і 10 ГГц відповідно. Обсяг даних випадковим чином

збільшується з 10 до 30 мегабайт. Залежно від відстані швидкість передачі даних також змінювалася випадковим чином від 3 до 9 Мбіт/с, що означає, що на коротших відстанях досяжна більша швидкість передачі.

Таблиця 4.6 - Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість задач $N$	15
Об'єм даних $S_i$	10–30 МВ
CPU цикли $C_i$	1900 Cycle/s
Тривалість $T_i^{constraint}$	0,002 s
Швидкість передачі даних $D_{IoT}, D_{UAV}$	3–9 Mbps
Частота процесора UAV-МЕС ( $F_{UAV}$ )	500 MHz
Частота процесора сервера граничних розрахунків ( $F_{server}$ )	10 GHz

На рисунку 4.8. наведено характеристики затримки залежно від швидкості передачі даних. Як бачимо, затримка зменшується щоразу, коли швидкість передачі даних збільшується, коли вузли IoT (наземні датчики) вивантажують усі завдання на UAV-МЕС або на граничний хмарний сервер.

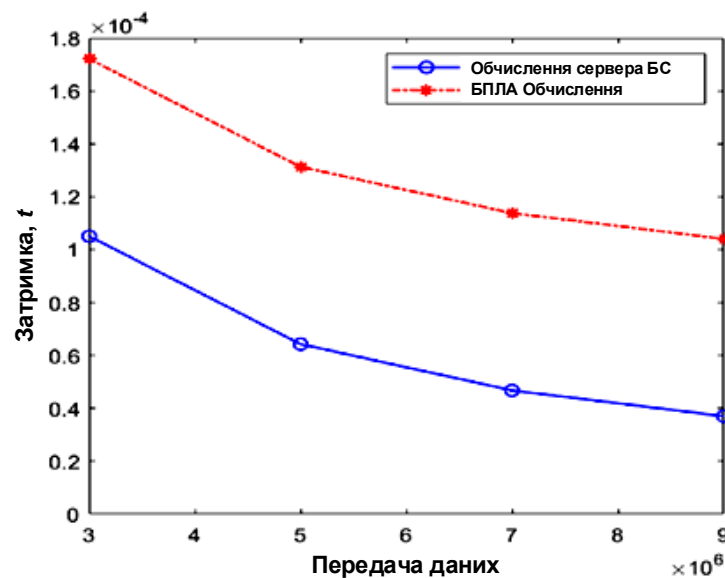


Рисунок 4.8 – Затримка залежно від швидкості передавання даних

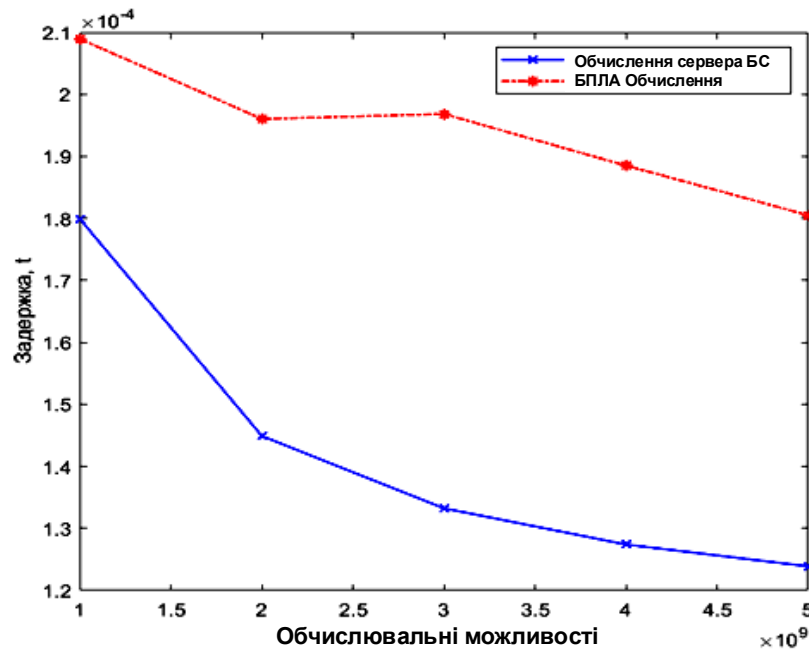


Рисунок 4.9 – Затримка залежно від обчислювальних можливостей

На рисунку 4.9 показано залежність затримки від обчислювальних можливостей у разі застосування літаючих обчислень і обчислень на граничних хмарних серверах. З рисунку видно, що загальна затримка зменшується при збільшенні обчислювальної потужності, коли вузли IoT (наземні датчики) вивантажують завдання на UAV-МЕС або на граничний хмарний сервер.

На рисунках 4.10 і 4.11 затримка збільшується лінійно зі збільшенням обсягу даних і кількості завдань, що генеруються вузлами IoT (наземними датчиками).

Як показано на рисунку, загальна затримка максимальна, коли завдання вивантажуються і виконуються в UAV-МЕС або віддалено на граничному хмарному сервері.

Затримка в разі літаючих обчислень набагато вища, ніж затримка в разі граничного хмарного сервера, оскільки обчислювальна потужність граничного хмарного сервера набагато вища, ніж обчислювальна потужність БПЛА-МЕС.

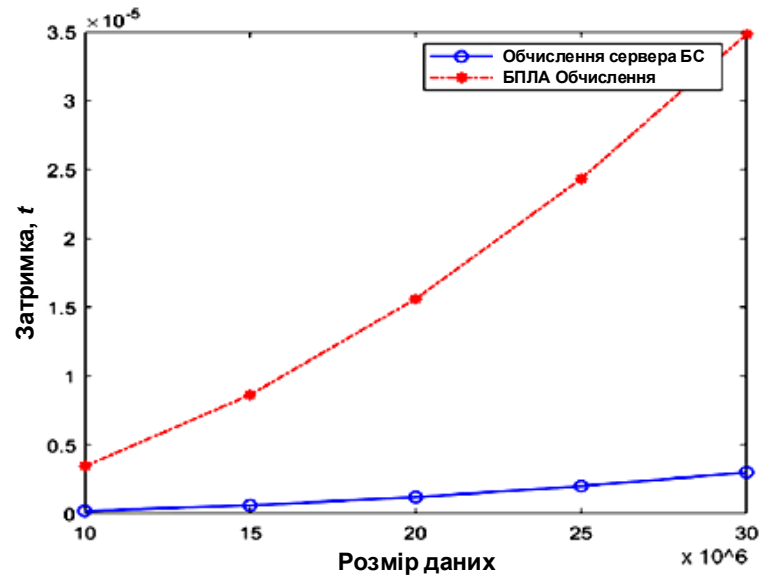


Рисунок 4.10 – Затримка в залежності від обсягу даних

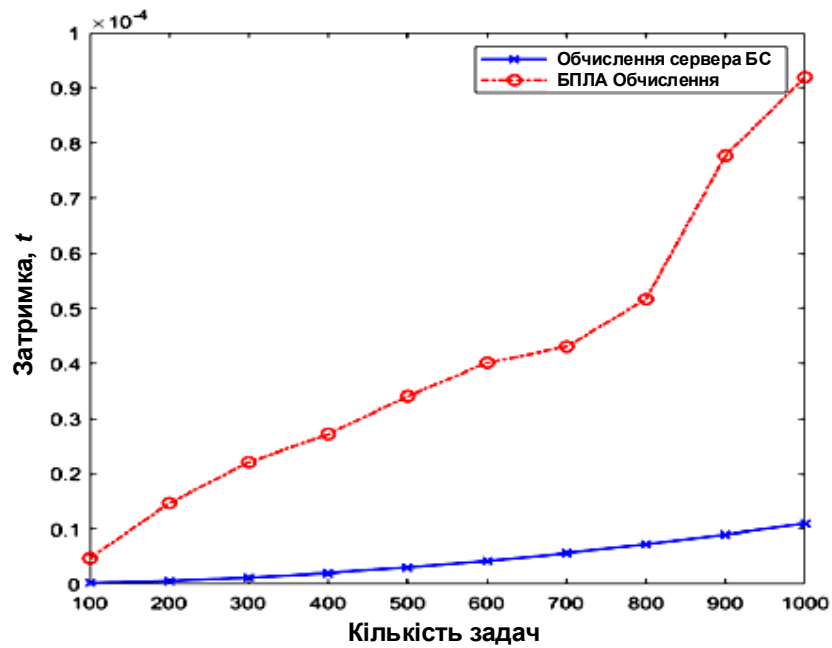


Рисунок 4.11 – Затримка в залежності від кількості завдань

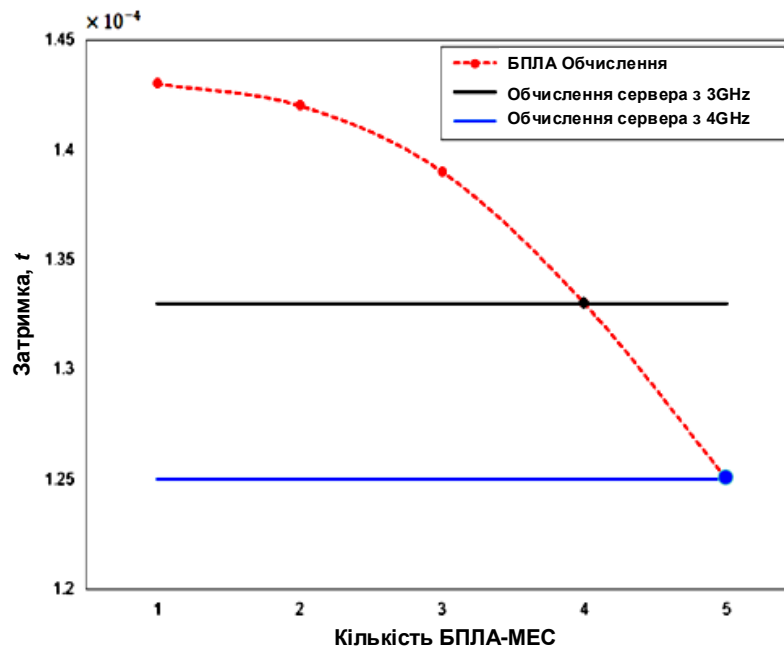


Рисунок 4.12 – Затримка в залежності від кількості БПЛА-МЕС

Відповідно, для зменшення затримки виконання обчислювального завдання необхідно збільшити або обчислювальну потужність БПЛА- МЕС, або збільшити кількість БПЛА- МЕС, як показано на рисунку 4.12.

#### 4.6 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було проведено дослідження кластеризації мереж БПЛА при зборі інформації з сенсорних полів і затримки при використанні в якості як контролерів SDN базових станцій та/або БПЛА як для одиночних БПЛА, так і для групи БПЛА. При цьому було отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз можливості та ефективності спільного використання технологій програмно-конфігурованих мереж, граничних обчислень і БПЛА як одиночних, так і груп БПЛА.

2. Розроблено метод побудови мережі з використанням БПЛА, у якому елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовано на БПЛА, що відрізняється від відомих тим, що рівень передавання даних реалізовано на групах БПЛА, які об'єднані в кластери та виконують функції комутаторів мережі

SDN, а рівень керування реалізовано на окремих прив'язних БПЛА, які виконують функції контролерів мережі SDN. При цьому кожен із контролерів взаємодіє з головним вузлом свого кластера БПЛА, передбачено також взаємодію контролерів між собою.

3. Для розв'язання задачі кластеризації БПЛА використано два методи: k-середніх і FOREL. За результатами досліджень для подальших робіт із кластеризації мереж БПЛА рекомендовано використовувати метод k-середніх з розробкою відповідного алгоритму.

4. Розроблено алгоритм кластеризації для групи БПЛА на основі методу k-середніх, що дає змогу знайти раціональні координати для розміщення контролерів, що відрізняються від вихідних на величину до 100 м у квадраті 1 км на 1 км.

5. Розроблено метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний та/або хмарний сервер наземної мережі.

6. Розроблено алгоритм вивантаження трафіку для запропонованого методу, заснований на алгоритмі динамічного програмування, що використовує відстань Хеммінга як критерій для завершення своєї роботи і визначено значення затримки для вибору розміру групи БПЛА, за якого затримка для вивантаження трафіку з наземної мережі на групу БПЛА буде меншою, ніж у разі використання БПЛА як ретранслятора для граничного/хмарного сервера.



## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПШБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	60	57
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		<b>57,3</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	68	66
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	<b>66,3</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [33]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де  $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{\text{нов}} = 57,3, k_{\text{теор}} = 66,3$  балів;

$0,6$  та  $0,4$  – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 57,3 + 0,4 \cdot 66,33 = 60,93 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{\text{нау}}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління», даний рівень становить 60,93 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

#### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [33]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=22$  дні.

$$Z_o = 15420,00 \cdot 44 / 22 = 30840,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	15420,00	700,91	44	30840,00
Ст. науковий співробітник	15000,00	681,82	40	27272,73
Інженер-розробник телекомунікаційних систем	14900,00	677,27	36	24381,82
Інженер-схемотехнік вищ. кат.	14900,00	677,27	26	17609,09
Консультант (аналітик цифрових мереж)	15000,00	681,82	8	5454,55
Технік	7200,00	327,27	22	7200,00
Всього				112758,18

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [33];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 22$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 56,53 \cdot 4,80 = 271,35 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Встановлення допоміжного обладнання	4,80	2	1,10	56,53	271,35
Інсталяція програмного забезпечення	5,20	4	1,50	77,09	400,86
Налагодження моделі цифрових мереж	3,50	5	1,70	87,37	305,78
Відлагодження інтерполяційних модулів	2,50	5	1,70	87,37	218,42
Монтаж системи	6,00	3	1,35	69,38	416,28
Тренування системи	5,50	3	1,35	69,38	381,59
Регулювання компонентів системи	3,20	4	1,50	77,09	246,68
Випробування системи	4,00	4	1,50	77,09	308,35
Регулювання остаточне системи	2,00	5	1,70	87,37	174,73
Всього					2724,04

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{дод}} = (112758,18 + 2724,04) \cdot 11 / 100\% = 12703,04 \text{ грн.}$$

### 5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де  $H_{zn}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (112758,18 + 2724,04 + 12703,04) \cdot 22 / 100\% = 28200,76 \text{ грн.}$$

### 5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення



експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,0 \cdot 193,90 \cdot 1,07 - 0 \cdot 0 = 414,95 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний (A4) 500-80	193,90	2,0	-	-	414,95
Папір для заміток (A5) 500-70	132,00	2,0	-	-	282,48
Папір креслярський (A1)	25,00	10,0	-	-	267,50
Папір креслярський (A3)	12,00	15,0	-	-	192,60
Начиння канцелярське	165,00	4,0	-	-	706,20

## Продовження таблиці 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Органайзер офісний	174,00	4,0	-	-	744,72
Картридж для плотера (HP-2106)	420,00	2,0	-	-	898,80
Картридж для принтера (HP-2002)	1120,00	1,0	-	-	1198,40
Диск оптичний (CD-R)	23,00	3,0	-	-	73,83
Диск оптичний (CD-RW)	28,00	3,0	-	-	89,88
USB-пам'ять (16 ГБ)	99,00	2,0	-	-	211,86
Всього					5081,22

## 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_6 = 2 \cdot 1840,00 \cdot 1,07 = 3937,60 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Спеціалізовані радіоінтерфейси	2	1840,00	3937,60
Програмно-конфігуруєма мережа	1	5680,00	6077,60
Контроллер Controller HD5g	1	3250,00	3477,50
Програмований комутатор Programmable switch DC90	1	4685,00	5012,95
Маршрутизатор RB16gHD	1	3680,00	3937,60
Імітатор магістральної мережі	1	4900,00	5243,00
Всього			27686,25

### 5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 8200,00 \cdot 1 \cdot 1,07 = 8774,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Термінал (імітатор навантаження)	1	8200,00	8774,00
Термінал (імітатор приймача)	1	6500,00	6955,00
Генератор завад	1	4850,00	5189,50
Всього			20918,50

### 5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де  $C_{\text{инрг}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8640,00 \cdot 1 \cdot 1,07 = 9244,80 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Програмний продукт обробки даних	1	8640,00	9244,80
Програмний продукт моделювання мереж MathLab 14	1	7200,00	7704,00
Всього			16948,80

### 5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де  $Ц_б$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (25899,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 1079,13 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Програмно-аналітичний комплекс	25899,00	4	2	1079,13
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	37899,00	4	2	1579,13
Офісна оргтехніка	7280,00	4	2	303,33
Місце оператора спеціалізоване	6870,00	5	2	229,00
Програмне забезпечення Microsoft Co	9650,00	3	2	536,11
Лабораторія досліджень	4006000,00	25	2	26706,67
Всього				30433,36

### 5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{vni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  грн;

$K_{vni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{vni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,25 \cdot 320,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 600,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Програмно-аналітичний комплекс	0,25	320,0	600,00
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	0,30	300,0	675,00
Офісна оргтехніка	0,50	5,0	18,75
Місце оператора спеціалізоване	0,06	320,0	144,00
Контроллер Controller HD5g	0,01	150,0	11,25
Програмований комутатор Programmable switch DC90	0,01	150,0	11,25
Маршрутизатор RB16gHD	0,02	150,0	22,50
Імітатор магістральної мережі FITCH	0,05	150,0	56,25
Термінал (імітатор навантаження)	0,10	150,0	112,50
Термінал (імітатор приймача)	0,08	150,0	90,00
Всього			1741,50

### 5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cb} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де  $H_{cb}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cb} = 20\%$ .

$$B_{cb} = (112758,18 + 2724,04) \cdot 20 / 100\% = 23096,44 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (112758,18 + 2724,04) \cdot 30 / 100\% = 34644,67 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:



$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ib} = 50\%$ .

$$I_{\epsilon} = (112758,18 + 2724,04) \cdot 50 / 100\% = 57741,11 \text{ грн.}$$

### 5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (112758,18 + 2724,04) \cdot 100 / 100\% = 115482,22 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_6 + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_6 + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 112758,18 + 2724,04 + 12703,04 + 28200,76 + 5081,22 + 27686,25 + 20918,50 + 16948,80 + 30433,36 + 1741,50 + 23096,44 + 34644,67 + 57741,11 + 115482,22 = 490160,08 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,95$ .

$$ZB = 490160,08 / 0,95 = 515957,98 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 3$ ;

$T_C$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_C = 3$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 515957,98$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I, n, T_C, R, B, t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [33].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 4 / 516,0 \cdot 0,17 = 8,93.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» складають 515957,98 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Дослідження програмно-конфігурованих літаючих мережі п'ятого покоління відбувалося в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника, згідно [34], могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

### 6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до [35].

Згідно із [36] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа - не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Під час безпосередньої роботи з монітором, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

1. Верхній край екрану монітора повинен знаходитися на одному рівні з очима користувача.

2. Під час роботи потрібно звертати особливу увагу на положення шиї, хребта, ліктів, кистей, стегон і ступень.

3. Клавіатура повинна знаходитися під тим же кутом, що і передпліччя.
4. Слід систематично робити перерви. Фахівці рекомендують кожну годину робити перерву на п'ять-десять хвилин.
5. Кожні десять-п'ятнадцять хвилин роботи за комп'ютером необхідно дати відпочинок очам, закриваючи їх на якусь мить.
6. Слід встановити монітор так, щоб від нього не відбивалося світло.
7. Читання паперових документів вимагає сильнішого освітлення, ніж читання з екрану монітора. Якщо працівник одночасно працює за комп'ютером і з паперовими документами, слід скористатися настільною лампою.
8. Екран монітора й інші поверхні комп'ютера необхідно регулярно протирати.

Приміщення із робочими місцями користувачів комп'ютерів для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби захисту відповідно до [37].

Категорія приміщення з електробезпеки – без підвищеної небезпеки, згідно [38].

ПК, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПУЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- увімкнути систему кондиціонування в приміщенні;

- перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран - під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має бути трохи нахиленим, нижній його край ближче до оператора;

- перевірити загальний стан апаратури, перевірити справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана;

- відрегулювати освітленість робочого місця;

- відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, зручний для користувача нахил його спинки;

- приєднати до системного блоку необхідну апаратуру. Усі кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід вставляти та виймати при вимкненому комп'ютері;

- ввімкнути апаратуру комп'ютера вимикачами на корпусах в послідовності: монітор, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування);

- відрегулювати яскравість свічення монітора, мінімальний розмір світної точки, фокусування, контрастність. Не слід робити зображення надто яскравим, щоб не втомлювати очей.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

- необхідно стійко розташовувати клавіатуру на робочому столі, не опускати її хитання. Під час роботи на клавіатурі сидіти прямо, не напружуватися;

- для уникнення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу «миша» належить забезпечувати вільну велику поверхню столу для переміщення миші і зручного упору ліктьового суглоба;

- не дозволяються сторонні розмови, подразнюючі шуми;

- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою порох з поверхонь апаратури.

## 6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 6.2.1 Мікроклімат

Недостатня вологість призводить до інтенсивного випаровування вологи зі слизових оболонок, їх пересихання та розтріскування, забруднення хвороботворними мікробами.

Робота, яка виконується дослідником, за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [39]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 6.1 (відповідно до [40]).

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

### 6.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється розробка програмно-конфігурованих літаючих мережі п'ятого покоління можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.



Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup>	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

### 6.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці.

Рівень освітлення на робочих місцях впливає на гостроту зору, тривалість ясного бачення, контрастну чутливість і здатність бачити на далекій і близькій відстані. Нормальна гострота зору, тобто здатність розрізняти дрібні предмети, у працівників, що не страждають на дефекти зору, досягається лише при

освітленні 50-70 лк. Для максимальної здатності ока розрізняти такі предмети необхідна освітленість 600-1000 лк.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.2.4 (відповідно [41]):

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір розрізнявання об'єкта	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	I		великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

#### 6.2.4 Виробничий шум

Шумом прийнято вважати звуки, які негативно впливають на організм людини і заважають його роботі та відпочинку. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили

той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в [42]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

### 6.2.5 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи із використанням ПК на працівника діє підвищений рівень електромагнітного поля. Випромінювання ПК можуть бути небезпечними для здоров'я. Низькочастотні поля при тривалому опроміненні сидять біля ПК людей можуть привести до порушень фізіологічних процесів.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії загрозливих факторів НС

#### 6.3.1 Дія радіації на живі організми

Кінцевим результатом початкової дії іонізуючих випромінювань є порушення структури тканини і клітин. Після припинення процесу опромінення живого організму біохімічні зміни не припиняються тому, що утворені іони і радикали продовжують свою активну дію ще деякий період часу. Виникає період вторинної дії променів.

Особливості біологічної дії іонізуючих випромінювань такі:

- біологічний ефект залежить від поглинутої дози випромінювання. Ця залежність прямо пропорційна – із зростанням дози посилюється ефект;
- ефект опромінення пов'язаний із розподілом дози за часом, тобто із місткістю поглинання енергії. Ступінь променевого ураження залежить від розділу сумарної дози на окремі фракції. Якщо число фракцій зростає;

- ураження живого організму зменшується тому, що в ньому між окремими порціями ураження розпочинається відновлення деяких функцій [43].

### 6.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії радіації

Вихідні дані: сховище: окремо розташоване в районі забудови, перекриття - залізобетонне товщиною  $h_1 = 40$  см, ґрунтова подушка товщиною  $h_2 = 40$  см. Час початку роботи  $t_{ni} = 1$  год. Максимальна тривалість роботи  $t_{pmax} = 12$  год. Максимальний рівень радіації через 1 год після аварії  $P_{1max} = 350$  Р/год. Коефіцієнт послаблення радіації виробничими приміщеннями  $K_{носл.Б} = 7$ . Допустима доза опромінення технічного персоналу  $D_0 = 2,5$  Р.

В якості критерію стійкості об'єкта господарської діяльності (ОГД) приймається допустима експозиційна доза опромінення людей або граничний рівень радіації.

Коефіцієнт послаблення для сховища визначається за формулою

$$K_{носл.сх} = K_p \prod_{i=1}^n 2^{h_i/d_i}, \quad (6.1)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт розташування сховища (для окремо розташованого сховища  $K_p = 1$ );

$n$  – кількість захисних шарів перекриття;

$d_i$  – товщина половинного ослаблення  $i$ -го захисного шару;

$h_i$  – товщина  $i$ -го захисного шару.

Товщина шару половинного ослаблення для радіоактивного зараження: бетон –  $d_1 = 5,7$  см, ґрунт –  $d_2 = 8,1$  см.

Коефіцієнт послаблення для сховища складатиме

$$K_{носл.сх} = 1 \cdot 2^{40/5,7} \cdot 2^{40/8,1} = 3972,46.$$

Знаходимо можливі дози опромінення, які може отримати персонал на робочих місцях та сховищах за формулою

$$D_M = \frac{1,33 P_{1\max} \left( \sqrt[4]{t_k^3} - \sqrt[4]{t_n^3} \right)}{K_{\text{посл}}} [\text{P}], \quad (6.2)$$

де  $t_n$  – час початку роботи, год;

$t_k$  – час кінця роботи, год;

$P_{1\max}$  – максимальний рівень радіації через 1 год після аварії, Р/год.

Час кінця роботи визначається за формулою

$$t_k = t_p + t_n [\text{год}]; \quad (6.3)$$

$$t_k = 12 + 1 = 13 (\text{ год}).$$

Для сховища можлива доза опромінення складатиме

$$D_{\text{м.сх}} = \frac{1,33 \cdot 350 \left( \sqrt[4]{13^3} - \sqrt[4]{1^3} \right)}{3972,46} = 0,6851 (\text{ Р}).$$

Для виробничого приміщення можлива доза опромінення складатиме

$$D_{\text{м.вн}} = \frac{1,33 \cdot 350 \left( \sqrt[4]{13^3} - \sqrt[4]{1^3} \right)}{7} = 388,78 (\text{ Р}).$$

Визначаємо граничне значення рівня радіації, до якого можлива робота виробничого персоналу у звичайному режимі

$$P_{ep} = \frac{D_{\partial} K_{\text{носл.Б}}}{1,33(\sqrt[4]{t_k^3} - \sqrt[4]{t_n^3})} [\text{P/год}]; \quad (6.4)$$

$$P_{ep} = \frac{2,5 \cdot 7}{1,33(\sqrt[4]{13^3} - \sqrt[4]{1^3})} = 2,251 (\text{P/год}).$$

ОГД нестійкий в умовах радіоактивного забруднення, оскільки  $D_M = 388,78 \text{ P} > D_d = 2,5 \text{ P}$ , тому безперервна робота ОГД у звичайному режимі неможлива.

6.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії надзвичайних ситуацій

Для зменшення проникнення у виробниче приміщення радіоактивного пилу проводимо його герметизацію.

Засоби підвищення стійкості ОГД:

- а) в будівельній конструкції потрібно застосувати вапняк;
- б) екранування робочих місць;
- в) застосувати свинцеві плити;
- г) розмістити людей в сховищах;
- д) закласти мішками з піском до третини площі віконних отворів першого поверху будівлі;
- е) розробити режими радіаційного захисту працюючих для роботи ОГД скороченими змінами.

#### 6.4 Висновки до розділу 6

Досліджено стійкість роботи виробничого приміщення в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій. З дослідження дії радіації на стійкість роботи виробничого приміщення можна сказати, що безперервна робота ОГД у звичайному режимі неможлива. Розроблено превентивні заходи з підвищення стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії надзвичайних ситуацій.



## ВИСНОВКИ

За результатами досліджень у магістерській роботі було отримано такі основні результати:

1. Мережі зв'язку при використанні БПЛА можуть бути розгорнуті набагато швидше, що робить їх особливо придатними для надзвичайних ситуацій та інших подібних явищ, а також в умовах важкодоступної місцевості та малонаселених районів.

2. За допомогою БПЛА, що летять низько, у більшості сценаріїв можуть бути встановлені лінії зв'язку прямої видимості (LoS), що потенційно призводить до значного поліпшення якості обслуговування.

3. Гнучкість у розгортанні мережі при використанні БПЛА відкриває нові можливості для підвищення продуктивності мережі та використання її ресурсів за рахунок можливості динамічної зміни положення БПЛА і його телекомунікаційних можливостей для найкращої відповідності існуючим у конкретний момент часу характеристикам простору оточення мережі зв'язку.

4. Проаналізовано рішення з SDN з одним контролером у ядрі мережі та мультиконтролерні SDN. Нам основі цього аналізу було розглянуто рішення щодо використання SDN у БПЛА.

5. Використання SDN спільно з БПЛА дає великі переваги при розгортанні мережі БПЛА, які можуть як підвищити ефективність мережевої структури БПЛА в цілому, так і знизити енергоспоживання БПЛА, а також прискорити розгортання мережі та зменшити її вартість.

6. На відміну від відомих моделей трафіку було запропоновано модель, у якій до трафіку Інтернету Речей і трафіку Тактильного Інтернету додається трафік доповненої реальності. При цьому було встановлено, що ймовірність втрат пакетів для трафіку AR більша, ніж для трафіку IoT і менша, ніж для трафіку TI, а вхідний агрегований потік трафіку IoT, TI і AR є самоподібним із параметром Херста  $H=0,7$ .

7. Запропонована модель дає можливість оцінити не тільки якість обслуговування об'єднаного потоку трафіку послуг інтернету речей, тактильного інтернету та доповненої реальності, але також затримку доставки та ймовірність втрати пакета. Застосування моделі дало змогу вивчити залежність якості обслуговування від властивостей об'єднаних потоків трафіку і залежність властивостей обслуженого потоку від інтенсивності навантаження. Збільшення інтенсивності навантаження призводить до домінування впливу властивостей системи обслуговування, а її зниження - до домінування властивостей вхідного потоку.

8. Результати моделювання показали, що параметри якості обслуговування трафіків інтернету речей та інших сучасних додатків помітно різняться при обслуговуванні сукупного потоку. Під час вивчення обслуговування агрегованого трафіку (H2H+TI та AR) встановлено, що для нього ймовірність втрати пакета більша, ніж для трафіку інтернету речей. Крім того, ця різниця стає більш істотною при збільшенні інтенсивності навантаження, що надходить.

9. Гетерогенний характер трафіку в мережах зв'язку п'ятого і наступних поколінь для забезпечення характеристик якості обслуговування та якості сприйняття вимагає використання всіх доступних ресурсів для обслуговування трафіку таких мереж, зокрема й ресурсів безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

10. Проведено аналіз можливості та ефективності спільного використання технологій програмно-конфігурованих мереж, граничних обчислень і БПЛА як одиночних, так і груп БПЛА.

11. Досліджено метод побудови мережі з використанням БПЛА, у якому елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовані на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що рівень передачі даних реалізовано на групах БПЛА, об'єднаних у кластери, які виконують функції комутаторів мережі SDN, а рівень управління реалізовано на окремих прив'язних БПЛА, що виконують функції контролерів мережі SDN. При цьому кожен із контролерів взаємодіє з головним вузлом свого кластера БПЛА, передбачено також взаємодію контролерів між собою.

12. Для розв'язання задачі кластеризації БПЛА використано два методи: k-середніх і FOREL. За результатами досліджень для подальших робіт із кластеризації мереж БПЛА рекомендовано використовувати метод k-середніх з розробкою відповідного алгоритму.

13. Алгоритм кластеризації для групи БПЛА на основі методу k-середніх дає змогу знайти раціональні координати для розміщення контролерів, що відрізняються від вихідних на величину до 100 м у квадраті 1 км на 1 км.

14. Досліджений метод вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний та/або хмарний сервер наземної мережі.

15. Алгоритм вивантаження трафіку для запропонованого методу, заснований на алгоритмі динамічного програмування, що використовує відстань Хемінга як критерій для завершення своєї роботи та визначено значення затримки для вибору розміру групи БПЛА, за якого затримка для вивантаження трафіку з наземної мережі на групу БПЛА буде меншою, ніж у разі використання БПЛА як ретранслятора для граничного/хмарного сервера.

В економічній частині роботи були розраховані витрати на проведення досліджень та проведена оцінка важливості та наукової значимості роботи

В розділі "Охорона праці" проаналізовані умови праці в лабораторії для досліджень, виконано організаційно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G<sup>+</sup> Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp.90-108.
2. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Ксьондз, Н. (2023). Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (52), 128-139. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16>
3. I. Mahmud and Y.-Z. Cho, "Adaptive Hello Interval in FANET Routing Protocols for Green UAVs," IEEE Access, vol. 7, pp. 63 004–63 015, 2019.
4. X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu, and H. Yanikomeroğlu, "Airborne communication networks: A survey," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 9, pp. 1907–1926, 2018.
5. Z.Li, M.Uusitalo, H.Shariatmadari, B.Singh. 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts. 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), October 8-9. Tokio, Japan, 2018, 6p.
6. P.Popovski and all. Wireless Access for Ultra-Reliable Low Latency Communications. IEEE Network, v.32, issue 2. March-April 2018, pp. 16-23.
7. Oubbati, Omar Sami, et al. "Softwarization of UAV networks: A survey of applications and future trends." IEEE Access 8 (2020): 98073-98125.
8. X. Wang, L. Li, and W. Zhou, "The effect of haps unstable movement on handover performance," in Proceedings of the 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). IEEE, 2019, pp. 1–5.
9. P. Di Vito, D. Fischer, M. Spada, R. Rinaldo, and L. Duquerroy, "HAPs Operations and Service provision in Critical Scenarios," in Proceedings of the SpaceOps Conference, 2018, p. 2504.

10. J. Qiu, D. Grace, G. Ding, M. D. Zakaria, and Q. Wu, "Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms," *IEEE Wireless Communications*, 2019.
11. J. Zhang, S. Zhu, and C. Li, "Research on Topology Partition Algorithm of Polar Orbit Satellite Network," in *Proceedings of the 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. IEEE, 2018, pp. 296–299
12. Alsamhi, Saeed H., et al. "Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities." *Ieee Access* 7 (2019): 128125-128152.
13. S. H. Alsamhi et al, "Greening Internet of Things for smart everythings with a green-environment life: A survey and future prospects," *Telecommun. Syst.*, 2019. doi: 10.1007/s11235-019-00597-1
14. S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, and S. K. Gupta, "Collaboration of drone and Internet of public safety things in smart cities: An overview of QoS and network performance optimization," *Drones*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2019.
15. Qiu, Junfei. *Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking*. Diss. University of York, 2021.
16. P. G. Sudheesh, M. Mozaffari, M. Magarini, W. Saad, and P. Muthuchidambaranathan, "Sum Rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1240–1243, June 2018
17. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 246–260, 2021.
18. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 849–852, 2020.
19. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication

multiplexing in a multi-UAV relay network,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 3, pp. 1802–1817, 2020.

20. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, “UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 2088–2092, 2020.

21. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, “Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 7404–7415, 2020.

22. M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, “FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 218–224, Jan. 2018.

23. M. E. Mkiramweni, C. Yang, J. Li, and W. Zhang, “A survey of game theory in unmanned aerial vehicles communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3386–3416, 2019.

24. M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, S. Andreev, N. Himayat, and Y. Koucheryavy, “Flexible and reliable UAV-assisted backhaul operation in 5G mmWave cellular networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 11, pp. 2486–2496, 2018

25. C. Wang, Y. He, F. R. Yu, Q. Chen, and L. Tang, “Integration of networking, caching and computing in wireless systems: A survey, some research issues and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 7–28, Firstquarter 2018.

26. N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi, and T. Skeie, “Mobile edge computing: A survey,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 5, no. 1, pp. 450–465, Feb. 2018.

27. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, “Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 155–161, 2020.

28. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, “LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 406–410, 2021.

29. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, “A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 7, pp. 4348–4358, 2021.

30. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.

31. Oteafy, S. M. A. Leveraging tactile Internet cognizance and operation via IoT and edge technologies. / Oteafy S.M.A., Hassanein H. S. // *Proceedings of the IEEE* 107.2. №7. 2018. – P. 364-375.

32. Yahiya, T. I., Issues and Challenges Facing Low Latency in Tactile Internet / Yahiya, Tara I., Pinar Kirci // *UKH Journal of Science and Engineering* 3.1. - № 3.- 2019. – P. 47-58.

33. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

34. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об’єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

35. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: [http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id\\_doc=71028](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)

36. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: [http://sop.zp.ua/norm\\_npraor\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_npraor_0_00-7_15-18_01_ua.php)

37. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

38. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

39. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

40. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

41. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

42. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

43. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.



## ДОДАТКИ

Додаток А  
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА  
ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ ЛІТАЮЧІ МЕРЕЖІ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ  
назва магістерської кваліфікаційної роботи

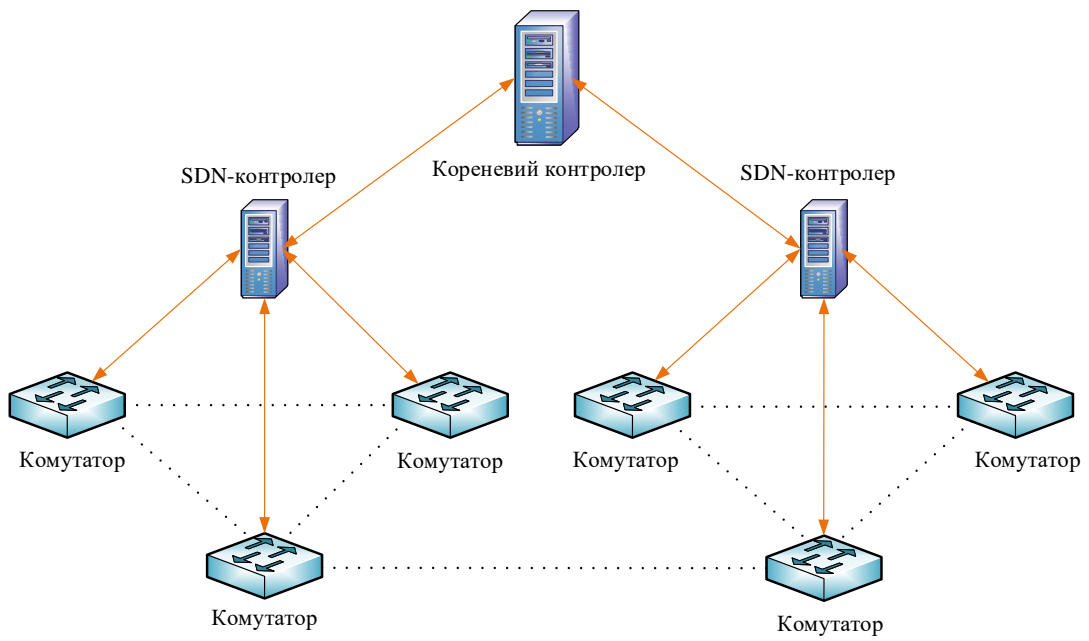


Рисунок 1 - Ієрархічна мультиконтролерна мережа SDN

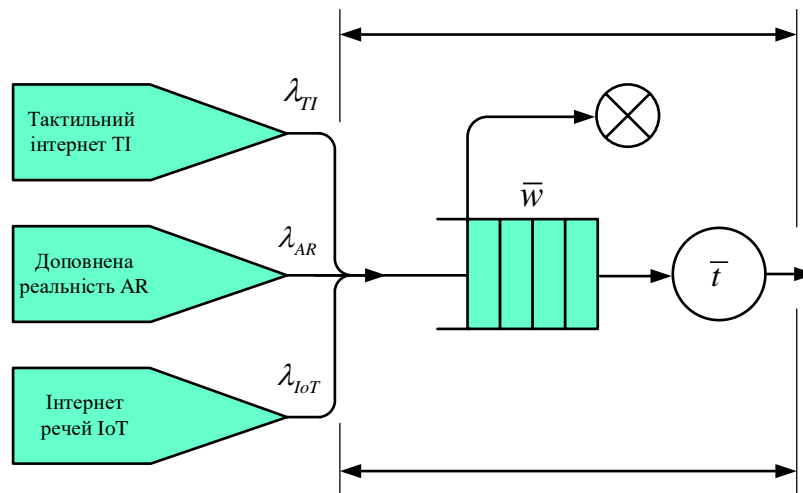


Рисунок 2 - Системна модель

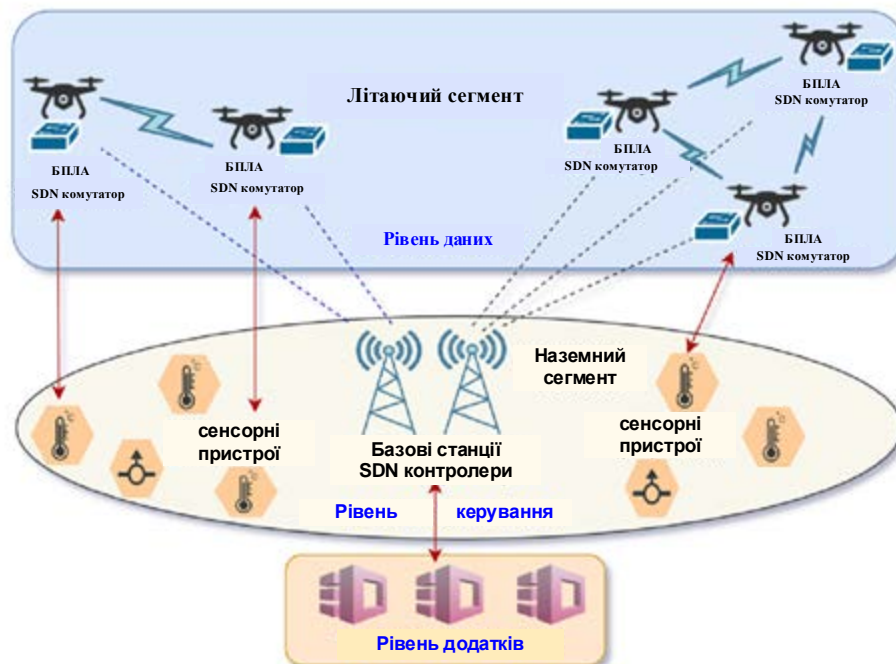


Рисунок 3 - Мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у наземному сегменті

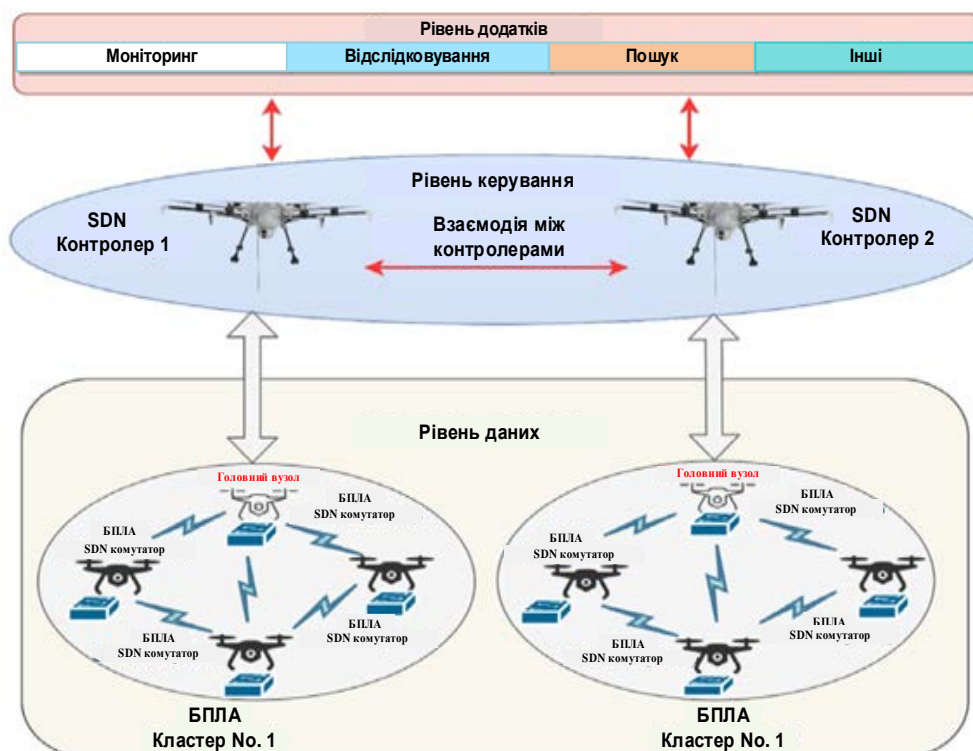


Рисунок 4 - Мережева архітектура БПЛА з контролерами SDN у літаючому сегменті

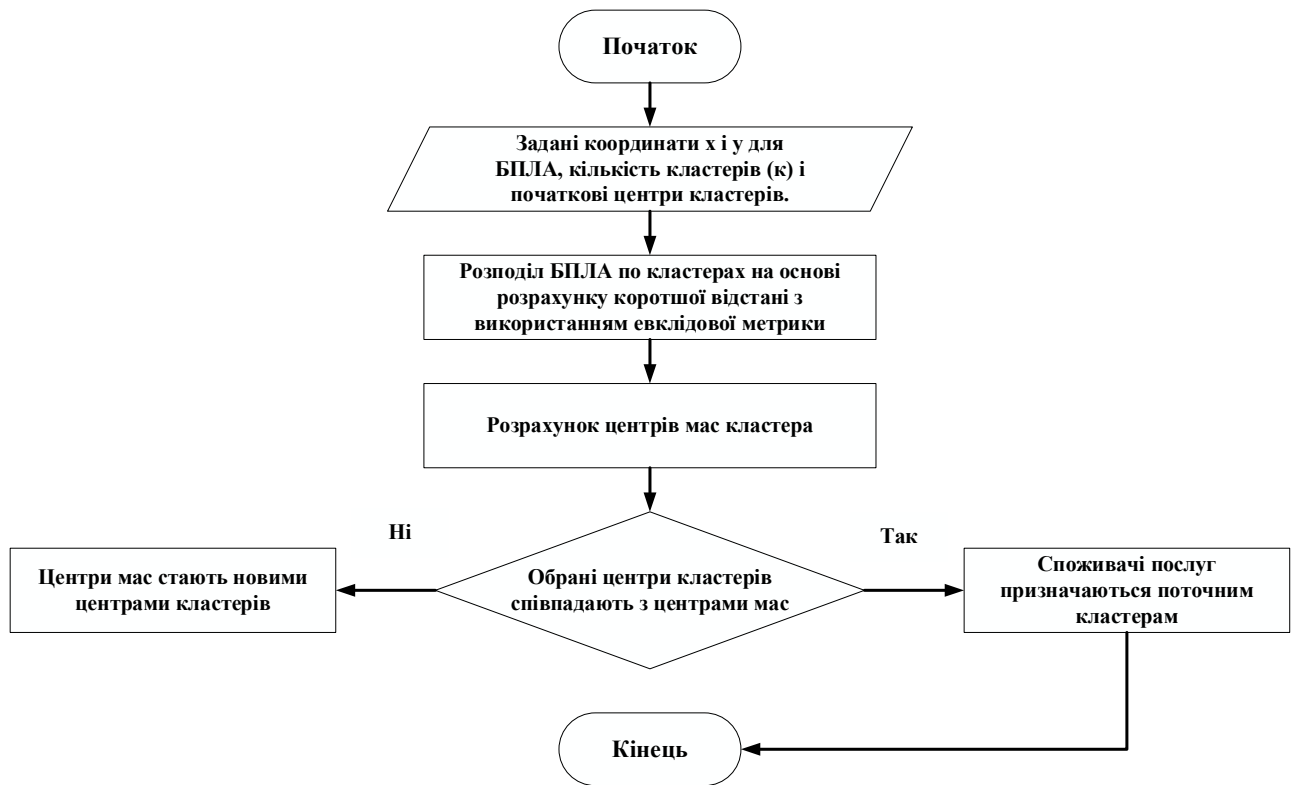


Рисунок 5 - Алгоритм k-середніх для БПЛА

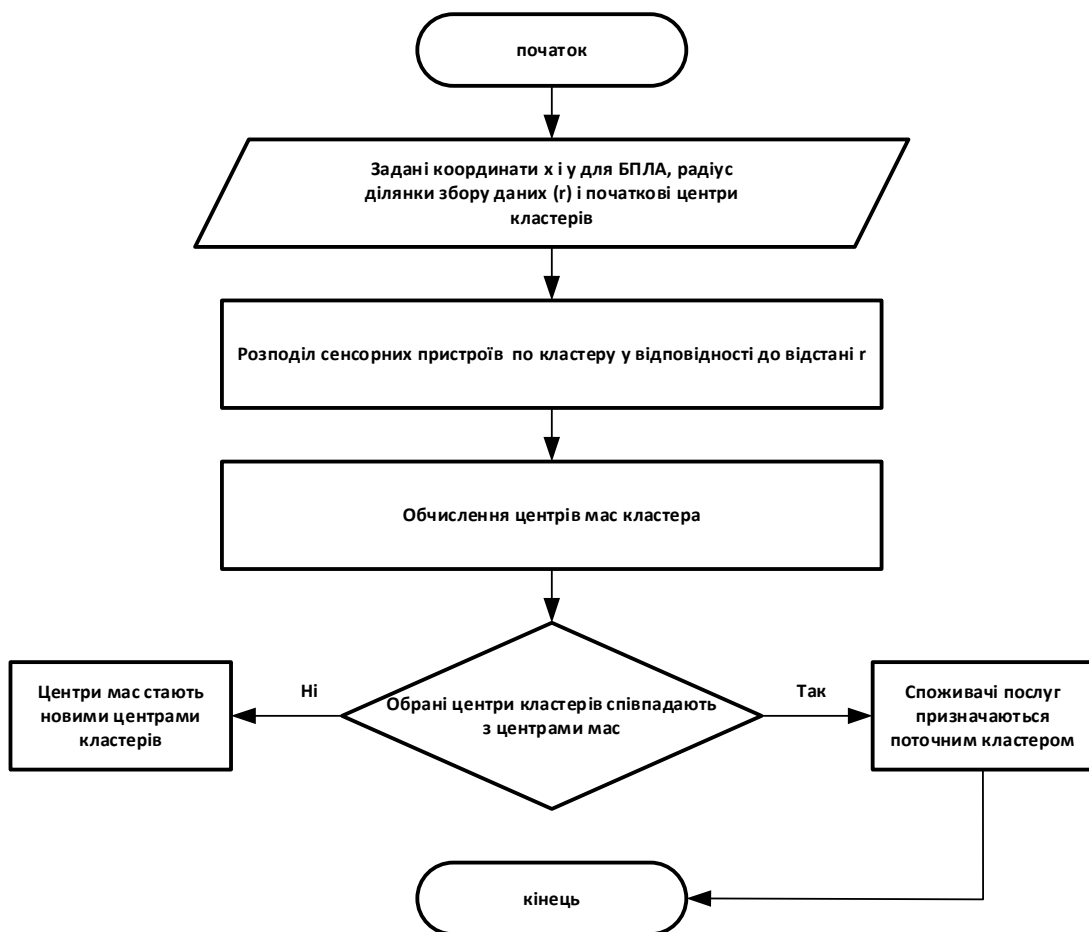


Рисунок 6 - Алгоритм FOREL для БПЛА

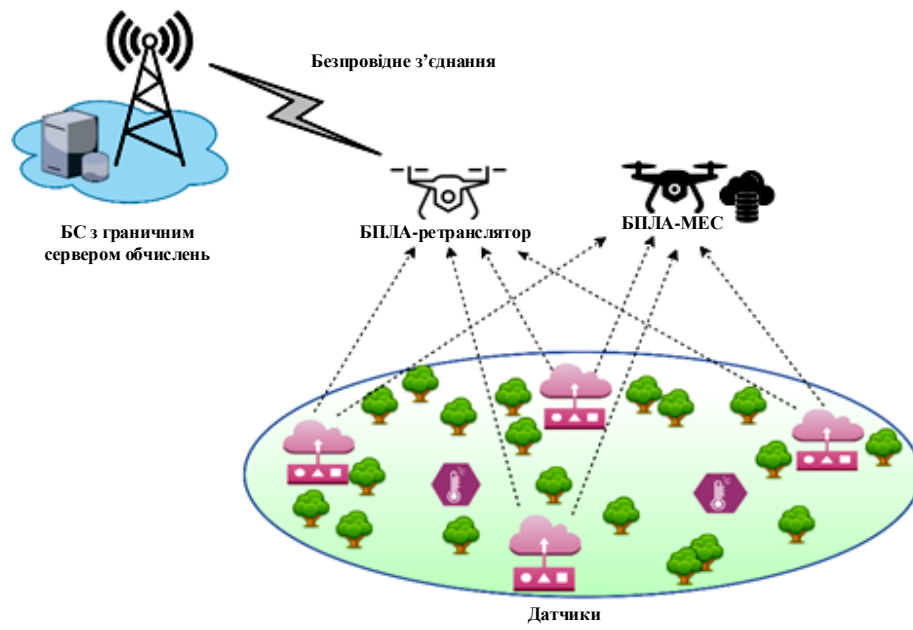


Рисунок 7 – Системна модель

Додаток Б  
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Програмно-конфігуровані літаючі мережі п'ятого покоління

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет  
інформаційних електронних систем  
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 95,35 % Схожість 4,65 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Васильківський М.В.  
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

Кеу  
(підпис)

Ксьондз Н.О.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Васильківський М.В.  
(прізвище, ініціали)