

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

Баюра Баюра С.В.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ

Стальченко О.В.
« 12 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС

Осадчук О.В.
« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М. д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
«5» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Баюрі Євгену Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Методи побудови телекомунікаційних мереж інтернету медичних речей

керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доцент,

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

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

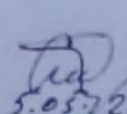
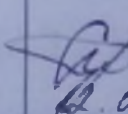
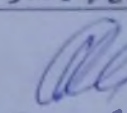
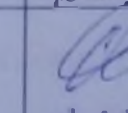
3. Вихідні дані до роботи: кількість контролерів у вихідній SDN-мережі - 13; кількість контролерів після оптимізації – 7; зменшення кількості контролерів - 46%; споживана потужність одного контролера - 15 Вт; економія енергії після оптимізації ≈ 90 Вт; середня затримка маршруту до контролера (до оптимізації) - 22 мс; середня затримка маршруту до контролера (після оптимізації) - 14 мс; зниження затримки $\approx 36\%$; площа покриття одного маршрутизатора БПЛА - 500 м²; зона обслуговування одного БПЛА до 1200 м²; кількість маршрутизаторів у рої БПЛА – 25; кількість активних з'єднань (mesh-лінків) – 80; середня швидкість передачі даних у mesh-мережі - 300 Мбіт/с; максимальна швидкість - 600 Мбіт/с; мінімальна гарантована - 100 Мбіт/с; середній час маршрутизації запиту (QoS-aware) при типовій задачі ≤ 25 мс; середній час маршрутизації запиту (QoS-aware) при критичній задачі (наприклад, для XR) ≤ 10 мс; загальна пропускна здатність мережі до оптимізації - 4 Гбіт/с; загальна пропускна здатність мережі після впровадження запропонованих методів - 5,8 Гбіт/с; зростання ефективності використання ресурсів $\approx 45\%$; зменшення кількості втрачених пакетів при маршрутизації до впровадження методів - 1,8%; зменшення кількості втрачених пакетів при маршрутизації після впровадження методів - 0,6%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, методи побудови та функціонування метавсесвітів у контексті

архітектури мереж зв'язку шостого покоління, інтелектуальне ядро мережі 6G
основі SDN, інтеграція мережевих маршрутизаторів, алгоритм динамічної міграції
сервісів у розподіленій архітектурі граничних обчислень для мереж п'ятого
шостого покоління, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
архітектура оптичної гібридної мережі в інфраструктурі 6G-SAGIN; багаторівнева
модель метавсесвіту в контексті систем зв'язку 6G; модель мережі з використанням
маршрутизаторів на БПЛА; структурна схема кластера Kubernetes; структурна схема
тестового середовища та мережевих з'єднань.

6. Консультанти розділів роботи

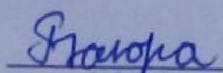
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

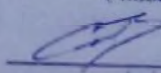
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Здобувач


(підпис)

Баюра С.В.

Керівник роботи



Стальченко О.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Баюра Є.В. Методи підвищення інформаційної ефективності телекомунікаційних мереж шостого покоління. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 113 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 51 назв; рис.: 27; табл. 14.

У роботі запропоновано метод оптимізації кількості контролерів у мультиконтролерних мережах SDN, що дозволяє знизити середню кількість контролерів на 46 % за рахунок динамічного управління. Це сприяє зменшенню енергоспоживання, зниженню витрат на розгортання мережі та підвищенню її надійності. Розроблено модельно-методичний апарат для побудови бездротових мереж із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), який забезпечує визначення оптимальних позицій для розміщення маршрутизаторів у рої БПЛА, формування зв'язної mesh-мережі та ефективну маршрутизацію трафіку з урахуванням параметрів якості обслуговування. Запропоновані підходи враховують особливості сучасних і перспективних телекомунікаційних систем, забезпечуючи інтеграцію з мобільними мережами. Окрім того, розглянуто методи реалізації іммерсивних технологій у мережах п'ятого та шостого поколінь (5G і 6G) для покращення якості надання телекомунікаційних послуг.

Ключові слова: SDN, мультиконтролерна мережа, оптимізація контролерів, безпілотний літальний апарат, mesh-мережа, маршрутизація трафіку, якість обслуговування, іммерсивна технологія, 5G, 6G, телекомунікаційна мережа.

ABSTRACT

UDC 621.396

Bayura Ye.V. Methods for Increasing the Information Efficiency of Sixth-Generation Telecommunication Networks. Bachelor's Qualification Work in Specialty 172 – Electronic Communications and Radio Engineering, Educational Program – Software for Telecommunication Systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 113 pages.

In Ukrainian. Bibliography: 51 titles; Figures: 27; Tables: 14.

This work proposes a method for optimizing the number of controllers in multi-controller SDN networks, which allows reducing the average number of controllers by 46% through dynamic management. This contributes to reduced energy consumption, lower deployment costs, and improved network reliability. A model-methodical framework for constructing wireless networks using unmanned aerial vehicles (UAVs) has been developed, enabling the determination of optimal positions for placing routers within a UAV swarm, forming a connected mesh network, and performing efficient traffic routing with consideration of quality of service parameters. The proposed approaches take into account the features of modern and prospective telecommunication systems, ensuring integration with mobile networks. Additionally, methods for implementing immersive technologies in fifth- and sixth-generation (5G and 6G) networks are considered to enhance the quality of telecommunication services.

Keywords: SDN, multi-controller network, controller optimization, unmanned aerial vehicle, mesh network, traffic routing, quality of service, immersive technology, 5G, 6G, telecommunication network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1 МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕТАВСЕСВІТІВ У КОНТЕКСТІ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ ЗВ’ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ ...	11
1.1 Архітектура інтегрованої мережі взаємодії повітряного та наземного сегментів.....	13
1.2 Архітектура інтегрованої мережі взаємодії повітряного та наземного сегментів.....	16
1.3 Висновки до розділу 1	29
2 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ЯДРО МЕРЕЖІ 6G НА ОСНОВІ SDN	31
2.1 Архітектура мережі.....	31
2.2 Динамічний розподіл SDN-контролерів	38
2.3 Результати моделювання.....	43
2.4 Висновки до розділу 2	46
3 ІНТЕГРАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ МАРШРУТИЗАТОРІВ	47
3.1 Модель розміщення маршрутизаторів на базі рою БПЛА.....	47
3.2 Вибір позиції маршрутизатора	51
3.3 Маршрутизація інформаційного трафіку	61
3.4 Оцінювання ефективності запропонованих методів	64
3.5 Висновки до розділу 3	66
4 АЛГОРИТМ ДИНАМІЧНОЇ МІГРАЦІЇ СЕРВІСІВ У РОЗПОДІЛЕНІЙ АРХІТЕКТУРІ ГРАНИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ МЕРЕЖ П’ЯТОГО ТА ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ.....	68
4.1 Методи розгортання та перенесення сервісів у хмарних і граничних архітектурах	69
4.2 Дослідження сучасних технологій міграції мережевих сервісів.....	73
4.3 Алгоритм автоматизованого перенесення сервісів	77
4.4 Висновки до розділу 4	88

	5
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	89
5.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи	90
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	92
5.3 Пожежна безпека	98
ВИСНОВКИ	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	109
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	113

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 6G — шосте покоління мобільного зв'язку
- API — інтерфейс програмування додатків
- БПЛА — безпілотний літальний апарат
- CRIU — технологія збереження і відновлення процесів у користувацькому просторі
- CRI — інтерфейс середовища виконання контейнерів
- CPU — центральний процесор
- DNS — система доменних імен
- Docker — платформа для контейнеризації додатків
- GPU — графічний процесор
- HTTP — протокол передачі гіпертексту
- IoT — Інтернет речей
- K8s — система оркестрації контейнерів
- LAN — локальна мережа
- LTE — технологія мобільного зв'язку 4G
- MEC — багатодоступні периферійні обчислення
- Mesh-мережа — мережа з сітковою топологією
- ML — машинне навчання
- NLOS — відсутність прямої видимості
- OFDM — ортогональне частотне мультиплексування
- PaaS — платформа як послуга
- PID — ідентифікатор процесу
- QoS — якість обслуговування
- REST — архітектурний стиль веб-сервісів
- ROS — операційна система для робототехніки
- RTT — час проходження сигналу туди і назад
- SDN — мережі з програмним керуванням
- SLA — угода про рівень сервісу

TCP/IP — протоколи передачі даних

UAV — безпілотний літальний апарат

VNF — віртуальна мережева функція

Wi-Fi — бездротова локальна мережа

XML — розширювана мова розмітки

XR — розширена реальність, включає AR, VR, MR

AI — штучний інтелект

Fog Computing — туманні обчислення (обчислення на периферії мережі ближче до джерела даних)

CI/CD — безперервна інтеграція та доставка

API Gateway — шлюз API (компонент для маршрутизації API-запитів)

NodeSelector — механізм Kubernetes для прив'язки подів до вузлів за мітками

Affinity/Anti-affinity — правила Kubernetes для визначення розміщення подів щодо інших подів або вузлів

Taints/Tolerations — механізми Kubernetes для контролю розміщення подів на вузлах з обмеженнями

CR — створення контрольних точок і відновлення процесів

kubelet — агент Kubernetes, який керує станом подів на вузлі

kube-proxy — компонент Kubernetes для обробки мережевого трафіку на вузлах

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом останніх двадцяти років у сфері розвитку мереж зв'язку відбувся стрімкий прогрес. Було впроваджено низку інноваційних технологій, які спочатку забезпечили користувачам доступ до широкого спектра телекомунікаційних послуг, включаючи мобільний зв'язок, а згодом — до передачі даних і відеоконтенту. На сучасному етапі ці технології призвели до трансформації архітектури телекомунікаційних мереж та розширення спектра доступних сервісів. Визначальну роль у формуванні нової парадигми мереж зв'язку відіграли концепції Інтернету речей (IoT) і Тактильного Інтернету (TI) [1].

Концепція Інтернету речей стимулювала створення мереж високої та надвисокої щільності підключень, тоді як Тактильний Інтернет ініціював розвиток мереж із надзвичайно низькою затримкою передавання даних. Сукупна дія цих чинників зумовила необхідність комплексного використання ресурсів різноманітних телекомунікаційних інфраструктур, що спричинило перехід від гомогенних до гетерогенних мереж зв'язку [2].

На початку третього десятиліття XXI століття стало очевидним, що фрагментоване, неузгоджене зростання мобільних і фіксованих мереж не забезпечує ефективного об'єднання їх ресурсів для повноцінного надання сучасних послуг у загальнодоступних мережах. У контексті формування концептуальних підходів до побудови мереж зв'язку шостого покоління (6G) було запропоновано нову архітектурну модель – концепцію інтегрованих мереж Космос–Повітря–Земля (SAGIN, Space-Air-Ground Integrated Network). Її основу становить ідея необхідності інтеграції не лише різноманітних технологій усередині окремих сегментів мереж, а й конвергенції самих мереж у єдину телекомунікаційну екосистему [3].

Очевидно, що реалізація цієї концепції формує широкий спектр наукових задач, актуальних щонайменше на найближче десятиліття. У цьому контексті актуальним є дослідження, присвячене розробці та аналізу моделей і методів

інтеграції граничних (edge) та туманних (fog) обчислень у мережах зв'язку п'ятого та шостого поколінь для глобального сегменту Повітря–Земля в рамках архітектури SAGIN [4].

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні накопичено значну кількість наукових праць, присвячених дослідженню мереж п'ятого покоління (5G) та перспективних мереж наступних поколінь, зокрема високошвидкісних і надвисокошвидкісних мереж, а також мереж із надмалими затримками передавання. Ці дослідження охоплюють як теоретичні аспекти, так і експериментальні підходи. Вагомий внесок у формування теоретичних засад і практичну реалізацію відповідних рішень зробили науковці, зокрема M. Dohler, G. Fettweis, J. Hosek, A.A. Ateya, M. Maier, M.Z. Shafiq та інші [5-9].

У працях згаданих авторів було досліджено характеристики мережевого трафіку та параметри якості обслуговування (QoS) у контексті мереж 5G/6G, зокрема для таких сервісів, як Інтернет речей, передавання даних, потокове відео, відеоконференції тощо. Водночас недостатньо уваги приділено специфіці трафіку та вимогам до якості обслуговування у разі надання послуг телеприсутності, особливо в умовах мереж із наднизькою затримкою. Саме ця наукова прогалина й обумовлює актуальність проведеного дослідження, яке зосереджено на розробленні та аналізі методів забезпечення сервісів телеприсутності в мережах шостого покоління [10]. Об'єктом дослідження є телекомунікаційні мережі п'ятого і шостого поколінь. Предметом дослідження виступають мережі 6G, побудовані із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і програмно-конфігурованих мереж (SDN), а також принципи надання послуг телеприсутності.

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження методів підвищення інформаційної ефективності телекомунікаційних мереж шостого покоління шляхом оптимізації кількості контролерів у мультиконтролерних SDN-мережах, створення модельно-методичного апарату для побудови бездротових мереж із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також впровадження методів

реалізації іммерсивних технологій у мережах 5G і 6G з метою підвищення надійності, енергоефективності та якості обслуговування телекомунікаційних послуг.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

1. Розробити метод оптимізації кількості контролерів у мультиконтролерних мережах SDN на основі динамічного управління, що дозволяє знизити середню кількість контролерів, зменшити енергоспоживання та витрати на розгортання, а також підвищити надійність мережі.

2. Створити модельно-методичний апарат для побудови бездротових мереж із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що забезпечує визначення оптимальних позицій для розміщення маршрутизаторів у рої БПЛА, формування зв'язної mesh-структури та ефективну маршрутизацію трафіку з урахуванням вимог до якості обслуговування.

3. Запропонувати нові підходи до розміщення точок доступу на основі БПЛА з урахуванням параметрів якості обслуговування та забезпечення сумісності mesh-мережі з мобільними мережами сучасного і перспективного поколінь.

4. Розробити методи реалізації іммерсивних (поглиблених) технологій у мережах п'ятого та шостого поколінь (5G і 6G) з метою покращення якості надання телекомунікаційних послуг та підтримки новітніх сервісів.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕТАВСЕСВІТІВ У КОНТЕКСТІ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

Упродовж останніх десятиліть відбувається постійна трансформація та розвиток технологій віртуальної (VR) і доповненої реальності (AR), а також інтенсивне впровадження інших іммерсивних (занурювальних) технологій. Ще у 1957 році було створено один із перших прикладів застосування таких технологій — «Sensorama». Цей кінематографічний пристрій, розроблений Мортонем Хейлігом, дозволяв глядачеві зануритися в багатосенсорне середовище за допомогою аудіоефектів, вібрації, потоків повітря та запахів.

Іммерсивні технології — це сукупність засобів і методів, що впливають на різні аспекти людського сприйняття з метою створення ефекту присутності в цифровому середовищі. Зростаючий інтерес до таких технологій призвів до їх активного впровадження в різних галузях — будівництві, машинобудуванні, медицині, освіті та інших секторах промисловості.

Із розвитком іммерсивних технологій закономірно зростає потреба у передаванні відчуттів на відстані, що стало основою для створення систем телеприсутності. Ця технологія дає змогу людині «переміщатися» у просторі шляхом інтерактивної взаємодії через телекомунікаційну мережу з віддаленим фізичним середовищем, ніби перебуваючи в ньому фізично, але відчуваючи це у віртуальній формі.

Одним із перших напрямів розвитку такої взаємодії став Тактильний Інтернет — еволюційне продовження концепції Інтернету речей (IoT), що забезпечує передавання не лише відео- та аудіосигналів, а й тактильних відчуттів, аналогічних до фізичних дотиків людини. Цей термін був запропонований у 2011 році в Технічному університеті Дрездена професором мобільних комунікацій Герхардом Фетвайсом. Він описав технологію як можливість дистанційно ловити об'єкти або керувати транспортними засобами, отримуючи зворотний тактильний зв'язок у реальному часі. Застосування

тактильного Інтернету охоплює автоматизацію, освіту, розваги, сільське господарство, охорону здоров'я та індустріальний транспорт.

Тоді як тактильний Інтернет забезпечує можливість взаємодії з віддаленим фізичним простором, концепція метавсесвіту реалізує створення повноцінних цифрових світів, у яких цифрові об'єкти взаємодіють із фізичними елементами реальності. Поняття Metaverse (від слів meta — «поза межами» та universe — «всесвіт») позначає нову парадигму взаємодії в інтернеті, у якій користувачі представлені у вигляді 3D-аватарів і взаємодіють із іншими користувачами та цифровим середовищем у режимі реального часу, із фокусом на соціальні зв'язки та комунікацію.

Термін «метавсесвіт» уперше з'явився у 1992 році в науково-фантастичному романі Ніла Стівенсона Snow Crash, де описувалася технологія, що дозволяє людям входити у віртуальний світ за допомогою засобів віртуальної реальності. У XXI столітті концепція метавсесвіту набула нового життя як наступна еволюційна фаза після мобільного Інтернету. Завдяки поєднанню технологій VR, AR, HCI (людино-комп'ютерної взаємодії) та тактильного Інтернету, користувачі отримують змогу існувати у цифровому світі з відчуттями, наближеними до реальності.

З моменту виникнення ідея метавсесвітів еволюціонувала та охопила різні концепти: віртуальні 3D-світи, системи life-logging, цифрові аватари, доповнена реальність і дзеркальні цифрові простори. Уже сьогодні реалізовано низку цифрових копій реальних міст, зокрема Сеула, Дубая та Абу-Дабі. У метавсесвітах функціонують магазини, проходять мистецькі виставки та технічні демонстрації. Активно розвиваються ігрові метавсесвіти — як-от Decentraland, VRChat та інші [11].

Окремий напрям становлять так звані «промислові метавсесвіти», прикладом чого є створення компанією Renault цифрового двійника одного зі своїх заводів із метою оптимізації виробничих процесів. Таким чином, метавсесвіт постає як перспективне рішення, що інтегрує ключові технології —

AR, VR, MR (змішану реальність) і XR (розширену реальність) — у єдиному цифровому середовищі глобального масштабу.

1.1 Архітектура інтегрованої мережі взаємодії повітряного та наземного сегментів

Передбачається, що шосте покоління мобільного зв'язку (6G) поступово витіснить існуючі стандарти, забезпечуючи користувачам якісно новий рівень телекомунікаційного обслуговування. Очікується, що 6G стане надзвичайно гнучкою мережею з високою продуктивністю, що забезпечить підтримку широкого спектра інноваційних сервісів і сценаріїв використання.

З моменту впровадження технологій першого покоління у 1981 році спостерігається безперервна еволюція мобільних та комунікаційних технологій. Починаючи з 1G, 2G і 3G, а згодом — з розгортанням 4G і 5G, користувачі отримали доступ до високошвидкісного передавання даних і покращеної якості обслуговування. Істотно зросли й швидкісні характеристики: від 2 кбіт/с у 1G до 64 кбіт/с у 2G, 8 Мбіт/с у 3G, 50 Мбіт/с у 4G і до 5 Гбіт/с у 5G. У свою чергу, очікувана пропускна здатність у 6G може сягати 100 Тбіт/с, що виводить мережі за межі традиційного гігагерцового спектра. Якщо 5G оперує в діапазоні 30–300 ГГц, то 6G передбачає використання субтерагерцового й терагерцового спектра частот [12].

Ще в 4G мережах Інтернет речей (IoT) почав використовуватися як основа для інтелектуальної взаємодії між пристроями. У 6G передбачається інтеграція перспективних технологій радіодоступу, таких як OFDM у міліметровому та терагерцовому діапазонах, технологій ультранадійного зв'язку з наднизькою затримкою (ultra-URLLC), а також безшовна конвергенція комунікаційних технологій і допоміжної інфраструктури на базі архітектури SAGIN (Space-Air-Ground Integrated Network).

На відміну від попередніх поколінь, які переважно покладалися на обмежені діапазони частот, 6G передбачає використання широкосмугового наземного

покриття, що накладається на традиційні, надширокосмугові та бездротові WWW-технології. Водночас розширюється спектр ключових показників ефективності (KPI), серед яких: швидкість передавання даних, надійність, вартість, ємність, затримка, доступність, щільність покриття, когнітивність, можливості зондового аналізу, безпека та довіра.

У контексті архітектури 6G-SAGIN можливе впровадження численних інноваційних сценаріїв. Наприклад, автономні публічні та приватні БПЛА з функціями транспортування людей зможуть літати за допомогою системи самостійного навігаційного керування. Установлення зв'язку з підводними об'єктами або навіть із пасажирями повітряних куль стане технічно реальним. Астронавти зможуть в реальному часі грати у відеоігри з дітьми у форматі UHD (ultra-high-definition). Об'єднання 6G з архітектурою SAGIN має потенціал подолати існуючі технічні бар'єри, забезпечуючи новий рівень занурення завдяки поєднанню тактильних, когнітивних, штучно-інтелектуальних і тактичних обчислювальних технологій.

Однак реалізація повноцінної взаємодії в системі 6G-SAGIN вимагає дотримання низки критичних вимог, серед яких:

- модернізація системи зв'язку типу «людина–машина» (H2M);
- створення ультранадійної низькозатримкової архітектури;
- забезпечення гарантованої якості обслуговування з рівнем надійності до 99,999999%;
- використання нових частотних діапазонів із підтримкою пікових швидкостей понад 100 Гбіт/с;
- забезпечення екстремального охоплення у повітряному, космічному та підводному середовищах;
- зменшення енергоспоживання до нановатного рівня в mmWave/ТГц-діапазонах;
- інтеграція технологій заряджання акумуляторів з мінімальним втручанням;
- досягнення надвисокої щільності підключень (>100 млн пристроїв на км²);

- реалізація високоточного позиціонування на рівні міліметрів або сантиметрів із розширеними можливостями сенсорного зондування.

Архітектура 6G-SAGIN представлена на рисунку 1.1 [13].

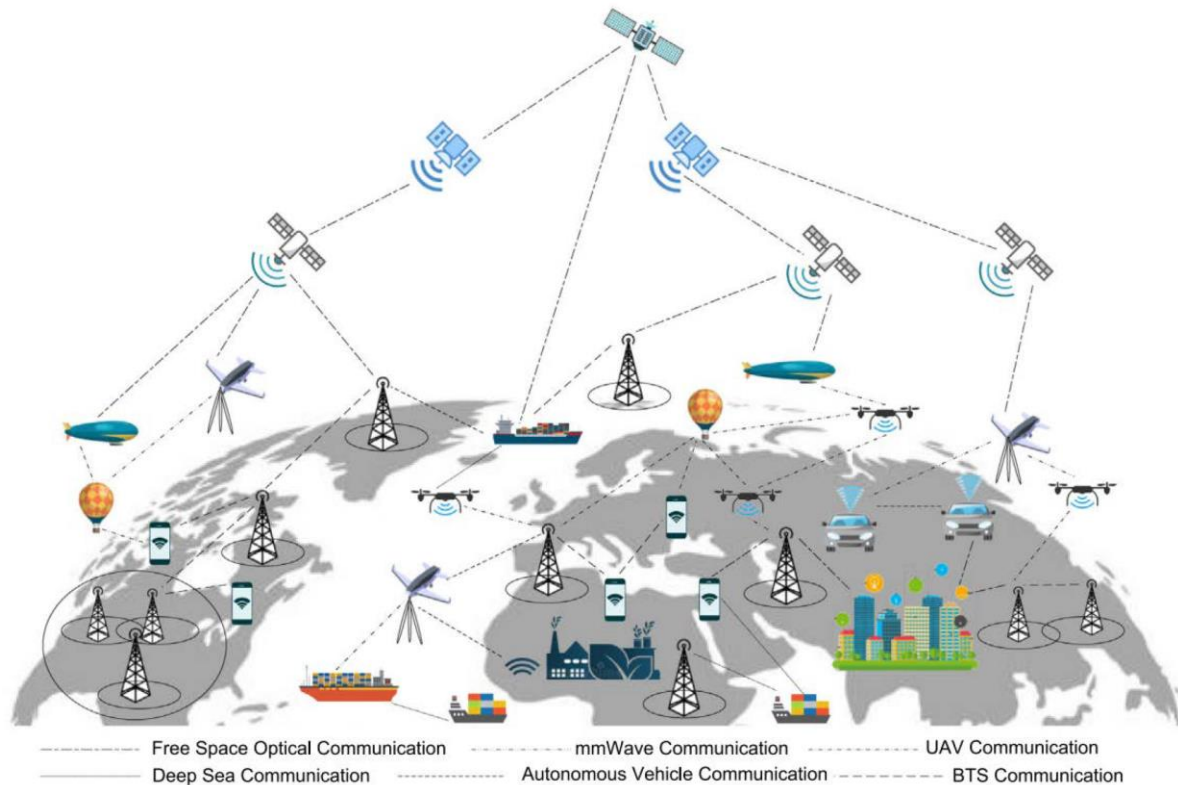


Рисунок 1.1 – Архітектура SAGIN

Архітектура SAGIN (Space–Air–Ground Integrated Network) — це концепція побудови телекомунікаційної інфраструктури, яка передбачає інтеграцію трьох фізичних середовищ передачі даних: космічного (супутники), повітряного (безпілотні літальні апарати, аеростати, літаки) та наземного (мобільні й фіксовані мережі зв'язку). Така багаторівнева структура дозволяє досягти глобального покриття, високої надійності, безперервності сервісів і адаптивності до умов середовища.

Архітектура SAGIN включає:

Космічний сегмент: супутники на низьких (LEO), середніх (MEO) і геостаціонарних (GEO) орбітах, які забезпечують широкомасштабне охоплення, зокрема у важкодоступних регіонах.

Повітряний сегмент: платформи на великій висоті (HAP), безпілотники (UAV), дирижаблі, які виконують функції ретрансляції, маршрутизації та збору даних.

Наземний сегмент: традиційні мобільні та фіксовані мережі (5G/6G), базові станції, оптична інфраструктура, центри обробки даних.

Особливості архітектури SAGIN:

Інтеграція обчислювальних ресурсів: забезпечення тісної взаємодії між edge-, fog- та cloud-компонентами.

Гнучке управління ресурсами: програмно-конфігуровані мережі (SDN) і функціональна віртуалізація (NFV).

Підтримка наднадійних і низькозатримкових сервісів (URLLC): важливо для тактильного Інтернету, телеприсутності, автономних систем.

Адаптивність до сценаріїв надзвичайних ситуацій, віддалених регіонів і мобільних користувачів.

Завдяки архітектурі SAGIN можлива реалізація багатьох сценаріїв для 6G: дистанційна медицина, глобальний Інтернет речей (IoT), інтелектуальні транспортні системи, мережі телеприсутності [14].

1.2 Архітектура інтегрованої мережі взаємодії повітряного та наземного сегментів

У контексті архітектури 6G-SAGIN (Space–Air–Ground Integrated Network) повітряні та наземні мережі формують два ключових сегменти, що забезпечують безперервність сервісів, гнучкість управління трафіком і підвищену ефективність зв'язку в умовах динамічного середовища.

Повітряні мережі формуються за допомогою платформ на середніх та великих висотах:

БПЛА (UAV), безпілотні літальні апарати для ретрансляції, збору даних і маршрутизації трафіку.

HAPS (High-Altitude Platform Stations) — стратосферні платформи з широким радіусом покриття.

Пілотовані та безпілотні повітряні судна, здатні виконувати роль мобільних базових станцій або шлюзів між сегментами мережі.

Переваги:

Швидке розгортання в надзвичайних ситуаціях або регіонах без інфраструктури.

Динамічна зміна топології й покриття.

Підвищена стійкість до локальних збоїв.

Наземна частина включає традиційну телекомунікаційну інфраструктуру:

Базові станції 5G/6G, мобільні вузли, оптичні мережі.

Мережі туманних та граничних обчислень для розміщення обчислювальних ресурсів ближче до користувача.

Центри обробки даних для виконання складних обчислень, зберігання інформації та централізованого управління.

Наземний сегмент забезпечує:

Високу пропускну здатність та щільне покриття в урбанізованих зонах.

Стабільну комутацію між користувачами та іншими сегментами мережі.

Підтримку сервісів з високими вимогами до якості обслуговування (QoS), зокрема телеприсутності, потокового відео, XR/VR, тощо.

Повітряні та наземні мережі в рамках 6G-SAGIN не функціонують ізольовано, а інтегруються в єдину динамічну екосистему, яка адаптується до умов середовища та запитів користувачів у реальному часі. Така взаємодія дозволяє реалізувати сценарії глобального мобільного зв'язку, віддаленого керування, автономних транспортних систем і мережевих сервісів нового покоління.

Повітряні мережі є ключовим компонентом архітектури інтегрованої мережі типу «Космос–Повітря–Земля» (SAGIN), що забезпечує розширення

покриття та гнучкість у наданні телекомунікаційних послуг у важкодоступних або віддалених регіонах. У контексті мереж шостого покоління (6G) повітряний сегмент відіграє важливу роль у забезпеченні безшовної зв'язності, наднизької затримки, високої доступності та мобільності [15].

До складу повітряних мереж входять такі компоненти:

Безпілотні літальні апарати (БПЛА, UAV) — використовуються як ретранслятори сигналу, мобільні базові станції або елементи маршрутизації. Завдяки можливості зміни положення в просторі, БПЛА забезпечують динамічну адаптацію топології мережі до потреб користувачів.

Платформи на великих висотах (HAPS) — стратосферні апарати (наприклад, аеростати, сонячні літаки), здатні забезпечувати тривале перебування в повітрі та широке покриття з мінімальними витратами енергії.

Літаки та дирижаблі з комунікаційним обладнанням, які можуть діяти як тимчасові вузли зв'язку під час надзвичайних ситуацій або масових заходів.

Основні функції повітряних мереж:

Розширення покриття в районах із недостатньою інфраструктурою.

Забезпечення зв'язку в умовах стихійних лих, катастроф або війни.

Підвищення стійкості мережі до відмов за рахунок мобільності вузлів.

Забезпечення високої пропускну здатності за рахунок прямої видимості та адаптивного управління.

У 6G-парадигмі повітряні мережі будуть тісно інтегровані з наземними та космічними сегментами, формуючи єдину багатошарову мережу зв'язку з підтримкою інтелектуальних технологій (AI), когнітивного радіо, мережевого планування в реальному часі та оркестрації ресурсів.

Таким чином, повітряні мережі є критично важливим елементом архітектури 6G-SAGIN, що забезпечує новий рівень мобільності, адаптивності та надійності телекомунікаційної інфраструктури.

1.2.1 Повітряні мережі

Мережа космічного доступу (SAN) є ключовим елементом архітектури 6G-SAGIN (Space–Air–Ground Integrated Network) і призначена для забезпечення надійного зв'язку, відстеження положення та ретрансляції даних між космічними об'єктами та іншими сегментами мережі. SAN формує глобальний інформаційний шар, що об'єднує супутникові платформи з наземною та повітряною інфраструктурою.

У традиційних рішеннях SAN використовуються геостаціонарні супутники (GEO), які функціонують у діапазоні Ku (12–18 ГГц) і забезпечують передачу даних зі швидкістю до 506 Мбіт/с, покриваючи зони радіусом від 100 до 6000 км. Для підключення можуть застосовуватися як стаціонарні, так і портативні модеми з антенами внутрішнього або зовнішнього типу.

Останнім часом усе більшого поширення набувають супутники низької (LEO) та середньої (MEO) навколоземної орбіти, що забезпечують швидкості передавання на рівні 64 кбіт/с (LEO) та до 1 Гбіт/с (MEO). У межах концепції супутникового Інтернету (SIA) SAN може забезпечувати двосторонню передачу даних, включаючи використання супутникових телефонів, мобільних модемів і широкосмугового доступу.

Односторонні приймачі з наземними передавачами також використовуються для мовлення у широкому форматі, обслуговуючи від 100 до 4000 кінцевих користувачів одночасно. Потенціал масштабування забезпечується через вдосконалення програмного забезпечення й використання схем множинного доступу з часовим розділенням каналів (TDMA).

Основними технічними проблемами впровадження SAN є:

- високі затримки при використанні GEO-супутників;
- вплив атмосфери та зон Френеля;
- вимоги до прямої видимості;
- складність орбітального розміщення.

Однак, об'єднання можливостей SAN та SIA в межах 6G-SAGIN сприяє підвищенню надійності та глобального покриття мережі нового покоління.

У цифрових мережах зв'язку використовуються три основні типи супутників:

- LEO (Low Earth Orbit) — висота 160–2000 км;
- MEO (Medium Earth Orbit) — висота 2000–36000 км;
- GEO (Geostationary Earth Orbit) — орбіта на висоті 35786 км.

Кожен тип виконує свої функції: GEO — для масового мовлення (телебачення, радіо), MEO — для навігації, LEO — для низькозатримкових інтернет-послуг.

Типи супутникових сервісів.

FSS (Fixed Satellite Service) — мовлення телерадіостанцій.

MSS (Mobile Satellite Service) — мобільна супутникова передача в діапазонах 137–138 МГц (S2E) і 148–150 МГц (E2E).

SARN (Satellite Radio Access Network) — супутниковий доступ для прямої радіослужби.

Оптичний супутниковий зв'язок (FSO/laser) — методи міжсегментної передачі даних з використанням лазерних телескопів.

Сценарії зв'язку включають: S2G (космос–земля), S2S (космос–космос), A2A (повітря–повітря), A2G (повітря–земля).

Середні швидкості передачі варіюються в межах 0,15–10 Гбіт/с залежно від умов середовища.

Технологія оптичного зв'язку глибокого космосу (DSOC), розроблена NASA JPL, може підвищити ефективність міжпланетного зв'язку в 100 разів. Система використовує інфрачервоний лазер із довжиною хвилі 1,55 мкм, забезпечуючи швидкість передачі до 292 кбіт/с. Ця технологія планується для застосування в місії Psyche, забезпечуючи двосторонній зв'язок між космосом і наземною станцією з лазером потужністю 4 Вт [18].

Іншим прикладом є оптична система зв'язку OPASC (Optical Payload for Space Communication), здатна підтримувати стабільний обмін навіть при спотвореннях сигналу. Її типовий діапазон — близько 50 Мбіт/с. OPASC може бути інтегрована в інфраструктуру 6G-SAGIN разом із системами ретрансляції

(TDRSS), а також з мережами ближнього космічного простору (NEN) і наземною інфраструктурою (GN), що дозволить реалізувати високоефективну гібридну модель передачі даних.

1.2.2 Наземні мережі

Під мобільним транзитним зв'язком (Mobile Backhaul, MBH) у контексті мереж шостого покоління розуміють систему з'єднання базових станцій мобільного зв'язку з провідною телекомунікаційною інфраструктурою за допомогою бездротових інтерфейсів [13]. Основною метою MBH є забезпечення користувачів мобільного зв'язку доступом до сервісів, орієнтованих на передачу даних і мультимедійного контенту.

З огляду на стрімке зростання потреб у пропускній здатності, MBH відіграє критичну роль в інтеграції мереж радіодоступу (RAN), поєднуючи малі, піко-, фемто- та макросоти з опорною транспортною мережею. У межах мереж 6G мобільний транзит повинен відповідати таким ключовим вимогам:

- масштабованість пропускної здатності,
- обслуговування користувачів на високих швидкостях переміщення,
- підтримка автоматизації керування й обслуговування,
- синхронізація вузлів мережі,
- забезпечення високої доступності та безперервності зв'язку [14].

Досягнення зазначених характеристик можливе за рахунок віртуалізації мережевих функцій (NFV), впровадження програмно-конфігурованих мереж (SDN), а також модернізації існуючої інфраструктури.

Один із ключових напрямів розвитку — автоматизація обслуговування гетерогенних мереж (HetNet), які об'єднують малі клітини різного типу (мікро-, піко-, фемтосоти) з макросотами через бездротові канали.

У мережах доступу (RAN) реалізуються механізми радіозв'язку між кінцевими пристроями та опорною мережею (CN), включаючи використання кремнієвих чипів як у базових станціях, так і в мобільних терміналах (UE/MS). Останнім часом набули поширення архітектури Cloud-RAN (CRAN), що

дозволяють розширити відстань обслуговування до 40–80 км у 3G і понад 20 км у 4G зі швидкістю передачі даних до 10 Гбіт/с і затримками на рівні ~ 10 мс. У поєднанні з IP-технологіями (IP-CRAN) такі рішення можуть бути інтегровані з МВН, знижуючи вартість послуг та оптимізуючи використання ресурсів у 6G-мережах.

Діапазон частот mmWave охоплює спектр 30–300 ГГц і є перспективним для: імплементації сервісів із мінімальною затримкою, реалізації іммерсивних технологій (AR/VR), формування вузькоспрямованих антенних променів, створення безсотових архітектур, тера-мереж та 6G-мереж з розширеними можливостями.

Використання mmWave здійснюється в таких діапазонах: 57–64 ГГц (неліцензований), 28/38 ГГц, 71/81/92 ГГц (ліцензовані), а також у недозавантаженому спектрі навколо 7 ГГц. Вони дозволяють проєктувати системи для фіксованого бездротового доступу, критичних застосунків, Wi-Fi у приміщеннях і формування енергозбиральних рішень у 6G.

Терагерцовий спектр (0,3–10 ТГц) відкриває нові можливості для розгортання надвисокошвидкісних з'єднань у 6G-SAGIN. Наприклад: експерименти з розповсюдження сигналу на частоті 140 ГГц (D-діапазон) засвідчили можливість стабільної передачі даних; проводяться вимірювання покриття на великих відстанях із мінімальними втратами.

Переваги THz-зв'язку: формування гібридних THz-оптичних каналів, підтримка мобільних HetNet-мереж, реалізація тера-IoT, тера-Wi-Fi, тера-промислових рішень, підтримка 3D-моделювання та позиціонування з міліметровою точністю.

Для повноцінного впровадження THz необхідно доопрацювати конструкції антен, методи керування затримками та технології формування масивів. У межах наземної складової архітектури 6G-SAGIN розглядається гібридна оптико-бездротова мережа (HOWF), що базується на технології вільного простору (Free-Space Optics, FSO) та зв'язку у видимому світлі (Visible Light Communication,

VLC). HOWF підвищує рівень безпеки передачі даних, особливо у спектрі, перевантаженому радіочастотними сигналами.

Усередині динамічних кабін (наприклад, транспортних модулів) розгортаються VLC-з'єднання з вбудованими АРТ-модулями (auto-pointing tracking) для стабілізації сигналу. Світлодіодні (LED) системи забезпечують двосторонній доступ до 6G-SAGIN з боку смартфонів, транспортних засобів, роботів тощо. Передача даних між терміналами здійснюється з використанням технологій TDM та TDMA. Усередині кабін підтримуються два режими: пристрій–пристрій (Device-to-Device, D2D) на базі VLC; внутрішньокабінна передача з високою пропускнуою здатністю. Міжкабінна комунікація реалізується через FSO-VLC HetNet із використанням двонаправлених каналів. Центральним керувальним елементом виступає контролер HetNet, що здійснює маршрутизацію, розподіл ресурсів та динамічну оптимізацію мережових параметрів. На рисунку 1.2 відображено загальну архітектуру HOWF [19].

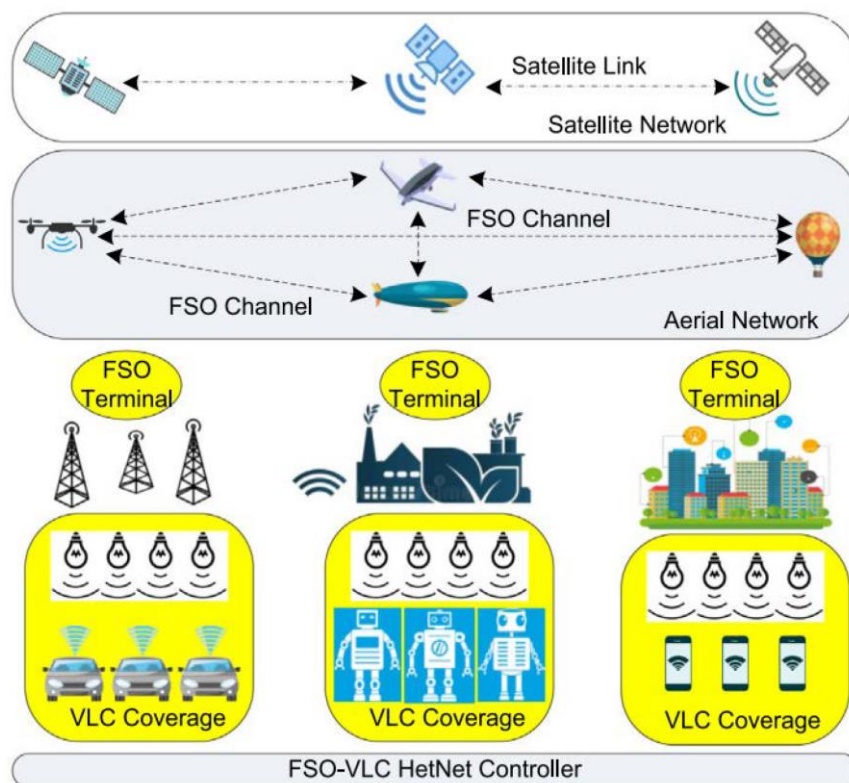


Рисунок 1.2 – Архітектура оптичної гібридної мережі в інфраструктурі 6G-SAGIN

Концепція метавсесвіту формується вже кілька десятиліть, однак лише нещодавно вона набула значного розголосу завдяки активному розвитку цифрових технологій. На рисунку 1.3 представлено хронологію ключових подій, що визначили етапи становлення метавсесвіту: від створення Інтернету у 1991 році та першої віртуальної платформи Second Life у 2003 році — до сучасних ініціатив провідних технологічних компаній, зокрема Microsoft і Meta, спрямованих на розробку віртуальних середовищ нового покоління [20].

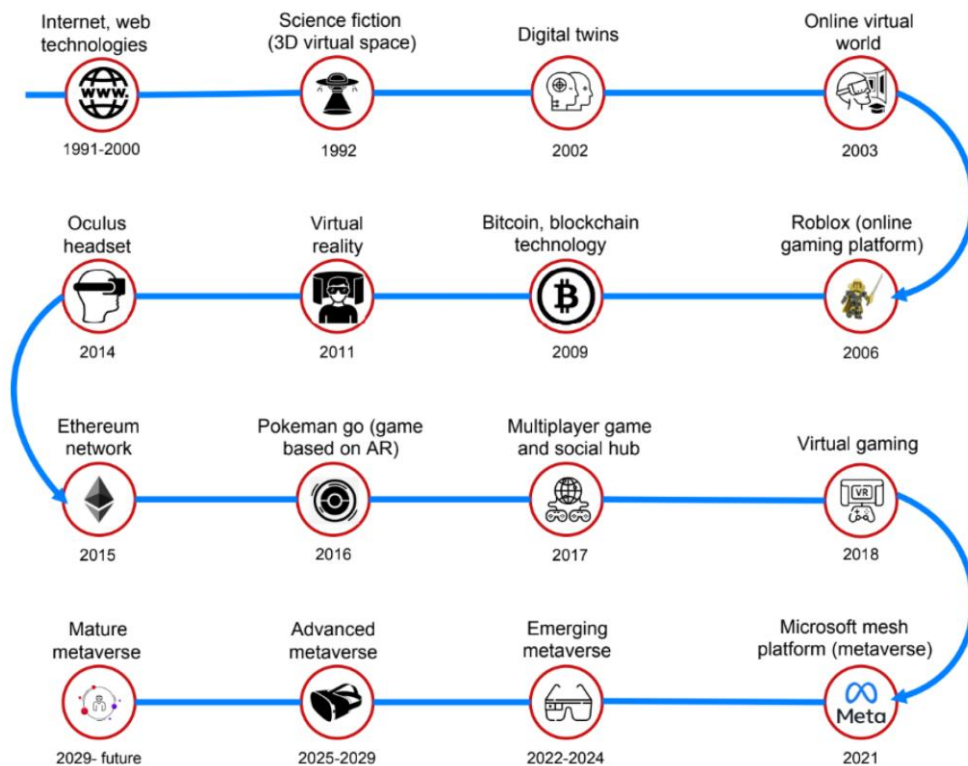


Рисунок 1.3 – Етапи розвитку концепції метавсесвіту

З метою забезпечення взаємодії та сумісності цифрових світів було впроваджено низку галузевих стандартів, серед яких найпоширенішими є OpenMetaverse, VRML (мова моделювання віртуальної реальності), X3D (розширюваний формат 3D) і COLLADA (обмінний формат 3D-об'єктів на основі XML). Зокрема:

OpenMetaverse — це відкритий фреймворк, створений на базі протоколу OpenSim, що забезпечує набір API, бібліотек і інструментів для побудови віртуальних світів.

VRML та X3D використовуються для створення інтерактивних 3D-сцен.

COLLADA забезпечує обмін 3D-активами між різними програмними засобами та підтримує 3D-моделювання і анімацію.

Однак ефективна реалізація функціоналу метавсесвітів потребує дотримання низки технічних вимог: наднизької затримки, високої пропускної здатності, сумісності додатків і безпеки. Сучасні мережі 5G частково задовольняють ці вимоги, забезпечуючи сервіси наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC), розширеної мобільної широкосмугової передачі (eMBB) та масового машинного зв'язку (mMTC) з піковими швидкостями до 20 Гбіт/с. Проте діапазони mmWave, задіяні в 5G, не здатні забезпечити терабітні швидкості та мікросекундні затримки, необхідні для додатків наступного покоління, зокрема для VAR (віртуальної розширеної реальності), сервісів ІоЕ, інтерфейсів «мозок-комп'ютер» та автономних систем. Для подолання цих обмежень передбачається впровадження мереж шостого покоління (6G), які виступатимуть революційною технологією бездротового зв'язку нового етапу. Архітектура 6G забезпечуватиме надвисоку пропускну здатність, мінімальні затримки, енергоефективність, масштабованість та інтелектуальні сервіси для широкого спектра тактильних і сенсорних застосувань. Очікується, що мережі 6G забезпечать швидкість до 1 Тбіт/с із затримкою менше 1 мкс, значно підвищуючи якість обслуговування (QoS) порівняно з попередніми поколіннями.

У цьому контексті мобільні граничні обчислення (MEC) розглядаються як ключова технологія для плавного переходу до архітектур 5G та 6G. MEC поєднує можливості хмарних платформ із обчислювальними ресурсами на периферії мережі, тим самим зменшуючи затримку, підвищуючи ефективність доступу до сервісів та забезпечуючи зручнішу взаємодію з користувачем. Питання реалізації метавсесвітів у майбутніх бездротових мережах активно досліджується науковою спільнотою. У роботі [3] представлено ґрунтовний огляд ролі

блокчейну в екосистемі метавсесвіту, зокрема підкреслюється його потенціал для збереження цифрових активів та забезпечення цілісності у розподіленому середовищі. У роботі [4] розглядаються освітні застосування метавсесвітів з акцентом на роль ІоЕ та XR для цифрового навчання та розвитку навичок. Водночас питання безпеки й захисту персональних даних залишаються критичними для подальшого впровадження цієї технології [5]. У зв'язку з цим, дослідники пропонують використання штучного інтелекту (ШІ) та блокчейну як механізмів саморегуляції віртуальних спільнот, зокрема для фіксації та повідомлення про порушення [17, 18]. У постпандемічний період значно зросла роль цифрових рішень у сфері охорони здоров'я. Зокрема, включення метавсесвітів у цифрові медичні платформи відкриває нові можливості для надання медичних послуг із меншими витратами та вищою ефективністю [19, 20]. В інших дослідженнях [22, 23] автори аналізують ключові сценарії застосування, пов'язані з впровадженням 6G, та формулюють перспективне бачення мереж майбутнього. У роботах [24, 25] описано потенціал використання метавсесвітів для цифрового міського планування, удосконалення інфраструктури та підвищення ефективності міського управління. Зазначається, що інтеграція цифрових середовищ у повсякденне життя може суттєво вплинути на якість життя мешканців. У дослідженні [26] автор розглянув використання VR-технологій для організації потокового відеозв'язку з низькою затримкою для віддаленого керування сервісами. Аналіз протоколів показав, що використання RTMP забезпечує найменшу затримку при передачі потоків. У роботі [27] представлено сценарії віддаленого водіння й групової взаємодії (squad communication) з використанням відеопотоків у режимі реального часу, реалізовані в хмарних і туманних обчислювальних середовищах. Незважаючи на значний поступ, сучасні дослідження не приділяють достатньої уваги проблемам масштабування та інтеграції 6G у контексті практичного розгортання застосувань метавсесвіту [28]. Це створює передумови для подальших досліджень і технічного вдосконалення в цьому напрямі.

Метавсесвіт є одним із найперспективніших інтелектуальних застосунків у контексті розвитку бездротових комунікацій шостого покоління (6G). У зв'язку з цим пропонується багаторівнева високорівнева архітектура метавсесвіту (рис. 1.4), яка описує взаємозв'язки між фізичними, комунікаційними, соціальними й віртуальними компонентами, що забезпечують інтерактивність у режимі реального часу між фізичним і цифровим просторами.

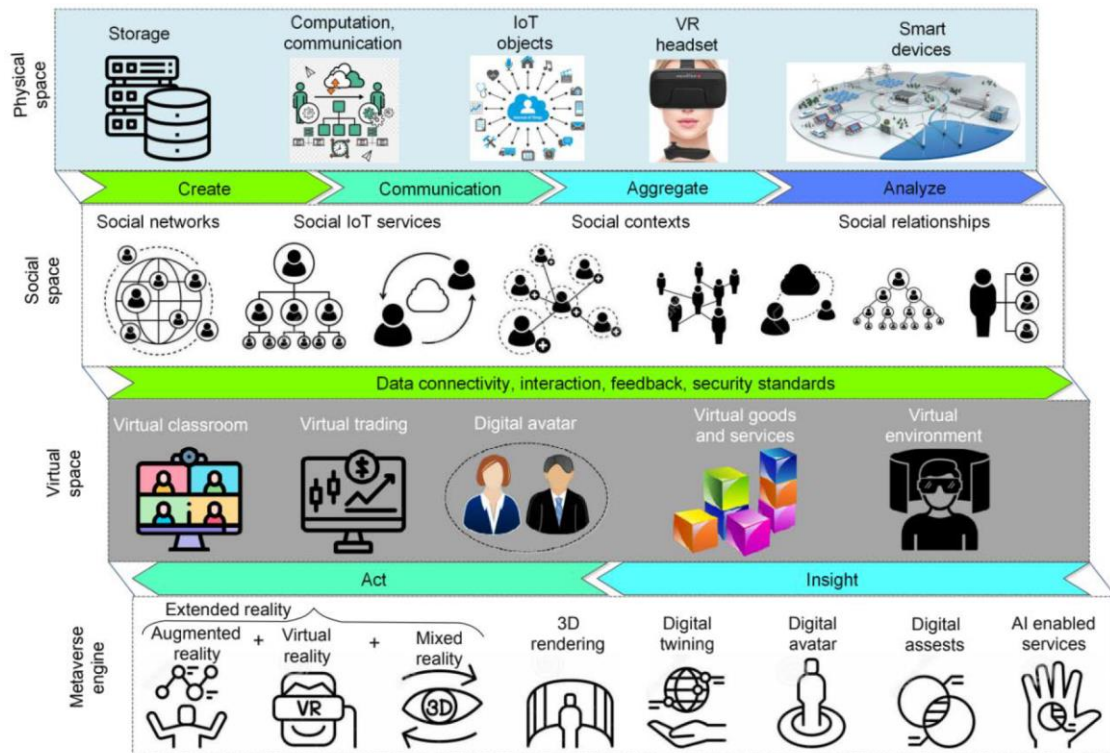


Рисунок 1.4 – Багаторівнева модель метавсесвіту в контексті систем зв'язку 6G

Фізичне середовище забезпечує базову інфраструктуру, включаючи термінальні пристрої та сервери хмарних і периферійних обчислень, необхідні для функціонування віртуального простору. Завдяки об'єднанню багатосенсорного сприйняття, обчислень, зберігання даних і керування, відбувається інтеграція людського й цифрового світів. Інтелектуальні пристрої, як-от VR-шоломи, голографічні дисплеї, розумні окуляри та тактильні сенсори, забезпечують занурення користувача у віртуальне середовище. Пристрої IoT відіграють роль інтерфейсу, що передає дані з фізичного світу до віртуального.

Взаємодія між фізичним і віртуальним просторами підтримується за допомогою гетерогенних мереж – як дротових, так і бездротових. Обчислювальні й зберігальні ресурси реалізуються через хмарні та периферійні обчислення.

Метавсесвіт відкриває нові можливості для соціальної взаємодії, віртуальної праці, дозвілля, освіти тощо. У межах концепції «третього простору» користувачі можуть брати участь у колективних активностях: шопінгу, кіберспортивних подіях, перегляді фільмів, спілкуванні та іграх. У цьому контексті віртуальні соціальні мережі поєднуються з даними соціального контексту, що надходять від сервісів IoT, орієнтованих на користувача.

Віртуальне середовище. У цьому шарі відбувається моделювання цифрових репрезентацій фізичних і соціальних об'єктів. API забезпечують інтерактивність між реальним і віртуальним середовищем. Тут створюються простори для освіти, торгівлі, послуг і цифрової ідентичності (аватарів), що реалізуються за допомогою високоякісного рендерингу та симуляцій.

Основний обчислювальний модуль агрегує дані, генерує 3D-моделі, керує цифровими двійниками та інтерактивними елементами середовища. Ці функції можуть виконуватись як на периферії мережі, так і в хмарі.

XR включає технології VR, AR та MR. VR забезпечує повне віртуальне занурення, AR – доповнення реального світу графічними/аудіо візуальними елементами, MR – взаємодію об'єктів у змішаному середовищі. Ці технології є ключовими для реалізації повноцінного 3D-досвіду.

Цифрові двійники. Це моделі фізичних об'єктів у реальному часі, що створюються шляхом моделювання та синтезу даних. Вони можуть використовувати AI для генерації когнітивних аватарів і 3D-об'єктів. Наприклад, GANverse3D від NVIDIA дозволяє миттєво генерувати цифрову копію фізичного об'єкта за фото.

Комунікаційна інфраструктура та рівень обміну даними забезпечують інтерактивність між усіма шарами архітектури. Впровадження політик безпеки (TLS, PKI, Kerberos) та блокчейну гарантує конфіденційність і цілісність інформації.

1.3 Висновки до розділу 1

Метавсесвіт як новітня парадигма цифрової взаємодії формує принципово нове середовище, що поєднує фізичну реальність із віртуальними просторами, породжуючи численні виклики у сфері безпеки, захисту персональних даних і цифрового суверенітету. На відміну від традиційного інтернет-простору, де персональні дані користувачів здебільшого обмежуються демографічною, географічною та поведінковою інформацією, метавсесвіт оперує глибоко чутливими біометричними, емоційними та когнітивними даними. Ці дані формуються зокрема шляхом зчитування рухів очей, міміки, мозкової активності, переміщень аватарів та взаємодій користувачів у віртуальних середовищах.

В умовах зростаючої складності цифрових просторів метавсесвіту значного загострення набувають питання юрисдикції, транскордонної обробки даних, сумісності цифрових ідентичностей, а також розмежування правового статусу між користувачем і його аватаром. У зв'язку з цим виникає потреба у переосмисленні чинного законодавства щодо конфіденційності та визначенні механізмів регулювання даних, зібраних у метавсесвіті. Наприклад, питання – чи є аватари суб'єктами права, та чи підпадають їхні дії під юрисдикцію країни фізичного перебування користувача, – наразі лишається відкритим.

Особливу загрозу становить масове профілювання, можливе внаслідок обробки широкого спектра мультимодальних даних. Це створює потенційні ризики маніпуляції свідомістю, цілеспрямованого впливу на соціальні, політичні та економічні рішення індивідів, а також розширення можливостей державного нагляду. Деякі технології метавсесвіту, такі як камера з віддаленим керуванням у режимі третьої особи або трекери розташування, вже сьогодні можуть перетворюватися на інструменти несанкціонованого стеження, що порушує право на приватність.

Крім того, впровадження цифрових активів, зокрема NFT, а також розповсюдження контенту через Web 3.0 ускладнюють дотримання норм

інтелектуальної власності. Питання правового захисту віртуальних об'єктів, аватарів, торгових марок і патентованих технологій, які репрезентуються у метавсесвіті, потребують окремої правової класифікації.

Зростаюча кількість альтернативних ідентичностей (так званих альтів), створюваних користувачами, підвищує ризики анонімного зловживання, кіберзлочинності та несанкціонованого збору персональної інформації. Водночас використання таких даних може порушити чинне законодавство про захист персональних даних, оскільки навіть опосередкована активність аватарів може дозволити ідентифікувати реального користувача.

Проблематика цифрового суверенітету також виходить на перший план. У віртуальних просторах відбувається створення цифрових державних інституцій (наприклад, банків), що ставить питання про суверенітет над економічними системами, національними валютами та територією, репрезентованою у метавсесвіті. Крім того, виникає необхідність гарантування базових прав людини – таких як свобода слова, гідність та захист приватності – у новій віртуальній юрисдикції.

Таким чином, з огляду на потенційні ризики, пов'язані з персональними даними, юрисдикційною відповідальністю, анонімністю, цифровою ідентифікацією та правами інтелектуальної власності, країни мають вжити превентивних заходів. Серед них – формування національних стратегій цифрової безпеки, правове врегулювання статусу аватарів, оцінка потенційних загроз для суверенітету та розроблення нормативних рамок для інтеграції метавсесвіту у правове поле держави. Оцінювання ступеня загроз від метавсесвіту дозволить вчасно адаптувати існуючі законодавчі норми та сформувати механізми їх дотримання в новій цифровій реальності.

2 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ЯДРО МЕРЕЖІ 6G НА ОСНОВІ SDN

2.1 Архітектура мережі

Проектування систем стільникового зв'язку п'ятого та шостого поколінь (5G/6G) супроводжується рядом складних завдань, серед яких особливе значення мають забезпечення субмілісекундних затримок, надвисокої доступності та надійності. Для подолання цих викликів використовуються сучасні технології, зокрема програмно-визначені мережі (Software-Defined Networking, SDN), віртуалізація мережевих функцій (Network Functions Virtualization, NFV), а також мобільні граничні обчислення (Mobile Edge Computing, MEC). Це обумовлює високий рівень зацікавленості як академічного середовища, так і комерційних структур до розвитку зазначених напрямів.

У традиційних стільникових мережах велика кількість мережевих функцій реалізуються на основі статичних з'єднань, що ускладнює масштабування системи через високу вартість, підвищене енергоспоживання та труднощі в інтеграції нових сервісів з апаратним забезпеченням. Саме тому технології NFV та SDN покликані вирішити ці обмеження шляхом перенесення мережевих функцій у програмне середовище.

Технологія NFV передбачає реалізацію традиційних мережевих функцій у вигляді програмних модулів, які працюють у віртуалізованому середовищі. Це дозволяє гнучко управляти мережею та знижує залежність від спеціалізованого апаратного забезпечення. NFV використовує інструменти віртуалізації на базі програмованих апаратних платформ, таких як сервери загального призначення, системи зберігання даних та комутатори, що дає змогу відокремити функціональність від фізичної інфраструктури [29]. У цьому контексті активно розробляються стандарти з відкритим вихідним кодом. До провідних ініціатив у сфері NFV належать проєкт MANO (Management and Orchestration), ініційований Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) [30], а також

програмне середовище SONATA, яке орієнтоване на оркестрацію сервісів та підтримку модульної архітектури в 5G-мережах.

Розробка SONATA спрямована на підвищення рівня програмованості та адаптивності сервісної платформи, що дозволяє задовольнити потреби різних постачальників послуг. Окрім того, вона реалізує власну парадигму проєктування та забезпечує підтримку автоматизованої оркестрації мережевих функцій.

Програмно-визначені мережі (SDN) дозволяють фізично розділити площини управління та пересилання даних, що сприяє створенню гнучкої, масштабованої та економічно ефективної архітектури. Площини управління відповідають за прийняття рішень щодо маршрутизації трафіку, а площини пересилання – за фактичну передачу даних відповідно до цих рішень [31]. Для взаємодії між цими площинами застосовуються стандартизовані інтерфейси, зокрема OpenFlow та ForCES. Інтерфейси прикладного програмування (API) забезпечують адміністрування, налаштування та контроль SDN-мереж з боку оператора. Головною метою впровадження SDN є зниження складності апаратної частини мережі та підвищення її адаптивності.

Сучасний розвиток технологій NFV і SDN ознаменував перехід до ери програмно-керованих мереж. Хоча ці технології не є взаємозалежними, їхнє поєднання створює синергійний ефект, що дозволяє суттєво скоротити витрати при реалізації складних IT-інфраструктур [32]. Перші реалізації SDN застосовувалися переважно в академічному середовищі, у дата-центрах та локальних мережах. Стратегічною метою NFV є поступова заміна спеціалізованих проміжних пристроїв стільникових мереж програмними реалізаціями на недорогому серверному обладнанні [33].

Однією з ключових можливостей, які відкриває поєднання SDN та NFV, є реалізація технології сегментації мережі (network slicing). Сегмент (slice) – це логічне об'єднання мережевих функцій і технологій радіодоступу, призначене для обслуговування конкретного випадку використання або сервісу. Це дозволяє

операторам створювати декілька віртуальних мереж з різними параметрами обслуговування на спільній фізичній інфраструктурі.

У межах цієї роботи розглядається побудова оптимізованого алгоритму балансування навантаження для SDN-мереж з мультиконтролерною архітектурою, що може бути застосований у мережах п'ятого та шостого поколінь. Запропонована модель відповідає сучасним вимогам архітектури 6G-мереж.

Архітектура мережі — це структурно-функціональна модель організації телекомунікаційної системи, яка визначає принципи взаємодії її компонентів, логічну і фізичну топологію, рівні управління та протоколи обміну даними. Вона охоплює як апаратне забезпечення (мережеві елементи, вузли маршрутизації, канали зв'язку), так і програмне забезпечення (мережеві протоколи, сервіси, алгоритми керування трафіком і захистом). У сучасних мобільних мережах (5G/6G) архітектура набуває динамічного, гнучкого характеру завдяки використанню таких технологій, як SDN (програмно-визначені мережі), NFV (віртуалізація мережевих функцій), MEC (граничні обчислення) та мережева сегментація (network slicing). Це дозволяє адаптувати мережу до різноманітних сценаріїв використання, забезпечуючи масштабованість, високу продуктивність і енергоефективність.

У сучасному світі з'являється все більше технологій іммерсивної взаємодії в межах інтернет-простору. Однією з інноваційних концепцій є тактильний Інтернет, який дозволяє створювати ефект "переміщення" у просторі та забезпечує передавання відчуттів у режимі реального часу. Одночасно з цим розвивається парадигма мультивсесвітів — віртуальних середовищ, де цифрові об'єкти активно взаємодіють із фізичним світом і подіями. Це уявлення про Інтернет нового покоління, у якому користувачі віртуально взаємодіють між собою та з програмними застосунками у вигляді тривимірних (3D) аватарів, з акцентом на соціальну комунікацію.

Послуги телеприсутності, які передбачають безпосередню взаємодію людини й машини в реальному часі, потребують надзвичайно високого рівня

надійності передавання даних і гарантованої доставки пакетів. Це зумовлює необхідність суворого дотримання параметрів середовища передачі. Відповідно до рекомендації ITU-R M.2083-0 [34], базовими принципами проєктування мереж 5G є гнучкість і варіативність, що дозволяє адаптувати архітектуру до численних сценаріїв використання.

Особливе значення в контексті повноцінної передачі людських сенсорних відчуттів мають параметри затримки й надійності. Для застосунків класу URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications — наднадійний зв'язок з низькою затримкою), час циркуляції сигналу (round-trip delay) має не перевищувати 1 мс, адже такі сервіси є вкрай чутливими до затримок [34, 35]. Зокрема, у випадку телемедицини, кожен рух лікаря, що перебуває на відстані, має миттєво передаватися та відтворюватися на стороні пацієнта, що забезпечує можливість проведення віддалених хірургічних втручань — навіть за умов, коли лікар і пацієнт перебувають у різних країнах.

Крім того, для забезпечення коректної роботи URLLC-застосунків потрібно досягати рівня надійності передачі, що перевищує 99,9999% [36]. Виконання цих вимог є критично важливим для таких галузей, як автономні транспортні системи, телемедицина, промислова автоматизація тощо. Побудова відповідної мережевої інфраструктури передбачає використання сучасних технологій, включаючи аналітику в реальному часі, машинне навчання, обробку великих даних та штучний інтелект [34, 37].

Мережева архітектура, що здатна задовольнити такі вимоги, повинна бути багаторівневою, гнучкою та масштабованою. Її структурні компоненти мають взаємодіяти між собою через визначені інтерфейси. Обов'язковими є функції централізованого управління, моніторингу стану мережі та ефективного розподілу обчислювальних і мережевих ресурсів [37].

Одним із підходів до забезпечення відповідної якості обслуговування URLLC є використання мультиконтролерної архітектури SDN, яка представлена на рисунку 2.1. Така архітектура забезпечує ефективніше використання наявних

ресурсів і дозволяє порівняти її продуктивність із традиційними мережевими рішеннями [38].

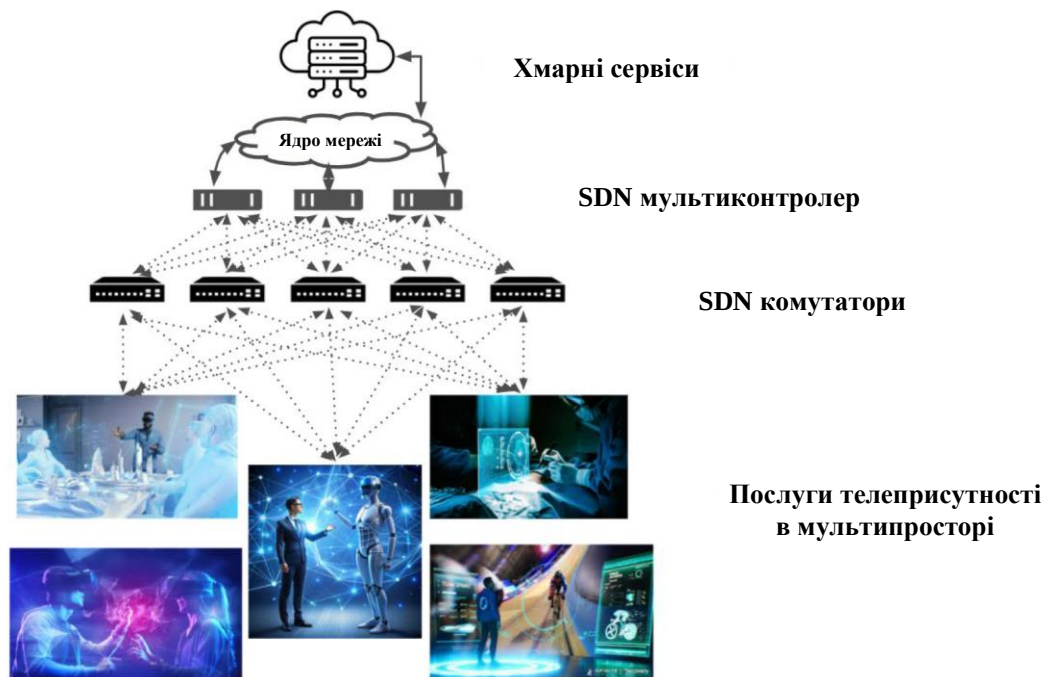


Рисунок 2.1 – Загальна архітектура мережі

Набір розгорнутих контролерів SDN у площині управління позначається як C та визначається наступним чином:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}, N \in R, \quad (2.1)$$

де N — загальна кількість розгорнутих SDN-контролерів. У площині пересилання (data plane) розгорнуто K комутаторів OpenFlow, які розподілені між кластерами контролерів. Кожен комутатор має підключення до одного з SDN-контролерів.

Для розв'язання задачі оптимального розміщення контролерів використано алгоритм хаотичної оптимізації на основі *salp swarm* [38].

Набір розгорнутих OpenFlow-комутаторів позначається як S і визначається наступним чином:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}. \quad (2.2)$$

Зв'язки між OpenFlow-комутаторами та SDN-контролерами відображаються у матриці комутації, у якій рядки відповідають номерам SDN-контролерів, а стовпці — номерам OpenFlow-комутаторів. Символ T позначає загальну кількість OpenFlow-комутаторів, які пов'язані з SDN-контролерами. Приклад матриці комутації має вигляд:

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 2 \\ \vdots \\ M \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Одним із ключових методів оцінювання продуктивності SDN-контролера є вимірювання часу його відгуку, на який найбільший вплив має затримка в черзі обробки запитів. У моделі дослідження передбачено, що розгорнуті SDN-контролери моделюються за допомогою черги типу M/M/s, де кожен контролер має s обчислювальних ядер. Пакети, що надходять для обробки, надсилаються до контролера зі швидкістю, яка підпорядковується розподілу Пуассона, формуючи одноканальну чергу (FIFO) при кожному контролері. У цьому випадку середній час відгуку T_i для i -го контролера визначається за формулою Ерланга наступним чином:

$$T_i(\lambda) = \frac{O\left(s, \frac{\lambda_i}{\mu}\right)}{s\mu_i - \lambda_i} + \frac{1}{\mu},$$

$$O\left(s, \frac{\lambda}{\mu}\right) = \frac{\left(\frac{(s\rho)^0}{s!}\right)\left(\frac{1}{1-\rho}\right)}{\sum_{k=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^k}{k!} + \left(\frac{(s\rho)^0}{s!}\right)\left(\frac{1}{1-\rho}\right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{1-\rho}\right)\left(\frac{s!}{(s\rho)^0}\right)\sum_{k=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^k}{k!}}, \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{\lambda_i}{s\mu},$$

де λ — швидкість надходження пакетів у систему;

λ_i — середня швидкість надходження комп'ютерних задач від усіх комутаторів, підключених до i -го SDN-контролера;

$O(s, \lambda/\mu)$ — ймовірність того, що пакети потрапляють у чергу, коли всі сервери (ядра) контролера зайняті;

μ — інтенсивність обслуговування (середня швидкість обробки запиту одним ядром);

μ_i — швидкість обслуговування i -го граничного пристрою (edge device);

ρ — рівень завантаження серверів (коефіцієнт використання ресурсів), який є показником надійності роботи системи.

Коли контролер досягає своєї максимальної пропускної здатності, інтенсивність обробки обмежується значенням $s\mu$, тобто сумарною продуктивністю всіх ядер, і не може перевищувати це значення.

Швидкість надходження запитів до i -го контролера визначається як сума середніх інтенсивностей трафіку від усіх підключених до нього OpenFlow-комутаторів:

$$\lambda_i = \sum_{s=1}^{k_i} \lambda_s. \quad (2.5)$$

Середнє завантаження контролера L_i визначається як середня кількість запитів, що очікують в черзі на обслуговування, і формалізується наступним чином:

$$L_i(\lambda) = s\rho + \frac{\rho}{1-\rho} O\left(s, \frac{\lambda_i}{\mu}\right). \quad (2.6)$$

2.2 Динамічний розподіл SDN-контролерів

Метою експериментального дослідження є динамічний пошук оптимальної кількості SDN-контролерів, за якої забезпечується мінімальна затримка зв'язку між розподіленими OpenFlow-комутаторами та SDN-контролерами, а також досягається мінімізація вартості побудови та обслуговування мережі. Зазначене оптимальне значення є змінним і адаптується відповідно до поточного рівня навантаження на мережу.

Крім того, задача полягає у визначенні оптимальних маршрутів та зв'язків між комутаторами та контролерами SDN з метою досягнення мініимальної затримки передачі даних та загальних витрат. Ще одним завданням є визначення ефективного розподілу комутаторів між наявними контролерами таким чином, щоб зменшити навантаження на кожен окремий SDN-контролер і покращити балансування навантаження в мережі.

Оптимізаційна задача полягає у динамічному розподілі контролерів, що перебувають у неактивному (сплячому) режимі, або ж у видаленні активних контролерів відповідно до змін у мережевому трафіку. Метою є визначення такого числа SDN-контролерів та їх кластерного розподілу, за якого забезпечується оптимальне співвідношення між затримкою, вартістю, ефективністю використання ресурсів і балансуванням навантаження.

Оптимізаційна модель формулюється як задача мінімізації, що передбачає зменшення таких параметрів: загальної кількості SDN-контролерів у мережі (NT), кількості контролерів у межах одного кластеру (NC), загальної вартості використання SDN-контролерів (C), середньої затримки передачі даних від контролера до підключених OpenFlow-комутаторів (D). Відповідна цільова функція має вигляд:

$$\text{Min } f(N_T, N_C, C, D), \quad (2.7)$$

де при розв'язанні поставленої оптимізаційної задачі необхідно враховувати ряд технічних та функціональних обмежень, які визначають допустимі області пошуку рішень:

1. Затримка зв'язку: затримка між будь-яким OpenFlow-комутатором і призначеним йому SDN-контролером не повинна перевищувати заданого порогового значення. Це необхідно для забезпечення якості обслуговування в реальному часі.

2. Обмеження навантаження на контролер: загальна кількість OpenFlow-комутаторів, підключених до одного SDN-контролера, не повинна перевищувати його допустимий поріг обробки запитів, щоб уникнути перевантаження та деградації продуктивності.

3. Кількість активних контролерів: кількість активних (виведених зі сплячого режиму) контролерів повинна бути не меншою за певне мінімальне значення, необхідне для підтримання відмовостійкості та керованості мережі.

4. Кількість контролерів у кластері: для кожного кластера визначено верхню межу кількості контролерів, яка зумовлена технічними обмеженнями апаратної чи програмної реалізації.

5. Обмеження на відстань: фізична або логічна відстань між комутатором і контролером повинна залишатися в межах допустимого значення, визначеного топологією мережі.

6. Обмеження енергоспоживання: для оптимізації ресурсів важливо мінімізувати кількість активних контролерів, але з урахуванням того, щоб не порушити інші обмеження, зокрема щодо затримки та навантаження.

7. Обмеження зв'язності: кожен комутатор повинен мати гарантований шлях зв'язку щонайменше до одного доступного контролера (зв'язність мережі не повинна порушуватись).

$$T_j \leq T_{thr}, \quad \forall C_i \in C,$$

$$U_{lb} \leq U_i \leq U_{ub}, \quad \forall C_i \in C,$$

$$U_{C-lb} \leq U_C \leq U_{C-ub},$$

де T_i – час відгуку i -го SDN-контролера;

T_{thr} – допустиме (порогове) значення часу відгуку, встановлене для забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS);

C_i – i -й SDN-контролер;

U_{lb} – нижній поріг допустимого рівня завантаження SDN-контролера;

U_{ub} – верхній поріг допустимого рівня завантаження SDN-контролера;

U_{C-lb} – мінімальне значення середньої утилізації кластеру контролерів;

U_{C-ub} – максимальне значення середньої утилізації кластеру контролерів;

U_C – середній рівень завантаження (утилізації) SDN-контролерів у кластері.

Формалізовані обмеження задачі:

1. Обмеження на час відгуку контролера: Кожен SDN-контролер, що входить до складу кластеру j , повинен забезпечувати середній час відгуку не вище допустимого порогу $T_i < T_{thr}$.

Це обмеження гарантує підтримання заданого рівня якості обслуговування (QoS).

2. Обмеження на рівень завантаження контролерів:

Для забезпечення ефективного використання ресурсів контролера його завантаження повинно залишатись у межах визначеного діапазону.

3. Обмеження на середню утилізацію кластера: Для кожного кластеру контролерів необхідно підтримувати баланс навантаження в межах допустимих значень. Це дозволяє уникати надмірного навантаження окремих кластерів та збоїв у роботі сегментів мережі. Після цього вводиться функція корисності (utility function), яка використовується для оцінювання якості рішень. Вона відображає комбінації значень змінних або подій у відповідні дійсні числа, що дозволяє порівнювати альтернативні рішення та обирати оптимальне з них.

$$U : V \rightarrow R. \quad (2.8)$$

Часова утилітарність (або корисність) є першою з функцій, що використовується для відображення ефективності часу відгуку SDN-контролерів. У цьому контексті доцільним є використання функції втрат, яка ефективно моделює поведінку системи при відхиленні часу відгуку від бажаного порогу.

Для моделювання корисності часу обирається квадратична симетрична функція, оскільки вона є аналітично зручною для математичного аналізу та дозволяє відобразити як надлишкову, так і недостатню продуктивність.

Формально, часова функція корисності для i -го контролера, який входить до складу j -го кластера і визначається наступним виразом:

$$U_{T-C_i}^j = \begin{cases} \alpha + \delta(T_{thr} - T_i^j(\lambda))^2, & T_i^j(\lambda) \leq T_{thr} \\ 0, & T_i^j(\lambda) > T_{thr} \end{cases} \quad \forall i \in \gamma \wedge j \in \beta. \quad (2.9)$$

Таким чином, вона стимулює вибір таких конфігурацій системи, при яких час відгуку контролера є максимально наближеним до бажаного рівня обслуговування.

Функція корисності часу відгуку для j -го кластера визначає середню ефективність часу реагування усіх контролерів, що входять до складу даного кластеру. З метою забезпечення порівнянності значень та стабільності обчислень, вона нормалізується. Формально функція розраховується як нормалізоване середнє значення індивідуальних функцій корисності часу відгуку для кожного контролера, що належить кластеру

$$U_T^j = \sum_{N_c} \frac{U_{T-C_i}^j}{N_c} = \left(\sum_{N_c} \begin{cases} \alpha + \delta(T_{thr} - T_i^j(\lambda))^2, & T_i^j(\lambda) \leq T_{thr} \\ 0, & T_i^j(\lambda) > T_{thr} \end{cases} \right) / N_c, \quad (2.10)$$

У моделі корисності часу використовується два параметри — коефіцієнти α та δ , які регулюють поведінку функції корисності часу реагування. Коефіцієнт α запроваджується з метою запобігання надмірному зниженню значення корисності часу у випадках незначних відхилень часу відгуку від порогового значення. Іншими словами, α визначає нижню межу прийнятної корисності, за якої ще вважається, що контролер функціонує у допустимому режимі. Це значення може бути встановлене рівним найменшому припустимому значенню корисності часу, який відповідає мінімально прийнятному рівню якості обслуговування. Коефіцієнт δ у свою чергу, може використовуватись як множник масштабу для налаштування чутливості функції до відхилень часу реагування від еталонного значення. Таким чином, обидва коефіцієнти α та δ можуть бути формалізовані у вигляді наступних співвідношень:

$$\alpha = U_{T-\text{thr}} \quad \forall U_T \in [0,1]; \quad (2.11)$$

$$\delta = \frac{(1 - U_{T-\text{thr}})}{T_{\text{thr}}^2}, \quad \forall U_T \in [0,1]. \quad (2.12)$$

Загальна складність розв'язання задачі оптимізації була знижена завдяки спрощенню її постановки — розглядається лише оптимізація кількості активованих (розгорнутих) SDN-контролерів, без врахування внутрішньої оптимізації їх кількості в межах кожного кластеру.

Це спрощення може призвести до нерівномірного розподілу навантаження між кластерами, проте воно дозволяє зменшити обчислювальну складність задачі приблизно на 57%, що суттєво знижує споживання обчислювальних ресурсів та скорочує час, необхідний для досягнення динамічної адаптації системи до оптимального стану.

Такий підхід виявляється доцільним для голографічних типів зв'язку, де пріоритетом є швидкість реагування системи в умовах обмежених ресурсів.

Водночас для сценаріїв щільного розгортання, які рідко застосовуються в сучасних голографічних мережах, може знадобитися додатковий облік міжкластерного балансування навантаження, що потребуватиме складніших алгоритмічних рішень.

2.3 Результати моделювання

У рамках даного дослідження проведено оптимізацію кількості SDN-контролерів та їх розподілу в мультиконтролерних програмно-визначених мережах на основі підходу, що ґрунтується на параметричній оптимізації. Запропонована методика враховує динамічні зміни мережевого трафіку та дозволяє досягти наступних цілей:

- мінімізація затримок передачі даних між комутаторами та контролерами;
- зменшення енергоспоживання шляхом оптимального керування активними контролерами;
- скорочення витрат на розгортання інфраструктури SDN;
- підвищення надійності мережі за рахунок динамічного балансування;
- зниження обчислювальної складності оптимізаційного процесу.

На рисунку 2.2 представлено середнє значення кількості контролерів, необхідних для функціонування мережі, у двох підходах: традиційному та запропонованому в даній роботі.

Для кожного з підходів було змодельовано десять варіантів, які відповідають різним комбінаціям вхідних параметрів мережі.

Повний перелік параметрів моделювання та їх варіацій наведено в таблиці 2.1, яка слугує основою для порівняльного аналізу результатів.

Як видно з рисунка 2.2, результати моделювання демонструють суттєву різницю між традиційним підходом та запропонованою оптимізаційною методикою. У традиційному методі кількість SDN-контролерів визначається заздалегідь та фіксується незалежно від поточного навантаження на мережу.

Такий підхід не враховує динаміку трафіку, що може призводити до надлишкових витрат ресурсів у періоди низької активності.

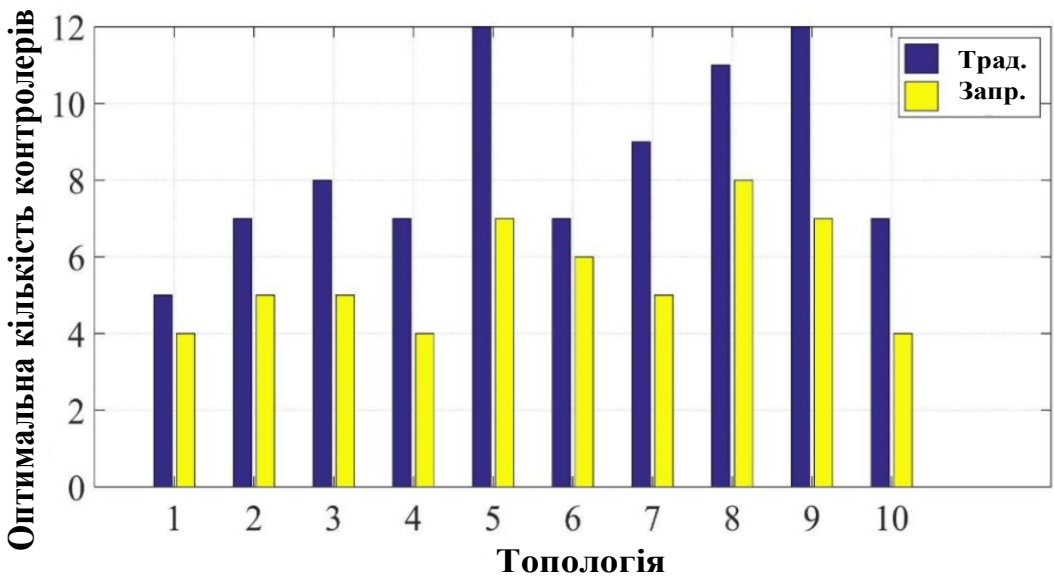


Рисунок 2.2 – Графічне представлення оптимальної кількості контролерів

Таблиця 2.1 – Топології мережі, розглянуті для моделювання

Номер топології	Назва	Кількість контролерів
1	IBM	18
2	Oxford	20
3	SCCN	23
4	AGIS	25
5	Viatel	83
6	GEANT	27
7	TATA	169
8	DFN	47
9	RNP	28
10	Carnet	43

У запропонованому динамічному підході, завдяки адаптивному управлінню кількістю активних контролерів, середня кількість контролерів у мережі зменшується на 46%. Це дозволяє значно скоротити експлуатаційні витрати,

зберігаючи при цьому прийнятний рівень якості обслуговування (QoS). Таким чином, реалізація адаптивної схеми управління контролерами є доцільною з погляду як продуктивності, так і економічної ефективності, особливо в умовах змінного навантаження в мережах нового покоління.

Як показано на рисунку 2.3, результати аналізу завантаження контролерів вказують на суттєву різницю у поведінці традиційного та запропонованого методів. У традиційному підході, через фіксоване та негнучке розподілення ресурсів, спостерігається ефект простою контролерів — частина з них залишається недостатньо завантаженою або навіть неактивною протягом тривалого часу. Це призводить до неефективного використання обчислювальних потужностей. У запропонованому динамічному методі, завдяки оптимізації топології керування та адаптивному розміщенню контролерів, середнє завантаження контролерів суттєво зростає, що свідчить про усунення ефекту простоювання. Контролери опрацьовують більший обсяг запитів, що позитивно впливає на загальну продуктивність мережі.

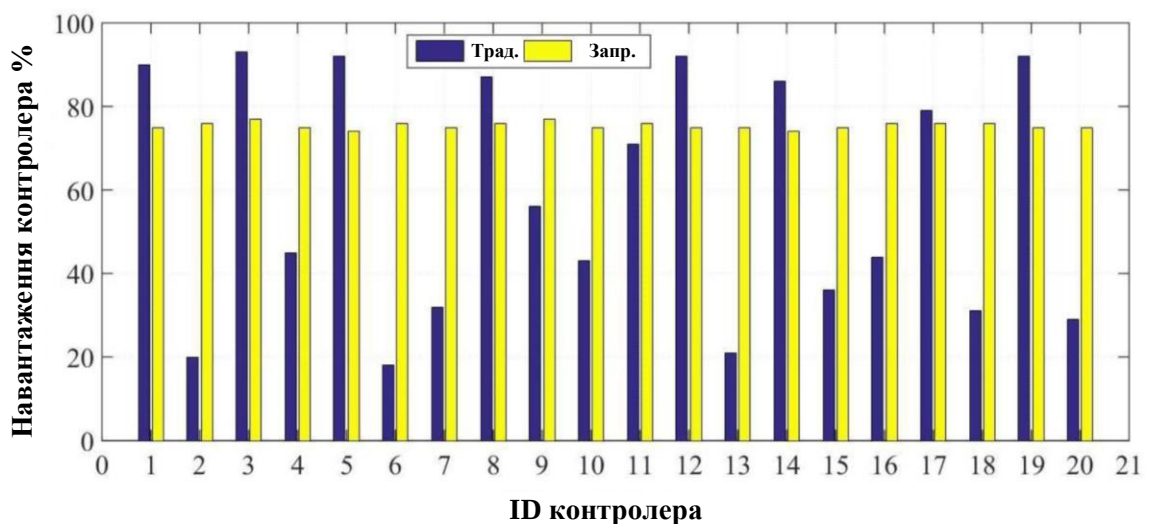


Рисунок 2.3 – Завантаження контролерів

Запропонована стратегія дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між активними контролерами, при цьому середній рівень завантаження збільшується на 53% у порівнянні з традиційною схемою. Водночас він не

перевищує допустимого порогового значення у 80%, що гарантує стабільність та надійність функціонування кожного контролера. Таким чином, результати підтверджують, що адаптивна модель не лише підвищує ефективність використання ресурсів, але й знижує витрати за рахунок усунення надмірного резервування обчислювальних потужностей.

2.4 Висновки до розділу 2

У роботі розроблено метод підвищення ефективності використання мережевих ресурсів інтегрованої мережі 6G, що враховує особливості трафіку при наданні послуг телеприсутності. Основні результати дослідження полягають у наступному:

1. Запропонований метод оптимізації кількості контролерів у мультиконтролерних SDN-мережах демонструє суттєві переваги у порівнянні з традиційним підходом. Завдяки динамічному керуванню середня кількість контролерів знижується на 46%, що сприяє зменшенню енергоспоживання, скороченню витрат на розгортання мережі, а також підвищенню її надійності.

2. Метод забезпечує підвищення ефективності використання контролерів на 53% за рахунок динамічного балансування навантаження між ними у мультиконтролерних SDN-мережах. Це суттєво знижує експлуатаційні витрати на розгортання та обслуговування мережевої інфраструктури.

Результати підтверджують доцільність застосування розробленого підходу для сучасних інтегрованих мереж нового покоління, зокрема 6G, у яких якість обслуговування та ефективність ресурсів є критично важливими.

З ІНТЕГРАЦІЯ МЕРЕЖЕВИХ МАРШРУТИЗАТОРІВ

3.1 Модель розміщення маршрутизаторів на базі рою БПЛА

Розвиток мереж зв'язку спрямований на покращення ключових показників якості обслуговування, зокрема досяжної швидкості передавання даних, затримки доставки інформації та загальної пропускної здатності мережі [20–24]. Технології зв'язку п'ятого покоління (5G) і наступних за ним поколінь орієнтовані на надання сервісів, чутливих до затримок і вимогливих до швидкості передавання.

Зростання популярності сервісів віртуальної та доповненої реальності, а також подальший розвиток технологій телеприсутності [25] зумовлюють необхідність підтримки високої якості обслуговування мережевого трафіку. Зокрема, актуальним є забезпечення ефективної передачі трафіку голографічних зображень [26] та інформації, яку формують костюми телеприсутності – пристрої, що забезпечують інтерфейс взаємодії користувача з метавсесвітом [27].

Метавсесвіт передбачає створення віртуального простору, придатного для реалізації різних форм активності – від навчання та торгівлі до інтерактивних ігор – і розглядається як наступний етап еволюції Інтернету. Підтримка AR/VR-додатків надає можливість реалізовувати віддалені послуги, які наближаються за якістю до фізичної присутності. Для повноцінного функціонування додатків метавсесвіту необхідно вирішити дві критичні інженерні задачі – синхронізацію даних у реальному часі та забезпечення безперервного покриття бездротової мережі. Це особливо важливо, враховуючи використання носимих бездротових пристроїв у сервісах телеприсутності.

Використання високочастотних діапазонів у мережах 5G та заплановане впровадження частот до 1 ТГц у 6G призводить до значного збільшення затухання сигналу. Це робить традиційне розгортання базових станцій у малонаселених передмістях економічно недоцільним [28]. Одним із потенційних

рішень є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для забезпечення мережевого покриття та синхронізації даних у таких зонах.

Костюми телеприсутності, а також інші пристрої, здатні фіксувати динаміку рухів користувача, генерують особливий тип трафіку, який суттєво відрізняється від класичних відео- або зображень-орієнтованих даних. Такий трафік вимагає гарантованої якості обслуговування (QoS) для забезпечення коректної роботи додатків. Одним із способів досягнення цього є використання механізмів пріоритезації трафіку або виділення додаткових мережевих ресурсів.

Підвищення ключових показників якості зв'язку досягається шляхом впровадження інноваційних технічних рішень, нових архітектур та моделей організації мереж. Найбільшим обмеженням при цьому залишаються мережі радіодоступу, де головним вузьким місцем є обмеження радіочастотного ресурсу. Ефективною стратегією виступає підвищення досяжної швидкості передачі. У процесі розвитку мобільного зв'язку спостерігається постійне зростання ширини смуги частот та робочих частот, що пояснюється потребою в підвищенні пропускної здатності.

Відповідно до формули Шенона [29], досяжна швидкість передачі інформації прямо пропорційна ширині смуги пропускання та логарифму відношення сигнал/шум (SNR). Попри тенденцію зниження SNR зі зростанням смуги, збільшення ширини є одним із найпростіших способів підвищення швидкості, хоча й супроводжується численними технічними викликами, зокрема у сфері апаратної реалізації.

У мережах 6G розглядається можливість використання субміліметрового діапазону частот аж до 1 ТГц [33]. Сигнали в цьому діапазоні мають характеристики, близькі до оптичного випромінювання, а ефективна передача можлива лише на коротких відстанях у зоні прямої видимості між передавачем і приймачем. Це зумовлює потребу у вирішенні низки проблем, пов'язаних з генерацією, модуляцією, прийомом і обробкою сигналів на таких частотах, а також створенням антенних систем [30, 31].

Особливості поширення хвиль у субміліметровому діапазоні вимагають спеціальних рішень на рівні архітектури мережі доступу. Так, затінення сигналу об'єктами, зокрема людським тілом, може призвести до повної втрати з'єднання. Це вимагає збільшення кількості точок доступу (антен) та ефективного механізму управління ними.

Одним із перспективних напрямів забезпечення покриття в умовах обмеженої інфраструктури є застосування мобільних маршрутизаторів. Вже зараз доступні автономні 5G-маршрутизатори [32], здатні створювати локальні мережі стандарту IEEE 802.11. Їх головне призначення – забезпечення високошвидкісного підключення до мережі 5G.

Для забезпечення ефективної роботи в субміліметровому діапазоні критично важливо дотримуватися умов малої відстані та прямої видимості між маршрутизатором і базовою станцією. Одним із способів вирішення цієї задачі є розміщення маршрутизаторів на борту безпілотних літальних апаратів [33–35]. У цій роботі запропоновано метод використання одного або групи БПЛА для розміщення мережевих маршрутизаторів та організації обслуговування користувачів у складних умовах прийому сигналу.

У загальному випадку при розміщенні мережевого маршрутизатора на безпілотному літальному апараті виникає необхідність вирішення задачі вибору оптимальної точки його позиціонування у просторі. Існує два основні сценарії:

1. Стаціонарне розміщення БПЛА, зокрема прив'язні платформи [36], які залишаються фіксованими у визначеній точці;
2. Динамічне розміщення БПЛА, коли апарат може змінювати своє положення відносно кінцевих користувачів або інших елементів мережі.

Ці сценарії відрізняються характером переміщення апаратів та вимогами до підтримки структури мережі. У випадку стаціонарного БПЛА топологія мережі залишається сталою, а отже, не потребує постійної адаптації. Натомість у випадку мобільних БПЛА виникає потреба в динамічному управлінні топологією, що включає переналаштування маршрутів передачі даних у режимі реального часу.

У незалежності від обраного сценарію, необхідно вирішити дві фундаментальні задачі:

1. Оптимальне розміщення БПЛА з урахуванням положення користувачів і доступності базових станцій мобільного зв'язку;
2. Формування логічної структури мережі, тобто побудова маршрутів передавання трафіку в межах мережі типу mesh (коміркова топологія).

Умовну модель запропонованої мережі представлено на рисунку 3.1. У ній розглядаються два випадки: одиночний БПЛА, на якому розміщено маршрутизатор, що виконує роль точки доступу для користувачів у межах власного радіуса покриття; рій БПЛА, у якому маршрутизатори організовані в mesh-мережу, що забезпечує багатоступеневу маршрутизацію трафіку.

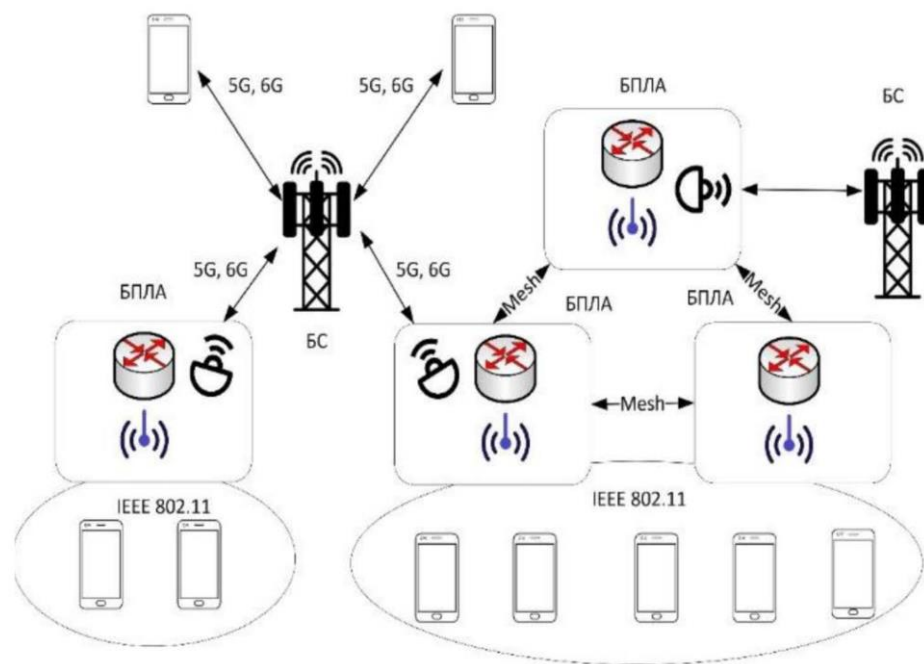


Рисунок 3.1 – Модель мережі з використанням маршрутизаторів на БПЛА

У складі рою один або кілька БПЛА мають прямий доступ до базових станцій мобільного оператора. Решта апаратів можуть передавати трафік через міждронові канали зв'язку. Залежно від мережеских умов, маршрутизатори на борту БПЛА можуть виконувати такі функції: передача трафіку до/від базової

станції; організація маршрутизації всередині рою (інтер-дроновий зв'язок); обслуговування кінцевих користувачів у зоні покриття.

Використання групи БПЛА дозволяє охопити зв'язком користувачів, розподілених на значній території, та забезпечити надійний маршрут передачі даних до мережі мобільного зв'язку, навіть у складних умовах розміщення або затінення сигналу.

3.2 Вибір позиції маршрутизатора

Вибір оптимального просторового розміщення маршрутизатора на базі БПЛА є ключовою задачею при побудові адаптивної бездротової мережі, особливо в умовах динамічних змін середовища, рухомих користувачів та обмеженого енергоресурсу апаратів.

При визначенні положення маршрутизатора враховуються наступні фактори:

Покриття користувачів: позиція БПЛА повинна забезпечувати максимальне число користувачів у межах радіуса надійного зв'язку R при заданому рівні потужності сигналу (наприклад, забезпечення мінімального SNR).

Якість каналу зв'язку з базовою станцією: БПЛА повинен або мати пряме з'єднання з базовою станцією, або бути частиною маршруту до неї через інші дрони.

Мінімізація затримки: трафік від користувачів повинен передаватись маршрутом із найменшою загальною затримкою.

Енергетична ефективність: бажано мінімізувати енерговитрати, пов'язані з польотом і передачею даних.

Стійкість до перешкод: положення має враховувати наявність фізичних об'єктів, що можуть блокувати або послаблювати сигнал (наприклад, будівлі, ландшафт).

Розглянемо випадок, коли наявна група з n маршрутизаторів. У загальному випадку їх кількість може бути заздалегідь задана або обмежена зовнішніми умовами.

Для визначення оптимальних позицій розміщення точок доступу найчастіше застосовуються методи кластерного аналізу [38]. При цьому об'єктами кластеризації виступають кінцеві користувачі, а центри виявлених кластерів приймаються як позиції для розміщення маршрутизаторів.

Задача кластеризації, як правило, вирішується за допомогою таких алгоритмів, як k -середніх, DBSCAN, FOREL [38]. У роботі [20] також запропоновано підхід, заснований на фрактальних властивостях топології мережі. Кожен із вказаних алгоритмів має свої переваги та обмеження.

Алгоритм k -середніх доцільно використовувати у разі рівномірного розподілу користувачів та заздалегідь відомої кількості кластерів. При збільшенні числа об'єктів форма кластера прагне до багатогранника.

DBSCAN ефективний за наявності виражених скупчень користувачів, причому щільність об'єктів у межах кластера має бути приблизно однаковою. Кластери можуть мати довільну форму.

FOREL придатний як для рівномірного розподілу користувачів, так і для виражених згущень, а типова форма кластера при цьому наближається до кола. Алгоритми на основі фрактальних властивостей працюють добре в умовах складної ієрархічної структури розміщення абонентів.

У рамках даної задачі алгоритм кластеризації повинен не лише виділяти групи користувачів (кластери), а й враховувати просторове розташування цих груп відносно одна одної, оскільки маршрутизатори, що розміщуються в центрах кластерів, мають формувати зв'язну міжсобою mesh-мережу. Крім того, ця мережа повинна мати доступ до інфраструктури мобільного зв'язку, тобто бути зв'язною з базовими станціями.

У подальшому пропонується алгоритм, розроблений на основі кластеризаційного підходу FOREL [21]. Застосування саме цього методу є доцільним з кількох причин. По-перше, у ньому явно задається максимальний

розмір кластера R , який інтерпретується як гранична відстань між користувачами та точкою доступу. Це дозволяє безпосередньо зв'язати просторові характеристики мережі із параметрами якості обслуговування.

Зокрема, якщо відома залежність між максимально допустимою відстанню R та досяжною швидкістю передавання даних b , тобто $R = f(b)$, тоді

$$R = \arg \{b_{\min} = f(R)\} \quad (3.1)$$

де $b_{\min}$ — мінімально допустима швидкість передавання даних, яка задається як вхідний параметр при проєктуванні мережі.

Функціональна залежність $f(R)$, що описує зв'язок між радіусом покриття маршрутизатора R та швидкістю передавання даних, є специфічною для обраного стандарту або групи бездротових стандартів і може бути визначена відповідно до їхніх технічних характеристик [22].

Для забезпечення універсальності така залежність може бути апроксимована на основі відомого виразу К. Шеннона з урахуванням поправкового коефіцієнта α , що враховує вплив фізичного середовища, параметри модуляції, тип використовуваного протоколу та інші фактори:

$$b(R) = \alpha w \log_2 (1 + \gamma(R)) \quad (3.2)$$

де α — поправковий коефіцієнт, що враховує відмінність реальної технології передавання від ідеалізованої аналітичної моделі, яка описує теоретично досяжну швидкість;

γ — відношення сигнал/шум (SNR);

w — ширина смуги пропускання каналу в герцах (Гц).

У загальному випадку виконується нерівність $0 < \alpha$.

При відсутності просторово-часового мультиплексування (наприклад, MIMO), коефіцієнт α зазвичай менший за одиницю: $0 < \alpha < 1$. У разі застосування

технологій MIMO, які дозволяють передавати кілька потоків одночасно в одному частотному каналі, значення α може перевищувати одиницю, що обумовлено підвищеною ефективністю використання спектра.

Відношення сигнал/шум $\gamma(R)$, що залежить від відстані R між передавачем (БПЛА-маршрутизатором) та приймачем (користувачем), може бути описано за допомогою спрощеної моделі загасання сигналу:

$$\gamma(R) = \frac{s_{RX}}{p_n} = \frac{1}{p_n} a(R) s_{TX} \quad (3.3)$$

де $a(R)$ — залежність загасання сигналу від відстані; в якості функції $a(R)$ може бути використана одна з відомих моделей втрат сигналу [23].

Залежність швидкості передавання даних від відстані згідно зі стандартом IEEE 802.11ac при ширині смуги $w = 20$ МГц наведена на рисунку 3.1 (синя крива).

Червона крива побудована відповідно до виразу (3.2) при тих самих умовах $w = 20$ МГц і з поправковим коефіцієнтом $\alpha = 0,5$.

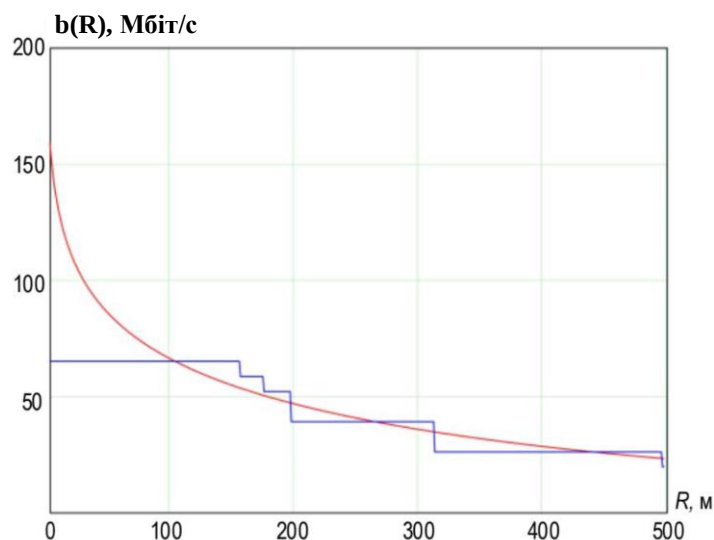


Рисунок 3.2 – Залежність швидкості передавання даних від відстані між обладнанням користувача та точкою доступу

Одним із ключових параметрів, що впливають на якість обслуговування у бездротовій мережі, є швидкість передавання даних b , яка істотно залежить від відстані R між кінцевим користувачем та точкою доступу (зокрема, маршрутизатором на борту БПЛА).

У більшості стандартів бездротового зв'язку (наприклад, IEEE 802.11ac) швидкість передавання даних зменшується зі збільшенням відстані через зниження рівня сигналу та погіршення відношення сигнал/шум (SNR). При цьому використовується адаптивне модуляційне та кодове управління (AMC), що динамічно підлаштовує параметри модуляції й корекції помилок залежно від поточних умов каналу.

Побудований графік демонструє досить високу точність апроксимації, що забезпечується моделлю (3.2), порівняно із залежністю, отриманою на основі стандарту. Найбільше відхилення між теоретичною та емпіричною кривими спостерігається на малих відстанях, тобто при високих значеннях відношення сигнал/шум. Це пояснюється технологічними обмеженнями та особливостями протоколу, які враховані в реальному стандарті, але не охоплюються аналітичною моделлю.

Застосування обраного підходу до кластеризації дозволяє вирішити задачу мінімізації сумарних відстаней між елементами (користувачами) та центрами відповідних кластерів, що відповідають позиціям маршрутизаторів. У контексті формального опису системи, поданого вище, цільова функція кластеризації може бути записана у вигляді:

$$O = \max_{c_j, j=1 \dots n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} b(c_j, u_{ji}) \quad (3.4)$$

де $b(c_j, u_{ji}) = b(d(c_j, u_{ji}))$ — досяжна швидкість передавання даних між центром j -го кластера та i -м елементом цього ж кластера,

$d(c_j, u_{ji})$ — відстань між центром j -го кластера та i -м елементом відповідного кластера.

Таким чином, застосування даного методу дозволяє обрати такі положення центрів кластерів (тобто позицій точок доступу), за яких сумарна швидкість передавання даних у мережі буде максимальною. При цьому умова (3.1) гарантує, що жоден з користувачів не отримає швидкість нижчу за мінімально допустиме значення.

Розв'язання задачі у формі (3.4) забезпечує позиції центрів кластерів, які є близькими до оптимальних щодо просторового розташування користувачів. Однак у цьому випадку необхідно також враховувати положення центрів кластерів відносно базових станцій мережі мобільного зв'язку та один одного.

Введемо наступні позначення:

R_C — радіус зони зв'язку всередині кластера (між користувачами та маршрутизатором),

R_M — радіус зони зв'язку маршрутизатора з базовою станцією мережі мобільного зв'язку.

Ці параметри повинні бути включені до кластеризаційного алгоритму як обмеження, що визначають допустимі зони розміщення центрів кластерів.

Особливість даного алгоритму полягає в тому, що вибір положень центрів кластерів здійснюється з урахуванням зазначених обмежень, а саме:

$$\begin{aligned} \exists j \in \{1 \dots n\}, \quad d(c_j, B) \leq R_M \\ \exists (j, i) \in \{1 \dots n\}, \quad j \neq i, \quad d(c_j, c_i) \leq R_C \end{aligned} \quad (3.5)$$

Зазначені обмеження фактично встановлюють такі вимоги: щонайменше один із маршрутизаторів має перебувати в зоні дії базової станції мережі мобільного зв'язку, а кожен маршрутизатор повинен бути в зоні зв'язку щонайменше з одним із сусідніх маршрутизаторів.

Ці умови забезпечують зв'язність між маршрутизаторами, розміщеними на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), а також зв'язок усієї мережі з інфраструктурою мобільного зв'язку.

Крім того, зазначені обмеження можуть бути посилені шляхом введення таких параметрів: $r_{\min}$ — мінімально допустима кількість зв'язків (зв'язаних сусідів) для кожного маршрутизатора в межах mesh-мережі; $M_{\min}$ — мінімальна кількість маршрутизаторів, які повинні мати прямий зв'язок із базовими станціями мережі мобільного зв'язку.

Завдяки введенню цих умов можна підвищити стійкість мережі до збоїв і забезпечити резервування маршрутів у разі втрати зв'язку окремих елементів.

$$\begin{aligned} \exists J \in \{1 \dots n\}, \quad |J| \geq M_{\min}, \quad d(c_j \in J, B) \leq R_M \\ \exists L \in \{1 \dots n\}, \quad |L| \geq r_{\min}, \quad d(c_j \in L, c_i \in L) \leq R_C, \quad j \neq i \end{aligned} \quad (3.6)$$

Особливість обчислення положення центру кластера полягає в тому, що при цьому додатково враховується відстань до центру найближчого сусіднього кластера. Регулюючи відповідний параметр, можна змінювати «тяжіння» центру формованого кластера до найближчого сусіда, тим самим впливаючи на топологію розміщення кластерів і забезпечуючи їхню просторову зв'язність.

Поданий вище алгоритм описує загальний тривимірний випадок, у якому кожен кластер моделюється у вигляді сфери з фіксованим або змінним радіусом. Однак, через недостатню наочність візуалізації результатів кластеризації у тривимірному просторі, на рисунку 3.3 наведено приклад реалізації кластеризації у двовимірному випадку.

У цьому прикладі моделюється кластеризація 1000 користувачів, рівномірно розподілених на площині. Для генерації просторового розташування абонентів застосовується точковий процес Гіббса [24], який дозволяє моделювати різні типи просторових взаємодій між об'єктами, включаючи ефекти відштовхування або групування.

Наведемо лістинг програми кластеризації на основі точкового процесу Гіббса у Python, з використанням бібліотек numpy, matplotlib, sklearn і pointpats (для генерації просторових точкових процесів):

```
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.cluster import KMeans
from pointpats import gibbard
# Параметри моделювання
n_points = 1000
window_size = 100 # розмір області моделювання
# Генерація точок за процесом Гіббса
# (відштовхуючий процес — моделює просторову регулярність
користувачів)
points = gibbard.GibbsHardCore(n=n_points, window=[[0, window_size], [0,
window_size]],
                                radius=5, max_iter=1000).points
# Кластеризація — наприклад, 10 кластерів
n_clusters = 10
kmeans = KMeans(n_clusters=n_clusters, random_state=42)
labels = kmeans.fit_predict(points)
centroids = kmeans.cluster_centers_
# Візуалізація
plt.figure(figsize=(10, 8))
plt.scatter(points[:, 0], points[:, 1], c=labels, cmap='tab10', s=15,
label='Користувачі')
plt.scatter(centroids[:, 0], centroids[:, 1], c='black', marker='x', s=100,
label='Центри кластерів')
plt.title("Кластеризація користувачів, згенерованих процесом Гіббса")
plt.xlabel("X, м")
plt.ylabel("Y, м")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.axis("equal")
plt.show()

```

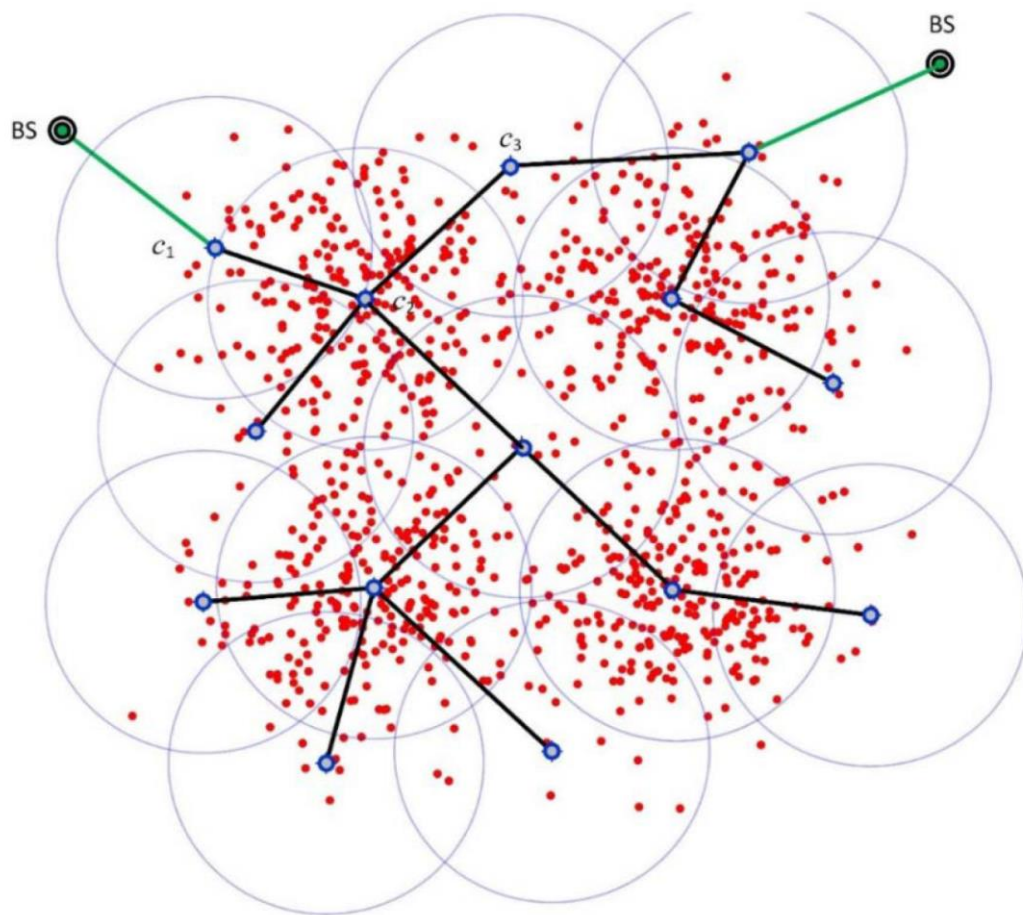


Рисунок 3.3 – Результати кластеризації та вибору структури мережі

Такий підхід дає добрі результати переважно у випадках наявності виражених скупчень користувачів, розміри яких не перевищують заданий радіус кластера R . В іншому разі розміри кластерів можуть істотно відрізнятися між собою.

У таких ситуаціях доцільно після завершення основного алгоритму виконати процедуру перерозподілу елементів шляхом віднесення кожного елемента до найближчого центру кластера. Після проведення операції перерозподілу кластери набувають форми многокутників, межі яких визначаються за допомогою діаграми Вороного [25], побудованої відносно знайдених центрів кластерів. Приклад такої кластеризації з візуалізацією діаграми Вороного наведено на рисунку 3.4.

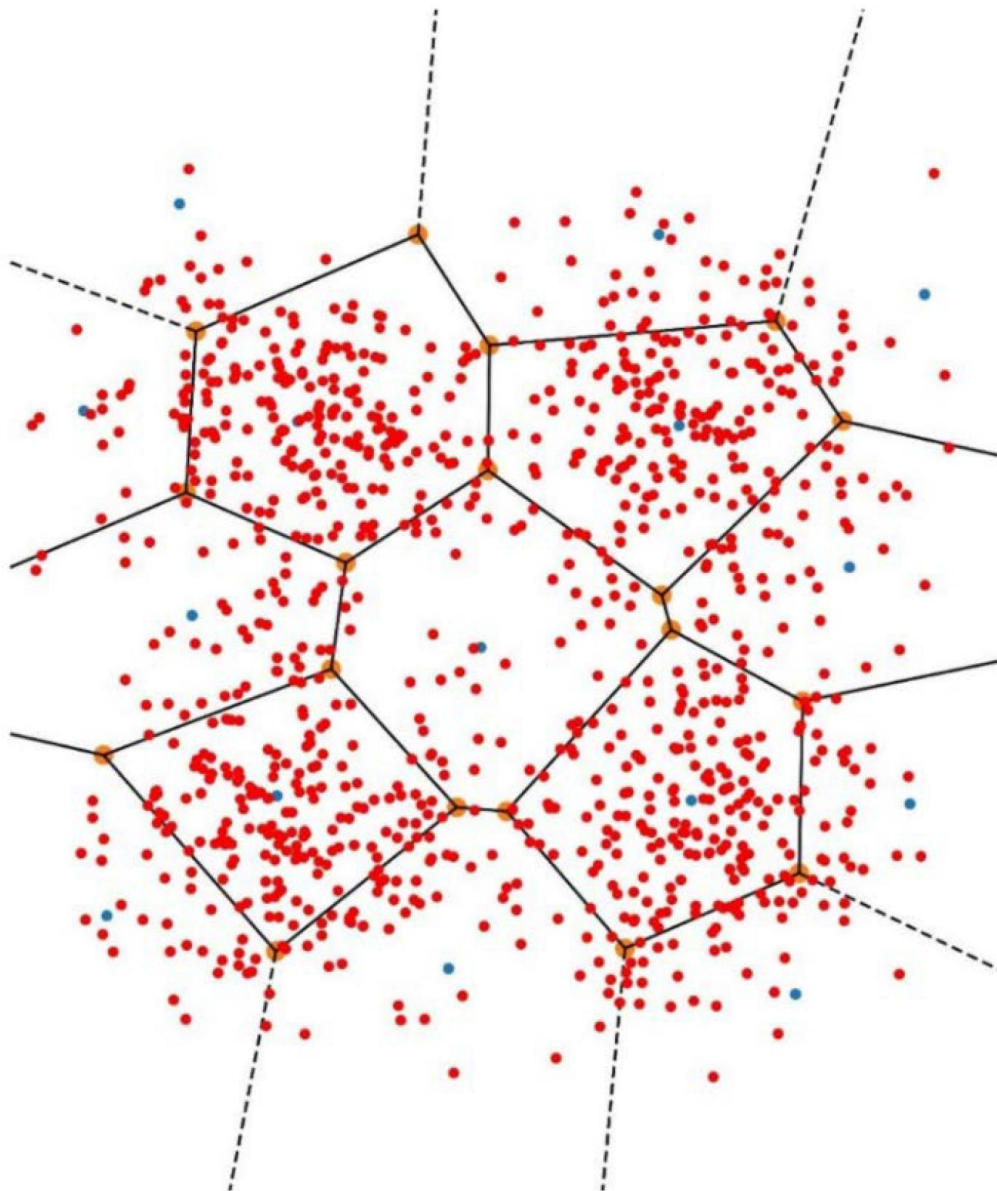


Рисунок 3.4 – Результат модифікації форми кластерів

В якості критерію доцільності виконання операції перерозподілу елементів між кластерами пропонується використовувати дисперсію кількості елементів у кластерах, яка визначається за формулою:

$$cond = \begin{cases} true & D_{II}(K) < D_I(K) \\ false & D_{II}(K) \geq D_I(K) \end{cases}, \quad (3.8)$$

де D_I , D_{II} — дисперсії кількості елементів у кластерах для алгоритму відповідно без перерозподілу елементів та з перерозподілом.

Дисперсії для обох випадків можуть бути обчислені за формулою:

$$D(K) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_i - E(K))^2, \quad E(K) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (3.9)$$

де n — кількість кластерів,

K_i — кількість елементів у i -му кластері.

Запропонований метод та відповідний алгоритм дозволяють здійснити кластеризацію користувачів у межах заданої зони обслуговування з урахуванням допустимих відстаней між центрами кластерів, а також допустимих відстаней до базових станцій мережі мобільного зв'язку.

Завдяки цим властивостям метод забезпечує побудову зв'язної mesh-мережі, що базується на маршрутизаторах, розміщених у центрах кластерів, і підтримує зв'язок із базовою інфраструктурою мобільного зв'язку.

Алгоритм кластеризації гарантує формування кластерів таким чином, щоб максимізувати якість обслуговування користувачів, відповідно до заданих технічних параметрів і просторових обмежень.

3.3 Маршрутизація інформаційного трафіку

Після формування структури кластерів та визначення позицій маршрутизаторів на БПЛА наступним ключовим етапом є маршрутизація трафіку між користувачами та базовими станціями мобільної мережі.

У побудованій mesh-мережі маршрутизатори виконують роль вузлів ретрансляції, що дозволяє організувати багатохопові з'єднання у випадках, коли прямий зв'язок між користувачем і базовою станцією є неможливим або неефективним (наприклад, через перешкоди або обмеження зони покриття).

Основні принципи маршрутизації:

- Підтримання зв'язності всієї мережі з базовою станцією при мінімальній кількості хопів (перехоплень);
- Вибір маршрутів з максимальною пропускнуою здатністю та мінімальною затримкою;
- Урахування поточної топології та якості каналів зв'язку (наприклад, SNR, доступна швидкість, рівень завантаження вузлів);
- Адаптація до змін (наприклад, переміщення БПЛА, зміна кількості активних користувачів або порушення зв'язку).

Для реалізації маршрутизації можуть бути застосовані такі типи протоколів:

- Протоколи з урахуванням якості каналу (QoS-aware routing);
- Алгоритми динамічного маршрутизування (наприклад, AODV, DSR, OLSR), адаптовані до мереж із мобільними вузлами;
- Протоколи на основі метаввристик, таких як мурашині алгоритми, генетичні алгоритми або алгоритми рою частинок — для знаходження найкращих маршрутів за множиною критеріїв.

З метою забезпечення ефективності обміну даними у мережі пропонується використовувати комбіновані підходи, які поєднують: локальну маршрутизацію всередині кластера (користувач $\rightarrow$ маршрутизатор); міжкластерну маршрутизацію (маршрутизатор $\rightarrow$ маршрутизатор); глобальну маршрутизацію до базової станції (маршрутизатор $\rightarrow$ БС).

Знайдені позиції маршрутизаторів (тобто центри кластерів) об'єднуються у mesh-мережу, структура якої може бути побудована на основі найкоротших маршрутів між відправником і одержувачем трафіку.

Під найкоротшим маршрутом у даному контексті розуміється маршрут, який забезпечує найвищу якість обслуговування (QoS) при передаванні даних.

Якість обслуговування (QoS) розглядається як функція таких основних характеристик: досяжна швидкість передавання даних (bitrate); затримка доставки пакета (latency); ймовірність втрати даних (packet loss probability).

З урахуванням зазначених критеріїв, структура mesh-мережі може бути описана матрицею з'єднань або матрицею вагового графа, де вага кожного ребра

визначається агрегованим показником QoS між відповідною парою маршрутизаторів:

$$ST = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{n1} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix}, \quad l_{ij} = \begin{cases} q_{ij} & l_{ij} \leq R_c \\ \infty & l_{ij} > R_c \end{cases} \quad (3.10)$$

де q_{ij} — інтегральний показник якості лінії зв'язку між вузлами мережі;

l_{ij} — технічна характеристика лінії зв'язку між вузлами, що враховує фізичні та протокольні параметри з'єднання.

У якості показника якості q_{ij} пропонується використовувати інтегральну метрику, яка комплексно враховує такі параметри:

$$q_{ij} = -\omega_1 b_{ij} + \omega_2 \rho_{ij} + \omega_3 p_{ij} \quad (3.11)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — коефіцієнти умовної вартості одиниці відповідного показника.

Ці коефіцієнти відображають відносну важливість кожного з параметрів у загальній оцінці якості обслуговування.

Інтегральний показник має сенс умовного виграшу або витрат, залежно від знаку його компонент. Знак доданка у виразі (3.11) є додатним для таких характеристик, зростання яких призводить до зростання умовних витрат, тобто — до погіршення якості обслуговування.

У такому випадку, використання будь-якого відомого алгоритму пошуку найкоротшого шляху для мережі, описаної матрицею (3.10), дозволяє знайти маршрут, що мінімізує сумарне значення інтегрального показника на шляху від джерела до приймача. Формально це можна записати як:

$$\Omega_{st} = \arg \left(\Omega_{st} = \Omega_{st} \cup q_{ij} \mid \min_{q_{ij} \in ST} \sum_{r=1}^{L_{qj}} q_{ij}, \quad i, j = 1 \dots n, \quad i \neq j \right) \quad (3.12)$$

де Ω_{st} — множина вершин (вузлів), що входять до найкоротшого шляху між початковою вершиною s та кінцевою вершиною t .

Для знаходження всіх найкоротших шляхів у мережі, описаній матрицею ваг може бути використаний, наприклад, алгоритм Данцига [26], який дозволяє ефективно розв'язувати задачу найкоротших шляхів у зважених графах, зокрема для повністю зв'язних або щільних топологій.

3.4 Оцінювання ефективності запропонованих методів

Для оцінки ефективності запропонованих методів, в якості альтернативного підходу було обрано немодифікований алгоритм FOREL. При його застосуванні розміщення маршрутизаторів у зоні обслуговування не гарантує зв'язності mesh-мережі та доступу до мережі мобільного зв'язку.

У такому випадку позиції маршрутизаторів визначаються виключно просторовим розподілом користувачів і не обмежуються умовами взаємного розташування. Внаслідок цього зв'язність побудованої мережі є випадковою величиною.

Якщо маршрутизатори, розміщені у вибраних позиціях (тобто центрах кластерів), не утворюють зв'язної топології, то користувачі, підключені до відповідних точок доступу, втрачають можливість обміну даними з іншими частинами мережі та доступу до зовнішньої інфраструктури.

Таким чином, для порівняння ефективності методів кластеризації найбільш репрезентативною характеристикою є зв'язність мережі, сформованої шляхом розміщення маршрутизаторів.

Зв'язність мережі може бути кількісно описана через ймовірність її зв'язності, яку доцільно оцінювати як частку можливих маршрутів у мережі, що фактично реалізуються:

$$con = \frac{n_e}{(n+1)^2} \quad (3.13)$$

де n — кількість кластерів (маршрутизаторів),

n_e — кількість дійсно доступних маршрутів у мережі.

Величина $(n+1)^2$ — це максимально можлива кількість маршрутів між усіма n вузлами мережі та одним вузлом, що представляє базову станцію мережі мобільного зв'язку. Така кількість маршрутів досягається у випадку повної зв'язності мережі.

Ймовірність зв'язності визначена за формулою (3.13), у разі використання немодифікованого алгоритму не перевищує одиниці, оскільки зв'язність залежить від випадкової топології, сформованої без урахування обмежень.

У випадку ж застосування модифікованого алгоритму кластеризації, який враховує обмеження на відстані та зону покриття, ймовірність зв'язності завжди дорівнює одиниці. Таким чином, величину $1 - con$ доцільно розглядати як виграш, отриманий у результаті використання запропонованого методу:

$$e = 1 - con \quad (3.14)$$

Цю величину визначає радіус зони зв'язку маршрутизаторів типу R_C і R_M . Припускаючи, що ці радіуси однакові (тобто $R_C = R_M$), можна оцінити залежність параметра e від відношення R_C/W , де W — розмір зони обслуговування.

Застосування методу є доцільним у випадках, коли радіус зони зв'язку маршрутизаторів у мережі типу mesh менший за розмір зони обслуговування. Це є природним, оскільки за умови великого радіуса зони зв'язку розташування маршрутизатора стає практично нерелевантним з погляду забезпечення зв'язності.

У наведеному прикладі, для зони обслуговування розміром 500×500 м та заданого просторового розподілу користувачів, при радіусі зони зв'язку маршрутизатора, що становить приблизно 0,23 від розміру зони обслуговування, ефективність запропонованого методу досягає близько 50 % (рис. 3.5).

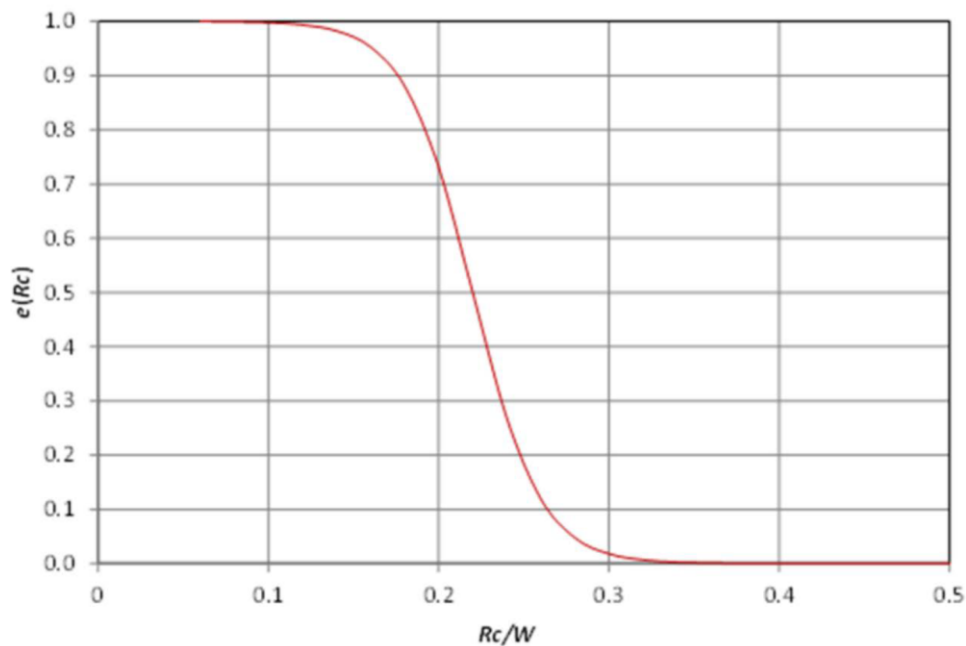


Рисунок 3.5 – Залежність ефективності методу від радіуса зони зв’язку між кластерами R_c .

Загалом ефективність методу зростає зі зменшенням відношення радіуса зони зв’язку маршрутизатора до розміру зони обслуговування. Отже, доцільність його використання особливо висока у випадках, коли необхідно забезпечити зв’язок на відносно великих територіях або обслуговувати значні обсяги трафіку.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Моделювання лінії зв’язку між маршрутизатором і користувачем із використанням моделі К. Шеннона з урахуванням особливостей її реалізації відповідно до чинного стандарту мережі бездротового доступу дозволяє формалізувати задачу кластеризації користувачів як задачу максимізації сумарної досяжної швидкості передавання даних.

2. Запропонований алгоритм кластеризації, що є модифікацією класичного алгоритму FOREL, забезпечує визначення оптимальних позицій

маршрутизаторів для обслуговування користувачів, побудови зв'язної mesh-мережі та її інтеграції з базовою станцією мобільного зв'язку.

3. Удосконалення алгоритму кластеризації, яке передбачає перерозподіл елементів між кластерами, дозволяє покращити якість кластеризації шляхом вирівнювання кількості елементів у сформованих кластерах.

4. Метод маршрутизації трафіку в mesh-мережі забезпечує вибір оптимальних маршрутів на основі мінімізації інтегрального показника якості маршруту, який враховує досяжну швидкість передавання даних, поточне навантаження на вузли мережі та імовірність втрат.

5. Запропоновані методи розміщення маршрутизаторів у рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також на окремих або прив'язних БПЛА, є ефективними у випадках, коли розмір зони зв'язку маршрутизатора менший за розмір зони обслуговування.

4 АЛГОРИТМ ДИНАМІЧНОЇ МІГРАЦІЇ СЕРВІСІВ У РОЗПОДІЛЕНІЙ АРХІТЕКТУРІ ГРАНИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ МЕРЕЖ П'ЯТОГО ТА ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

Згідно зі статистичними даними «Data Age 2025», опублікованими міжнародною аналітичною компанією IDC, що спеціалізується на дослідженні тенденцій розвитку інформаційних технологій, до кінця 2025 року до Інтернету буде підключено понад 100 мільярдів пристроїв, а загальний обсяг даних, пов'язаних із цими пристроями, досягне 300 зетабайтів [27, 38]. У рамках традиційних підходів до обробки інформації всі отримані дані необхідно передавати до центрального хмарного дата-центру для подальшого аналізу. Проте через надзвичайно великі обсяги інформації хмарні обчислювальні платформи стикаються з низкою критичних проблем, серед яких: висока затримка в мережі, надмірна кількість підключених пристроїв, складність обробки великих обсягів даних, обмежена пропускна здатність мережі та підвищене енергоспоживання.

У зв'язку з цим виникла потреба у впровадженні нової парадигми, яка нині відома як граничні обчислення (Edge Computing) [29, 30]. Ця концепція передбачає розподілену обробку даних безпосередньо поблизу джерел їхнього генерування, тобто в межах досяжності кінцевих пристроїв. Застосування граничних обчислень дозволяє значно зменшити час відгуку мережі та ефективніше використовувати її пропускну здатність.

Одним із ключових напрямів забезпечення відмовостійкості при обробці великих обсягів даних є підтримка механізмів міграції сервісів у розподілених системах [31]. Такий підхід передбачає перенесення окремих сервісів з одного обчислювального ресурсу на інший для забезпечення стійкості роботи всієї системи в умовах змінного навантаження або відмов окремих елементів інфраструктури.

У даній роботі розглянуто застосування технології граничних обчислень шляхом перенесення обчислювальних процесів до граничного обчислювального

кластера, проаналізовано сучасні підходи до міграції сервісів, а також досліджено показники повного часу міграції та часу простою. Крім того, наведено результати виявлення оптимального механізму міграції, який може бути використаний для подальшої реалізації алгоритму автоматизованої міграції сервісів.

4.1 Методи розгортання та перенесення сервісів у хмарних і граничних архітектурах

Kubernetes — це платформа з відкритим вихідним кодом, яка автоматизує операції з контейнерами у середовищі Linux. Вона значно знижує потребу у ручному втручанні при розгортанні, масштабуванні та управлінні контейнеризованими застосунками. Фактично, за допомогою Kubernetes можна об'єднувати групи вузлів, на яких запущено контейнери, в єдиний кластер, а сама платформа забезпечує централізоване й ефективне управління цим кластером [32].

Назва «Kubernetes» походить від старогрецького слова κυβερνήτης, що означає «керманич», «пілот» або «штурман» — той, хто управляє. У скороченні K8s цифра 8 означає кількість літер між першою (K) та останньою (s).

Kubernetes API — це набір об'єктів і функцій, призначених для взаємодії з платформою Kubernetes. За допомогою API можна керувати ресурсами кластера (такими як капсули (pods) й вузли), а також виконувати завдання планування, масштабування, моніторингу тощо. API забезпечує ефективну взаємодію між компонентами платформи, що дозволяє динамічно розподіляти ресурси відповідно до навантаження.

Однією з ключових переваг API є розширюваність — можливість додавання користувацьких функцій шляхом створення власних типів ресурсів (Custom Resource Definitions, CRD). Як частина проєкту з відкритим кодом, API Kubernetes постійно розвивається та доповнюється новими можливостями.

Доступ до API можна отримати кількома способами: через командний інтерфейс `kubectl`; через графічну панель керування; напряму через HTTP-запити; за допомогою клієнтських бібліотек на мовах програмування, таких як Java або Go.

Усі ресурси кластера описуються у вигляді API-об'єктів, зазвичай у форматі YAML, із чіткою структурою метаданих. Ім'я кожного об'єкта має бути унікальним в межах простору імен (`namespace`), а сам сервер API призначає об'єкту унікальний ідентифікатор (UID).

Pod — це найменша одиниця розгортання в Kubernetes. Вона може містити один або кілька контейнерів, які спільно використовують ресурси зберігання, мережу та параметри запуску. Наприклад, якщо потрібно розгорнути 5 взаємопов'язаних контейнерів, їх можна об'єднати в один pod, або розмістити окремо, залежно від функціонального навантаження.

Капсули можуть мати доступ до томів (аналогічно Docker) і налаштовуються залежно від потреб. Кожен pod прив'язується до певного вузла (`node`) до завершення свого життєвого циклу (відповідно до політики перезапуску або видалення). У разі відмови вузла, аналогічний pod буде автоматично перепризначено іншому доступному вузлу.

Кожен вузол у кластері K8s має власну IP-адресу, яку поділяють контейнери цього вузла. Контейнери на одному вузлі можуть обмінюватися даними напряму. Проте для реалізації мережевих можливостей Kubernetes необхідно інтегрувати мережевий плагін, що працює через інтерфейс CNI (Container Network Interface) [34].

Для реалізації функцій, таких як балансування навантаження, створюються ресурси типу Service. Вони використовують мітки вузлів для визначення доступних підключень і створення відповідних кінцевих точок (Endpoints). Крім того, доступ до сервісів може здійснюватися через змінні середовища, DNS-записи або явне вказання IP-адреси й порту.

Класичний кластер Kubernetes складається з двох основних рівнів: площини управління (Control Plane); площини даних (Data Plane) (див. рис. 4.1).

Площина керування відповідає за централізоване керування кластером, і може обслуговувати тисячі вузлів. До її складу входять:

- API-сервер, який зберігає інформацію про об'єкти в розподіленому сховищі etcd (ключ-значення);
- Менеджер контролерів (kube-controller-manager) — модуль, що об'єднує набір контролерів для автоматичного управління станами об'єктів;
- Планувальник (kube-scheduler) — компонент, який визначає оптимальне розміщення капсул на доступних вузлах;
- Модуль взаємодії з хмарними провайдерами (опціонально), що розширює функціональність кластера у хмарному середовищі.

Площина даних складається з робочих вузлів, тобто серверів, на яких безпосередньо виконуються застосунки та обробляються запити користувачів.

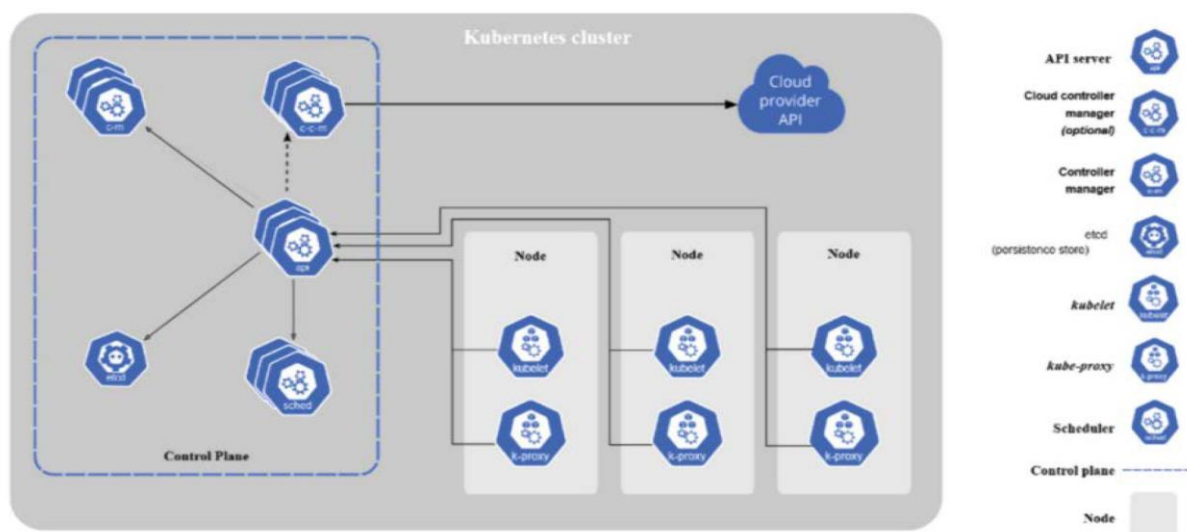


Рисунок 4.1 – Структурна схема кластера Kubernetes

На кожному з таких вузлів запускається агент **kubelet**, який взаємодіє з API-сервером і ініціює запуск подів, призначених для цього вузла. Агент контролює стан подів і розміщених у них застосунків, оновлюючи відповідні статуси в API.

Крім того, на вузлах функціонує компонент **kube-proxy**, що відповідає за обробку мережевого трафіку, пов'язаного з цим вузлом [37].

Для керування контейнерами агент kubelet взаємодіє із середовищем виконання контейнерів через спеціальний інтерфейс CRI (Container Runtime Interface). Цей інтерфейс визначає набір можливостей для створення, модифікації та видалення контейнерів, сумісних з Kubernetes. Завдяки цьому забезпечується можливість зміни платформи контейнеризації без потреби у безпосередній підтримці з боку Kubernetes.

Для міграції сервісу необхідно перенести контейнери, на яких він функціонує. Оскільки контейнери є ізольованими процесами, завдання зводиться до міграції процесів. У системі Linux для цього застосовується технологія створення контрольних точок та відновлення процесів (Checkpoint-Restore), яка з'явилася ще у 1970-х роках і з того часу була суттєво модернізована.

Спочатку копіювання області пам'яті процесу вимагало привілейованого доступу до системи, що потребувало відповідної підтримки на рівні ядра операційної системи. Проте цей підхід дозволяв здійснювати прозору міграцію, тобто перенесення процесу без необхідності змін у вихідному програмному забезпеченні.

Подальший розвиток технології Checkpoint-Restore (CR) забезпечив можливість зберігання усіх даних пам'яті процесу у просторі користувача, що дозволило усунути обмеження, пов'язані з доступом до системної пам'яті. На початку 2010-х років з'явилося програмне рішення з відкритим кодом — CRIU (Checkpoint-Restore In Userspace) [38].

Це рішення реалізує стандартну процедуру переносу процесу, яка включає такі етапи: призупинення (заморожування) процесу; збереження його стану на диск; передавання збереженого стану до цільового середовища; відновлення (відновлення виконання) процесу.

Головною перевагою CRIU у порівнянні з класичним CR є можливість роботи з пам'яттю процесу без потреби у надмірних привілеях. Ізоляція процесів, забезпечена контейнеризацією, додатково спрощує відновлення процесу (контейнера) на новому вузлі, оскільки CRIU прагне забезпечити максимально прозорий перенос, включно з копіюванням ідентифікаторів процесів (PID). Через

ізолюваність середовищ виконання ймовірність конфлікту PID під час відновлення процесу є вкрай низькою.

4.2 Дослідження сучасних технологій міграції мережевих сервісів

4.2.1 Аналіз засобів конфігурування оркестрації

У межах даної роботи як оркестратор використовується Kubernetes (K8s). Для вирішення завдань, пов'язаних із визначенням оптимальної конфігурації розгортання та запуску сервісів, застосовуються такі інструменти:

- зіставлення властивості `nodeSelector` з мітками вузлів;
- правила `Affinity` та `Anti-affinity`;
- пряме вказання імені вузла за допомогою параметра `nodeName`;
- обмеження топології розміщення подів;
- використання механізмів `Taints` та `Tolerations`.

Цей метод є одним із найпростіших і найпоширеніших завдяки своїй прозорій логіці та легкості застосування. У Kubernetes передбачено інструменти для маркування більшості об'єктів, тому можна вручну додати мітку до цільового вузла. Для цього достатньо додати поле `'nodeSelector'` до декларативного опису конфігурації пода.

Також існує інструмент автоматичного маркування вузлів зі стандартними ролями у кластері — перелік доступний в офіційній документації. Додавання міток до вузлів дає змогу планувати запуск подів на конкретному вузлі або групі вузлів. Це гарантує, що певні поди працюватимуть лише на вузлах із заданими характеристиками, рівнем ізоляції та безпеки.

У разі, якщо мітки використовуються з метою запобігання запуску на певному вузлі, необхідно застосовувати такі ключі міток, які не можуть бути змінені агентом `kubelet`. Це підвищує загальний рівень безпеки кластера: навіть у разі спроби встановити мітку для розміщення шкідливого пода система не дозволить цього зробити, і розгортання буде заблоковане.

Affinity та Anti-affinity механізми розширюють можливості вибору вузлів для розміщення подів порівняно з `nodeSelector`. Якщо `nodeSelector` вимагає повної відповідності всім міткам, то `Affinity` дає змогу задавати гнучкі правила розміщення, зокрема пріоритетні (але не обов'язкові) умови.

Можна також орієнтуватися на мітки інших подів, які вже працюють на вузлі, і відповідно задавати умови сумісного або несумісного розміщення. Це дозволяє більш ефективно управляти балансуванням навантаження та ізоляцією середовищ виконання.

Пряме вказання імені вузла (nodeName) передбачає жорстке закріплення пода за конкретним вузлом за допомогою параметра `nodeName`, що має вищий пріоритет, ніж `nodeSelector` або `Affinity`. Хоча цей метод забезпечує передбачувану поведінку та гарантує розміщення на потрібному вузлі, слід враховувати такі особливості:

- якщо у кластері не існує вузла з заданим ім'ям — под не буде запущено;
- якщо на обраному вузлі недостатньо ресурсів — под також не запуститься, а в журналі буде зафіксовано відповідну помилку (наприклад, нестача оперативної пам'яті або CPU);
- при розгортанні в хмарному середовищі імена вузлів можуть бути динамічними й змінюватися в процесі роботи.

Обмеження топології розміщення подів застосовується для керування географічним розміщенням подів у межах кластера з урахуванням таких характеристик, як зони доступності, регіони та топологічні властивості, задані під час створення кластера. Подібні обмеження використовуються для: зниження затримок у взаємодії між сервісами; підвищення продуктивності; покращення доступності сервісів.

Механізм топологічного розміщення подів було розроблено для вирішення проблем неефективного розподілу подів у географічно рознесених дата-центрах. Зі зростанням навантаження міжсервісний трафік зростає, і це потребує локалізації комунікацій.

Розміщення пов'язаних сервісів у межах однієї зони дозволяє: зменшити навантаження на канали зв'язку; підвищити пропускну здатність; знизити час відгуку системи на запити користувачів.

Taints і Tolerations є інверсією логіки Affinity: вони дозволяють обмежити** або заборонити запуск подів на певних вузлах.

Правила taint застосовуються до вузлів і вказують, що ті не повинні приймати поди без відповідного допуску. Водночас toleration застосовується до подів і повідомляє планувальнику, що под може бути розміщений на вузлі з відповідним taint.

Комбіноване використання `taints` та `tolerations` забезпечує: розміщення тільки на сумісних вузлах; захист від запуску подів на вузлах із обмеженими ресурсами або особливими умовами виконання; можливість гнучкого керування політиками доступу та розгортання у кластері.

Один вузол може мати декілька правил taint, і лише ті поди, які мають відповідні toleration, будуть допущені до розміщення на ньому. Це дає змогу забезпечити сегментацію середовища й підвищити стійкість до помилок і загроз.

4.2.2 Аналіз процесу міграції, тривалості повного перенесення та часу простою

Для вибору оптимальної стратегії міграції необхідно провести тестування всіх описаних методів перенесення. У ході експериментальних досліджень використовується програмне забезпечення CRIU (Checkpoint/Restore In Userspace).

У якості навантаження застосовується спеціалізований інструмент для стрес-тестування вузлів Kubernetes — kube-stresscheck [38]. Тестування здійснюється у двох режимах навантаження на оперативну пам'ять:

- низьке навантаження — використовується 32 МБ оперативної пам'яті;
- високе навантаження — використовується 512 МБ оперативної пам'яті.

Для керування цим параметром під час створення образу застосунку необхідно вказати відповідне значення параметра `stressDefaultMemoryMB` (див. рисунок 4.2).

```

1 package main
2
3 import (
4     "fmt"
5     "log"
6     "os"
7     "os/exec"
8     "runtime"
9 )
10
11 // #include <unistd.h>
12 import "C"
13
14 const (
15     listenSocket = ":6666"
16
17     stressBinary = "stress"
18     stressTimeout = 60
19     stressIterations = 5
20     stressDefaultMemoryMB = 256
21     stressMemoryHangSec = 2
22 )
23
24 // Common variables
25 var (
26     description = "Simple stress checker for Kubernetes nodes."
27     gitCommit = "n/a"
28     name = "kube-stresscheck"
29     source = "https://github.com/giantswarm/kube-stresscheck"

```

Рисунок 4.2 – Параметри конфігурації тестового застосунку

Для отримання статистично достовірних результатів міграція обраного вузла виконується чотирма способами, описаними раніше: холодна міграція, міграція з попереднім копіюванням, міграція з наступним копіюванням, гібридна міграція. Кожен із методів буде виконано по 100 разів.

Повний час міграції визначається за даними моніторингу щодо зміни розташування відповідного вузла, а час простою — за моментом зниження та подальшого відновлення навантаження на ресурси вузла.

Отримані дані будуть представлені у вигляді гістограм, на яких:

- рівень синього кольору відображає мінімальний час міграції;

- рівень червоного кольору відповідає найхарактернішому значенню (медіані);
- рівень зеленого кольору вказує на максимальний зафіксований час перенесення (див. рисунок 4.3 та рисунок 4.4) [33].

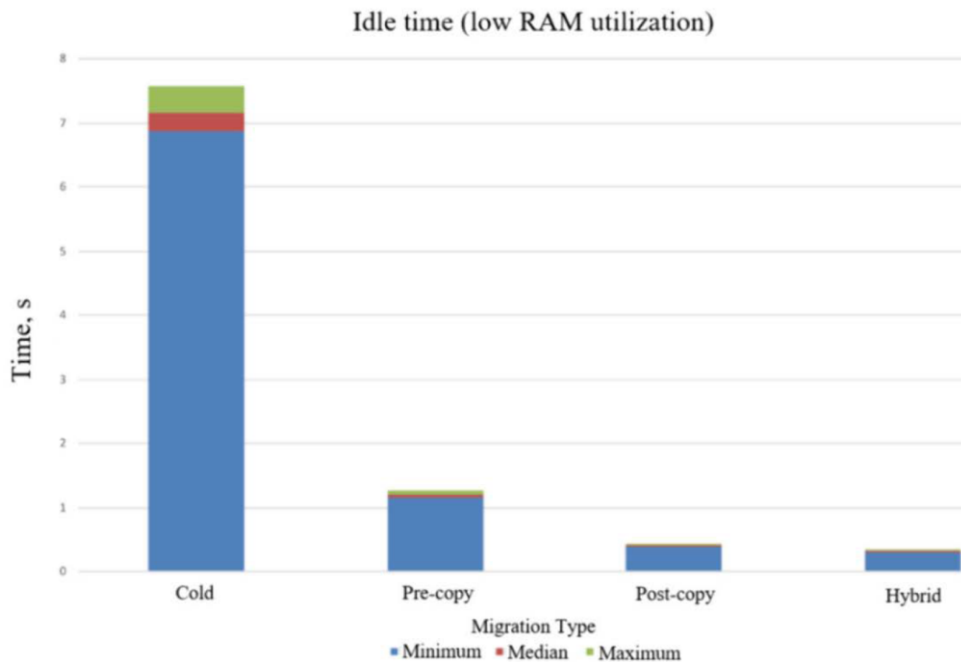


Рисунок 4.3 – Графік залежності часу простою від типу міграції за умов низького навантаження на оперативну пам'ять

4.3 Алгоритм автоматизованого перенесення сервісів

У якості фізичного обладнання для хмарного кластера використано комп'ютер на базі процесора x86-64 з встановленою системою віртуалізації Proxmox. На ньому запущено п'ять віртуальних машин: одна використовується як система розгортання кластера, друга — як контролер кластера, а решта три — як обчислювальні вузли.

В якості базової операційної системи на кожній ВМ кластера застосовано Ubuntu 22.04 LTS, а на допоміжній — Alpine v3.16.

Для обчислювального обладнання використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi на базі процесора архітектури ARM64. Базовою ОС на Raspberry Pi є Ubuntu 22.04 LTS, а для створення кластера використовується програмне забезпечення minikube.

Повна схема тестового стенда з мережевими з'єднаннями між компонентами кластера та кластерів наведена нижче (рисунок 4.5).

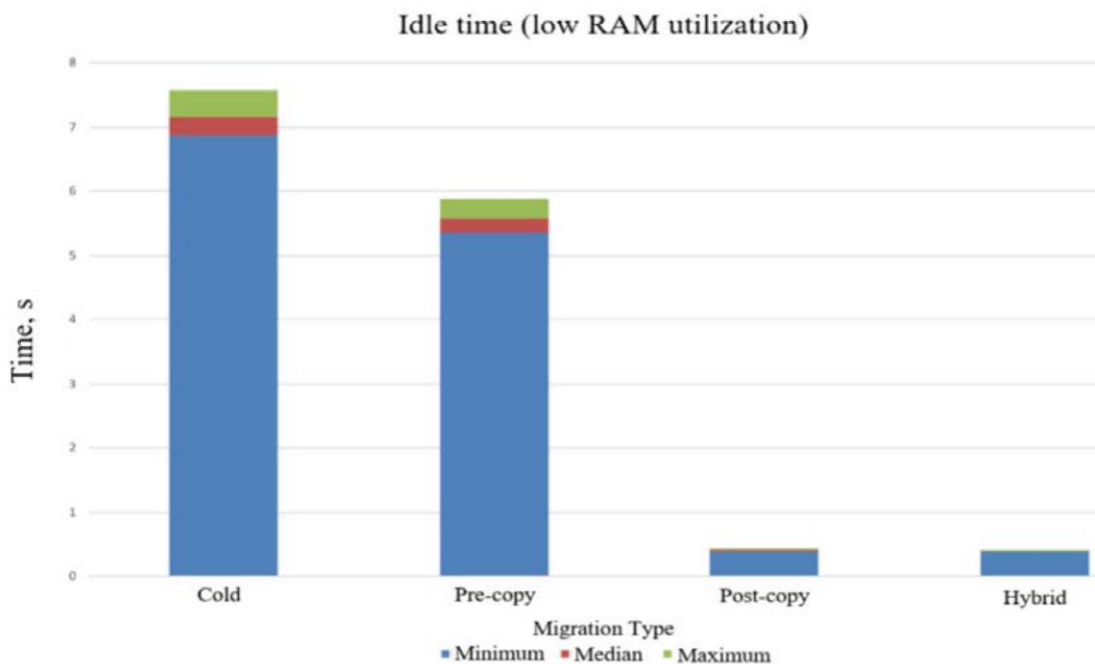


Рисунок 4.4 – Графік залежності часу простою від типу міграції за умов високого навантаження на оперативну пам'ять

За результатами проведених тестувань можна стверджувати, що для сервісів, які потребують швидкого реагування та мінімального часу простою, оптимальним стандартним методом міграції є гібридний.

Незважаючи на те, що він має найбільший повний час міграції, час простою сервісу при застосуванні цього методу є мінімальним. Ці висновки підтверджуються дослідженнями [20].

В експериментальній частині буде використано саме гібридний метод міграції.

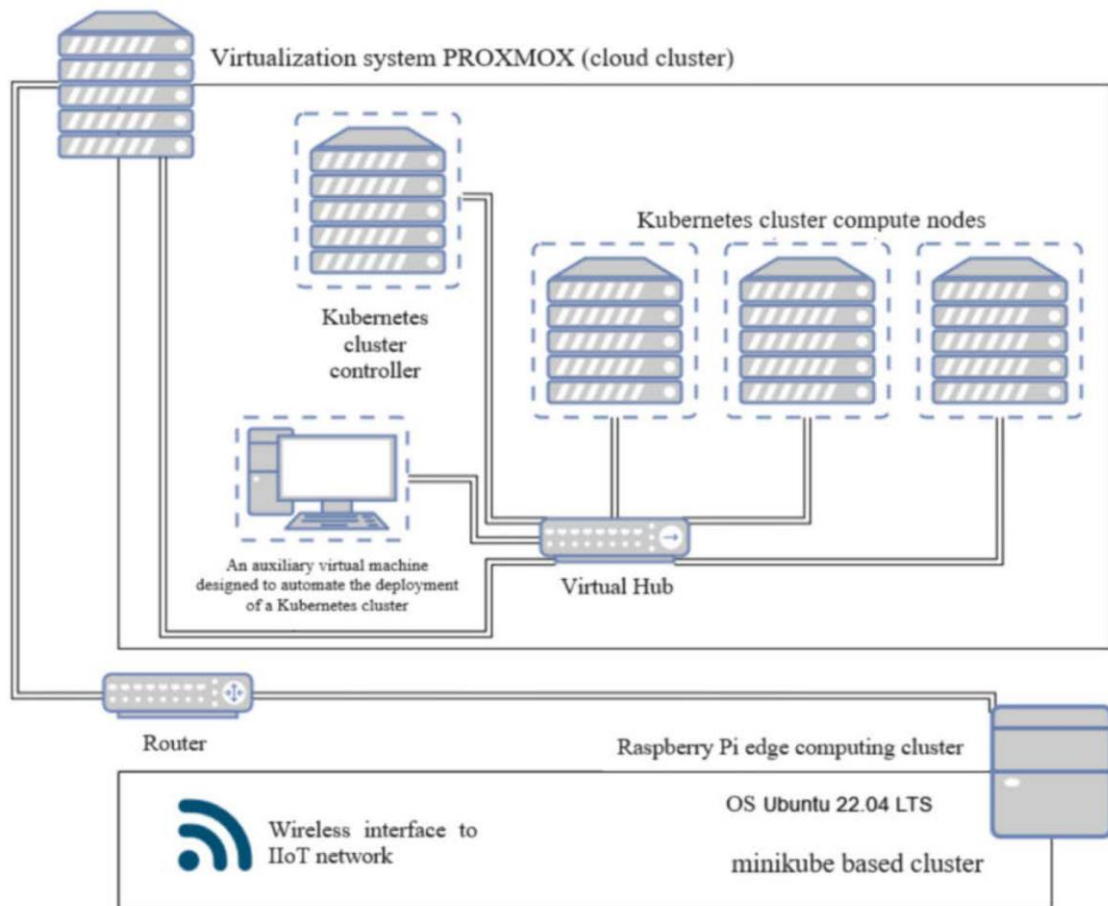


Рисунок 4.5 – Структурна схема тестового середовища та мережеских з'єднань

4.3.1 Розробка алгоритму для автоматизації міграції сервісів

Для автоматизації процесу міграції сервісів пропонується використовувати демон, який відстежує стан черги запитів, швидкість їх виконання, має доступ до інформації про навантаження на процесор та оперативну пам'ять на вузлах, а також про стан комунікаційної мережі між кластерами для оперативної оцінки часу, що витрачається на операції міграції.

При розробці алгоритму, який враховує стан системи для прийняття рішення про міграцію, необхідно перш за все розглянути, які типи задач виконуватимуть сервіси, та визначити необхідну швидкість реакції системи для кожного типу.

Для тестування алгоритму будуть використовуватися два типи задач, які необхідно вирішувати під час експлуатації:

- Тип 1 — оперативні задачі, що потребують високої швидкості відгуку системи, втрачають актуальність протягом 1 секунди, є критичними;
- Тип 2 — вторинні задачі, які потребують більших обчислювальних ресурсів, втрачають актуальність протягом 10 секунд, некритичні.

```

1  import time
2
3  start_time = time.time()
4  sum = 0
5  for i in range(1000000):
6      sum += 16**(-i)*(4/(8*i+1)-2/(8*i+4)-1/(8*i+5)-1/(8*i+6))
7
8  print("%s" % (time.time() - start_time))

```

Рисунок 4.6 – Обчислювальна частина експериментальної програми

В якості тестового навантаження будуть використовуватись стандартні Docker-контейнери для запуску Python-застосунків.

Всередині контейнера працюватиме сервіс для обчислення числа π з заданою точністю: до 50 000 знаків — для задач першого типу; до 1 000 000 знаків — для задач другого типу. Обчислення числа π здійснюватиметься за методом, описаним у джерелі [21]. Для розрахунку використовується формула (4.1):

$$\pi = \sum_{i=0}^N \frac{1}{16^i} \left(\frac{4}{8i+1} - \frac{2}{8i+4} - \frac{1}{8i+5} - \frac{1}{8i+6} \right) \quad (4.1)$$

Для визначення необхідних ресурсів для розв’язання задач обох типів програмне забезпечення буде розміщено на кластері кожного типу. Проведемо статистичне дослідження з метою отримання залежності часу виконання коду від обсягу доступних обчислювальних потужностей.

Час актуальності для задач першого типу становить 1 секунду, для задач другого типу — 10 секунд. Для оцінки часу, необхідного на виконання операцій у кожному з кластерів, була запущена тестова програма (рисунок 4.6), яка

відрізняється для задач першого та другого типів лише діапазоном підстановок — відповідно 50 000 та 1 000 000.

В результаті запуску цього тесту отримано набір даних, що містить мінімальний, медіанний та максимальний час розв’язання задач для кожного з кластерів. Це дозволяє планувати навантаження, яке подається на вхід моделі імітаційного моделювання, для якісного порівняння підходу автоматизованого обслуговування з роботою планувальника.

Графіки із зазначенням значень у досліджуваних точках наведені на рисунках 4.7 – 4.10.

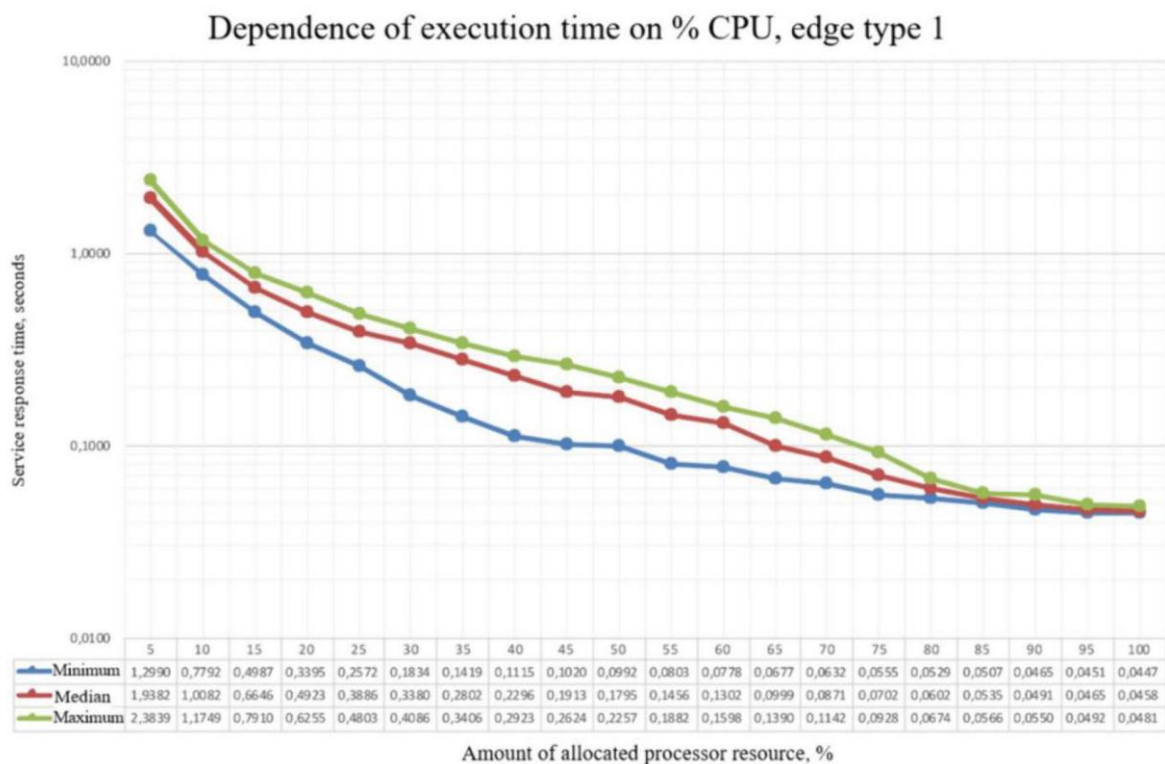


Рисунок 4.7 – Графік залежності часу відгуку сервісу, розміщеного на пограничному кластері, від виділеного ресурсу процесора для задачі типу 1

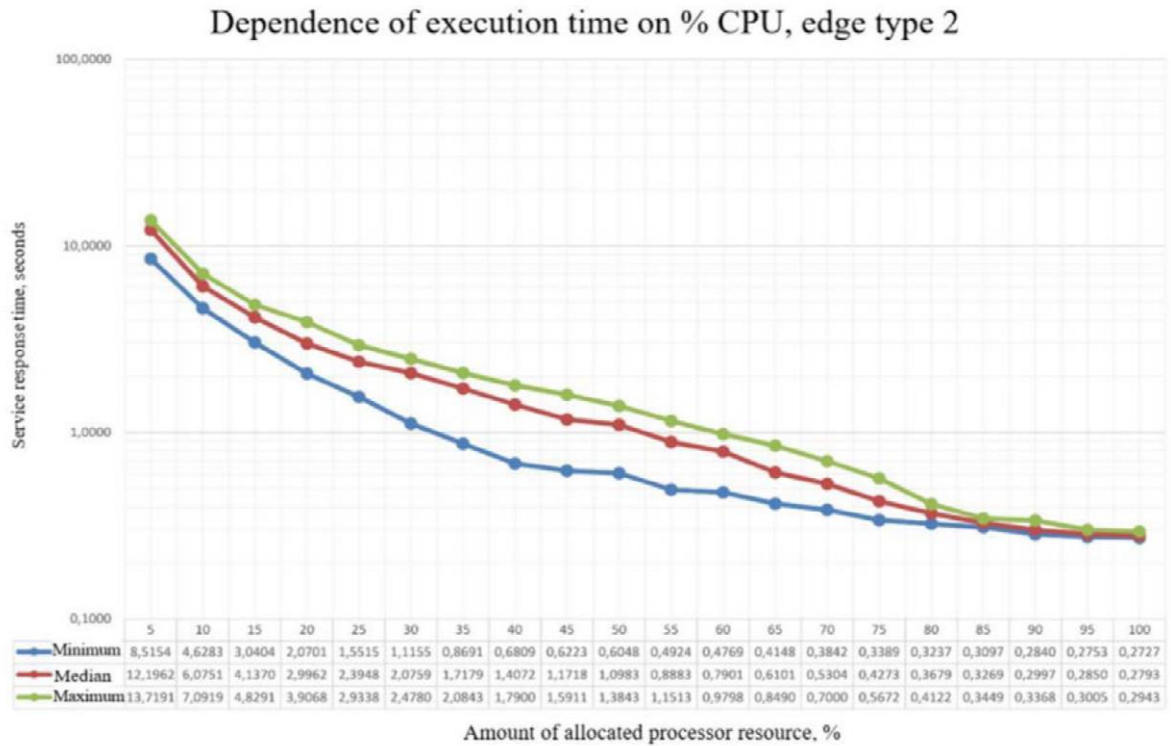


Рисунок 4.8 – Графік залежності часу відгуку сервісу, розміщеного на пограничному кластері, від виділеного ресурсу процесора для задачі типу 2

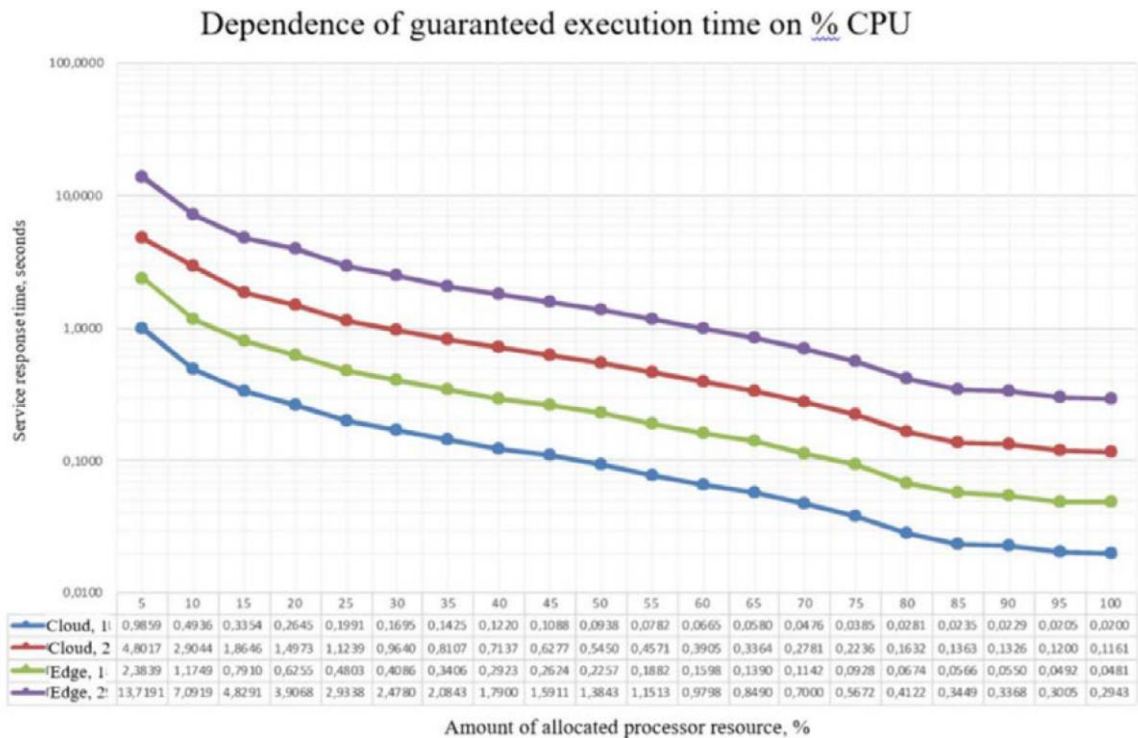


Рисунок 4.9 – Графік залежності часу відгуку сервісу, розміщеного в хмарному кластері, від виділеного ресурсу процесора для задачі типу 1

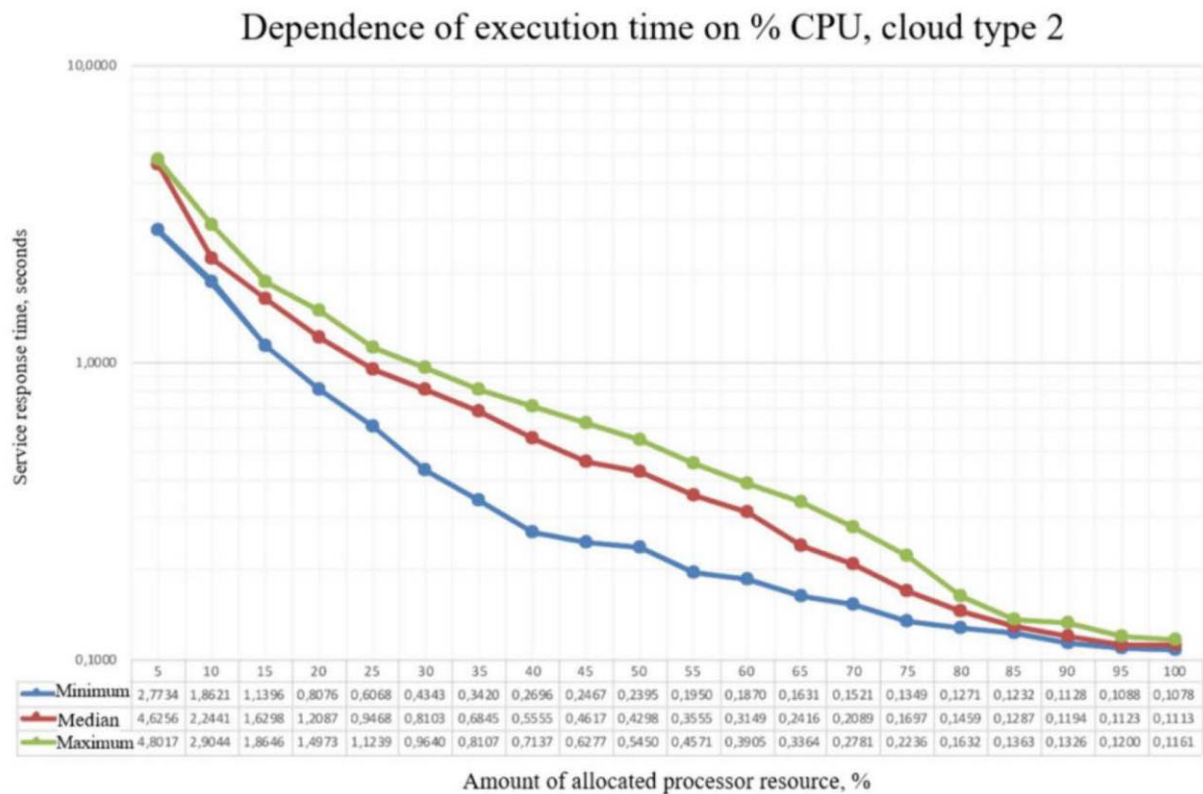


Рисунок 4.10 – Графік залежності часу відгуку сервісу, розміщеного в хмарному кластері, від виділеного процесорного ресурсу для задачі типу 2

Для визначення гарантованого часу виконання використано максимальні значення часу, які витрачають кожен із кластерів на розв'язання задач обох типів (рисунок 4.11). Потрібно зазначити, що збільшення швидкості обробки задач залежно від виділених контейнеру ресурсів відбувається експоненціально (аналогічний результат отримано в дослідженні [22]), тому доцільно збільшувати виділення ресурсів у обмеженому діапазоні, оскільки приріст у часі зменшується порівняно з паралельним запуском контейнерів. Для визначення найбільш оптимального розподілу доступного процесорного ресурсу необхідно провести розрахунок, що максимізує кількість відповідей від кластера за формулою:

$$\max N = \text{floor}\left(\frac{T_{z_max}}{T_{z_cpu}}\right) \cdot \text{floor}\left(\frac{100\%}{Q_{cpu}}\right) \quad (4.2)$$

де T_{z_max} — максимально допустимий час, відведений на виконання задачі;

T_{z_cpu} — час, витрачений кластером на розв’язання задачі;

Q_{cpu} — відсоток доступного ресурсу процесора.

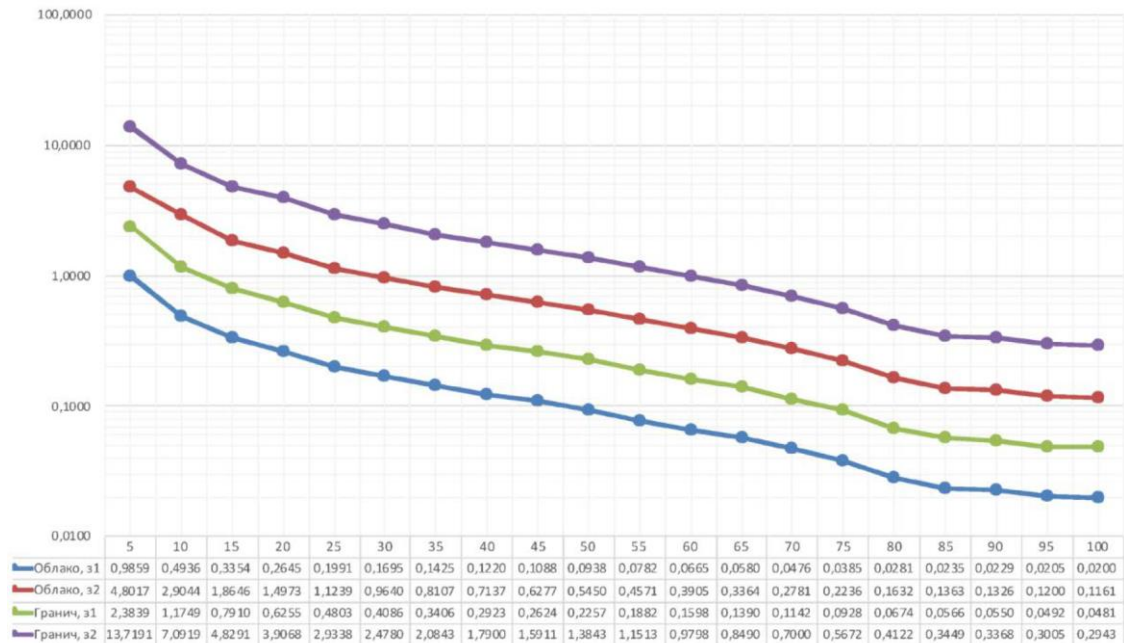


Рисунок 4.11 – Графік залежності часу відгуку сервісу від виділеного обчислювального ресурсу CPU

Ліва частина цієї формули показує, скільки послідовних запусків задач можна виконати, щоб вкластися у час актуальності задачі, а права частина — скільки задач можна запустити паралельно.

Результати розрахунків для випадку повністю вільного кластера наведені нижче у графічній формі (рисунок 4.12). Як видно з графіка, найбільша кількість запитів може бути опрацьована при послідовному запуску контейнерів із виділенням кожному з них максимальних ресурсів процесора.

Також спостерігаються локальні максимуми, які демонструють, що при виділенні 50 % та 25 % CPU продуктивність усієї системи буде вищою, ніж у випадку надання для розв’язання задачі 65 % та 45 % обчислювальної потужності CPU відповідно.

Під час роботи служби автоматичної міграції цей розрахунок виконуватиметься «на льоту» з урахуванням актуальних даних про доступні системні ресурси.

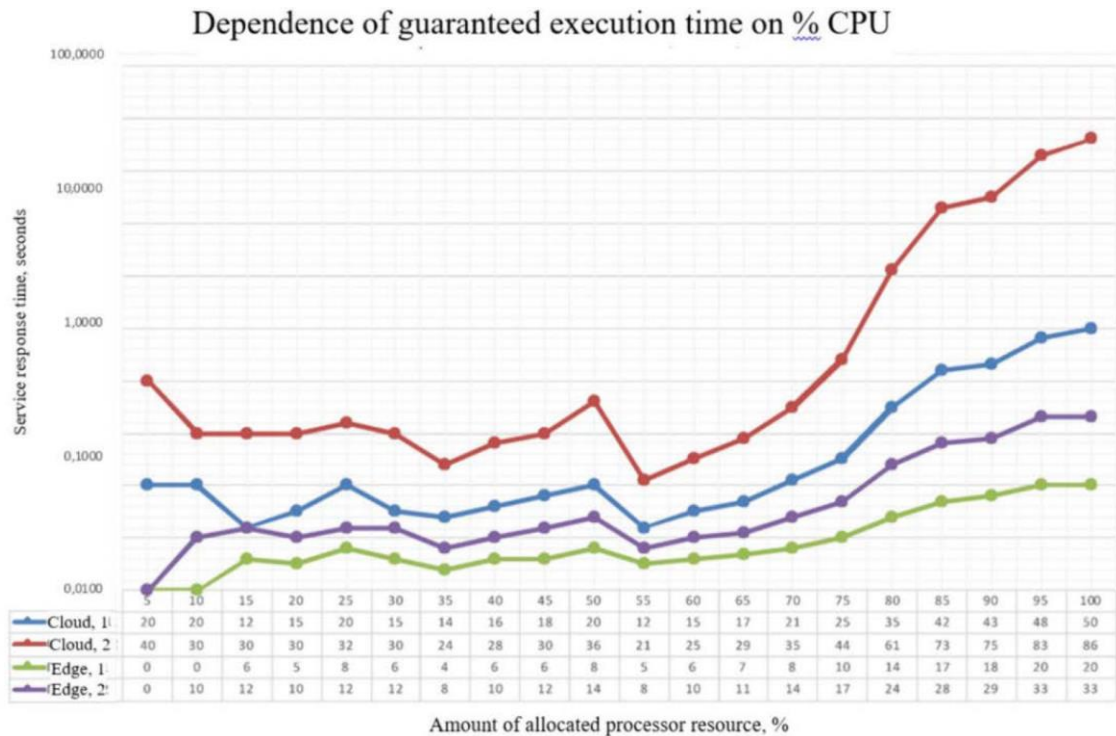


Рисунок 4.12 – Графік залежності кількості відповідей, що повертаються сервісом, від виділеного обчислювального ресурсу CPU

Таким чином, можна розрахувати максимальне навантаження, яке слід застосувати при тестуванні продуктивності. Враховується, що задачі мають різний час актуальності, а в хмарному кластері є три обчислювальні вузли (по 2 процесорних ядра на кожен), призначені для запуску контейнерів. Raspberry Pi має 4 обчислювальних ядра.

Отже, за 10-секундний інтервал на пограничному кластері може бути розв’язано 800 задач першого типу або 132 задачі другого типу. У той же час на хмарному кластері за 10 секунд можна виконати 3000 задач першого типу або 516 задач другого типу.

У тестових умовах задачі будуть комбінуватися, що дозволить імітувати умови роботи, близькі до реальних.

Метод автоматичного розміщення вузлів, який використовується для порівняння з планувальником, працює за простим алгоритмом — розміщуємо контейнер на вузлі, якщо є доступні ресурси; якщо ні — передаємо запит далі або відкидаємо його.

Перевірка швидкості роботи системи з використанням автоматичної міграції порівняно з планувальником здійснюється за допомогою шаблону оператора, що дозволяє відстежувати завантаження вузлів. Перенаправлення запитів відбувається шляхом розміщення проксуючого контейнера, який пересилає запити в хмарний кластер.

При збільшенні навантаження автоматично здійснюється горизонтальне масштабування кількості вузлів на кластері, кількість яких визначається максимальною продуктивністю при паралельному виконанні запитів.

Навантаження, що подається на вхід системи, є синтетичним, генерується перед випробуванням та обмежується умовами, представленими на графіку (рисунок 4.13). Таким чином, у кожному типі тесту (пропонований та порівнюваний алгоритми) на вхід подається одна й та сама навантаження, що перевищує фізичні можливості кластерів.

Пропонований алгоритм використовує можливості міграції вузлів за необхідності, враховуючи поточну потребу у швидкості обробки вхідного навантаження. Тобто міграція застосовується лише у випадках, коли потрібно звільнити наявні обчислювальні ресурси для розв'язання пріоритетних задач.

Потрібно зауважити, що міграція менш пріоритетних задач не призводить до багаторазового збільшення продуктивності системи. Проте за рахунок звільнення ресурсів можна зменшити загальну кількість втрачених задач, а зокрема практично гарантувати виконання критичних задач та підвищити стабільність обробки при високому рівні завантаження ресурсів.

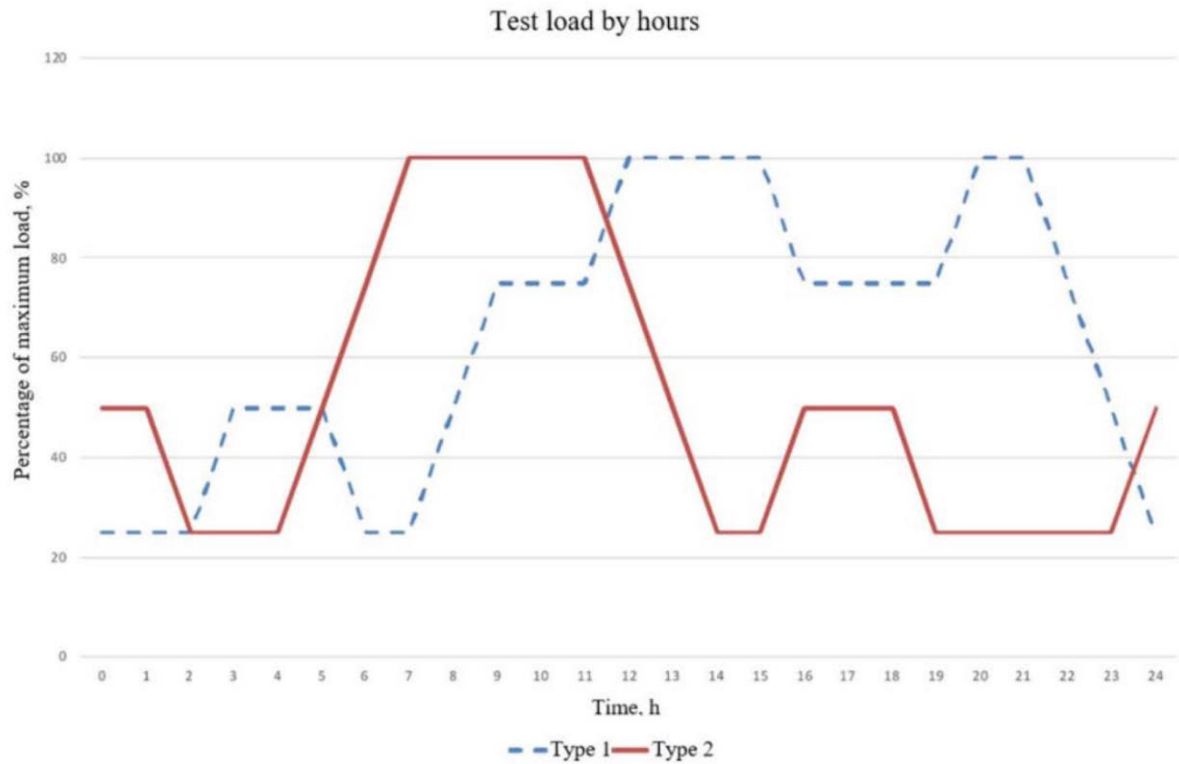


Рисунок 4.13 – Графік максимального рівня навантаження на інфраструктуру за часом

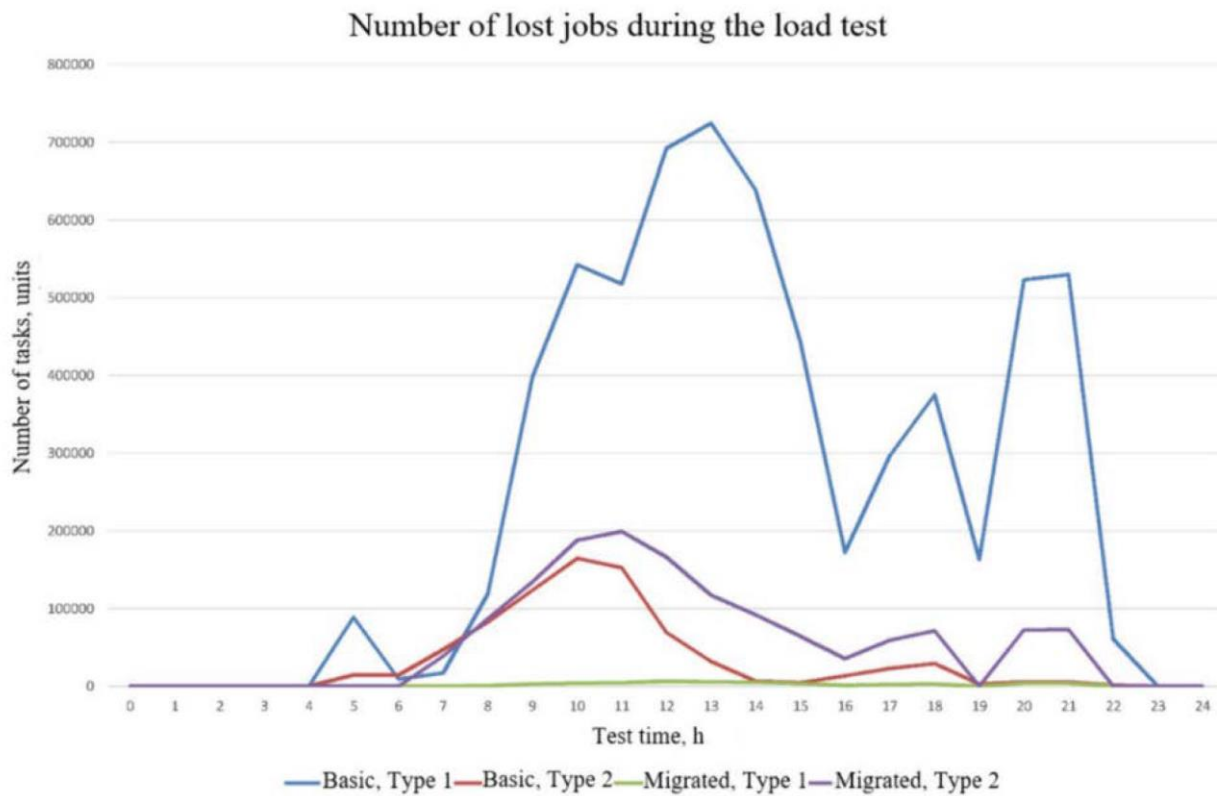


Рисунок 4.14 – Графік кількості невиконаних задач за часом

4.4 Висновки до розділу 4

Досліджено принципи роботи системи Kubernetes із масштабуванням та розподілом задач, схеми і методи, що застосовуються при розгортанні та автоматизації інфраструктури. Kubernetes має розвинену систему планування і розподілу задач по кластеру. Такі властивості об'єктів K8s, як Affinity і Anti-affinity, Taints і Tolerations, забезпечують широкі можливості для якісного розміщення сервісів і застосунків у кластері.

Однак використання цих властивостей для міжкластерного розміщення капсул неможливе. Що стосується рішень, запропонованих спільнотою розробників, пропонуються варіанти об'єднання кількох кластерів в отказостійку систему з виділенням одного провідного контролера та розподілом ролей резервних контролерів між іншими вузлами. Таким чином, можна застосовувати перелічені властивості для балансування навантаження всередині об'єданого кластера, але у випадку розриву мережевого з'єднання між такими пов'язаними кластерами виникає затримка в обробці вхідних запитів, а час відновлення значно перевищує час міграції сервісів між кластерами.

Особливий інтерес викликали технології, пов'язані з міграцією, зменшенням часу простою сервісів та покращенням користувацького досвіду при їх використанні. Наприклад, ефективним варіантом міграції є метод зі створенням додаткової ноди для перемикання між вихідною та цільовою нодами. Завдяки тому, що цільова нода створюється як копія робочої ноди із запущеним сервісом, вдається практично звести до нуля час простою.

Експеримент показав, що наявність систем автоматичного відстеження необхідності проведення процедур міграції сервісів значно підвищує загальну здатність системи справлятися з підвищеними навантаженнями у порівнянні з випадками, коли перенесення та планування розміщення нод із сервісами здійснювалися вручну або взагалі відсутні.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Міжнародні нормативно-правові акти та угоди підкреслюють першочергове значення створення ефективної системи управління охороною праці. Охорона праці визнається як фундаментальна гарантія реалізації трудових прав працівників у сфері безпеки та гігієни праці. Зокрема, «Конвенція № 155 МОП про безпеку та гігієну праці та виробниче середовище» встановлює вимоги організації охорони праці як на загальнодержавному, так і на рівні окремого підприємства. Відповідно до цієї конвенції, на роботодавців покладається юридичний обов'язок щодо забезпечення безпечних робочих місць, належного функціонування механізмів та обладнання, організації виробничих процесів згідно з чинними стандартами, що виключають загрозу здоров'ю працівників.

На працівника під час дослідження методів підвищення інформаційної ефективності телекомунікаційних мереж шостого покоління впливають такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»:

- фізичні: підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря робочої зони; підвищена запиленість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена та понижена вологість повітря; пряма або відображена блискість; розташування робочого місця на значній висоті від поверхні землі; гострі краї, шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання;

- психофізіологічні: фізичні перевантаження (динамічні); нервово – психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів).

Визначаємо технічні рішення з безпечного виконання роботи у відповідності до окреслених факторів.

5.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

5.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Робоче місце є фундаментальною та первинною одиницею виробничого процесу, ефективна організація якої має ключове значення для всього комплексу наукової організації праці. Саме в межах робочого місця відбувається інтеграція основних компонентів виробництва: засобів праці, предметів праці та безпосередньо самої праці. На робочому місці реалізується головна мета трудової діяльності – якісне, економічно обґрунтоване та своєчасне виготовлення продукції або виконання запланованого обсягу робіт.

Організація обслуговування робочого місця передбачає його комплексне забезпечення необхідними засобами виробництва, предметами праці та послугами для ефективного здійснення трудового процесу. Окрім загальних вимог, на організацію робочих місць впливають специфічні характеристики виробництва, зокрема співвідношення інтелектуальної та фізичної складових праці, рівень відповідальності. При проектуванні робочих місць обов'язково враховуються параметри освітленості, температурного режиму, вологості, тиску, рівня шуму та вібрації, запиленості та інші санітарно-гігієнічні норми, що регламентують організацію робочого простору.

Робоче місце дослідника, який виконує завдання за допомогою комп'ютера та відповідного програмного забезпечення, відповідно до нормативних документів має відповідати таким вимогам:

- антропометричні вимоги – робоче місце повинно бути зручним і комфортним для працівника з урахуванням його антропометричних даних, таких як зріст, довжина рук, ширина плечей тощо;
- фізичні вимоги – робоче місце повинно забезпечувати оптимальні умови для роботи з екранними пристроями, такі як правильне освітлення, достатня відстань від екрану до очей, зручне положення рук і ніг тощо.

- психологічні вимоги – робоче місце повинно сприяти зниженню стомлюваності і стресу працівника, такі як наявність достатньої кількості вільного простору, можливість відпочинку тощо.

Організація робочого простору дослідника має бути оптимізована відповідно до специфіки його завдань. Враховуючи тривалість дослідницького процесу, що потребує високої концентрації уваги, ключовим є забезпечення максимального комфорту та ергономічності робочого місця. Це передбачає належне освітлення, достатню площу для розміщення необхідних матеріалів та обладнання, а також можливість легкої зміни робочої пози для мінімізації фізичної втоми. Робоче крісло є підйомно-поворотним, регульованим щодо висоти і кутів нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від переднього краю сидіння, при цьому регулювання кожного параметра крісла є незалежним, легко здійсненим і надійно фіксуватися. Висота поверхні сидіння регулюється в межах 260-460 мм.

Додатково, в процесі аналізу умов праці на робочому місці необхідно оцінити відповідність параметрів приміщення НПАОП 0.00-7.15-18 та відповідність параметрів мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99. В приміщенні знаходиться 4 робочих місця обладнаних ПК. Площа приміщення становить 28,8 м², що в розрахунку на одного працівника становить 7,2 м². Даний показник відповідає нормі щодо площі приміщення на одного працівника відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18. Об'єм приміщення становить 73,4 м³, що в розрахунку на одного працівника (без врахування обладнання) становить 18,35 м³. Даний показник не відповідає нормі щодо площі приміщення на одного працівника відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18. Відповідно, кількість комп'ютеризованих робочих місць має бути зменшена.

5.1.2 Електробезпека приміщення

При експлуатації електрообладнання слід враховувати, що ймовірність ураження електричним струмом варіюється залежно від умов робочого середовища. Зокрема, навколишні фактори можуть як посилювати, так і

послаблювати ступінь впливу електричного струму на організм людини, а також впливати на характеристики електричної напруги. Рівень електротравматизму прямо пропорційно залежить від умов використання електрообладнання. Середовище чинить значний вплив, особливо на властивості ізоляційних матеріалів, що є невід'ємною складовою будь-якого електричного пристрою, підвищуючи або знижуючи ризик електротравми для працівника. Вплив негативних факторів довкілля (кліматичних, метеорологічних, виробничих) на електрообладнання є ключовим аспектом, що враховується на етапах проектування, монтажу та подальшої експлуатації.

Електропостачання всієї будівлі виконано з дотриманням чинних нормативних вимог. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), приміщення, в яких експлуатуються екранні пристрої, класифікуються як такі, що не мають підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Вимоги щодо електробезпеки та пожежної безпеки для приміщень з екранними пристроями регламентуються НПАОП 0.00-7.15-18. Згідно з цим документом, персональні комп'ютери та все допоміжне обладнання для їх обслуговування, ремонту та налагодження, а також електропроводка та кабелі повинні відповідати вимогам електробезпеки зони згідно з ПУЕ та бути оснащені захисною апаратурою від струмів короткого замикання.

Інструктажі з електробезпеки на досліджуваному робочому місці проводяться відповідно до чинних нормативно-правових актів та правил з охорони праці, зокрема Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів та Правил улаштування електроустановок.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Законодавчо визначено оптимальні та допустимі діапазони температури, відносної вологості й швидкості руху повітря для робочих зон виробничих приміщень, що варіюються залежно від пори року та категорії виконуваних

робіт. Мікроклімат виробничого приміщення являє собою сукупність параметрів внутрішнього середовища, які впливають на теплообмін між організмом людини та навколишнім середовищем через процеси конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування вологи. Ці умови формуються комбінацією температури повітря, відносної вологості, швидкості повітряного потоку, температури оточуючих поверхонь та інтенсивності інфрачервоного опромінення.

Проведене дослідження відноситься до категорії Іб за енерговитратами (140-174Вт). Допустимі параметри мікроклімату наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С Допустима		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа	Допустима	Допустима
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

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

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Моніторинг якісного складу повітря робочої зони є критично важливим з огляду на такі ключові аспекти: забезпечення здоров'я працівників (недостатня якість повітряного середовища може провокувати розвиток різноманітних патологій, включаючи алергічні реакції, бронхіальну астму, інфекційні захворювання дихальних шляхів, а також негативно впливати на функціонування серцево-судинної, нервової та інших систем організму), гарантування безпеки праці (забруднене повітряне середовище може становити

пряму загрозу життю та здоров'ю працівників, зокрема підвищуючи ймовірність виникнення пожеж або вибухів у присутності певних забруднюючих речовин) та підвищення продуктивності праці (наявність у повітрі шкідливих домішок призводить до зниження працездатності, спричиняє втому та погіршує концентрацію уваги, що негативно позначається на ефективності виконання робочих завдань). При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні, де здійснювалося дослідження, може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах на підприємстві і знаходяться в повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	10	4	4
Оксиди азоту	0,4	0,06	3
Оксид вуглецю	5	3	4

З метою підтримання оптимальних параметрів повітряного середовища робочої зони передбачено такі технічні та організаційні заходи: періодичне природне провітрювання шляхом відкриття вікон для забезпечення циркуляції повітря, видалення забрудненого повітря та надходження свіжого; систематичне вологе прибирання робочих поверхонь та приміщення загалом для ефективного видалення пилових частинок; функціонування вентиляційних систем для примусового обміну повітря, що забезпечує постійне видалення забруднень та надходження повітря ззовні або очищеного повітря.

5.2.3 Виробниче освітлення

Промислове освітлення виробничих приміщень, фабричних цехів та складських зон характеризується специфічними вимогами та нормативами, дотримання яких є ключовим для підвищення продуктивності праці, зниження

зорового напруження та забезпечення безпеки персоналу. Проектування системи промислового освітлення передбачає обов'язковий облік планування приміщення, рівня природної інсоляції, особливостей технологічного процесу, ступеня запиленості, вологості та агресивності навколишнього середовища. На основі цих факторів здійснюється підбір необхідного світлотехнічного обладнання. Пріоритетними критеріями при розрахунку освітлення виробничих просторів є забезпечення комфортних та безпечних умов праці.

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 система природного освітлення в приміщенні відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 5.3

Таблиця 5.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

З метою забезпечення належного рівня освітленості у приміщенні заплановано реалізацію наступних заходів: максимальне використання природного світла; впровадження енергоефективної системи штучного освітлення на основі світлодіодних (LED) ламп; систематичний технічний контроль стану освітлювальної системи; а також оптимізація планування

внутрішнього простору для максимального використання світлового потоку та уникнення його блокування.

5.2.4 Виробничий шум

Інтенсифікація виробничих процесів шляхом впровадження машин та механізмів супроводжується значним зростанням рівнів шуму та вібрації, що негативно позначається на працездатності та здоров'ї працівників. Механічні коливання елементів обладнання генерують акустичні хвилі, які сприймаються слуховим апаратом людини як звук. Шум визначається як сукупність неупорядкованих звуків різної частоти та інтенсивності, що викликають дискомфортні суб'єктивні відчуття. Збільшення впливу шуму на організм людини зумовлене переважно використанням сучасного високопродуктивного обладнання, широкою механізацією та автоматизацією виробничих операцій, а також підвищенням швидкостей обертання та руху в станках і агрегатах.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Допустимі нормативні значення рівнів шуму в процесі виконання роботи наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Рівень звукового тиску

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

В приміщенні рівень шуму відповідає нормативним вимогам, однак додатково можна передбачити такі заходи: раціональне розміщення виробничого обладнання та меблів та встановлення загальноприйнятих правил щодо дотримання шумового режиму.

5.2.5 Виробничі випромінювання

На сучасному етапі розвитку технологій електромагнітне випромінювання широко застосовується в різноманітних сферах, включаючи інтернет, радіо- та мобільний зв'язок, телебачення, радіолокацію та радіонавігацію, а також у медичній практиці та багатьох галузях промисловості, таких як металургійна, деревообробна, текстильна, легка та харчова. В умовах сьогодення практично неможливо повністю уникнути контакту з ЕМП. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника під час виконання роботи наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (Е), В/м	за магнітною складовою (Н), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30 МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0... 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 В/м

Потрібно зазначити, що навіть у межах одного житлового або робочого простору рівні електромагнітного впливу можуть значно коливатися в залежності від часу та розташування. Вплив ЕМП на біологічні системи людини може бути як прямим, що проявляється у термічному впливі на тканини,

пошкодженні клітинних структур та змінах у біологічних процесах, так і опосередкованим, асоційованим з розвитком патологій, зумовлених порушеннями функціонування імунної, нервової та інших систем організму.

Для обмеження впливу ЕМП на працівника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

5.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека об'єкта характеризується таким станом, при якому ймовірність виникнення пожежі є мінімальною, а у випадку її виникнення забезпечується захист людей від небезпечних факторів пожежі та збереження матеріальних цінностей. Досягнення пожежної безпеки забезпечується шляхом інтеграції системи запобігання пожежі та системи пожежного захисту. Пожежна безпека приміщення повинна відповідати вимогам Кодексу цивільного захисту України та НАПБ А.01.001-14 «Правила пожежної безпеки в Україні». За вибуховою і пожежною небезпекою приміщення належить до категорії Д, згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек.. У приміщенні знаходяться ПК та інша оргтехніка, що можуть спричинити пожежу.

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки П-Па (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.)

Згідно даних наведених у таблиці 5.1 будівля, в якій знаходиться приміщення, має II ступінь вогнестійкості, а приміщення можна віднести до категорії вибухопожежонебезпеки В (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Визначення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)							
	стіни				колони	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	переkritтя міжповерхові (у т. ч. горючі та над підвалами)	елементи суміщених покриттів
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	RE I 60 M0	E1 5, M0 E3 0, M1	EI 15 M1	R 12 0 M 0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються

5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

З метою запобігання пожеж у приміщенні впроваджуються наступні заходи:

- регулярне, щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та навчальних занять за програмою пожежно-технічного мінімуму для осіб, відповідальних за забезпечення пожежної безпеки;
- підтримання засобів протипожежного захисту в належному робочому стані⁴
- оперативне повідомлення про будь-які несправності пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання та інших протипожежних систем.

Експлуатація електромереж, електроприладів та апаратури здійснюється виключно в технічно справному стані з обов'язковим дотриманням інструкцій та рекомендацій заводів-виробників. При виявленні будь-яких дефектів електропроводки, пошкоджень вимикачів, розеток, запобіжників, штепсельних

з'єднань або інших електротехнічних виробів необхідно негайно знеструмити пошкоджену ділянку та вжити невідкладних заходів для відновлення їхньої пожежної безпеки, зокрема шляхом проведення кваліфікованого ремонту або заміни несправних елементів. Додатково слід періодично проводити огляд електромереж та електрообладнання на предмет виявлення потенційних несправностей та здійснювати профілактичне обслуговування для забезпечення їхньої надійної та безпечної роботи.

5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист являє собою інтегровану систему організаційних та технічних рішень, метою яких є гарантування безпеки людей, недопущення виникнення пожежі, локалізація її розповсюдження та створення сприятливих умов для ефективного пожежогасіння.

В усіх службових приміщеннях наявність затвердженого «Плану евакуації людей при пожежі» є обов'язковою. Цей документ визначає чіткий алгоритм дій персоналу у випадку виявлення початкової стадії пожежі та містить інформацію про розташування первинних засобів пожежогасіння. Враховуючи, що процес горіння виникає за наявності горючих речовин, окислювача та джерела запалювання, слід констатувати присутність усіх трьох ключових факторів ризику в даному робочому приміщенні. До горючих матеріалів належать будівельні елементи, використані для акустичного та естетичного оформлення інтер'єру, зокрема перегородки, дверні конструкції, підлогове покриття, а також ізоляційні матеріали кабельної продукції та інші потенційно займисті компоненти.

Потенційними джерелами займання у приміщенні можуть слугувати електронні компоненти персональних комп'ютерів, обладнання, що використовується для технічного обслуговування, системи електроживлення та кондиціонування повітря. Внаслідок різноманітних несправностей у цих пристроях можливе утворення перегрітих елементів, електричних іскор та дугових розрядів, здатних ініціювати горіння наявних горючих матеріалів.

Сучасні ПК характеризуються високою щільністю компонування елементів електронних схем, де сполучні провідники та кабелі розташовані на мінімальних відстанях один від одного. Проходження електричного струму через ці елементи супроводжується значним виділенням теплової енергії, що за певних умов може призвести до термічної деструкції ізоляційного покриття. Для забезпечення відведення надлишкового тепла від електронно-обчислювальної техніки використовуються системи вентиляції та кондиціонування повітря, які, при безперервній експлуатації, самі можуть становити додаткову загрозу виникнення пожежі.

На початкових етапах розвитку пожежі ефективним засобом локалізації та ліквідації є вогнегасники. У даному приміщенні переважно використовуються вуглекислотні вогнегасники, що зумовлено їхньою високою вогнегасною здатністю, безпекою для електронного обладнання та діелектричними властивостями вуглекислого газу. Остання характеристика дозволяє застосовувати ці вогнегасники навіть за умови неможливості негайного відключення електроживлення ураженої електроустановки.

В приміщенні наявна система автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння у відповідності до вимог ДБН В.2.5-56:2014, що передбачає використання вогнестійких кабелів в системах живлення та забезпечення автоматичного запуску системи оповіщення та управління евакуацією людей у випадку пожежі. Працівники повинні дотримуватися правил пожежної безпеки, таких як заборона паління в робочих приміщеннях, зберігання пожежогасних засобів та систематично проходити інструктажі з пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі отримано такі основні результати:

1. Досліджений метод оптимізації кількості контролерів у мультиконтролерних мережах SDN демонструє суттєві переваги порівняно з традиційним підходом. Метод дозволяє знизити середню кількість контролерів на 46 % завдяки динамічному управлінню, що сприяє зменшенню енергоспоживання, скороченню витрат на розгортання мережі та підвищенню її надійності.

2. Розглянутий метод підвищує ефективність використання контролерів на 53 % шляхом динамічного розподілу навантаження між ними у мультиконтролерних мережах SDN, що суттєво знижує загальні витрати на впровадження мережі.

3. Досліджений алгоритм кластеризації, який є модифікацією алгоритму FOREL, забезпечує ефективний вибір розташування маршрутизаторів для обслуговування користувачів, організації зв'язної mesh-мережі та інтеграції цієї мережі з базовою станцією мобільного зв'язку.

4. Модифікація алгоритму кластеризації, що передбачає перерозподіл елементів кластерів, дозволяє підвищити якість кластеризації за рахунок вирівнювання кількості елементів у виділених кластерах.

5. Запропонований метод маршрутизації трафіку в mesh-мережі базується на мінімізації інтегрального показника якості маршруту, який враховує досяжну швидкість передачі даних, рівень навантаження та ймовірність втрат, що забезпечує оптимальний вибір маршрутів.

6. Метод розподілу маршрутизаторів у рої БПЛА або на окремих/прив'язаних БПЛА є ефективним у випадках, коли розмір зони покриття маршрутизатора менший за зону обслуговування.

Розглянуті у роботі моделі та методи побудови інтелектуального ядра мережі зв'язку шостого покоління сприяють підвищенню ефективності застосування існуючих підходів до проектування мереж зв'язку. Досліджена

модельно-методична база забезпечує основу для подальших досліджень у сфері передачі послуг телеприсутності на відстані. Для подальшого розвитку теми рекомендується вивчити особливості трафіку, що генерується костюмами телеприсутності, а також розглянути можливості застосування штучного інтелекту для зменшення затримок при передачі даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Y. Wang et al., “A Survey on Metaverse: Fundamentals, Security, and Privacy,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, DOI: 10.1109/COMST.2022.3202047, Sept. 2022.
2. M. Xu et al., “Wireless Edge-Empowered Metaverse: A Learning-Based Incentive Mechanism for Virtual Reality,” *ICC 2022 — IEEE Int’l. Conf. Commun.*, Seoul, Korea, pp. 5220–25, DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838736, May 2022.
3. R. Cheng et al., “Will Metaverse Be Nextg Internet? Vision, Hype, and Reality,” *arXiv preprint arXiv:2201.12894*, Jan. 2022.
4. Y. J. Moon et al., “OFDM-based 25Gbps Wireless Backhaul System for 5G Convergence Service,” *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Barcelona, Spain, 2020, pp. 814-817, 10.1109/ICOIN48656.2020.9016621.
5. M. J. Piran and D. Y. Suh, “Learning-Driven Wireless Communications, towards 6G,” *2019 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE)*, 2019, pp. 219-224, 10.1109/iCCECE46942.2019.8941882.
6. K. Popoola, D. Grace and T. Clarke, “Capacity and Coverage Analysis of High-Altitude Platform (HAP) Antenna Arrays for Rural Vehicular Broadband Services,” *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-5, 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129557.
7. Li, F., Lam, K., Liu, X., Wang, L., 2020. Resource Allocation in Satellite-Based Internet of Things Using Pattern Search Method. *IEEE Access* 8, 110908–110914. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002834>.
8. Chen, S., Liang, Y., Sun, S., Kang, S., Cheng, W., Peng, M., 2020. Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed. *IEEE Wireless Communications* 27 (2), 218–228 <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900333>.

10. Z. Zhang et al., “User Activity Detection and Channel Estimation for Grant-Free Random Access in LEO Satellite-Enabled Internet-of-Things,” in *IEEE Internet of Things Journal*, 10.1109/JIOT.2020.2997336
11. Nawaz, S.J., Sharma, S.K., Wyne, S., Patwary, M.N., Asaduzzaman, M., 2019.
12. Quantum Machine Learning for 6G Communication Networks: State-of-the-Art and Vision for the Future. *IEEE Access* 7, 46317–46350. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909490>
13. M. Fadlullah and N. Kato, “HCP: Heterogeneous Computing Platform for Federated Learning Based Collaborative Content Caching Towards 6G Networks,” in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 10.1109/TETC.2020.2986238
14. Kato, N. et al., 2019. Optimizing Space-Air-Ground Integrated Networks by Artificial Intelligence. *IEEE Wireless Commun.* 26 (4), 140–147. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800365>.
15. “White Paper: Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence.” <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>, accessed in Dec. 2019.
16. T. R. Gadekallu et al., “Blockchain for the Metaverse: A Review,” *arXiv preprint arXiv:2203.09738*, Mar. 2022.
17. S. K. Jagatheesaperumal et al., “Advancing Education Through Extended Reality and Internet of Everything Enabled metaverses: Applications, Challenges, and Open Issues,” *arXiv preprint arXiv:2207.01512*, June 2022.
18. P. Bhattacharya et al., “Coalition of 6G and Blockchain in AR/VR Space: Challenges and Future Directions,” *IEEE Access*, vol. 9, Dec. 2021, pp. 168,455–84.
19. T. Huynh-The et al., “Artificial Intelligence for the metaverse: A Survey,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 117, Jan. 2023.
20. R. Chengoden et al., “Metaverse for Healthcare: A Survey on Potential Applications, Challenges and Future Directions,” *arXiv preprint arXiv:2209.04160*, Sept. 2022.

21. W. Saad, M. Bennis, and Mingzhe Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, June 2020, pp. 134–42.
22. A. I. Salameh and M. El Tarhuni, "From 5G to 6G — Challenges, Technologies, and Applications," *Future Internet*, vol. 14, no. 4, Apr. 2022, pp. 117.
23. Y. Wu, G. Lin, and J. Ge, "Knowledge-Powered Explainable Artificial Intelligence for Network Automation toward 6G," *IEEE Network*, vol 36, no. 3, June 2022, pp. 16–23.
24. Z. Allam et al., "The Metaverse as A Virtual Form of Smart Cities: Opportunities and Challenges for Environmental, Economic, and Social Sustainability in Urban Futures" *Smart Cities*, vol. 5, no. 3, July 2022, pp. 771–801.
25. El Marai, Oussama and Taleb, Tarik and Song, JaeSeung, "AR-based Remote Command and Control Service: Self-driving Vehicles Use Case" *IEEE Network*, DOI: 10.1109/MNET.119.2200058, Oct 2022.
26. El Marai, Oussama, and Tarik Taleb, "Smooth and Low Latency Video Streaming for Autonomous Cars During Handover," *IEEE Network*, vol. 34, no.6, Dec. 2020, pp. 302–09.
27. D. Yang et al., "Expert Consensus on the Metaverse in Medicine," *Clinical eHealth*, vol. 5, Dec 2022, pp. 1–9.
28. Faisal, V.A. "NFV MANO-Management & Orchestration", *TelcoCloud Bridge*, 2020.
29. Taleb, T. 6G System Architecture: A Service of Services Vision / Tarik Taleb, Chaika Benzaid, Miguel Bordallo Lopez and etc. // *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, Volume 3, Issue 3, December 2022
30. Akyildiz, F. Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for the Next Decade. / Ian F. Akyildiz, Life Fellow, Chong Han, Zhifeng Hu, Shuai Nie, Josep M. Jornet // *arXiv:2112.13187v3 [eess.SP]* 27 Apr 2022.

31. Muthanna, M.S.A., et al.: Deep reinforcement learning based transmission policy enforcement and multi-hop routing in QoS aware LoRa IoT networks. *Comput. Commun.. Commun.* 183, 33–50 (2022)
32. Dame, M.: *The Kubernetes Operator Framework Book: Overcome complex Kubernetes cluster management challenges with automation toolkits* (2022)
33. Kubernetes Pods [website]. Text: electronic (2023). <https://www.knowledgehut.com/blog/devops/kubernetes-pods>. Accessed 22 Aug 2023
34. Muschko, B.: *Certified Kubernetes Application Developer (CKAD) Study Guide: In-Depth Guidance and Practice*. O'Reilly Media, Sebastopol (2021)
35. Rosso, J., Lander, R., Brand, A., Harris, J.: *Production Kubernetes*. O'Reilly Media, Sebastopol (2021)
36. Kubernetes Documentation [website]. Text: electronic (2023). <https://kubernetes.io/docs/home/>. Accessed 22 Aug 2023
37. Puliafito, C., Vallati, C., Mingozi, E., Merlino, G., Longo, F., Puliafito, A.: Container migration in the fog: a performance evaluation. *Sensors* 19(7), 1–22 (2019)
38. Mohan, A., Yezalaleul, J., Chen, A., Enkhjargal, T.: *Seamless container migration between cloud and edge*. CA, Santa Clara: Santa Clara University (2021)
39. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
40. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
41. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/98.156~2014.pdf>

42. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. // Офіційний вісник України від 07.09.2009 - 2009 р., № 66.

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

44. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

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

46. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

47. НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>

48. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI

49. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>

50. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

51. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

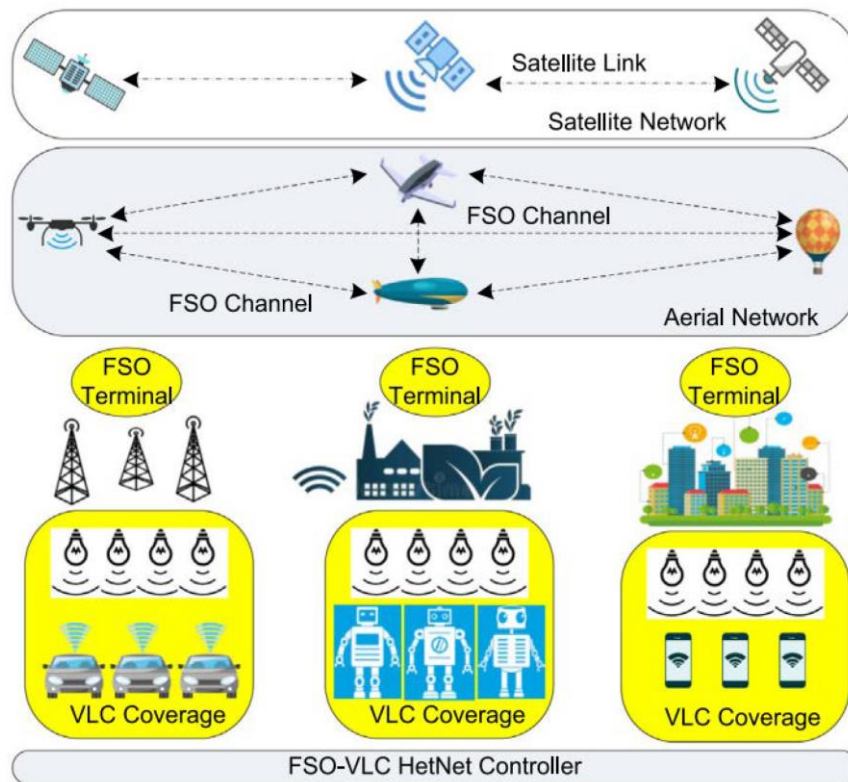


Рисунок 1 – Архітектура оптичної гібридної мережі в інфраструктурі 6G-SAGIN

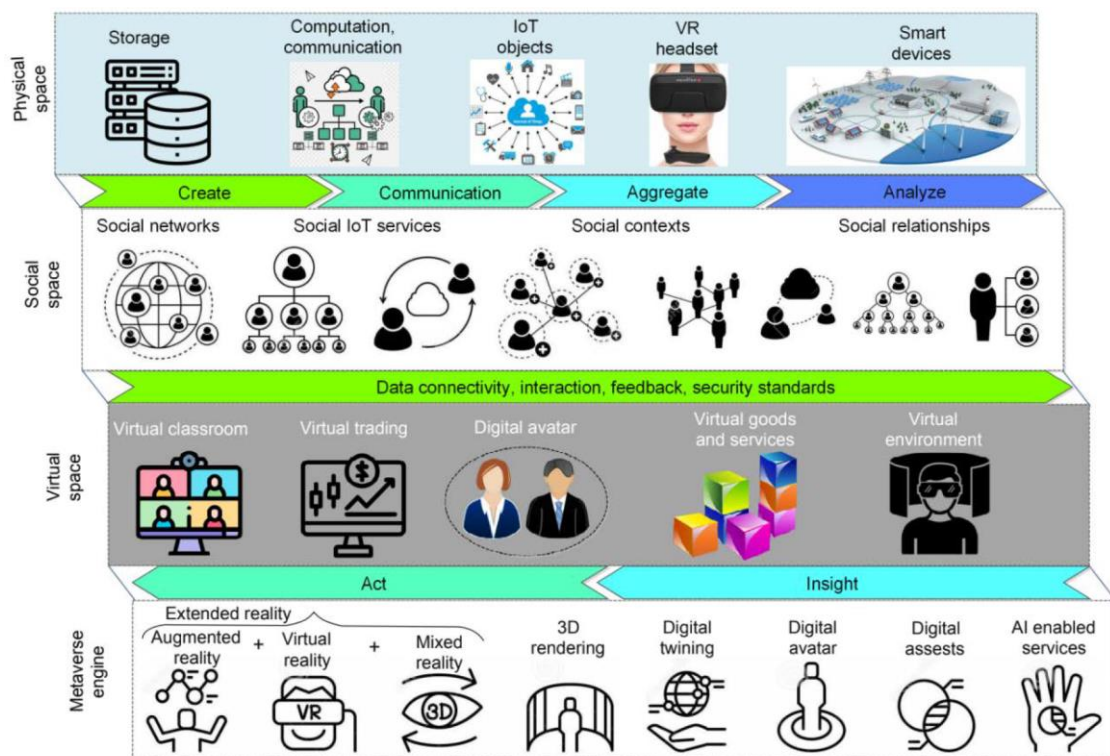


Рисунок 2 – Багаторівнева модель метавсесвіту в контексті систем зв'язку 6G

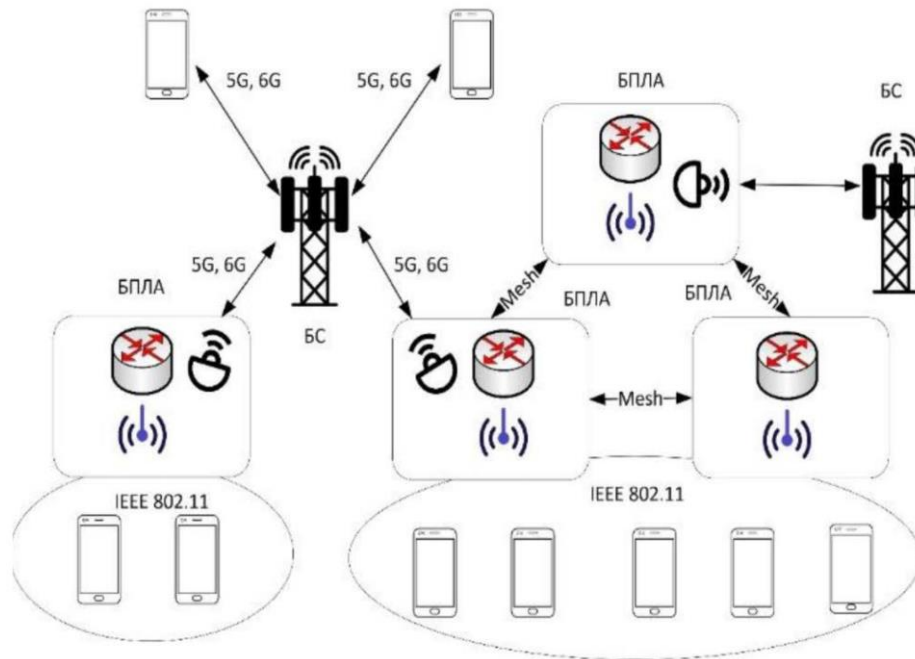


Рисунок 3 – Модель мережі з використанням маршрутизаторів на БПЛА

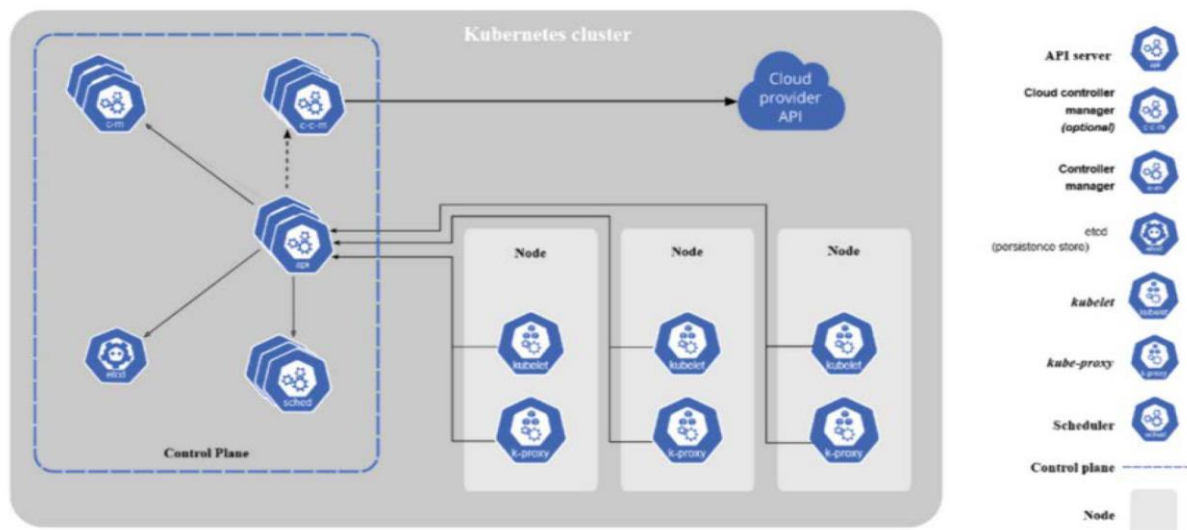


Рисунок 4 – Структурна схема кластера Kubernetes

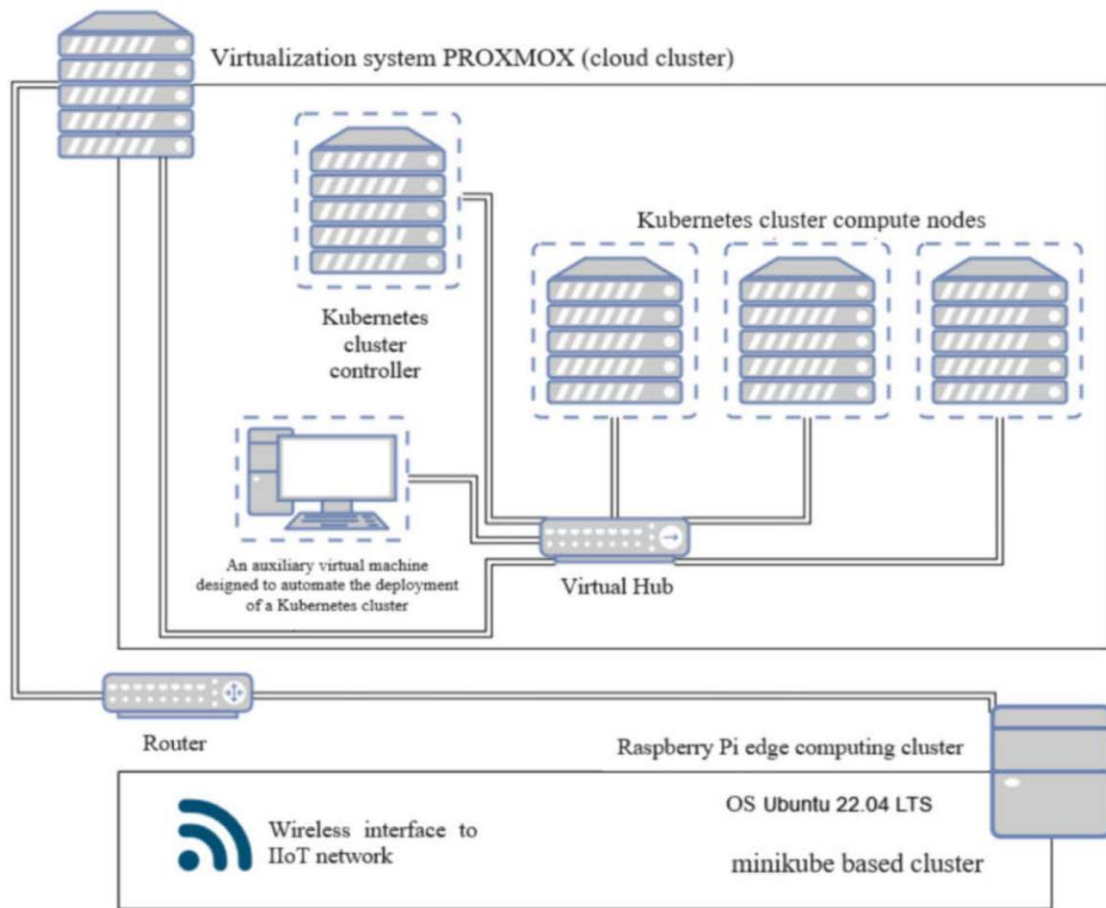


Рисунок 5 – Структурна схема тестового середовища та мережєвих з'єднань

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Методи підвищення інформаційної ефективності телекомунікаційних мереж шостого покоління

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мс
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,38 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Бакюра Є.В.

(прізвище, ініціали)