

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій»

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

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ  
Васильківський М.В.  
«8» 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС  
Осадчук В.С.  
«10» 12 2023 р.

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри ІКСТ  
Кичак В.М.  
д.т.н., проф. Кичак В.М.  
«11» 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)

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

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**

**“19” 09 2023 року**



## **З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Крещенко Маріні Сергіївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій

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

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

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

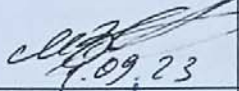
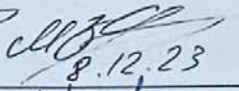
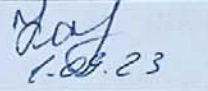
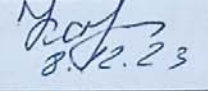
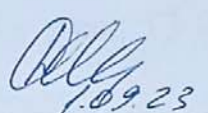
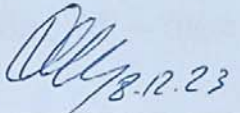
3. Вихідні дані до роботи Швидкість передавання даних - 1 Тбіт/с; затримка передавання даних в мережі – 0,1 мс; затримка оброблення даних периферійним штучним інтелектом в мережі – 10 нс; доступність і надійність мережі – 99,99999%; щільність з'єднання в ІоЕ мережі –  $10^7$  пристроїв/км<sup>2</sup>; мобільність пристроїв в мережі – 1000 км/год; діапазону частот пристроїв мережі - 0,1-10 ТГц; SNR лінійного тракту – 20 дБ.

4. Зміст текстової частини: мережі мобільного зв'язку 6G; основні вимоги до мережі 6G; ключові технології мобільного зв'язку 6G; архітектурні напрямки систем та мереж 6G; мережі радіодоступу 6G; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
алгоритм федеративного навчання моделі безпроводної системи; оптимізація інтелектуальної мережі ІоТ з периферійним навчанням; топологія безпроводної літаючої мережі доступу 6G; архітектура літаючої безпроводної системи доступу; архітектура тривірневої обчислювальної інфраструктури інтелектуальної мережі ІоТ; узагальнена архітектура традиційного RAN та O-RAN; архітектура високого рівня O-RAN.



## 6. Консультанти розділів роботи

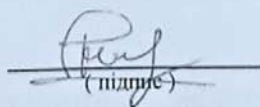
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 1.09.23	 8.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 8.12.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька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

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

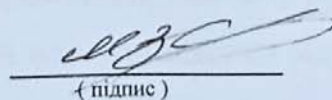
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Мережі мобільного зв'язку 6G; Основні вимоги до мережі 6G	17.09.2023р.	
3.	Ключові технології мобільного зв'язку 6G	06.10.2023р.	
4.	Архітектурні напрямки систем та мереж 6G	27.10.2023р.	
5.	Мережі радіодоступу 6G	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент

  
(підпис)

Крещенко М.С.

Керівник роботи

  
(підпис)

Васильківський М.В.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Крещенко М. С. Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 149 – стор., 35 – рис., 13 – табл., 65 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення швидкості передачі даних в інтегрованих та інтелектуальних мережах, здатних підтримувати різноманітні застосування від масштабних мереж IoT до квантової комунікації для створення більш інтегрованих, ефективних та стійких мереж, які можуть підтримувати різноманітні застосування від розумних міст до квантових обчислень і покращення в якості зв'язку, ефективності використання ресурсів та нових можливостей для різноманітних застосувань.

Виконані дослідження є важливим етапом у розвитку майбутніх мобільних мереж, спрямованих на створення інтелектуальних, гнучких та безпечних систем, що можуть відповідати вимогам технологій 6G. Разом з тим, розглянуто широкий спектр ключових аспектів розробки мобільних мереж у контексті високочастотного діапазону (THz) та систем 6G.

Досліджено вплив технологій, таких як штучний інтелект, квантовий зв'язок та блокчейн, на мережеву функціональність. Виконано аналіз механізмів для ефективного використання ресурсів та оптимізації мережевої продуктивності.

Досліджено особливості створення гнучкої архітектури для швидкого впровадження нових сервісів та технологій. Визначено можливості використання технологій Edge Computing та диференційованого обслуговування для поліпшення продуктивності.

Розглянуто методи підвищення ефективності та гнучкості систем радіодоступу, використовуючи технології ARAN, AI-RAN та O-RAN. Здійснено оцінювання вимог та можливостей вдосконалення мережевої архітектури.

Ключові слова: мережа 6G; штучний інтелект, квантовий зв'язок; блокчейн; система радіодоступу.

## ABSTRACT

UDC 621.391

Kreschenko M. S. Wireless systems and networks using 6G technologies - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU, 2023. 149 p., 35 figures, 13 tables, 65 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to increase the data rate in integrated and intelligent networks capable of supporting a variety of applications from large-scale IoT networks to quantum communication to create more integrated, efficient and resilient networks that can support a variety of applications from smart cities to quantum computing and improve communication quality, resource efficiency and new opportunities for a variety of applications.

This research is an important step in the development of future mobile networks aimed at creating intelligent, flexible and secure systems that can meet the requirements of 6G technologies. At the same time, a wide range of key aspects of mobile network development in the context of the high-frequency band (THz) and 6G systems are considered.

The impact of technologies such as artificial intelligence, quantum communication, and blockchain on network functionality is investigated. The mechanisms for efficient use of resources and optimisation of network performance are analysed.

The features of creating a flexible architecture for the rapid introduction of new services and technologies are investigated. The possibilities of using Edge Computing and differentiated service technologies to improve performance are identified.

The methods of increasing the efficiency and flexibility of radio access systems using ARAN, AI-RAN and O-RAN technologies are considered. The requirements and opportunities for improving the network architecture are assessed.

Keywords: 6G network; artificial intelligence, quantum communication; blockchain; radio access system.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	10
1 МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G.....	16
1.1 Впровадження технологій 6G .....	16
1.2 Основні тенденції переходу до 6G .....	17
1.3 Перспективи розширення IoT в напрямку IoE.....	19
1.4 Широка доступність невеликих обсягів даних .....	21
1.5 Наявність самопідтримуваних мереж .....	22
1.6 Конвергенція зв'язку, обчислень, управління, локалізації та зондування (3CLS).....	24
1.7 Інтернет речей з мінімальним споживанням енергії.....	25
1.8 Розвиток інформаційних технологій.....	26
1.9 Комунікація без гаджетів .....	27
1.10 Висновки до розділу 1 .....	29
2 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО МЕРЕЖІ 6G .....	30
2.1 Вимоги та бачення 6G.....	30
2.2 Особливості вдосконалення мобільного широкосмугового зв'язку (FeMBB).....	32
2.3 Надмасивний зв'язок машинного типу .....	34
2.4 Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою .....	35
2.5 Надзвичайно низькоенергетичний зв'язок.....	37
2.6 Зв'язок на великі відстані та висока мобільність .....	38
2.7 Висока ефективність використання спектру .....	39
2.8 Висока пропускна здатність по всій території .....	39
2.9 Мобільний широкосмуговий зв'язок з низькою затримкою (MBBLL) .....	40
2.10 Масовий широкосмуговий машинний зв'язок .....	41
2.11 Масивний зв'язок машинного типу з низькою затримкою (mLLMT) .....	42
2.12 Екстремальні комунікації на основі III.....	44

	3
2.13 Висновки до розділу 2 .....	45
3 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G .....	46
3.1 Мережеві технології радіозв'язку .....	46
3.2 Методи оброблення даних інтелектуальних систем .....	51
3.3 Методи розвитку децентралізованих систем та забезпечення інформаційної безпеки даних.....	54
3.4 Граничні обчислення .....	56
3.5 Квантові комунікації.....	61
3.6 Інші новітні технології.....	63
3.7 Висновки до розділу 3 .....	69
4 АРХІТЕКТУРНІ НАПРЯМКИ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ 6G .....	71
4.1 Розвиток мережевої архітектури .....	71
4.2 Інтелектуальна мережа з підмереж .....	73
4.3 Екологічно чиста інтелектуальна мережа.....	75
4.4 Мережева архітектура на базі кібернетичного зв'язку .....	77
4.5 Висновки до розділу 4 .....	79
5 МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ 6G .....	81
5.1 Основні аспекти та вимоги.....	81
5.2 Мережі ефірного радіодоступу .....	87
5.3 RAN з підтримкою штучного інтелекту .....	92
5.4 Відкрий RAN .....	97
5.5 Прогнозування мережевого трафіку з використанням ШІ .....	101
5.6 Висновки до розділу 5 .....	105
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	106
6.1 Оцінювання наукового ефекту.....	106
6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	109
6.2.1 Витрати на оплату праці.....	110
6.2.2 Відрахування на соціальні заходи .....	113
6.2.3 Сировина та матеріали.....	114
6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	115

	4
6.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	116
6.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт .....	117
6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....	118
6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей .....	120
6.2.9 Службові відрядження.....	121
6.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	122
6.2.11 Інші витрати.....	122
6.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	123
6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи .....	124
6.4 Висновок до розділу 6.....	126
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	127
7.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт .....	128
7.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця .....	128
7.1.2 Електробезпека приміщення.....	130
7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	131
7.2.1 Мікроклімат .....	131
7.2.2 Склад повітря робочої зони.....	132
7.2.3 Виробниче освітлення.....	134
7.2.4 Виробничий шум.....	135
7.2.5 Виробничі випромінювання.....	136
7.2.6 Психофізіологічні фактори .....	137
7.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	138
7.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі .....	139
7.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	139
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
ДОДАТКИ.....	152
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА .....	153



Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень .....	158
--	-----

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ASTA - Прибуття побачити середні значення часу  
BHCA - Спроби дзвінків у години зайнятості  
BR - Резервування смуги пропускання  
b.u. - одиниці пропускну здатності  
CAC - Контроль допуску викликів/з'єднань  
CBP - Імовірність блокування виклику  
CCS - Центральний виклик в секундах  
CDTM - Порогова модель, що залежить від з'єднання  
CS - Повне спільне використання  
DiffServ - Диференційовані послуги  
EMLM - Ерлангова модель багатошвидкісних втрат  
erl - Одиниця вимірювання трафіку Erlang  
GB - Глобальний баланс  
GoS - Клас обслуговування  
ІКТ - Інформаційно-комунікаційні технології  
IntServ - Інтегровані послуги  
IP - Інтернет-протокол  
МСЕ-Т - Міжнародний союз електрозв'язку - Сектор стандартизації  
LB - Місцевий баланс  
MMPP - Марківський модульований пуасонівський процес  
MPLS - Багатопротокольна комутація з маркуванням  
MRM - Модель багаторазових спроб  
MTM - Багатопорогова модель  
PDF - Функція розподілу ймовірностей  
pdf - Функція щільності розподілу ймовірностей  
QoS - Якість обслуговування  
r.v. - випадкова(і) змінна(и)  
RED - випадкове раннє виявлення

RLA - Апроксимація зменшеного навантаження  
SIRO - обслуговування у випадковому порядку  
STM - Однопорогова модель  
TCP - Протокол управління транспортом  
AEC - Екстремальний зв'язок з підтримкою штучного інтелекту  
AI - Штучний інтелект  
AR - Доповнена реальність  
AV - Автономні транспортні засоби  
BCI - Мозково-комп'ютерний інтерфейс  
CAV - Підключені автономні транспортні засоби  
CPS - Кібер-фізичні системи  
CS - Компресійне зондування  
D2D - Пристрій-пристрій  
DLT - Технології розподіленого реєстру  
DRL - Глибоке навчання з підкріпленням  
EI - Граничний інтелект  
ELPC - Надзвичайно малопотужний зв'язок  
ETSI - Європейський інститут телекомунікаційних стандартів  
eMBB - розширений мобільний широкосмуговий зв'язок  
eMTC - розширений зв'язок машинного типу  
eRLLC - Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою  
FeMBB - Мобільний широкосмуговий зв'язок з подальшим вдосконаленням  
FL - Федеративне навчання  
HCS - Послуги, орієнтовані на людину  
HT - Голографічна телеприсутність  
IoBNT - Інтернет біо-нано-речей  
IoMT - Інтелектуальний Інтернет медичних речей  
IIoT - Інтернет промислових розумних речей  
IIoT - Промисловий інтернет речей  
IoE - Інтернет всього

IoH - Інтернет охорони здоров'я

IoNT - Інтернет нано-речей

IoT - Інтернет речей

IoV - Інтернет транспортних засобів

IP - Інтернет-протокол

MCE - Міжнародний союз електрозв'язку

IRS - Інтелектуальна відбивна поверхня

ITS - Інтелектуальна транспортна система

IWD - Інтелектуальні пристрої, що носяться

KPI - Ключовий показник ефективності

LDHMC - Міжміський та високомобільний зв'язок

LIS - Великі інтелектуальні поверхні

LSTM - Довготривала короткочасна пам'ять

LTE - Довгострокова еволюція

MBLL - Мобільний широкосмуговий зв'язок з низькою затримкою

MEC - Периферійні обчислення з множинним доступом

mHealth - мобільне здоров'я

MIMO - Багатоканальний вхід і багатоканальний вихід

ML - Машинне навчання

mLLMT - масовий тип машин з низькою затримкою

MMS - Служби мультимедійних повідомлень

mMTC - Масовий зв'язок машинного типу

MR - Змішана реальність

MTC - Машинний тип зв'язку

MTP - Motion-To-Photon

NB-IoT - Вузкосмуговий Інтернет речей

NOMA - Неортогональний множинний доступ

NTN - Наземні мережі

QoPE - Якість фізичного досвіду

RF - Радіочастота



RIS - Інтелектуальна поверхня, що реконфігурується

SAGINs - Мережі та взаємопов'язані мережі "космос - повітря - земля

SDN - Програмно-визначені мережі

SDO - Організації з розробки стандартів

SMS - Служби коротких повідомлень

SSN - Самодостатні мережі

U2X - Безпілотні літальні апарати для всього

БПЛА - безпілотні літальні апарати

UHD - надвисока роздільна здатність

umMTC - надмасивний зв'язок машинного типу

uRLLC - наднадійний зв'язок з низькою затримкою

VANET - Спеціальні мережі для транспортних засобів

VoIP - передача голосу через IP

VR - Віртуальна реальність

VLC - видимий світловий зв'язок

XR - Розширена реальність

RPL - Мережі з низьким енергоспоживанням і втратами

ZSM - Безконтактне управління мережею та послугами

## ВСТУП

*Актуальність теми.* У той час як мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) розгортаються по всьому світу, вже з'являється безліч нових додатків і варіантів використання, зумовлених сучасними тенденціями, які кидають виклик можливостям 5G. Це спонукало академічних і промислових дослідників переосмислити і працювати над наступним поколінням мереж мобільного зв'язку, яке надалі називатиметься 6G. Очікується, що мережі 6G ознаменують собою революційну трансформацію парадигми мобільного зв'язку завдяки досягненню надзвичайних мережевих можливостей для задоволення потреб майбутнього суспільства, керованого даними.

Нещодавні розробки в галузі зв'язку представили багато нових концепцій, таких як периферійний інтелект, зв'язок на частотах від 6,5 ГГц до ТГц, неортогональний множинний доступ, великі інтелектуальні поверхні і самопідтримувані мережі [1-3].

Ці концепції розвиваються, щоб стати повноцінними технологіями, які можуть стати основою майбутніх поколінь мереж зв'язку. З іншого боку, очікується, що такі додатки, як голографічна телеприсутність, розширена реальність, інтелектуальні мережі 2.0 та Індустрія 5.0 стануть основними додатками майбутніх мереж зв'язку. Однак вимоги цих додатків, такі як надвисока швидкість передачі даних, доступ в режимі реального часу до потужних обчислювальних ресурсів, надзвичайно низька затримка, точна локалізація і зондування, а також надзвичайно висока надійність і доступність, перевершують мережеві можливості, обіцяні 5G. IoT, який стає можливим завдяки 5G, навіть перетворюється на Інтернет всього (IoE), який має намір об'єднати величезну кількість датчиків, пристроїв і кіберфізичних систем, що виходять за рамки можливостей 5G. Це надихнуло дослідницьку спільноту на розробку мереж мобільного зв'язку 6G [4-6]. Очікується, що 6G використовуватиме розробки нових комунікаційних технологій, повністю підтримуватиме нові додатки, з'єднуватиме величезну кількість пристроїв і

надаватиме доступ у реальному часі до потужних обчислювальних ресурсів і сховищ даних. Очікується, що мобільні мережі 6G забезпечать екстремальні пікові швидкості передачі даних понад 1 Тбіт/с. Наскрізні затримки будуть непомітними і не перевищуватимуть 0,1 мс. Мережі 6G забезпечать доступ до потужного периферійного інтелекту, затримки обробки якого не перевищуватимуть 10 нс. Очікується, що доступність та надійність мережі перевищать 99,99999%. Очікується, що буде підтримуватися надзвичайно висока щільність з'єднання - понад  $10^7$  пристроїв на км<sup>2</sup>, що сприятиме розвитку ІоЕ. Ефективність використання спектру 6G буде більш ніж у 5 разів вищою, ніж у 5G, при цьому очікується підтримка екстремальної мобільності до 1000 км/год. Також передбачається, що розвиток 6G буде зосереджений на безлічі нових вимог, таких як подальше розширення мобільного широкопasmового зв'язку (FeMBB), надмасивний зв'язок машинного типу (umMTC), мобільний широкопasmовий зв'язок з низькою затримкою (mBBL) і масивний зв'язок машинного типу з низькою затримкою (mLLMT). Ці вимоги будуть забезпечені завдяки новим технологіям, таким як ТГц-спектр, федеративне навчання, периферійний штучний інтелект (ШІ), зондування зі стисненням, блокчейн і 3D-мережі. Крім того, 6G сприятиме появі нових додатків, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), голографічна телеприсутність, ІоЕ, Індустрія 5.0 і спільне автономне водіння. У світлі цього бачення багато нових дослідницьких робіт і проєктів спрямовані на розробку бачення 6G, технологій, варіантів використання, додатків і стандартів. Передбачається, що бачення 6G буде сформовано до 2024-2025 років, щоб встановити вимоги до 6G і оцінити розвиток 6G, технології, стандарти [7].

*Аналіз останніх досліджень.* Мобільні мережі розвиваються з 1980-х років, в результаті чого кожне десятиліття з'являється нове покоління мобільних мереж. Зараз розгортаються мобільні мережі п'ятого покоління (5G). Однак дослідження і розробки в галузі мобільного зв'язку свідчать про те, що до 2030 року можна очікувати появу мобільних мереж шостого покоління (6G).

У той час як мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) розгортаються по всьому світу, вже з'являється безліч нових додатків і сценаріїв використання, зумовлених сучасними тенденціями, які кидають виклик можливостям 5G. Це спонукає дослідників переосмислити і працювати над створенням мереж мобільного зв'язку наступного покоління (далі - 6G) [1, 2]. Очікується, що мережі мобільного зв'язку шостого покоління (6G) ознаменують собою революційну трансформацію парадигми мобільного зв'язку завдяки досягненню надзвичайних мережевих можливостей для задоволення потреб майбутнього суспільства, керованого даними.

За останні чотири десятиліття мобільні мережі змінили п'ять поколінь. Кожні десять років з'являється нове покоління мобільних мереж, що містить більше технологій та можливостей, які дають людям змогу покращити свою роботу та спосіб життя. Епоха до появи мобільних телефонів до 1980-х років позначена як нульове покоління (0G) мереж мобільного зв'язку, які забезпечували просту функціональність радіозв'язку за допомогою таких пристроїв, як рації [3].

Перше покоління (1G) представило загальнодоступні та комерційно доступні стільникові мережі у 1980-х роках. Ці мережі забезпечували голосовий зв'язок за допомогою аналогової мобільної технології [4]. Друге покоління (2G) мереж мобільного зв'язку ознаменувало перехід мобільних мереж від аналогових до цифрових. Воно підтримувало базові послуги передачі даних, такі як передача коротких повідомлень, на додаток до голосового зв'язку [5]. Третє покоління (3G) запровадило вдосконалені послуги мобільного широкопasmового зв'язку та уможливило нові додатки, такі як передача мультимедійних повідомлень, відеодзвінки та мобільне телебачення [6]. У четвертому поколінні (4G) було впроваджено подальше вдосконалення мобільних широкопasmових послуг, all-IP-зв'язок, передачу голосу через IP (VoIP), потокове відео надвисокої чіткості та онлайн-ігри [7].

Мережі мобільного зв'язку 5G вже розгортаються по всьому світу. 5G підтримує розширений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), що



забезпечує пікову швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с. Крім того, наднадійний зв'язок з низькою затримкою (uRLLC) мінімізує затримки до 1 мс, а масовий зв'язок машинного типу (mMTC) підтримує у 100 разів більше пристроїв на одиницю площі порівняно з 4G. Очікувана надійність та доступність мережі становить понад 99,999% [8].

Софтверізація мережі є важливою технологією 5G, яка забезпечує динамічність, програмованість та абстрагування мереж [9]. Можливості 5G уможливили нові додатки, такі як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), змішана реальність (MR), автономні транспортні засоби, Інтернет речей (IoT) та Індустрія 4.0 [10, 11].

Останні розробки в галузі зв'язку представили багато нових концепцій, таких як граничний інтелект (EI), зв'язок на частотах від 6 ГГц до ТГц, неортогональний множинний доступ (NOMA), великі інтелектуальні поверхні (LIS), ройові мережі та самопідтримувані мережі (SSN) [12, 13]. Ці концепції розвиваються, щоб стати повноцінними технологіями, які можуть стати основою майбутніх поколінь мереж зв'язку. З іншого боку, очікується, що такі додатки, як голографічна телеприсутність (HT), безпілотні літальні апарати (БПЛА), розширена реальність (XR), інтелектуальні мережі 2.0, промисловість 5.0, а також космічний і глибоководний туризм стануть основними додатками майбутніх мереж зв'язку. Однак вимоги цих додатків, такі як надвисокі швидкості передачі даних, доступ в режимі реального часу до потужних обчислювальних ресурсів, надзвичайно низька затримка, точна локалізація і зондування, а також надзвичайно висока надійність і доступність, перевершують можливості мережі, обіцяні 5G [14, 15]. IoT, який підтримується 5G, навіть зростає, перетворюючись на Інтернет всього (IoE), який має намір з'єднати величезну кількість датчиків, пристроїв і кіберфізичних систем (CPS), що виходять за межі можливостей 5G.

Це надихнуло дослідницьку спільноту на розробку мереж мобільного зв'язку 6G. Очікується, що 6G використовуватиме розробки нових комунікаційних технологій, повністю підтримуватиме нові додатки,

з'єднуватиме величезну кількість пристроїв і надаватиме доступ у реальному часі до потужних обчислювальних ресурсів і сховищ даних.

*Мета і завдання роботи.* Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення швидкості передачі даних в інтегрованих та інтелектуальних мережах, здатних підтримувати різноманітні застосування від масштабних мереж IoT до квантової комунікації за рахунок нових технологій 6G для створення більш інтегрованих, ефективних та стійких мереж, які можуть підтримувати різноманітні застосування від розумних міст до квантових обчислень і покращення в якості зв'язку, ефективності використання ресурсів та нових можливостей для різноманітних застосувань.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження ключовий тенденцій розвитку мобільних мереж із високочастотним діапазоном (THz), а також розвитку бездротових мереж в цілому;

- аналіз мереж 6G, що передбачає врахування нових вимог та викликів, які можуть виникнути з впровадженням нових технологій та розширення функціональності для задоволення потреб майбутніх додатків;

- методи створення інтелектуальних, безпечних та ефективних мереж 6G;

- розробка архітектури мобільних систем і мереж 6G, яка має бути відзначена гнучкістю, інтелектуальністю та енергоефективністю, щоб відповідати потребам майбутніх мереж та додатків;

- визначення концепції та вимоги впровадження мереж радіодоступу в майбутніх системах 6G, покликаних враховувати різноманітні вимоги та виклики сучасного бездротового зв'язку.

З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.

*Об'єктом дослідження є архітектура бездротових систем і мереж.*

*Предметом дослідження є розробка інфраструктури мережі, яка буде здатна відповідати викликам та потребам розумного світу, що розвивається.*

*Методи досліджень* базуються на використанні: математичних моделей та симуляцій для аналізу та прогнозування характеристик безпроводних систем; методів машинного навчання для виявлення закономірностей, оптимізації роботи систем та передбачення покращень; методи, що дозволяють науковцям та інженерам вивчати, розробляти та вдосконалювати технології 6G для майбутніх безпроводних систем і мереж.

*Новизна одержаних результатів:*

Дослідження та розробка мобільних мереж із високочастотним діапазоном (THz) та систем 6G включає широкий спектр аспектів.

Здійснено дослідження властивостей THz-зв'язку, включаючи втрати, взаємодію з атмосферою та інші перешкоди. Здійснено вивчення нових вимог та викликів, таких як велика пропускна здатність, низька затримка, забезпечення конфіденційності та безпеки.

Виконано оцінювання впливу нових технологій, таких як штучний інтелект, квантовий зв'язок та блокчейн, на функціональність мережі. Здійснено дослідження механізмів керування ресурсами та оптимізації мережі.

Виконано розроблення гнучкої архітектури, здатної до швидкого впровадження нових сервісів та технологій. Вивчення можливостей обчислення на краю (Edge Computing) та диференційованого обслуговування.

Досліджено технології ARAN, AI-RAN та O-RAN для розробки ефективних та гнучких систем радіодоступу. Аналіз вимог до мережевого трафіку та можливостей вдосконалення мережевої архітектури.

Вказані результати досліджень спрямовані на створення майбутніх мобільних мереж, які будуть інтелектуальними, гнучкими, безпечними та здатними відповідати потребам різноманітних додатків в епоху 6G.

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

# 1 МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G

## 1.1 Впровадження технологій 6G

Очікується, що мережі 6G будуть більш потужними, інтелектуальними, надійними, масштабованими і енергоефективними, щоб задовольнити всі очікування, які не можуть бути реалізовані з 5G. 6G також повинен відповідати будь-яким новим вимогам, таким як підтримка нових технологій, додатків і нормативних актів, що з'являться в наступному десятилітті.

Рисунок 1.1 ілюструє еволюцію мобільних мереж, розкриваючи ключові особливості кожного покоління мобільних мереж. Передбачувані вимоги, бачення, засоби і додатки 6G також висвітлені для того, щоб сформулювати загальне уявлення про сучасне розуміння 6G.

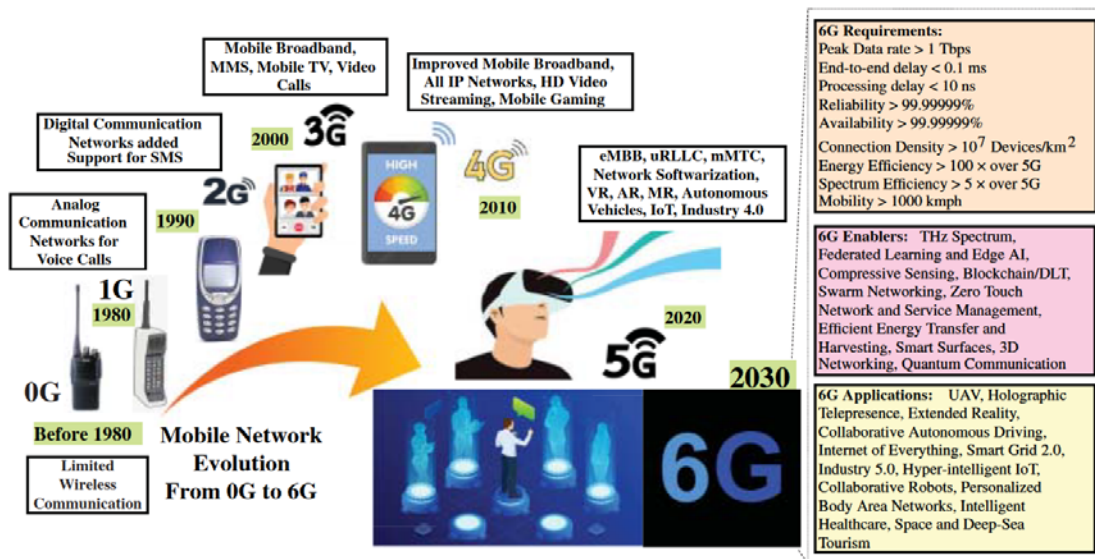


Рисунок 1.1 – Аналіз розвитку мобільних мереж від 0G до 6G

Очікується, що мережі мобільного зв'язку 6G, як це передбачається сьогодні, забезпечуватимуть екстремальні пікові швидкості передачі даних понад 1 Тбіт/с. Наскрізні затримки будуть непомітними і не перевищуватимуть 0,1 мс. Мережі 6G забезпечать доступ до потужного периферійного інтелекту,



затримки в обробці якого не перевищуватимуть 10 нс. Очікується, що доступність і надійність мережі перевищить 99,99999%. Очікується, що буде підтримуватися надзвичайно висока щільність з'єднання - понад  $10^7$  пристроїв/км<sup>2</sup>, що сприятиме розвитку ІоЕ. Ефективність використання спектру 6G буде більш ніж у 5 разів вищою, ніж у 5G, при цьому очікується підтримка екстремальної мобільності до 1000 км/год [12].

Передбачається, що розвиток 6G буде зосереджений на безлічі нових вимог, таких як подальше розширення мобільного широкосмугового зв'язку (FeMBB), надмасивний зв'язок машинного типу (umMTC), мобільний широкосмуговий зв'язок з низькою затримкою (MBBLL) і масивний зв'язок машинного типу з низькою затримкою (mLLMT).

Ці вимоги будуть забезпечені завдяки новим технологіям, таким як ТГц-спектр, федеративне навчання (FL), периферійний штучний інтелект (AI), стиснене зондування (CS), блокчейн/технології розподіленого реєстру (DLT) і 3D-мережі. Крім того, 6G сприятиме появі нових додатків, таких як БПЛА, НТ, ІоЕ, Індустрія 5.0 та спільне автономне водіння. У світлі цього бачення багато нових дослідницьких робіт і проектів спрямовані на розробку концепції, технологій, сценаріїв використання, додатків і стандартів 6G [1, 2].

## 1.2 Основні тенденції переходу до 6G

Нові додатки та сценарії використання майбутнього суспільства вимагають від мобільних мереж більшої щільності та можливостей. Розуміти майбутні тенденції розвитку мереж 6G. Важливість рушійної тенденції до розвитку та визначення вимог до мереж 6G. Визначати компоненти, пов'язані з екологічною та енергетичною інфраструктурою.

За останні чотири десятиліття кожні 10 років з'являлося нове покоління мобільного зв'язку, яке задовольняло зростаючі технологічні та соціальні потреби суспільства.

Очікується, що ця тенденція продовжиться, і на горизонті з'явиться покоління 6G, яке задовольнить потреби суспільства 2030 року [19, 20]. Технології, тенденції, вимоги та очікування, які змушують переходити від 5G до наступного покоління мереж, визначаються як рушійні тенденції 6G. Ці рушійні тенденції перетворять 6G на ключовий фактор, що сприятиме створенню більш зв'язного і спроможного суспільства 2030 року.

У цьому підрозділі розглянемо ключові тенденції розвитку 6G, а також пояснимо, чому і як кожна з них вимагає нового покоління мереж зв'язку.

Через очікувану популярність IoT-пристроїв на базі 6G і нових послуг 6G-IoT, мережі 6G будуть генерувати все більший обсяг даних. Більшість таких даних будуть невеликими, динамічними та неоднорідними за своєю природою [12, 24]. Наявність самопідтримуваних мереж: Мобільні системи 6G повинні бути енергетично самодостатніми як на рівні інфраструктури, так і на рівні пристроїв, щоб забезпечити безперебійний зв'язок у кожному куточку світу. Розвиток можливостей збору енергії продовжить життєвий цикл як пристроїв мережевої інфраструктури, так і кінцевих пристроїв, таких як пристрої IoE [25, 26]. Конвергенція зв'язку, зондування, управління, локалізації та обчислень: Розвиток сенсорних технологій і пряма інтеграція їх з мобільними мережами в поєднанні з можливостями зв'язку з низьким енергоспоживанням призведе до створення передових мереж 6G [12, 27]. Така мережа зможе надавати послуги зондування та локалізації на додаток до захоплюючих можливостей зв'язку та обчислень [12, 27, 28]. IoT з нульовим споживанням енергії: Як правило, пристрої Інтернету речей будуть споживати значно більше енергії для зв'язку, ніж для зчитування та обробки даних [29]. Розробка механізмів зв'язку з наднизьким енергоспоживанням та ефективних механізмів збору енергії призведе до створення пристроїв IoT з самодостатнім енергоспоживанням або з нульовим споживанням енергії [29]. Більше бітів, спектру та надійності: Розвиток технологій бездротового зв'язку, включаючи схеми кодування та антенні технології, дозволить використовувати новий спектр, а також надійно передавати більше біт інформації через існуючі бездротові канали [12, 19].

Зв'язок без гаджетів: Інтеграція все більшої кількості розумних та інтелектуальних пристроїв і цифрових інтерфейсів у навколишнє середовище призведе до зміни моделі комунікації з орієнтованої на гаджети на орієнтовану на користувача або безгаджетну модель. Гіперзв'язане цифрове середовище сформує навколо користувача атмосферу "всеомогутності", надаючи всю інформацію, інструменти та послуги, які потрібні користувачеві в його повсякденному житті [30-32].

### 1.3 Перспективи розширення IoT в напрямку IoE

IoT передбачає створення глобальної мережі машин і пристроїв, здатних взаємодіяти один з одним [33]. Кількість пристроїв Інтернету речей зростає і, як очікується, до 2030 року зросте до 24 мільярдів завдяки зростанню таких додатків, як промисловий Інтернет речей (IIoT). Очікується, що загальний ринок IoT також зростає до 1,5 трильйона доларів США у 2030 році [23]. Очікується, що IoE розширить сферу застосування IoT, сформувавши гіперзв'язаний світ, що об'єднує людей, дані та речі для оптимізації процесів бізнесу та промисловості, одночасно збагачуючи життя людей [34]. IoE об'єднає багато екосистем, що включають різноманітні датчики, виконавчі механізми, користувацьке обладнання, типи даних, послуги та додатки [35].

Важливість цієї рушійної тенденції обговорюється з урахуванням викликів, пов'язаних з подоланням обмежень існуючих мереж для сприяння розвитку IoT в напрямку IoE. Однією з ключових проблем у цьому розвитку є інтеграція технологій штучного інтелекту та машинного навчання (ML) в мережі мобільного зв'язку [36]. Ці технології необхідні для обробки величезних обсягів даних, зібраних з різноманітних пристроїв IoE, для отримання значущої інформації та створення нових додатків і сценаріїв використання, передбачених 6G [37]. Обробка величезних обсягів даних з використанням ШІ та ML вимагає від майбутніх мереж зв'язку забезпечення доступу в реальному часі до потужних обчислювальних потужностей (рис. 1.2).

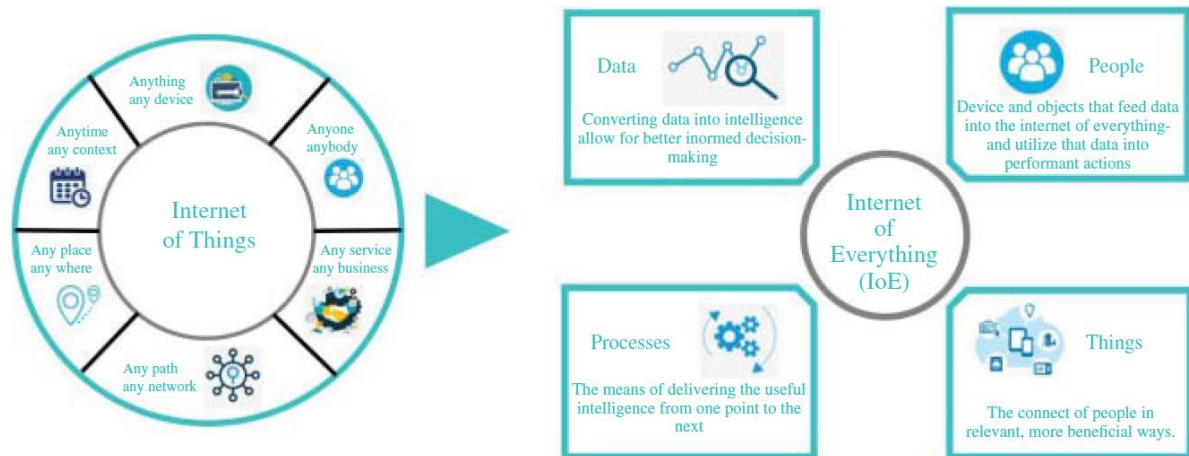


Рисунок 1.2 - Перехід від IoT до IoE

Зв'язок між IoE-пристроями та мобільними мережами також має бути енергоефективним, щоб мінімізувати вуглецевий слід. Наприклад, очікується, що інтелектуальні системи управління дорожнім рухом і транспортні системи в майбутніх розумних містах будуть використовувати майбутні мережі зв'язку 6G для масового використання методів оптимізації на основі даних в режимі реального часу [38]. Такі системи потребуватимуть ШІ та ML для ефективною обробки великих обсягів даних, зібраних з різнорідних датчиків у режимі реального часу, щоб надати інформацію, яка дозволить мінімізувати трафік.

Збереження безпеки та конфіденційності даних в існуючих мережах IoT є ще однією важливою вимогою. Оскільки все в IoE підключено до Інтернету, технології розподіленого штучного інтелекту будуть потрібні для навчання наборів даних, нерівномірно розподілених по декількох периферійних пристроях. Це робить мережі IoE вразливими до вразливостей безпеки, пов'язаних з розподіленням ШІ, таких як атаки отруєння і проблеми з аутентифікацією [39]. Вирішення цих проблем вимагає адаптивних рішень безпеки на основі ШІ і DLT, які повинні бути інтегровані з майбутніми мережами зв'язку [40].



DLT і блокчейн, зокрема, є ключовими інструментами ІоЕ. Децентралізована робота, незмінність і підвищена безпека блокчейну сприяють подоланню проблем, пов'язаних з експоненціальним розширенням ІоТ [41].

Більше того, традиційні схеми на основі ортогонального множинного доступу (ОМА) не можуть забезпечити доступ до величезної кількості пристроїв ІоЕ через обмеження в радіочастотному спектрі. Це вимагає застосування нових технологій, таких як NOMA, до стільникового ІоТ для забезпечення доступу до великої кількості пристроїв ІоТ [13, 36]. Крім того, забезпечення безперебійного підключення до пристроїв ІоЕ, які знаходяться за межами покриття наземних стільникових мереж, вимагає від безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і супутників узгодженої роботи для формування когнітивної супутниково-безпілотної мережі [42]. Очікується, що такі технології будуть інтегровані з наступним поколінням мереж мобільного зв'язку для полегшення плавного переходу від ІоТ до ІоЕ.

#### 1.4 Широка доступність невеликих обсягів даних

Очікується, що до 2020 року широко розповсюджені гетерогенні сенсорні вузли Інтернету речей, які безперервно отримують величезні обсяги різноманітних даних, генеруватимуть понад 30 ексабайт даних на місяць [43]. Збір, зберігання та обробка цього типу даних через широко розповсюджені мережі зв'язку стане однією з складних вимог, які повинні задовольняти майбутні мережі зв'язку. Термін "малі дані" відноситься до невеликих наборів даних, що представляють обмежений пул даних у ніші, що представляє інтерес [44]. Такі набори даних можуть надати значущу інформацію для управління великою кількістю пристроїв Інтернету речей. На відміну від великих даних, які стосуються великих наборів історичних даних, малі дані стосуються або даних в реальному часі, або статистичних даних за обмежений період часу. Малі дані будуть корисними в багатьох сферах, включаючи роботу обладнання в режимі реального часу та обслуговування величезної кількості машин,

підключених до Інтернету речей. Очікується, що в наступному десятилітті IoT зростатиме, об'єднуючи мільярди CPS, пристроїв і датчиків.

Іншим прикладом є зростаючий попит на аналітику на основі малих даних у роздрібній торгівлі, яка збирає дані з різних датчиків, персональних носіїв та пристроїв Інтернету речей [45]. Така аналітика допомагає надавати клієнтам персоналізовані послуги в режимі реального часу. Ці додатки призводять до генерації величезних обсягів невеликих наборів даних, які повинні бути ефективно зібрані та оброблені за допомогою ШІ та ML [12].

Важливість цієї рушійної тенденції обговорюється з урахуванням обмежень обробки та передачі даних в існуючих мережах мобільного зв'язку. Обробка великих обсягів малих наборів даних не є ефективною в існуючій інфраструктурі хмарних та периферійних обчислень, яка призначена для обробки великих масивів даних [46]. Це вимагає нових засобів ефективною обробки великих обсягів малих наборів даних в інфраструктурі периферійного штучного інтелекту в майбутніх мережах зв'язку.

Це також потребуватиме нових методів ML, що виходять за рамки класичної аналітики великих даних, для покращення мережевих функцій та надання нових послуг, передбачених у майбутніх мережах зв'язку [12]. Крім того, майбутні мережі повинні максимізувати енергоефективність вивантаження величезних обсягів малих даних на периферійні обчислювальні потужності. Це вимагає оптимізації спільних радіо- та обчислювальних ресурсів при дотриманні максимально допустимих обмежень на затримку [47].

З іншого боку, комунікаційні мережі повинні будуть підтримувати передачу великих обсягів малих даних від гетерогенних пристроїв IoT. Накладні витрати такого типу зв'язку можуть бути значними в порівнянні з розміром даних, що передаються, що робить цей тип передачі даних менш ефективним [24, 48]. Це вимагає нових методів для зменшення витрат на передачу і конфліктні ситуації в майбутніх мережах зв'язку.

### 1.5 Наявність самопідтримуваних мереж

Самопідтримувані мережі (SSN) можуть виконувати такі завдання, як самоуправління, самопланування, самоорганізація, самооптимізація, самовідновлення та самозахист мережевих ресурсів, щоб постійно підтримувати свої ключові показники ефективності (KPI) [12]. Це досягається шляхом адаптації роботи та функціональності мережі з урахуванням різних фактів, включаючи стан навколишнього середовища, використання мережі та енергетичні обмеження [49]. Ці типи інтелектуальних мережевих операцій в режимі реального часу в SSN полегшуються за допомогою методів машинного навчання/глибокого навчання/квантового машинного навчання, які дозволяють швидко вивчати швидкі зміни в мережі та динамічні вимоги користувачів [50]. Очікується, що за допомогою SSN майбутні мережі забезпечать безперешкодний доступ до нових доменів додатків у високодинамічних і складних середовищах [12].

Важливість цієї провідної тенденції обговорюється з огляду на нездатність існуючих мобільних мереж функціонувати як SSN. SSN вимагають можливості отримувати мережеву статистику в режимі реального часу для автоматичного управління ресурсами і адаптації функціональних можливостей для підтримки високих KPI [12]. Тому SSN потребують нової самопідтримуваної мережевої архітектури, яка може адаптуватися до швидких змін у навколишньому середовищі та вимог користувачів. Ці операції повинні бути полегшені за рахунок аналізу в реальному часі величезних обсягів малих даних, отриманих вузлами мережі. Аналіз малих даних може бути виконаний з використанням можливостей периферійної розвідки, передбачених у майбутніх мережах.

Крім того, самооптимізація радіоресурсів повинна спиратися на програмно-визначені когнітивні радіостанції за допомогою таких операцій, як аналіз радіообстановки [50, 51]. Крім того, SSN повинні сприяти енергетичній самодостатності як на стороні інфраструктури, так і на стороні пристроїв, щоб забезпечити безперебійний і безперебійний зв'язок. Тому збір енергії в мережевій інфраструктурі повинен відігравати ключову роль для збільшення

радіусу дії і часу очікування [25, 26]. Це також вимагає, щоб майбутні комунікаційні мережі були спроектовані з урахуванням енергоефективності, щоб дозволити пристроям збирати енергію, бути автономними, ділитися енергією і працювати довго [17, 52]. Крім того, енергоефективне управління великою кількістю пристроїв Інтернету речей за різних умов каналу та різноманітних застосувань вимагає самонавчання за допомогою контекстно-орієнтованої роботи, щоб мінімізувати енергію на біт для заданих вимог до зв'язку [43].

#### 1.6 Конвергенція зв'язку, обчислень, управління, локалізації та зондування (3CLS)

Очікується, що майбутні комунікаційні мережі будуть конвергувати обчислювальні ресурси, архітектуру управління та іншу інфраструктуру, що використовується для точної локалізації та зондування [12]. Ця конвергенція необхідна для сприяння високо персоналізованим і критично важливим до часу майбутнім додаткам. Наприклад, очікується, що людино-орієнтовані послуги (Human-Centric Services, HCS) будуть спиратися на послуги 3CLS для полегшення ефективної комунікації і обробки в реальному часі великої кількості потоків даних, зібраних за допомогою датчиків, які зосереджені навколо людини [53, 54].

Розвиток послуг 3CLS є важливою рушійною тенденцією для наступного покоління мереж мобільного зв'язку, оскільки існуючі технології 5G не повністю дослідили взаємозалежність між обчисленнями, зв'язком, управлінням, локалізацією і зондуванням в наскрізному режимі [55]. Реалізація послуг 3CLS вимагатиме від майбутніх мереж мобільного зв'язку колективного мережевого інтелекту на периферії мережі для запуску алгоритмів ШІ та ML в режимі реального часу [1, 6]. Крім того, мережева архітектура повинна бути відкритою, масштабованою і еластичною, щоб полегшити надання наскрізних послуг з проектування 3CLS, керованих ШІ [2, 7]. Точна локалізація і

зондування також повинні співіснувати з комунікаційними мережами шляхом спільного використання мережевих ресурсів у часі, частоті і просторі для сприяння розвитку нових додатків, таких як розширена реальність, підключена робототехніка, підключені і автоматизовані транспортні засоби (CAV), зондування і 3D-картографування [12, 28].

### 1.7 Інтернет речей з мінімальним споживанням енергії

Пристрої Інтернету речей з нульовим споживанням енергії можуть збирати енергію з навколишнього середовища для отримання нескінченної енергії [8]. Наприклад, радіочастотний збір енергії може збирати енергію з радіочастотних хвиль, щоб продовжити термін служби мережі. Вузли, які збирають більше енергії, можуть ділитися своєю енергією з іншими вузлами, використовуючи енергетичну кооперацію.

В даний час лише близько 0,6% з 1,5 трильйона об'єктів у реальному світі підключено до Інтернету [29]. Очікується, що решта пристроїв також будуть підключені в енергоефективний спосіб разом зі зростанням майбутніх комунікаційних технологій і додатків.

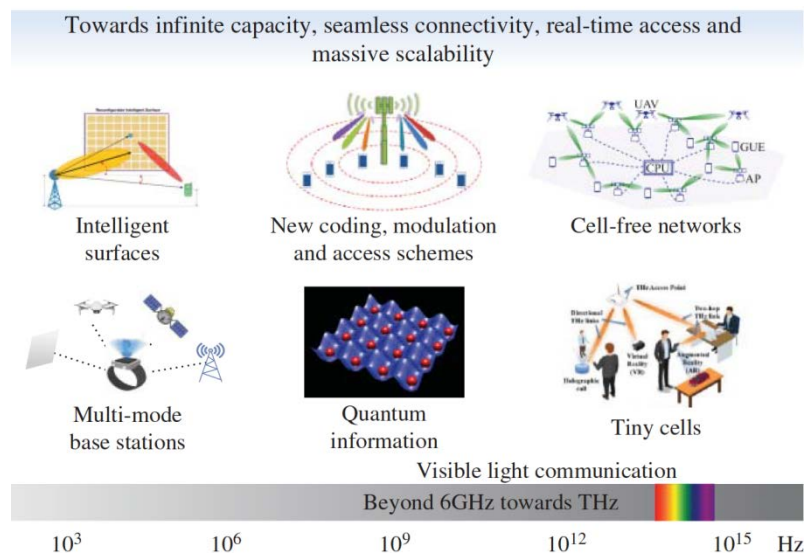
IoT з нульовим споживанням енергії є важливою рушійною тенденцією для майбутніх мереж зв'язку, які дозволять масовій кількості пристроїв IoT працювати без технічного обслуговування і акумуляторів. Це вимагає від мобільних мереж здатності підтримувати зв'язок з наднизьким енергоспоживанням та ефективне збирання енергії [29]. Однак існуючі мережеві інфраструктури 5G не підтримують збір енергії, особливо через те, що електронні схеми не можуть ефективно перетворювати зібрану енергію в електричний струм [17]. Тому електронні схеми в майбутніх мережах зв'язку повинні бути спроектовані і розроблені таким чином, щоб підтримувати ефективне збирання енергії. Крім того, схеми, що збирають енергію, повинні забезпечувати автономне живлення пристроїв, щоб уможливити роботу в автономному режимі, довговічність пристроїв Інтернету речей та довший час

роботи в режимі очікування [17]. Очікується, що бездротова передача енергії також відіграватиме ключову роль у наступному поколінні мереж мобільного зв'язку, враховуючи можливість її використання завдяки значно меншим відстаням зв'язку в більш щільних мережах зв'язку [9]. Крім того, стеки передачі даних також можуть бути оптимізовані з урахуванням енергоспоживання для мінімізації використання енергії.

## 1.8 Розвиток інформаційних технологій

Останнім часом мобільний зв'язок зазнав значного технологічного прогресу.

Наприклад, електромагнітно активні великі інтелектуальні поверхні (LIS), виготовлені з використанням метаматеріалів, розміщених у стінах, дорогах, будівлях та інших інтелектуальних середовищах з інтегрованою електронікою, забезпечать масивні поверхні для бездротового зв'язку [6]. Крім того, нові схеми доступу до каналів, такі як NOMA, мають багато переваг, наприклад, вони є більш спектрально ефективними, ніж існуючі схеми. Зв'язок за межами міліметрових хвиль (mmWave) у діапазоні ТГц також використовується для забезпечення безперебійного зв'язку в локальних і глобальних мережах [1]. Основні досягнення комунікаційних технологій проілюстровані на рис. 1.3.



### Рисунок 1.3 - Розвиток комунікаційних технологій у напрямку 6G

Поява нових комунікаційних технологій, які не можуть бути інтегровані з існуючими мережами 5G, обговорюється для того, щоб підкреслити важливість цієї рушійної тенденції. Наприклад, майбутні мережі зв'язку повинні будуть перейти від існуючих малих стільників до крихітних стільників для підтримки високочастотних діапазонів у ТГц-спектрі. Це вимагає нового архітектурного дизайну, що підтримує більш щільне розгортання мереж і управління мобільністю на більш високих частотах [6]. Крім того, багатомодові базові станції будуть необхідні для того, щоб мережі могли працювати в широкому діапазоні спектрів - від мікрохвильового до ТГц - і забезпечувати безперебійний зв'язок. Крім того, використання LIS в якості приймачів вимагає демодуляції каналів низької складності, що базується на таких методах, як спільне стискання (CS) і глибоке навчання, що не є можливим у 5G [3]. Крім того, жоден з останніх досягнень в області комунікаційних технологій, таких як надання мережевих функцій на основі штучного інтелекту з використанням колективного мережевого інтелекту, зв'язок видимого світла (VLC), NOMA, безстільникові мережі, а також квантові обчислення і зв'язок, не реалізовані в 5G [1, 2, 4]. Тому інтеграція цих передових комунікаційних технологій вимагає нової парадигми мереж мобільного зв'язку.

#### 1.9 Комунікація без гаджетів

Комунікація без гаджетів усуває необхідність для користувача мати фізичні пристрої зв'язку. Передбачається, що цифрові послуги, які базуються на розумних і підключених гаджетах, будуть рухатися до моделі комунікації без гаджетів, орієнтованої на користувача, оскільки все більше цифрових інтерфейсів, інтелектуальних пристроїв і датчиків інтегруються в навколишнє середовище [3, 5]. Оскільки більшість наших даних і послуг вже базуються на



хмарних платформах, перехід до повсюдного середовища, вільного від гаджетів, здається природним.

Гіперзв'язане розумне цифрове середовище створить навколо користувача всеохоплююче середовище для надання всіх цифрових послуг, необхідних у повсякденному житті. Отже, в майбутньому будь-який користувач зможе жити "голим", тобто користувачі зможуть отримувати доступ до інтернет-сервісів без будь-яких персональних пристроїв, гаджетів або носимих пристроїв [31].

Обмеженість нинішніх мережевих технологій 5G у сприянні комунікації без гаджетів також підкреслює, що це є важливою рушійною тенденцією до наступного покоління мереж. Спілкування без гаджетів вимагає від користувачів безперервного зв'язку з високою доступністю, високою продуктивністю мережі, підвищеною енергоефективністю та меншими витратами (рис. 1.4).

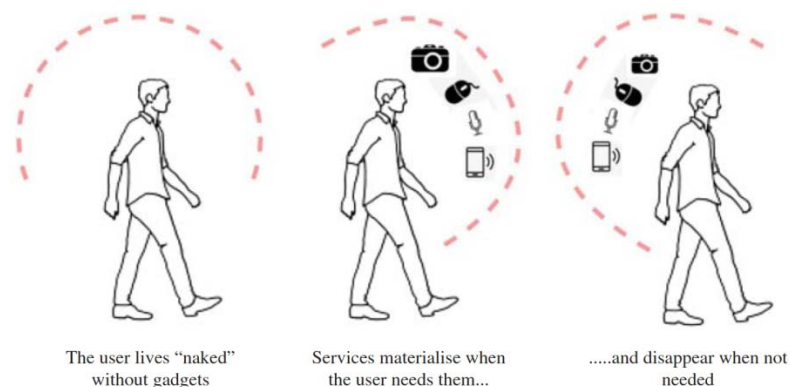


Рисунок 1.4 - Комунікація без гаджетів.

Майбутні комунікаційні мережі повинні бути високоавтоматизованими, контекстно-орієнтованими, адаптивними, гнучкими, безпечними і самоконфігурованими, щоб надавати користувачам задовільний сервіс [31]. Задоволення таких вимог вимагає, щоб майбутні мережі зв'язку були оснащені потужними розподіленими обчисленнями з периферійним інтелектом, якого не вистачає в нинішньому впровадженні 5G [5]. Майбутні мережі також повинні забезпечувати екстремальні швидкості передачі даних, незначні затримки і

надзвичайну надійність для підтримки голографічного зв'язку, що дозволить користувачам повною мірою використовувати потенціал комунікації без гаджетів [6]. Крім того, існуючі заходи мережевої безпеки та конфіденційності також потребують вдосконалення. Наприклад, ефективні, безпечні та приватні механізми автентифікації з використанням легких операцій повинні бути інтегровані з майбутніми комунікаційними мережами, щоб сприяти комунікації без гаджетів [7].

### 1.10 Висновки до розділу 1

Очікується, що ТГц-зв'язок прокладе шлях до швидкості передачі даних в Тбіт/с, щоб задовольнити потреби майбутніх додатків, і має потенціал для підсилення транзитних мереж. Тим не менш, вони страждають від високих втрат при поширенні і вимагають прямої видимості (LoS) для зв'язку. Потрібно докласти більше зусиль, щоб зрозуміти поведінку сигналів ТГц, і потрібні кращі моделі каналів.

Неназемні мережі розвиваються в напрямку 3D-мереж, щоб забезпечити глобальне радіопокриття і пропускну здатність в 3D для майбутніх мереж 6G.

Бездротові мережі представляють широкий спектр технологій, таких як БПЛА, НАР, супутники та інші літаючі гаджети, які, як очікується, будуть працювати в гармонії, щоб забезпечити безперервне покриття в космосі, повітрі, на землі, під водою і під землею. Очікується, що рішення на основі AI/ML відіграватимуть важливу роль у подоланні обмежень, пов'язаних з фізичною відсутністю людини.

## 2 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО МЕРЕЖІ 6G

Мережі 6G повинні розвиватися поперх існуючих мереж 5G для підтримки нових технологій і додатків. Для цього необхідно розуміти, як вимоги до мереж 6G розвиваються в порівнянні з можливостями існуючих мереж. Отримати уявлення про те, як вимоги 6G можуть сприяти розвитку майбутніх технологій і додатків.

### 2.1 Вимоги та бачення 6G

Щоб реалізувати нові додатки, мережі 6G повинні надавати розширені мережеві можливості, які виходять за рамки мереж 5G. На рисунку 2.1 показані такі вимоги, яким повинні відповідати мережі 6G, щоб уможливити роботу майбутніх додатків.

Згідно з різними дослідженнями [3, 7], вимоги до мереж 6G можна розділити на наступні категорії. Подальше вдосконалення мобільного широкопasmового зв'язку (FeMBB): Швидкість мобільного широкопasmового зв'язку має бути ще більше підвищена за межі 5G і забезпечувати пікову швидкість передачі даних на рівні терабіт на секунду (Тбіт/с). Крім того, швидкість передачі даних для користувача також має бути підвищена до рівня гігабіт на секунду (Гбіт/с) [7]. Надмасивний зв'язок машинного типу (nmMTC): Щільність з'єднання в 6G ще більше зросте завдяки популярності пристроїв Інтернету речей (IoT) і новій концепції IoE. Ці пристрої спілкуються один з одним і пропонують спільні послуги в автономному режимі [6, 7]. Покращений наднадійний зв'язок з низькою затримкою (ERLLC/eURLLC): Затримка E2E в 6G повинна бути додатково зменшена до рівня мкс, щоб уможливити нові високотехнологічні додатки 6G в режимі реального часу [20].

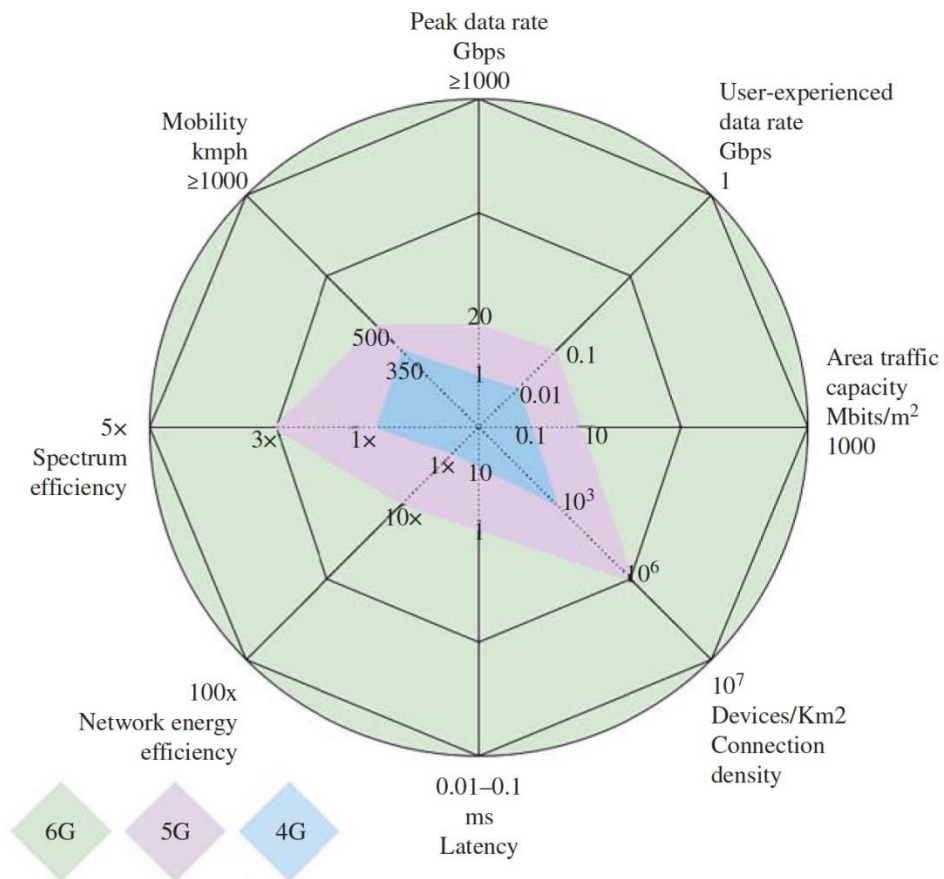


Рисунок 2.1 - Вимоги до мережі 6G

Зв'язок з надзвичайно низьким енергоспоживанням (ELPC): Енергоефективність мережі 6G буде покращена в 10 разів порівняно з 5G і в 100 разів порівняно з 4G. Це дозволить використовувати канали ELPC для пристроїв IoT з обмеженими ресурсами [2, 8]. Зв'язок на великі відстані та високомобільний зв'язок (LDHMC): За підтримки повністю інтегрованих супутникових технологій, 6G забезпечить зв'язок для екстремальних місць, таких як космос і морські глибини. Більше того, автоматизовані системи управління мобільністю на основі штучного інтелекту і системи проактивної міграції зможуть підтримувати безперебійну мобільність на швидкості понад 1000 км/год [17]. Висока ефективність використання спектра: Ефективність використання спектра буде ще більше підвищена в мережах 6G до п'яти разів порівняно з 4G і майже вдвічі порівняно з мережами 5G [20]. Висока пропускна здатність: Експоненціальне зростання Інтернету речей вимагатиме збільшення

пропускної здатності в 100 разів порівняно з мережами 5G. Це призведе до 1 Гбіт/с трафіку на квадратний метр в мережах 6G. Мобільний ширококутний зв'язок з низькою затримкою (MBLL): MBLL забезпечить високу швидкість передачі даних ( $> 1$  Тбіт/с) і низький час відгуку ( $< 0,1$  мс), навіть у випадках високої мобільності ( $> 1000$  км/год) для підтримки таких додатків, як XR. Масовий тип ширококутної мережі (mBBM): Очікується, що мережі 6G підтримуватимуть велику кількість датчиків, пристроїв, обладнання та інших машин (наприклад,  $100/\text{м}^3$ ). Масовий тип машин з низькою затримкою (mLLMT): У 6G послуги URLLC і масового зв'язку машинного типу (mMTC) повинні бути пов'язані між собою, і для вирішення завдання забезпечення ефективного і швидкого масового зв'язку потрібні нові уніфіковані рішення. Екстремальні комунікації з використанням штучного інтелекту: Очікується, що ШІ зануриться в кожен аспект майбутніх мереж зв'язку.

У решті розділу обговорюється, як кожна вимога 6G може бути покращена порівняно з існуючими мережами. Кожна вимога супроводжується кількома відповідними додатками і ключовими технологіями, що їх забезпечують.

## 2.2 Особливості вдосконалення мобільного ширококутної мережі зв'язку (eMBB)

eMBB є продовженням розвитку традиційного LTE, який забезпечує ширококутний мобільний зв'язок в обмежених сферах застосування. Швидкість eMBB становить гігабіти в 4G. У 5G швидкість eMBB значно зростає [2]. Крім того, прогнозується, що низка захоплюючих імерсивних додатків, включаючи функції розширеної 3D-реальності, 3D-мультимедіа, ІоЕ, стануть можливими завдяки високій якості послуг, які потребуватимуть пікових швидкостей у десятки Гбіт/с [37]. Таким чином, швидкість мобільного ширококутної мережі зв'язку 6G має бути ще більше вдосконалена, ніж у 5G, щоб забезпечити пікову швидкість мобільного ширококутної мережі зв'язку на рівні Тбіт/с. Більше того, оскільки кінцеві користувачі будуть використовувати

більше контенту високої чіткості, швидкість мобільної передачі даних також має бути підвищена до рівня Гбіт/с.

Це уможливить багато варіантів використання, наприклад, FeMBB може значно покращити широкосмуговий зв'язок у густонаселених регіонах, включаючи громадський транспорт (наприклад, швидкісні поїзди та "розумні" міста), щоб забезпечити надшвидкісну "гарячу точку".

Крім того, FeMBB уможливить багато захоплюючих мультимедійних додатків надвисокої чіткості (наприклад, 4D-відеоігри і мобільне телебачення [9]), що сприятиме розширенню можливостей мультимедійних додатків. Інші напрямки розвитку FeMBB в технічній роботі включають автономне виробництво і зростання кількості підключених носіїв і датчиків. Як результат, 6G уможливить широкосмуговий зв'язок по всій планеті.

6G буде розгорнуто на великій кількості територій за допомогою фіксованого бездротового доступу, що дозволить використовувати технології 6G для забезпечення бездротового широкосмугового зв'язку в будь-якій точці планети [8]. Іншою популярною технологією є ТГц-діапазон, який на сьогодні є одним з головних рубежів у сфері зв'язку за межами 5G. ТГц-діапазон пропонує практично необмежену пропускну здатність для підтримки широкосмугових каналів і надзвичайно високих швидкостей передачі даних [6]. Крім того, в роботі [11] навмисно підкреслюється, що ТГц-зв'язок може досягти високих швидкостей передачі даних за допомогою VLC.

Нещодавно було запропоновано використовувати AI/ML на фізичному та MAC рівнях [12]. ML може оптимізувати синхронізацію, керувати розподілом потужності, а також схемами модуляції і кодування. Крім того, ML може допомогти в ефективному розподілі спектра, оцінці каналів і забезпечить адаптивне масове формування променя з множинним входом і множинним виходом (MIMO) в режимі реального часу. Однак такі рішення на основі ШІ/ML все ще перебувають на стадії дослідження. Тому стає очевидним, що нам знадобляться більш інтелектуальні алгоритми, які можуть визначити, в яких

областях дві системи можуть спільно використовувати спектр з високою ефективністю співіснування [22].

### 2.3 Надмасивний зв'язок машинного типу

Очікується, що в революції ІоЕ зв'язок 5G буде підтримувати масовий зв'язок машинного типу для мільярдів пристроїв. Можливість підключення та передачі даних до 1 мільйона датчиків на км<sup>2</sup>. Крім того, в роботі [23] висловлюється припущення, що масштаб комунікацій машинного типу буде перевернутий з ніг на голову завдяки пристроям Інтернету речей та їх підключенню в світі ІоЕ. В архітектурі ІоЕ, як не дивно, трильйон датчиків і виконавчих механізмів будуть автоматизовані для відправки своїх даних туди і назад. У таких масштабних мережах поточна архітектура зв'язку машинного типу не зможе забезпечити ефективно та продуктивно з'єднання. Однак мережі за межами 5G і/або 6G потенційно потребують архітектури *nmMTC*, яка може підтримувати надійне з'єднання з величезними масштабами мереж, наприклад, з трильйонами пристроїв [33]. Таким чином, щільність з'єднання буде ще більше покращуватися в 6G завдяки популярності нової концепції ІоЕ.

У 6G *nmMTC* забезпечить кілька ключових додатків, включаючи Інтернет промислових розумних речей (IIoT), розумні будівлі, ланцюжок поставок з підтримкою Інтернету, логістику та управління автопарком, а також моніторинг якості повітря і води [33, 34]. Крім того, іншими сферами застосування будуть надщільні стільникові мережі ІоТ, відстеження контейнерів, зондування природи/дикої природи, моніторинг шахт/шляхів та/або лісових робіт [15].

Такі технології, як SigFox і LoRa [13], стануть потенційними кандидатами на підключення до мережі і покриття в напрямку мережі 6G. З іншого боку, архітектура зв'язку машинного типу (MTC) та її функції також можуть бути реалізовані в 6G з використанням ліцензованого спектру, який буде накладено на існуючу інфраструктуру зв'язку (наприклад, RAN). Крім того, така архітектура може забезпечити гарантовану надійність пристроїв у зв'язку 6G.



Для досягнення цієї мети можуть бути використані в основному дві технології: вдосконалений МТС і вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT), серед інших [23]. Покращений зв'язок машинного типу (eMTC) може забезпечити високу швидкість передачі даних (наприклад, до 1 Мбіт/с) і може підтримувати високу мобільність для багатьох додатків з підтримкою 6G, таких як Інтернет транспортних засобів (IoV) [14]. У той час як NB-IoT може увімкнути та/або підтримувати багато додатків, які вимагають низької пропускну здатності (наприклад, порядку Кбіт/с) [13].

З іншого боку, Massive MIMO є одним з основних кандидатів, які можуть підвищити ефективність використання спектру в багатокористувацькому середовищі [26]. Як наслідок, це може збільшити пропускну здатність каналу в мережах 5G і не тільки. Для того, щоб змоделювати масове MIMO, автори в [36] застосували MIMO для вирішення проблеми ідеального розподілу каналів (PSCA). Автори використовували коефіцієнт бітових помилок для PSCA.

Крім того, вони використовували вузькосмуговий (спільний) зв'язок для збору мережевого трафіку даних від пристроїв МТС (тобто підключених пристроїв у мережі). Для підвищення ефективності широкосмугового зв'язку вони використовували техніку кластеризації, коли гетерогенні пристрої спільно використовують ресурси власного кластера [46].

#### 2.4 Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою

5G підтримується uRLLC, і його надійність становить 99,999% [14]. Однак до 2030 року інновації потребуватимуть надзвичайно високої наднадійності не лише в МТС, але й у деяких інших видах зв'язку, таких як зв'язок між пристроями, Wi-Fi, зв'язок між пристроями і хмарою тощо. На практиці уявімо, що медичний хірург сидить перед телекомунікаційною "розумною поверхнею" або консоллю в Чикаго, в той час як пацієнт лежить на операційному ліжку за 4000 миль від нього в Дубліні, Ірландія, як показано на рис. 2.2. Використовуючи "розумну" поверхню та інші комунікаційні технології,

медичний хірург може дистанційно керувати рухом багаторукогого хірургічного робота для видалення хворого жовчного міхура 70-річного пацієнта. Однак таке критично важливе за часом застосування роботизованої хірургії вимагатиме надвисокої надійності і низької затримки зв'язку. Тому в 6G дослідники повинні вивчити і розробити нові або вдосконалені методи, які можуть дозволити eRLLC забезпечити більш високий рівень надійності (99,99999%), ніж в 5G.

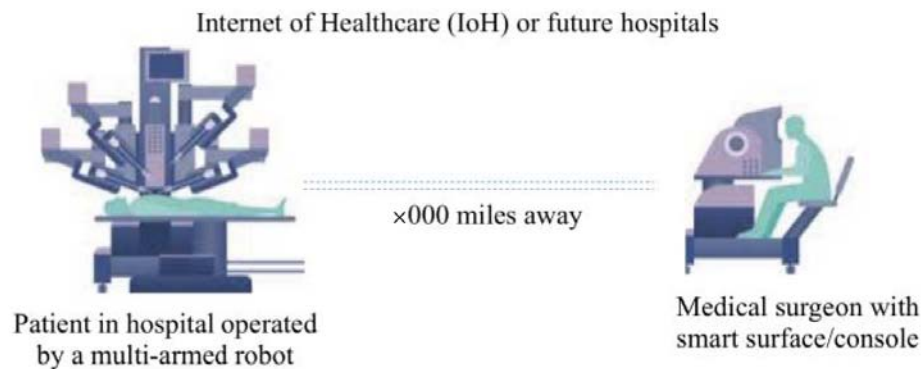


Рисунок 2.2 - Схема застосування технології eURLLC.

eRLLC і (вдосконалений наднадійний зв'язок з низькою затримкою (eURLLC) уможливають кілька застосувань, таких як телемедицина, XR, революція в сфері охорони здоров'я (IoH), включаючи HT, і AI-медицина. Всі ці додатки вимагають надвисокої наднадійності зв'язку [12].

Проектування систем eRLLC (тобто висока надійність і низька затримка) вимагає різних параметрів, таких як наскрізний швидкий час виконання, інтелектуальне кадрування і кодування, ефективне управління ресурсами, інтелектуальний зв'язок по висхідній і низхідній лініях і так далі. Для більш детальної інформації, будь ласка, зверніться до [14]. Мадян та ін. [19] обговорили ще одну технологію, яка може бути корисною в структурах без грантів на висхідну лінію зв'язку та зменшити затримку при передачі даних. У [29] автори запропонували не використовувати когнітивну операцію посередника, яка зазвичай вимагає техніки виділення грантів на планування.

## 2.5 Надзвичайно низькоенергетичний зв'язок

Кількість об'єктів з обмеженими ресурсами, підключених до Інтернету, стрімко зростає, і ці об'єкти потребують високоефективного обладнання з автономним живленням. Однак дослідження показали, що традиційні пристрої інтегровані з великомасштабними антенними решітками (наприклад, МІМО), що неминуче призводить до високого енергоспоживання [13]. У мережі 5G існує кілька технологій, які дозволяють забезпечити зв'язок з мережами зв'язку 5G з низьким енергоспоживанням, наприклад, зв'язок зі зворотним розсіюванням, гібридне аналогово-цифрове гібридне попереднє кодування, технологія передачі променевої області на основі лінз, розріджені антенні решітки та проектування розріджених радіочастотних каналів зв'язку.

Тим не менш, такі підходи можуть бути не в змозі повністю контролювати екологічні проблеми, такі як характер бездротового зв'язку, який може споживати більше енергії [13]. Тому зв'язок 6G повинен зосередитися на підтримці високошвидкісної передачі даних при одночасному зниженні енергоспоживання.

Кілька додатків потребують ELPC; однак, в даний час перспективними додатками є "розумні" будинки, "розумні" автомобілі, БПЛА і т.д.

Для досягнення ELPC дослідники пропонують розгорнути інтелектуальну поверхню, що відбиває (IRS), яка відома як інтелектуальна поверхня, що реконфігурується (RIS) [13]. Завдяки використанню невеликої кількості антен, IRS може допомогти зменшити залежність апаратної складності передавачів і приймачів. Крім того, використання пасивних штучних решіток дозволяє значно зменшити споживання енергії. З іншого боку, технологія IRS є досить привабливою з точки зору енергоспоживання. В IRS не використовується підсилювач потужності для підсилення і пересилання вхідного сигналу. В результаті, оскільки підсилювач не використовується, IRS буде споживати набагато менше енергії, ніж звичайний релейний трансивер з підсиленням і переадресацією [18].

## 2.6 Зв'язок на великі відстані та висока мобільність

У мережах великої розмірності LDHMC є обов'язковою вимогою для 6G [19].

У 5G послуги LDHMC є незаперечними, оскільки вони можуть підтримувати швидкість до 500 км/год. Розглянемо приклад: швидкісна залізниця буде працювати зі швидкістю понад 500 км/год протягом наступних кількох десятиліть, а це вимагатиме великої відстані і високої мобільності для надпортового зв'язку і послуг для бортового екіпажу і пасажирів. Тому LDHMC на базі 5G може бути недостатньо для майбутніх застосувань, оскільки вони можуть потребувати зв'язку на великі відстані на багато тисяч кілометрів і безперебійної мобільності. Крім того, дослідження показують, що мобільність вузла є дуже складним завданням у різних середовищах (таких як глибокі води) [10].

Тому для майбутніх застосувань 6G повинен вимагати безперебійного зв'язку на великі відстані і з високою мобільністю (наприклад, >1000 км/год) на основі безперебійних послуг.

Згідно з [20], 6G дасть можливість для багатьох захоплюючих застосувань, деякі з прикладів - космічні екскурсії, глибоководний туризм, високошвидкісний транспорт. Існує кілька технологій, що сприяють цьому, наприклад, точна оцінка каналу.

Через значний часовий і частотний розкид у високомобільних бездротових комунікаціях оцінка каналу є дуже складним завданням. Альтернативні форми сигналу на основі фільтрів [14] (альтернативи ортогональному мультиплексуванню з частотним поділом каналів), такі як багатопроменева несуча з фільтрами і універсальна фільтрована багатопроменева несуча, є хорошими кандидатами для високомобільного зв'язку 6G.

## 2.7 Висока ефективність використання спектру

Як прогнозується в [15, 16], очікується, що кількість пристроїв або "розумних" об'єктів в мережі 6G зросте в багато разів. Зокрема, в районі тисячі (тисяч) розумних пристроїв, включаючи машини, обладнання, датчики і багато іншого, в одному кубічному метрі [17]. Тим не менш, відеопотоки надвисокої чіткості, такі як голографічний контент, потребуватимуть широкосмугового спектру, який може не підтримуватися спектром міліметрового діапазону. Це створить некеровані перешкоди, пов'язані з ефективністю використання простору, коли велика кількість пристроїв не зможе належним чином підключатися до поточної мережі. Це призведе до розгортання нових технологій в області 6G, таких як субТГц і ТГц діапазони, які можуть задовольнити вимоги до мережевих додатків з високою спектральною ефективністю [27].

Мережа 6G уможливить роботу вимогливих до даних додатків, таких як доповнена і змішана реальність. Це дозволить безперебійно функціонувати новим інтелектуальним послугам в "розумних" містах, "розумному" сільському господарстві, роздрібній торгівлі, ланцюгах поставок і багато чому іншому.

У [28] запропоновано два методи формування променя з відкритим контуром за допомогою інформації про місцезнаходження (тобто попереднє кодування МІМО на основі місцезнаходження і циклічна робота прекодера МІМО з підтримкою місцезнаходження). Ці методи можна віднести до ранніх технологій, що забезпечують високу ефективність використання спектра.

## 2.8 Висока пропускна здатність по всій території

Територіальна пропускна здатність відповідає загальній пропускній здатності трафіку, що обслуговується на географічній території (біт/с/м<sup>2</sup>) [29]. У зв'язку з цим широко очікується, що 5G може забезпечити пропускну здатність трафіку 10 Мбіт/с на квадратний метр у виділених зонах хот-спотів.

Однак такі додатки, як 3/4-D мультимедіа, вимагатимуть високої пропускної здатності, яка може бути не підтримана нинішнім зв'язком 5G.

Тому 6G має забезпечити вдесятеро більшу пропускну здатність, ніж 5G, як пропонується в [39]. Що ще важливіше, для реальних застосувань вона повинна досягати  $1 \text{ Гбіт/с/м}^2$  [49]. До таких додатків відносяться: міські мережі, прогнози погоди, автомобілі з автоматичним керуванням, залізничні мережі високої щільності.

Для досягнення високої пропускної здатності автоматизованих транспортних засобів в роботі [10] запропоновано нову методику. Автори припустили, що кожен інтелектуальний транспортний засіб складається з двох окремих модулів, лідера і послідовника. Однак запропонована методика забезпечує високу пропускну здатність і щільність транспортних засобів у щільному географічному розташуванні. Крім того, автори стверджують, що їхня пропозиція дозволяє суттєво уникнути заторів на дорогах [20].

## 2.9 Мобільний широкопasmовий зв'язок з низькою затримкою (MBLL)

MBLL стане необхідною умовою для розвитку зв'язку 6G. Для того, щоб зрозуміти концепцію MBLL, розглянемо приклад VR-додатку [21]. У VR-середовищах висока затримка є найвищою вимогою для забезпечення приємних вражень від використання гарнітури віртуальної реальності [22]. Людське око зазвичай вимагає вільного та ідеально плавного руху, тобто низького часу відгуку Motion-To-Photon (MTP) без будь-яких перерв. Тут MTP - це час в межах однієї миті і пікселів кадру зображення, які представляють нове поле зору (FoV), що потрапило в поле зору людського ока [32]. Однак, високий час відгуку MTP може спрямовувати суперечливі значення сигналу на вестибуло-окулярний рефлекс (VoR), тобто між рухом голови та оком. Крім того, високий час відгуку MTP може призвести до видимої затримки руху. Точніше, на практиці, в простих умовах, верхня межа MTP становить  $<15 - 20 \text{ мс}$ . У той же час час відгуку зворотного зв'язку 4/5G становить  $25 \text{ мс}$  в заданих ідеальних

умовах функціонування. Однак такі додатки на основі VR вимагають високої пропускної здатності (наприклад, пікова швидкість низхідної лінії зв'язку  $> 1$  Тбіт/с, а користувацька швидкість передачі даних  $> 10$  Гбіт/с), включаючи зображення надвисокої чіткості, відео та інші імерсивні інструкції, такі як людські жести. Крім того, він вимагає низького часу відгуку на голосові команди в реальному часі ( $< 0,1$  мс) і швидких прийомів управління ( $< 1$  мс). Крім того, ці вимоги також повинні бути забезпечені у високомобільних випадках використання ( $> 1000$  км/год), наприклад, космічний туризм, глибоководний туризм, високошвидкісний транспорт і так далі. Типові додатки MBLL включають мобільні AR, VR і НТ [21].

У роботі [23] представлено пропозицію, в якій багатореберні обчислення використовуються для досягнення наскрізної гарантовано низької затримки для потокового VR-відео з використанням імерсивних технологій. Автори розробили механізм низької складності, який може розвантажити обчислювальні задачі з високими обчислювальними навантаженнями на МЕС і може досягти енергоефективності. Таку пропозицію можна віднести до технологій, що сприяють розвитку зв'язку 6G.

## 2.10 Масовий широкосмуговий машинний зв'язок

5G обіцяє вирішити проблеми, пов'язані з продуктивністю, а також уможливити абсолютно нові варіанти використання. Можливість підключення і передачі даних до 1 мільйона датчиків на км<sup>2</sup>, що дозволить безперервно збирати дані з величезної кількості датчиків, дасть змогу здійснювати віддалений моніторинг і прогнозоване обслуговування виробничих активів. Низька затримка в поєднанні з можливостями периферійних хмарних обчислень стане основою для процесів в режимі реального часу, таких як спільна робота для автоматизації процесів, а висока надійність забезпечить підтримку критично важливих операцій. Тактильний ІоЕ уможливить багато важливих прикладних сценаріїв використання в наступному десятилітті, які



вимагатимуть величезної швидкості передачі даних для забезпечення високої якості обслуговування і всього іншого. Однак такий ІоЕ також вимагатиме монолітних з'єднань для щільно розташованих (наприклад, 100/м<sup>3</sup>) датчиків, пристроїв, обладнання та інших машин для збору даних про навколишнє середовище і перетворення отриманих даних в цифрові дані. Мотивуючими додатками є промислові смарт-мережі, надвисокошвидкісні стільникові мережі Інтернету речей, відстеження контейнерів, зондування природи/дикої природи, моніторинг шахт/доріг/лісових робіт [25].

На основі технологій 5G існує кілька ключових технологій, які можуть розширити можливості mBBMT в 6G. Масивне MIMO є одним з основних кандидатів, який може підвищити ефективність використання спектру в багатокористувацькому середовищі [26]. Як результат, це може підвищити пропускну здатність каналу в мережах 5G і не тільки. Для того, щоб змодельовати масове MIMO, автори в [36] застосували MIMO для вирішення проблеми PCA. Автори використовували коефіцієнт бітових помилок для PCA.

Крім того, вони використовували вузькосмуговий (спільний) зв'язок для збору мережевого трафіку даних від пристроїв МТС (тобто підключених пристроїв у мережі). Для підвищення ефективності широкосмугового зв'язку вони використовували техніку кластеризації, коли гетерогенні пристрої спільно використовують ресурси власного кластера [46].

### 2.11 Масивний зв'язок машинного типу з низькою затримкою (mLLMT)

Призначення МТС в автоматизації 6G пов'язане з багатьма послугами, такими як доступність даних, ультрамасштабованість і, що більш важливо, низька затримка в додатках з підтримкою 6G. Такі послуги з низькою затримкою є надзвичайно важливими для критично важливих за часом додатків, де прийняття рішень відбувається в масштабі часток мілісекунд. Однак такі вимоги (наприклад, низька затримка, висока доступність) не можуть бути задоволені існуючими бездротовими мережами, включаючи мережі 4/5G,

через низку проблем, таких як обмежені ресурси комунікаційних технологій, недостатня автоматизація операцій, орієнтовані на людину пристрої тощо. Таким чином, 6G має збільшити критично важливий зв'язок MLLMT для підтримки майбутніх додатків.

До різних сфер застосування відносяться, наприклад, автоматизація будинків і будівель, інтеграція розподілених енергоресурсів з енергетичними установками, системи безпілотних транспортних засобів, інфраструктура охорони здоров'я з підтримкою Інтернету речей, а також контроль і моніторинг промислових застосувань 4.0. Для розвитку таких інноваційних і захоплюючих додатків Інтернету речей і багатьох інших (наприклад, космічний туризм) існує нагальна потреба в нових бездротових технологіях, які можуть забезпечити і підтримувати величезну кількість з'єднань між пристроями Інтернету речей і наземно-космічними зв'язками і навпаки.

Існує кілька існуючих технологій, які можуть бути безпосередньо прийняті для надання послуг mLLMT в екосистемі 6G. Наприклад, Парк та ін. [14] запропонували механізм, який може забезпечити зв'язок машинного типу з низькою затримкою, де ресурси пристроїв ІоЕ можуть спільно використовуватися протягом частки часу відгуку (в мс). Автори розробили нову структуру послідовного навчання з кінцевою пам'яттю, яка буде належним чином відповідати вимогам в декількох сценаріях, таких як толерантні до затримок додатки, періодична доставка повідомлень, а також обмін терміновими і критично важливими повідомленнями. Пак та ін. стверджують, що запропонована ними система навчання збільшить затримку пристроїв ІоЕ або МТС для навчання декількох важливих повідомлень і перерозподілу мережевих і комунікаційних ресурсів для доставки періодичних повідомлень, які будуть використовуватися для важливих повідомлень у багатьох додатках 6G.

## 2.12 Екстремальні комунікації на основі ШІ

У наступні два-три десятиліття штучний інтелект зануриться в усі аспекти комунікації і буде активно використовуватися в комунікаційних цілях. Тут ми пропонуємо термін "допоміжний екстремальний зв'язок з використанням ШІ" (АЕС). Однак на сьогоднішній день мережа 4/5G не зможе впоратися з такою великою кількістю пристроїв, додатків, різномірних стандартних і нестандартних практик, різних зацікавлених сторін тощо. Тому 6G повинен вимагати такого АЕС.

Мережа АЕС може контролювати і відстежувати трильйони пристроїв в різних вертикалях (наприклад, виробництво і ланцюжок поставок IoT) по всьому світу. Ці пристрої відстежують кілька інтелектуальних параметрів - розподіл смуги пропускання, прийняття рішень щодо маршрутизації та агрегації даних, обмін знаннями - ось лише кілька прикладів. Іншими можливостями застосування є планування мережі на основі даних, експлуатація, інтелектуальна мобільність, управління хендовер і інтелектуальне управління спектром на основі штучного інтелекту для перетворення багатьох реальних традиційних середовищ в динамічні середовища зв'язку 6G.

Існують різні методи машинного навчання, які можуть забезпечити динамічний зв'язок, роботу в мережі, а також елементи безпеки і довіри в мережах "транспортний засіб-інфраструктура" і передбачити способи підтримки ШІ-орієнтованих футуристичних розумних або безпілотних транспортних мереж 6G. У роботі [15] автори дослідили кілька методів ML, включаючи керований багатошаровий перцептрон для вирівнювання каналів шляхом інтелектуального і творчого перевизначення символів зв'язку. Механізм нелінійного вирівнювання на основі опорних векторів може бути використаний у бездротових мережах та зв'язку 6G, де існує часова кореляція у зібраних даних про міжсимвольні завади.

## 2.13 Висновки до розділу 2

Розвиток мереж 6G передбачає врахування нових вимог та викликів, які можуть виникнути з впровадження нових технологій та розширення функціональності для задоволення потреб майбутніх додатків. Ось кілька ключових аспектів, які можуть впливати на розвиток мереж 6G:

З розвитком розумних міст, віртуальної реальності, розширеної реальності та інших передових додатків передбачається величезний обсяг обміну даними. Мережі 6G мають забезпечувати значно вищу швидкість передачі даних та пропускну здатність порівняно з 5G для підтримки цих додатків. Деякі застосування, такі як хірургічні операції з використанням роботів, вимагають найменшої можливої затримки. Мережі 6G повинні забезпечувати надзвичайно низьку латентність для забезпечення реального часу в таких сценаріях. Впровадження штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) для автоматизації та оптимізації роботи мережі. Вимоги до високої продуктивності цих алгоритмів можуть впливати на мережеві пристрої та інфраструктуру.

З урахуванням зростаючої кількості підключених пристроїв і IoT-технологій, важливо забезпечити ефективне використання енергії для тривалого функціонування. Мережі 6G мають дозволяти інтеграцію різних діапазонів частот для оптимального використання спектру та забезпечення стабільного з'єднання в різних умовах.

Зі зростанням кількості підключених пристроїв важливо забезпечити високий рівень безпеки та захисту приватності, оскільки збільшується потенційна загроза кібератак. Мережі 6G мають забезпечувати глобальне покриття для забезпечення доступу до інтернету в найвіддаленіших районах.

Розробка мереж 6G повинна бути гнучкою та адаптивною, здатною відповідати зростаючим вимогам майбутніх технологій і додатків у світі з'єднаності.

## 3 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6G

Попередні розділи були присвячені еволюції, основним тенденціям і ключовим вимогам майбутніх бездротових систем 6G. Для реалізації 6G запропоновано кілька ключових технологій, які обговорюються в даному розділі.

Для цього необхідно отримати загальне уявлення про ключові технології майбутніх бездротових систем 6G. Вивчити кожен ключову технологію з попереднім описом її ролі в 6G і оглядом репрезентативних досліджень.

### 3.1 Мережеві технології радіозв'язку

У цьому підрозділі представляємо важливі технології радіомереж 6G, включаючи ТГц-зв'язок і неземні мережі на шляху до 3D-мереж.

Стрімке зростання бездротового трафіку даних, за оцінками, збільшить мобільний трафік даних у сім разів з 2019 по 2024 рік [16]. Очікується, що широкі радіодіапазони, такі як міліметрові хвилі (до 300 ГГц), задовольнять попит на дані в мережах 5G.

Однак очікується, що такі додатки, як голографічна телеприсутність, інтерфейси між мозком і комп'ютером та XR, потребуватимуть швидкості передачі даних у діапазоні Тбіт/с, що буде складно забезпечити за допомогою систем mmWave [17]. Це вимагає вивчення терагерцового (ТГц) діапазону частот (0,1-10 ТГц). Цей тип зв'язку буде особливо корисним для надвисокої швидкості передачі даних з нульовим рівнем помилок на коротких відстанях. Очікується, що 6G забезпечить більш ніж 1000-кратне збільшення швидкості передачі даних порівняно з 5G, щоб задовольнити цільову вимогу в 1 Тбіт/с. Для забезпечення такого значного збільшення швидкості передачі даних дослідники вивчають додаткові ресурси спектру за межами діапазону до 6 ГГц. Очікується, що ранні системи 6G використовуватимуть бездротові мережі mmWave на частотах до 6 ГГц. Однак очікується, що 6G розвиватиметься за

рахунок використання частот, що виходять за межі mmWave, в діапазоні ТГц [6]. Очікується, що розмір осередків 6G ще більше зменшиться від маленьких осередків 5G до крихітних осередків, радіус яких становитиме лише кілька десятків метрів. Таким чином, мережі 6G потребуватимуть нового архітектурного дизайну і методів управління мобільністю, які зможуть задовольнити більш щільне розгортання мережі, ніж 5G [12]. Трансивери 6G також повинні будуть підтримувати інтегровані частотні діапазони від мікрохвильового до ТГц. Застосування ТГц для мереж 6G проілюстровано на рисунку 3.1, де ТГц-зв'язок використовується для високошвидкісних передач між радіовежами і мобільними пристроями, інтегрованими мережами доступу і транзитного зв'язку, а також високошвидкісними супутниковими лініями зв'язку.

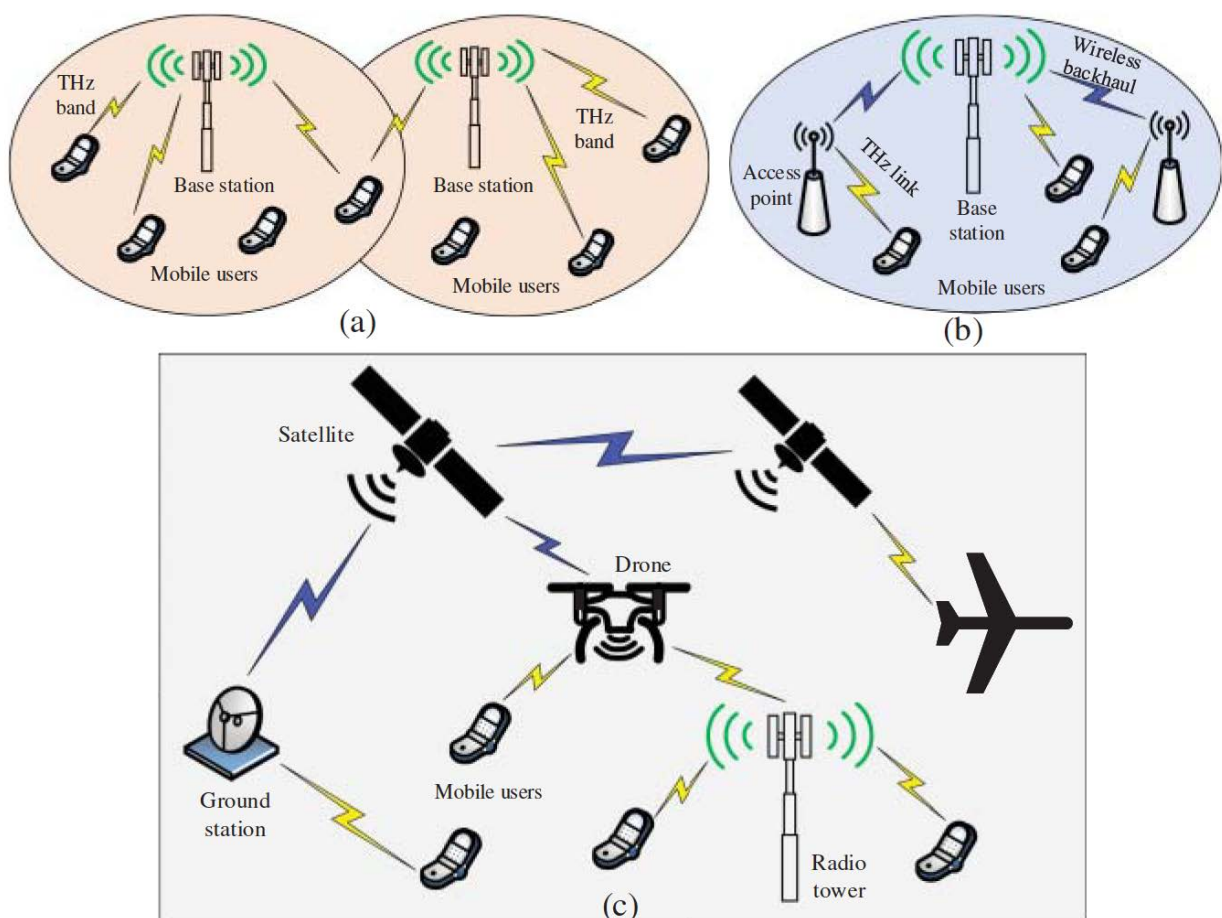


Рисунок 3.1 – Архітектура інтегрованої безпроводної мережі на основі 6G технології

ТГц-хвилі розташовані між мм-хвилями і оптичним діапазоном частот.

Це дозволяє використовувати в майбутніх мережах технології, засновані на електроніці та фотоніці. Що стосується електронних пристроїв, то технології нано-виробництва можуть сприяти прогресу напівпровідникових пристроїв, які працюють в ТГц діапазоні частот. Електроніка в цих пристроях виготовляється з фосфіду арсеніду галію індію та різних технологій на основі кремнію [18]. Масштабована кремнієва архітектура дозволяє синтезувати і формувати хвильові сигнали ТГц в одному мікрочіпі [19]. Механізм підведення оптичних волокон до ТГц-схем має важливе значення для досягнення більш високих швидкостей передачі даних у фотонних пристроях. Звичайні матеріали, що використовуються на нижчих частотах у мікрохвильовому та міліметровому діапазонах, недостатньо ефективні для високочастотного бездротового зв'язку. Пристрої, виготовлені з таких матеріалів, демонструють великі втрати в ТГц діапазоні частот. ТГц хвилі вимагають матеріалів, що електромагнітно реконфігуруються. У цьому контексті графен був визначений як підходящий кандидат для реформування електромагнітних хвиль ТГц за допомогою тонких графенових шарів [11, 11]. Компоненти бездротового зв'язку ТГц на основі графену продемонстрували багатообіцяючі результати з точки зору генерації, модуляції та виявлення ТГц хвиль [12]. Бездротовий зв'язок ТГц дозволяє використовувати малі розміри антен для досягнення як підсилення рознесеності, так і підсилення спрямованості антени за допомогою МІМО. Наприклад, надмасивне МІМО 1024x1024 представлено в [13] як підхід до збільшення відстані зв'язку в системах бездротового зв'язку ТГц.

Канал ТГц діапазону є високочастотно-селективним [14]. Ці канали страждають від високого атмосферного поглинання, атмосферного загасання і втрат у вільному просторі. Це вимагає розробки нових моделей каналів, які б імітували поведінку ТГц-зв'язку [16]. Перша статистична модель для ТГц каналів запропонована в [15], яка залежить від виконання обширного моделювання трасування променів для отримання статистичних параметрів

каналу. Деякі нещодавні дослідження [16, 17] пропонують більш точні моделі каналів. Різні дослідницькі роботи також зосереджені на застосуванні ТГц зв'язку. Гібридна радіочастотна і оптична система вільного простору представлена в [18], де ТГц/оптичний зв'язок розглядається як підходящий метод для майбутнього бездротового зв'язку. Крім того, ТГц-зв'язок може використовуватися в центрах обробки даних для підвищення продуктивності при досягненні значної економії за рахунок мінімізації використання кабелю [19].

У звичайних наземних мобільних мережах функціонування базових станцій оптимізовано для задоволення потреб наземних користувачів. Більше того, кут нахилу антен на наземних базових станціях орієнтований на наземного користувача для кращої спрямованості і, отже, не може підтримувати повітряних користувачів [20].

Така мобільна мережа дозволяє незначне вертикальне переміщення (тобто над і під поверхнею землі), таким чином, пропонуючи переважно двовимірний (2D) зв'язок. Наземні мережі розширюють 2D-зв'язок, додаючи висоту як третій вимір [21]. Неземні мережі здатні забезпечувати покриття, магістралі, транзит і підтримку високошвидкісної мобільності в районах, що не обслуговуються або недостатньо обслуговуються, завдяки інтеграції БПЛА, супутників (зокрема, дуже низьких навколоземних орбіт (VLEO)), прив'язних аеростатів і станцій висотних платформ (HAP) [12, 21]. Розробка протоколів та архітектурних рішень для нових радіооперацій (NR) в неземних мережах підтримується в 3GPP Rel-17 і, як очікується, продовжиться в Rel-18 і Rel-19 [21]. 3D-мережі ще більше розширюють парадигму неземної мережі, дозволяючи 6G перетворитися на глобальну систему зв'язку, розширюючи своє покриття з землі в повітря, в космос, під землю і під воду [22]. Цікаво, що повітряні базові станції, що працюють на основі технології БПЛА, можуть запропонувати ширококосмугове і надійне бездротове покриття на вимогу в економічно ефективний і гнучкий спосіб. Деякі з перспективних характеристик базових станцій з використанням БПЛА [20, 22] є наступними. Інтелектуальна 3D мобільність і легкість



маневрування. Різноманітні можливості з точки зору обчислень, зберігання, резервного живлення тощо для задоволення гетерогенних потреб. Комунікаційні лінії LoS, що дозволяють ефективно формувати промінь в 3D. Висока гнучкість з точки зору кількості антенних елементів при використанні БПЛА для створення антенних решіток для 3D MIMO.

Спостерігається експоненціальне зростання кількості підключених пристроїв, і ця тенденція збережеться з більш високими темпами зростання в майбутньому. Зокрема, в майбутньому очікується значне збільшення користувачів антен або пристроїв, підключених до антен. Технологічний прогрес у різних галузях, таких як електроніка і сенсорні технології, високошвидкісний зв'язок, мережі передачі даних і авіаційні технології, забезпечують необхідну екосистему для стабільного зростання БПЛА (також відомих як дрони), що, в свою чергу, розширює горизонти застосування БПЛА. Очікується, що до 2024 року парк малих моделей БПЛА (що використовуються переважно в рекреаційних цілях аматорами) досягне позначки в 1,38 мільйона одиниць, тоді як малі немодельні БПЛА (що використовуються переважно в комерційних цілях), згідно зі звітом Федерального управління цивільної авіації США (FAA), становитимуть 789000 мільйонів одиниць [23]. Більше того, до того ж року, тобто до 2024 року, світовий ринок БПЛА оцінюється в 68,6 мільярда доларів США [24]. Отже, очікується, що мобільні мережі 6G забезпечать необхідний зв'язок для такої зростаючої кількості повітряних користувачів. Щоб виправдати ці очікування, парадигма 3D-мереж буде відігравати ключову роль в 6G.

Фреймворк для 3D-стільникової мережі на базі БПЛА для майбутнього 5G забезпечує рішення для розміщення базових станцій з БПЛА в 3D (з використанням підходу усіченого октаедра), а також чутливого до затримок зв'язку користувачів на базі БПЛА з базовими станціями з БПЛА [20]. У роботі [25] досліджується тривимірна нестационарна стохастична модель на основі геометрії (GBSM) для каналів БПЛА-земля, які передбачаються в мобільних мережах 6G, інтегрованих з БПЛА. Основна мета GBSM полягає в тому, щоб

добре працювати для mmWave і масивних конфігурацій MIMO. Більше того, інтелект може бути поширений на периферійні 3D-мережі (тобто за межі 2D-мереж) за рахунок використання периферійних обчислень (наприклад MEC і туманні обчислення) [26]. Зокрема, робота передбачала інтеграцію літаючих базових станцій з наземними станціями за допомогою нових технологій, таких як мобільні периферійні обчислення (MEC), програмно-визначені мережі та штучний інтелект.

### 3.2 Методи оброблення даних інтелектуальних систем

Завдяки відмінним рисам і чудовим можливостям штучний інтелект знаходить різноманітне застосування в бездротових і мобільних мережах. Величезні масиви даних, що генеруються великими пристроями Інтернету речей, можуть бути використані підходами ШІ для вилучення цінної інформації, покращуючи таким чином роботу та продуктивність мережі. Нещодавно федеративне навчання (FL) з'явилася як нова концепція ШІ, яка використовує обчислювальну потужність пристрою і покращує конфіденційність даних користувача [27, 28]. Обґрунтування полягає у спільному навчанні спільної моделі таким чином, що пристрої-учасники навчають локальні моделі і обмінюються лише оновленнями (а не даними) з централізованим сервером параметрів [15, 29]. Мобільні та IoT-пристрої, такі як мобільні телефони, IoT-пристрої та автономні пристрої, стають все більш потужними з точки зору зберігання даних та обчислювальних можливостей, і це зумовило зростаючий інтерес до FL. Згідно з [30], FL можна класифікувати на горизонтальне FL, вертикальне FL та федеративне трансферне навчання: Горизонтальне навчання: загальні простори ознак різних наборів даних однакові, але користувачі навчання мають різні розподіли вибірок, як показано на рис. 3.2 (a). Вертикальне FL: простори ознак різних наборів даних відрізняються, але користувачі FL мають однаковий розподіл вибірки, як показано на рисунку 3.2 (b). Федеративне трансферне навчання: Користувачі FL

мають набори даних з різними просторами ознак і розподілами просторів вибірок, як показано на рисунку 3.2(с).

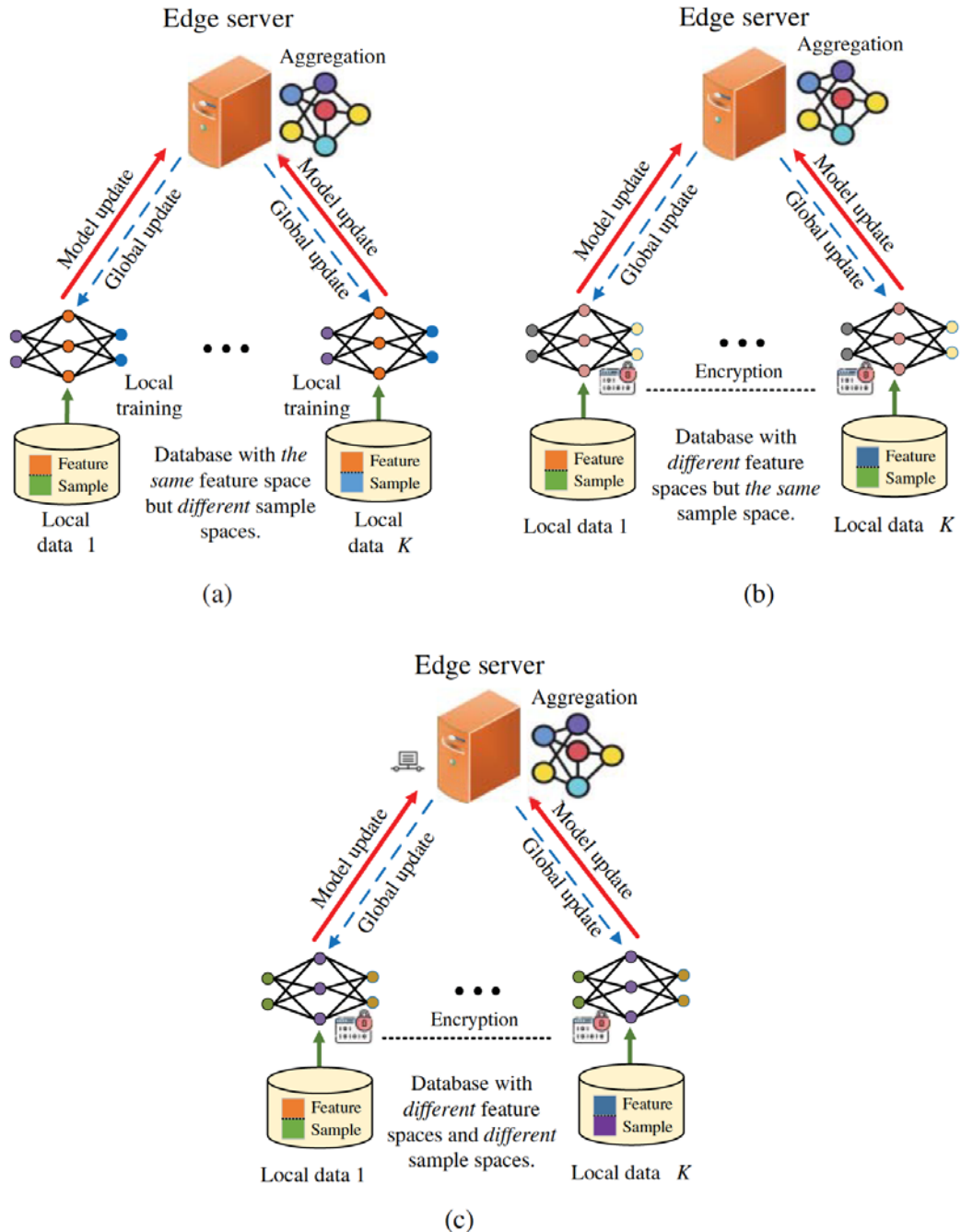


Рисунок 3.2 – Алгоритм федеративного навчання моделі безпроводної системи

Оскільки передбачається, що 6G матиме ШІ/МН в основі, роль ШІ/МН стає важливою для 6G. Використання традиційних централізованих підходів до

ML підходить для мережеских сценаріїв, де доступний централізований збір і обробка даних. Оскільки обсяг мобільних даних і прогрес в обчислювальному обладнанні та навчанні зростають, численні проблеми в майбутніх мережах 6G можуть бути ефективно вирішені за допомогою підходів ШІ, таких як класифікація модуляції, виявлення форми сигналу, обробка сигналів і проектування фізичного рівня [9, 31, 32].

Однак через централізовану природу таких систем на основі ШІ/МН вони страждають від єдиної точки відмови, а також вразливостей у сфері безпеки. Таким чином, FL набуває все більшої популярності і стає життєздатним розподіленим рішенням для ШІ, яке дозволяє реалізувати концепцію "ubiquitous AI" для зв'язку 6G [33]. FL пропонує безліч переваг для 6G, як підсумовано авторами в [34], таких як ефективний для зв'язку розподілений ШІ, підтримка гетерогенних даних, що надходять з різних пристроїв, які належать до різних послуг, що може призвести до неідентично розподіленого набору даних, захист конфіденційності, оскільки дані залишаються локально і нікуди не завантажуються, а також можливість широкомасштабного розгортання.

Останні кілька років стали свідками використання різних методів ШІ для вирішення численних проблем у бездротових мережах. Наприклад, в роботі [35] розглядаються застосування глибокого навчання з підкріпленням (DRL) для трьох важливих тем, включаючи доступ до мережі і контроль швидкості, кешування даних і розвантаження обчислень, безпеку і збереження зв'язку, а також для ряду інших питань, таких як розподіл ресурсів, маршрутизація трафіку, виявлення сигналів і балансування навантаження. Застосування ML для бездротових мереж розглянуто в [36], де обговорюються рішення для управління ресурсами, мережею, мобільністю та локалізацією з використанням ШІ. Використання навчання з передачею, глибокого навчання та ройового інтелекту для майбутніх бездротових мереж можна знайти в [37, 38] та [39], відповідно. Деякі з пов'язаних робіт стосуються використання ШІ у бездротових мережах. В роботі [40] запропоновано ігровий підхід Стакельберга для стимулювання взаємодії між глобальним сервером і пристроями, що беруть

участь у навчальній моделі. В роботі [33] запропоновано систему FL для мереж IoT з метою одночасної максимізації ефективності використання периферійних ресурсів та мінімізації витрат на мережі IoT. У роботі [41] запропоновано механізм стимулюючого FL з використанням теорії контрактів, який дозволяє залучати пристрої з високою репутацією до виконання завдань навчання. Крім того, для відбору пристроїв пропонується схема репутації, заснована на мультитиваговій моделі, а для управління цією системою репутації використовується блокчейн. Незважаючи на ажіотаж, існує безліч проблем, які необхідно вирішити, щоб отримати максимальну користь від FL у сфері 6G. Деякі проблеми FL висвітлені в [15, 27], включаючи вартість зв'язку, значну гетерогенність обладнання, високий відтік пристроїв, витік конфіденційності через оновлення моделі та проблеми безпеки.

### 3.3 Методи розвитку децентралізованих систем та забезпечення інформаційної безпеки даних

Останні кілька років стали свідками зростання DLT, зокрема, технології блокчейн. Передбачається, що DLT відкриє двері в децентралізоване майбутнє шляхом подолання відомих перешкод централізованих систем [43].

Блокчейн - це різновид DLT, який веде цифровий реєстр у безпечний і розподілений спосіб. Цей реєстр зберігає всі транзакції в хронологічному порядку та криптографічно запечатаний [44]. Ілюстрація блокчейну зображена на рисунку 3.3.

Якщо хакер має намір відредагувати транзакцію в блокчейні, він повинен змінити хеш не тільки цього блоку, але й усіх інших, що майже неможливо. Ця властивість безпеки блокчейну робить його ідеальним вибором для використання в багатьох секторах, таких як банківська справа, страхування, державні послуги та управління ланцюгами поставок. Крім того, блокчейн пропонує численні переваги, такі як відсутність посередників, незмінність, неспростовність, доказ походження, цілісність і псевдонімичність; тому

блокчейн привертає всебічну увагу як з боку промисловості, так і з боку академічних кіл [28].

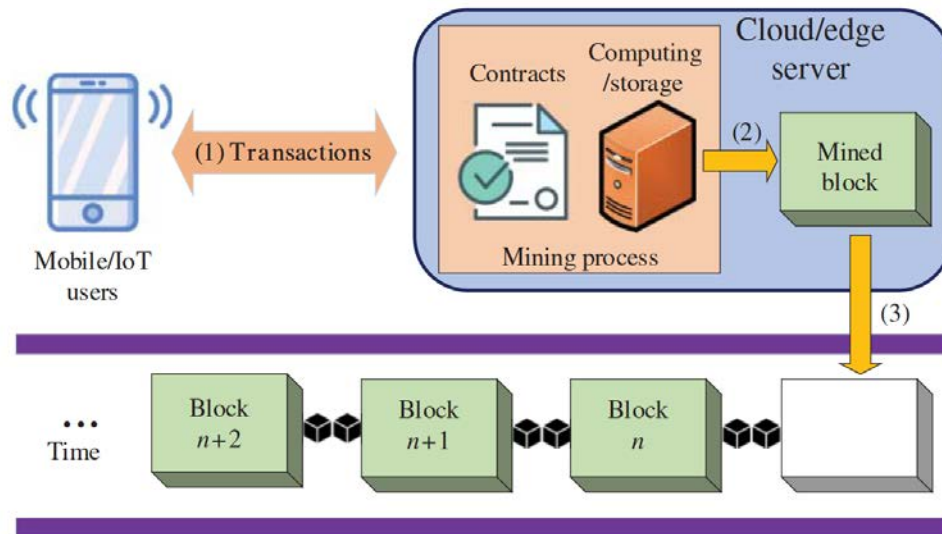


Рисунок 3.3 - Алгоритм оптимізації функціоналу блокчейну

Багато секторів вже визнали прагматичне використання технології блокчейн та її ефективність, оскільки вони використовують/пропонують технологічні рішення на основі блокчейну [45]. Прикладами деяких з цих бізнес-секторів є фінанси і банківська справа, промислові ланцюги поставок і виробництво, доставка і транспорт, охорона здоров'я і медичні картки пацієнтів, освітні процеси і кредитування. Блокчейн може відігравати кардинальну роль у покращенні наступних аспектів майбутніх бездротових систем 6G.

Управління та оркестрування з точки зору зменшення перешкод, розподілу ресурсів, спектру та управління мобільністю [46, 47]. Операції з точки зору безстільникового зв'язку та 3D-мереж. Бізнес-моделі з точки зору децентралізованих цифрових ринків, що не потребують довіри, за участю різних зацікавлених сторін, таких як провайдери інфраструктури (InPs), орендарі мереж, галузеві вертикалі, провайдери over-the-top (OTT) і периферійні провайдери [48, 49].

Крім того, блокчейн має величезний потенціал для зміцнення існуючої сфери послуг мобільних мереж, а також для створення підґрунтя для футуристичних додатків і варіантів використання 6G.

Блокчейн був визначений як одна з ключових технологій для 6G.

Численні зусилля докладаються для використання його потенціалу для поліпшення як технічних аспектів 6G, так і варіантів використання екосистеми 6G. Наприклад, в роботі [46] представлено використання блокчейну для децентралізованого управління мережею 6G. Зокрема, в роботі показано блокчейн плюс смарт-контракт для торгівлі спектром. В роботі [50] запропоновано мережу радіодоступу на основі блокчейну (B-RAN), яка дозволяє невеликим підмережам співпрацювати в середовищі, що не викликає довіри, для створення більших кооперативних мереж. У роботі [47] представлено, як блокчейн може бути використаний для усунення проміжного шару і розробки розподіленої мобільності як послуги, яка розміщується як додаток на периферійних обчислювальних засобах.

Покращена прозорість і довіра між усіма зацікавленими сторонами є очевидними перевагами цієї роботи. У роботі [51] пропагується використання блокчейну для забезпечення безпеки даних у додатках зі штучним інтелектом для 6G. Двома основними застосуваннями є позиціонування в приміщенні та автономні транспортні засоби.

### 3.4 Граничні обчислення

Одна з найперших концепцій периферійних обчислень, так званий клаудлет, була запропонована в 2009 році [52]. Концептуально, кластер визначається як надійний і багатий на ресурси комп'ютер або кластер комп'ютерів, розташований у стратегічному місці на периферії і добре підключений до Інтернету. Основна мета хмарних обчислень - розширення хмарних обчислень до межі мережі та підтримка мобільних користувачів з обмеженими ресурсами у запуску ресурсномістких та інтерактивних додатків.

Хоча можливості зберігання та обчислювальні можливості клаудлетів відносно менші, ніж у центрів обробки даних у хмарних обчисленнях, клаудлети мають такі переваги, як низька вартість розгортання та висока масштабованість [53]. Мобільні користувачі використовують віртуалізацію на основі віртуальних машин (VM), налаштовуючи сервісне програмне забезпечення на найближчих хмарах, а потім використовуючи ці хмарні сервіси через бездротову локальну мережу для розвантаження інтенсивних обчислень [52, 54]. Існує два різних підходи до розвантаження обчислень [52], включаючи міграцію VM та синтез VM. Оскільки в хмарах використовується резервування VM, хмари можуть працювати в автономному режимі без втручання хмари [54, 55]. Мобільні користувачі можуть отримати доступ до сервісів кластерів через Wi-Fi. Ідея хмарних обчислень у безпосередній близькості до мобільних користувачів схожа на концепцію Wi-Fi у наданні доступу до Інтернету [46].

Wi-Fi з'єднання між користувачами та хмарними сервісами може бути серйозним недоліком.

Таким чином, мобільні користувачі не можуть отримати доступ до хмарних сервісів на великій відстані і використовують одночасно і Wi-Fi, і стільниковий зв'язок [53], тобто користувачі повинні перемикатися між мобільною мережею і Wi-Fi, якщо вони користуються послугами хмарних сервісів.

Для усунення недоліків, притаманних хмарним обчисленням, перспективним рішенням стали туманні обчислення. Туманні обчислення - термін, запропонований компанією Cisco у 2012 році, означає розширення хмарних обчислень від ядра до межі мережі, таким чином наближаючи обчислювальні ресурси до кінцевих користувачів [47].

Основна мета туманних обчислень - наблизити обчислювальні ресурси до кінцевих користувачів, а також зменшити обсяг даних, необхідних для передачі в хмару для обробки та зберігання. Таким чином, замість того, щоб передаватися в хмару, більшість інтенсивних обчислень від мобільних користувачів і дані, зібрані кінцевими користувачами (наприклад, датчиками і



пристроями Інтернету речей), можуть оброблятися і аналізуватися вузлами туманних обчислень на кордоні мережі, таким чином зменшуючи затримку виконання і перевантаження мережі [48].

Як доповнення до хмарних обчислень, туманні обчислення виділяються наступними особливостями [45, 49]. Граничне розташування, низька затримка та обізнаність про місцезнаходження. Широке географічне розповсюдження. Підтримка мобільності та додатків у режимі реального часу. Дуже велика кількість вузлів як наслідок географічного розподілу. Неоднорідність туманних вузлів і переважання бездротового доступу.

Завдяки своїм характеристикам, туманні обчислення відіграють важливу роль у багатьох варіантах використання та додатках [49]. З точки зору типу вузла, туманний вузол може бути побудований з різнорідних елементів (наприклад, маршрутизаторів, комутаторів, шлюзів Інтернету речей), а хмарний вузол можна назвати хмарним дата-центром у коробці [50]. З точки зору розташування вузлів, туманний вузол може бути розгорнутий у стратегічному місці, починаючи від кінцевих пристроїв і закінчуючи централізованими хмарами, а клаудлет може бути розгорнутий як у приміщенні, так і на відкритому повітрі.

Близька схожість між хмарними і туманними обчисленнями полягає в тому, що хмарні і туманні вузли не інтегровані в архітектуру мобільної мережі; таким чином, туманні вузли і хмарні вузли зазвичай реалізуються і належать приватним підприємствам, і забезпечити мобільним користувачам гарантії якості обслуговування (QoS) і якості досвіду (QoE) непросто [45, 46].

Концепція MEC була ініційована наприкінці 2014 року. Як доповнення до архітектури C-RAN, MEC має на меті об'єднати хмарні сервіси телекомунікаційних та інформаційних технологій (IT) для надання можливостей хмарних обчислень в мережах радіодоступу в безпосередній близькості від мобільних користувачів [51]. Загальна архітектура MEC може бути проілюстрована на рисунку 3.4.

Основними цілями MEC є [52]: оптимізація мобільних ресурсів шляхом розміщення обчислювальних додатків, оптимізація великих даних перед відправкою в хмару, надання хмарних сервісів в безпосередній близькості від мобільних абонентів, а також надання контекстно-орієнтованих послуг за допомогою інформації про мережу радіодоступу. Як видно з ілюстрації на рисунку 3.4, MEC уможливорює широкий спектр застосувань, де реакція в реальному часі є суворо необхідною, наприклад, безпілотні транспортні засоби, VR, AR, робототехніка та імерсивні засоби масової інформації.

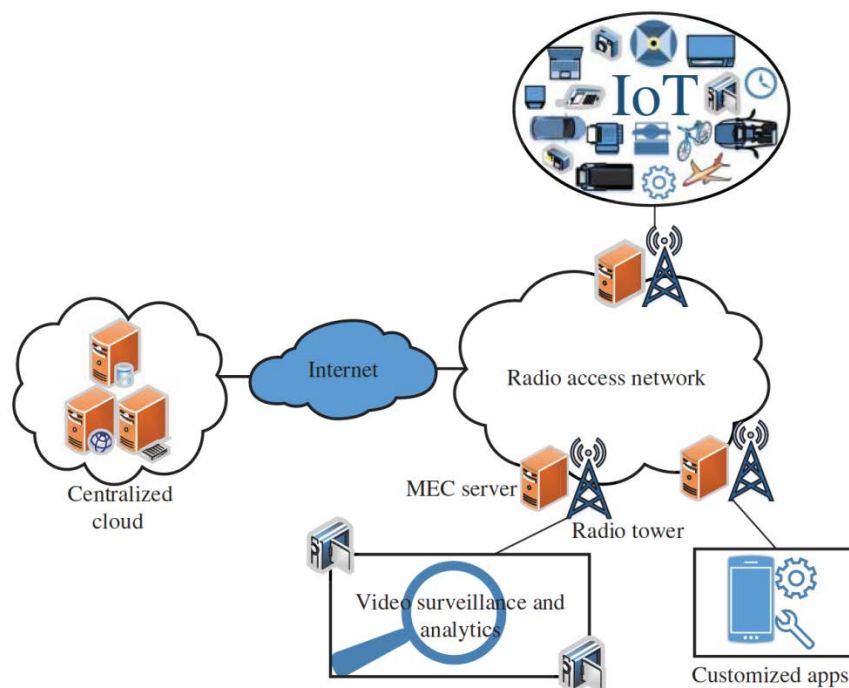


Рисунок 3.4 - Узагальнена архітектура MEC у складі мережі доступу

Щоб скористатися додатковими перевагами MEC з гетерогенними технологіями доступу, наприклад, 4G/5G/6G, Wi-Fi та фіксованим з'єднанням, у 2017 році назву мобільних периферійних обчислень було змінено на мультидоступні периферійні обчислення [53]. Після такого розширення сфери застосування, сервери MEC можуть бути розгорнуті мережевими операторами в різних місцях в межах RAN та/або поєднані з різними елементами, що створюють межу мережі. В той час як БС в традиційних стільникових мережах

в основному використовуються для цілей зв'язку, МЕС дозволяє їм взаємодіяти з серверами МЕС для надання мобільним користувачам додаткових послуг. Ця трансформація підштовхує інтелект до традиційних БС, щоб їх можна було використовувати не тільки для цілей зв'язку, але й для обчислень, кешування та управління [7].

Граничні обчислення були ключовою технологією в мережах 5G і залишаться ключовою технологією в мережах 5G і майбутніх мережах 6G. Впровадження периферійних обчислень уможлиблює багато нових послуг і додатків, наприклад, автономні транспортні засоби, розумний Інтернет речей, розумні міста, розумну охорону здоров'я тощо. Як наслідок, існує нагальна потреба в тісній інтеграції периферійних обчислень з такими технологіями, як штучний інтелект, великі дані, інтелектуальні поверхні, блокчейн, Інтернет речей, VR/AR/метаверсія. Важливо відзначити, що з'явиться більше додатків і послуг, що вимагають розгортання ШІ на периферії мережі і розгортання інтелектуальної периферії, створюючи концепцію периферійного ШІ. Крім того, з'явилося кілька нових концепцій завдяки поєднанню периферійних обчислень з новими технологіями. Наприклад, обчислення в мережі можуть ще більше вдосконалити традиційні концепції периферійних обчислень. Зокрема, обчислення в мережі дозволяють мережевим пристроям, таким як маршрутизатори і комутатори, виконувати обчислювальні функції замість переадресації передачі даних [54]. Об'єднання мереж повітряного доступу та периферійних обчислень вводить нову концепцію, яка називається повітряними обчисленнями [55].

Очікується, що повітряні обчислення надаватимуть передові послуги, наприклад, зв'язок, обчислення, кешування, зондування, навігацію та управління в глобальному масштабі. Завдяки перевагам високої мобільності, швидкого розгортання, глобальної доступності, масштабованості і гнучкості, повітряні обчислення доповнюють традиційні обчислювальні парадигми (наприклад, хмарні обчислення, туманні обчислення, МЕС) і тому вважаються

основою комплексної обчислювальної інфраструктури в майбутніх мережах 6G.

Для надання додатків і послуг на периферійних мережах пропонуються різні парадигми периферійних обчислень. Доступність ресурсів периферійних обчислень і вибух даних Інтернету речей уможливають розгортання багатьох нових послуг з низькою затримкою і інтелектуальними можливостями.

### 3.5 Квантові комунікації

Останнім часом зв'язок на основі квантових обчислень привертає багато уваги дослідників і розробників. Повільно, але квантові обчислення виходять за рамки простої наукової фантастики і стануть перетворюючою реальністю в парадигмі 6G в наступному десятилітті або близько того. Оскільки 6G повинен відповідати суворим вимогам, таким як величезні швидкості передачі даних, швидкі обчислення і надійний захист, QC стане потенційним інструментом для цього. Рушійною силою QC є те, що він використовує традиційні концепції фізики, тобто фотони використовуються для обробки обчислень у квантові кубіти. Потім ці кубіти надсилаються від машини-відправника (або емітера) до машини-одержувача. Використання літаючих кубітів у комунікаціях приносить величезні переваги, такі як слабка взаємодія з навколишнім середовищем, швидші обчислення і комунікації, квантова телепортація, безпека комунікацій і низькі втрати при передачі даних у комунікації.

Згідно з [46], роль квантових систем для телекомунікацій та мережевих технологій поділяється на дві різні категорії: квантовий зв'язок і квантові обчислення. Квантовий зв'язок - це спосіб передачі квантового стану від відправника до одержувача [47]. Це може дозволити виконувати завдання, які або не можуть бути виконані, або неефективно виконуються за допомогою класичних методів [46, 47].

Деякі з цікавих пропозицій квантового зв'язку - квантовий розподіл ключів (QKD), квантовий безпечний прямий зв'язок (QSDC), квантовий обмін

секретами (QSS), квантова телепортація, квантова мережа (квантовий канал, квантові ретранслятори, квантова пам'ять і квантовий сервер) [48].

Одним з перспективних напрямків використання квантового зв'язку є безпечний розподіл криптографічних ключів, так званий QKD. Методи, які використовують для цього квантову заплутаність, називаються QKD на основі заплутаності [49]. Будь-який вид атаки "зловмисника посередині" при використанні QKD можна легко виявити, оскільки зловмисник порушує квантовий (спільний) стан, і про це порушення можна дізнатися, дослідивши кореляції між об'єктами, що спілкуються [49].

Передбачається, що квантовий зв'язок відіграватиме вирішальну роль у реалізації безпечного зв'язку 6G. Зокрема, основні принципи квантового елемента і його нелокальності, суперпозиції, невід'ємного права і теореми про неклонування прокладають шлях до надійної безпеки. Наступне покоління послуг, які все більше підтримуватимуться квантовим зв'язком, - це НТ, тактильний Інтернет, VCI, а також надзвичайно масові та інтелектуальні комунікації [46, 50].

Ці протоколи QKD продемонстрували найбільший прогрес, і було показано численні практичні реалізації таких протоколів, що відображає їх потенційну застосовність у майбутніх бездротових мережах 6G [19, 26]. Ще одним цікавим застосуванням квантового зв'язку є його застосування для безпечного зв'язку на великі відстані [29]. Це, зокрема, було б цікаво, оскільки передбачається, що 6G буде мати особливий фокус на LDHMC, який буде мати справу з надзвичайно далеким зв'язком.

У роботі [31] розглядаються різні парадигми, такі як квантовий зв'язок, зв'язок за допомогою квантових обчислень і квантовий зв'язок на основі машинного навчання, який використовує машинне навчання і квантові обчислення в синергетичному порядку. Поява засобів квантових обчислень створює значну конкуренцію традиційним криптографічним методам, які використовуються для шифрування даних в сучасних бездротових системах зв'язку. Так, в роботі [41] використано механізм QKD для генерації та

управління ключами в сценаріях 5G IoT, а саме, квантовий ключ GRID для аутентифікації та узгодження ключів (QKG-AKA), і аналітично показано, що безпека не може бути порушена за поліноміальний час. У роботі [42] запропоновано дві хеш-функції (для додатків 5G), які використовують квантові блукання (QW), а саме: QWHF-1 і QWHF-2 (Quantum Walk Hash Function 1 і 2). Далі, QWHF-1, в свою чергу, використовується для розробки протоколу розподілу ключів автентифікації (AKD), а QWHF-2 використовується для розробки протоколу автентифікованого квантового зв'язку в напрямку (AQDC) для зв'язку між пристроями (D2D). У роботі [43] досліджено застосовність QKD для забезпечення фронтального зв'язку, який пропонує підключення з низькою затримкою до безлічі терміналів 5G. Зокрема, в цьому дослідженні було інтегровано BB84 і QKD, а також підтримано шифрування AES. Їхня робота прокладає шлях до квантово захищеної інфраструктури для мереж 5G/B5G.

### 3.6 Інші новітні технології

Зв'язок видимого світла (VLC), який використовує видиме світло для зв'язку на короткі відстані, є однією з перспективних технологій оптичного бездротового зв'язку (OWC) [44]. Частотний спектр для VLC знаходиться в діапазоні від 430 ТГц до 790 ТГц. Крім того, у VLC найпоширенішими пристроями, що використовуються для передачі, є світлодіоди (LED) і діоди з підсиленням світла за допомогою вимушеного випромінювання (LASER), тоді як для прийому використовуються фотоприймачі, такі як кремнієвий фотодіод, PIN-фотодіод (PD) і PIN-лавинний фотодіод (APD) [44-46]. Деякі з переваг використання технології VLC, заснованої на [44, 46, 47], полягають у наступному. Спектр видимого світла є вільним для використання, оскільки він потрапляє в неліцензійну смугу. Дуже висока пропускна здатність порівняно з радіочастотними сигналами (спектр видимого світла в  $10^4$  рази перевищує спектр радіохвиль [46]). Висока просторова багаторазовість використання, оскільки видиме світло блокується такими об'єктами, як стіни. Точна оцінка

напрямку прибуття. Дуже висока швидкість передачі даних, наприклад, 10 Гбіт/с при використанні світлодіодів і 100 Гбіт/с при використанні лазерних діодів [48]. Низьке споживання енергії завдяки використанню світлодіодів. Безпека за своєю суттю завдяки односпрямованому поширенню, ізоляції сигналу та непроникаючій природі видимого світла. Менша вартість у порівнянні з радіозв'язком, особливо в діапазонах мм і ТГц. Безпечний для використання для зв'язку, оскільки відповідає нормам безпеки для очей та шкіри [46].

Крім того, існуючий діапазон радіочастот і діапазон видимого світла добре розділені; таким чином, електромагнітні перешкоди відсутні [49].

VLC з'явилася з появою білих світлодіодів і за останні два десятиліття дозріла до того, щоб її можна було розглядати як технологію, що сприяє розвитку 6G [50]. Ця технологія успішно використовується в різних сферах застосування, таких як автомобільний зв'язок, підводний зв'язок, внутрішні сценарії, системи ідентифікації видимого світла, бездротові локальні мережі та підземні шахти. Оскільки VLC працює в ТГц діапазоні, він пропонує надвисоку пропускну здатність, а це означає, що він може цілком задовольнити вимоги 6G до пропускну здатності і швидкості передачі даних [51]. З точки зору 6G, гібридна інфраструктура зв'язку може бути розроблена з використанням найкращих можливостей видимого світла та інших традиційних комунікацій, таких як радіочастотний зв'язок, Wi-Fi, інфрачервоний зв'язок (ІЧ) і зв'язок по лініях електропередач (PLC) [50, 52, 53]. Наприклад, для створення гібридної системи RF-VLC було запропоновано використовувати RIS. Тут RIS може контролювати середовище розповсюдження і забезпечувати зв'язок LoS між базовими станціями і мобільними пристроями, оснащеними фотодетектором [54].

Нова парадигма контролю середовища розповсюдження за допомогою розумних та інтелектуальних поверхонь отримала багато назв, таких як LIS, IRS, RIS, програмно-визначена поверхня (SDS) і багато інших [55]. LIS відіграє життєво важливу роль, коли прямий зв'язок LoS неможливий або погіршує

якість настільки, що перешкоджає розумному спілкуванню. LIS забезпечує спосіб перетворення створених людиною структур (наприклад, будівлі, дороги, стіни/стелі в приміщенні) в інтелектуальне і електромагнітно активне бездротове середовище [36].

Це перетворення здійснюється шляхом доповнення цих структур або великим масивом невеликих, недорогих і пасивних антен, або мета-матеріалами (так званими мета-поверхнями), які допомагають контролювати такі характеристики, як відбиття, розсіювання і заломлення середовища розповсюдження [35]. Хоча за допомогою LIS можна змінювати різні характеристики падаючих електромагнітних сигналів, більшість робіт зосереджується на зміні фази падаючого сигналу.

LIS було визначено як ключовий технологічний фактор для 6G, оскільки він буде працювати на більш високих частотах і, як очікується, вийде за рамки масового MIMO [12, 37]. Різні переваги LIS над традиційним масивним MIMO, як зазначено в [36], включають зниження рівня шуму, зменшення міжкористувацьких завад і надійний зв'язок. Цікаво, що LIS дозволить використовувати голографічні радіочастоти, а також голографічні MIMO [12]. Більше того, у сфері 6G LIS можна використовувати для кращого відчуття бездротового середовища шляхом захоплення CSI [38].

Дискретизація є невід'ємною частиною сучасної цифрової обробки сигналів і знаходиться на межі між аналоговим (фізичним) і цифровим світом. Традиційно для ефективної передачі, гнучкої обробки, завадостійкості, включення безпеки (за допомогою шифрування та дешифрування), низької вартості тощо використовується теорема дискретизації Найквіста. Згідно з нею, для сигналу з обмеженою смугою частот, якщо відліки беруться з частотою, що перевищує або дорівнює подвоєній найвищій частоті цього сигналу, то за цими відліками можна відновити точну копію сигналу.

За вибіркою зазвичай слідує процес стиснення, коли вибіркові дані стискаються для підтримки певного прийняттого рівня якості [39]. Як зазначено в [40], зі збільшенням пропускну здатності мобільних мереж 5G і



майбутніх мереж 6G подальше використання методу дискретизації Найквіста призведе до численних проблем, таких як значні накладні витрати, велика складність і підвищене енергоспоживання. У цьому контексті компресійне зондування, також відоме як компресійна дискретизація або розріджена дискретизація, було запропоновано як інтригуюче рішення, яке має потенціал для подолання обмежень, що накладаються традиційною дискретизацією. Компресійне зондування - це, по суті, суб-Найквістська система відбору проб.

Компресійне зондування стверджує, що якщо сигнал характеризується розрідженістю і некогерентністю, його можна дискретизувати зі швидкістю, нижчою за швидкість Найквіста, і отриманого в результаті (меншого набору) відліків буде достатньо для реконструкції вихідного сигналу [40]. Це досягається обчислювально ефективним способом і шляхом знаходження розв'язку для недостатньо визначених лінійних систем. Більше того, в компресійному зондуванні як дискретизація, так і стиснення здійснюються одночасно. Коротко кажучи, частота дискретизації в компресійному зондуванні залежить від розрідженості та некогерентності сигналу, що дискретизується, і не залежить від ширини смуги сигналу [14]. Ця властивість компресійного зондування відкриває двері для його застосування в мережах 6G. Загалом, компресійне зондування пропонується використовувати для зменшення даних, що генеруються пристроями IoT для mMTC [41]. Іншим запропонованим використанням стискаючого зондування є увімкнення NOMA на передавачі в ландшафті сценарію mMTC [42]. Це здійснюється шляхом присвоєння пристроям неортогональних кодів розповсюдження і застосування багатокористувацьких методів виявлення на основі компресійного зондування, оскільки дуже малий відсоток від загальної кількості пристроїв є активними в будь-який момент часу. Перевагою цієї схеми є відсутність накладних витрат на передачу керуючих сигналів. Ще одним застосуванням стисненого зондування разом з методами глибокого навчання є подолання проблем, пов'язаних з очікуваним інтенсивним використанням LIS в мережах наступного покоління [43].

Управління мережею та послугами "без дотику" (ZSM) - це концепція, що розвивається і має на меті забезпечити основу для побудови повністю автоматизованого управління мережею, в першу чергу, завдяки ініціативі ETSI. Ідея ZSM полягає в розширенні можливостей мереж, щоб вони могли здійснювати самоконфігурацію для автономного налаштування без необхідності явного втручання людини, самооптимізацію для кращої адаптації відповідно до ситуації, що склалася, самовідновлення для забезпечення правильного функціонування, саомоніторинг для відстеження функціонування та самомасштабування для динамічного залучення або відключення ресурсів відповідно до потреб [43]. Щоб підкреслити важливість концепції ZSM, ETSI в [44] визначає перелік сценаріїв, які згруповані в сім різних широких категорій, як показано нижче:

Категорія наскрізного управління мережею і послугами стосується автоматизації операційних і функціональних завдань, пов'язаних з управлінням наскрізним життєвим циклом різних типів мережевих ресурсів і послуг, які є частиною основної мережі, транспортної мережі і мережі радіодоступу. Мережа як послуга (Network-as-a-Service, NaaS) - це вимога надання доступу до деяких сервісних можливостей з усіх частин мережі для забезпечення автоматизації "нульового дотику". Сценарії аналітики і ML підкреслюють необхідність інтеграції можливостей ML і AI для реалізації ZSM. Категорія спільного управління послугами підкреслює необхідність спільного управління, що охоплює домени декількох операторів. Безпека підкреслює потребу в надійних механізмах безпеки та конфіденційності для системи ZSM. Сценарій тестування вказує на необхідність автоматизованого тестування ресурсів та послуг. Сценарій трасування обумовлений потребами в автоматизованому пошуку та усуненні несправностей та аналізі першопричин.

У цьому напрямку пропонується фреймворк, названий саморозвиваючимися мережами (SEN) [45], який спрямований на автоматизацію управління мережею з ефективним використанням ресурсів,

координацією та управлінням конфліктами, притаманною безпекою та довірою, зниженням вартості та високою якістю досвіду.

Майбутні бездротові мережі 6G будуть гетерогенними з функціями багатокористувацької, багатооператорської та мульти(мікро)послуг. Для того, щоб такі мережі працювали якнайкраще і з найменшими витратами, вони повинні бути повністю автоматизовані. Таким чином, ZSM набуває особливого значення в 6G. Використання можливостей AI/ML в рамках ZSM дійсно може додати багато нових можливостей (як згадувалося вище) і закласти основу для автономних мереж зі штучним інтелектом.

Однак безпека залишається великим питанням. Це пов'язано з тим, що методи ВК вразливі до таких атак, як отруєння або ухилення від сплати [46].

Тут використання блокчейну як загального каналу зв'язку може зробити необхідне. Крім того, ще однією проблемою при використанні ZSM є забезпечення автоматичного оновлення сервісів без впливу на інтероперабельність сервісів, а також на досвід кінцевих користувачів [46].

Збір енергії є найбільш затребуваною сферою досліджень, коли мова йде про майбутній сталий спосіб забезпечення енергією зростаючої кількості підключених пристроїв. Метою збору енергії є заміна традиційних способів живлення пристроїв і датчиків шляхом використання енергії з навколишнього середовища.

Існує два великі класи джерел для збору енергії: природні джерела та джерела, створені людиною [47]. Природні джерела включають поновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія, механічні коливання, вітер, тепла енергія, мікробні паливні елементи та енергія людської діяльності [47]. Збирання енергії, виробленої людиною, відбувається за допомогою бездротової передачі енергії (WET), де спеціальний радіомаяк використовується для передачі енергії від джерела до місця призначення [47]. Оскільки природні джерела збору енергії страждають від непередбачуваності і періодичності, вони не можуть запропонувати гарантовану якість послуг; таким чином, WET є гарячою дослідницькою областю [48].

З огляду на бачення універсальної системи зв'язку та забезпечення надійної основи для ІоЕ, майбутні мережі 6G будуть поширюватися з великою кількістю підключених пристроїв. Традиційний спосіб живлення цих пристроїв за допомогою акумуляторних або змінних батарей може виявитися неефективним в епоху 6G. Це пов'язано з тим, що такі рішення, як правило, дорогі, незручні, ризиковані та мають несприятливі наслідки, коли пристрої працюють всередині тіла [48]. Таким чином, технології збору енергії розглядаються як ефективне альтернативне рішення для мобільних мереж наступного покоління [47]. У цьому контексті значний інтерес викликає ідея про те, що радіосигнали можуть одночасно передавати як енергію, так і інформацію [49]. Це називається збором радіочастотної енергії (RF-EH) [50]. Тим не менш, для прагматичного використання таких технологій і отримання максимальної вигоди, проблема полягає в ефективній інтеграції бездротової передачі інформації та бездротової передачі енергії, за умови, що їхні апаратні та експлуатаційні вимоги відрізняються [47]. Іншими відкритими питаннями є висока мобільність, багатокористувацьке планування енергії та інформації, розподіл ресурсів та управління перешкодами, питання охорони здоров'я та безпеки [48, 50].

### 3.7 Висновки до розділу 3

Методи ІІІ та FL дозволяють розробляти інтелектуальні механізми для майбутніх мереж 6G, використовуючи величезні обсяги мобільних даних і все більші обчислювальні ресурси, доступні на межі мережі. Пристрої, що беруть участь у FL, локально навчають моделі ML (що використовуються), використовуючи свої вбудовані ресурси. Таким чином, цим пристроям не доведеться ділитися вихідними даними, які можуть бути приватними і вразливими до атак на безпеку. Таким чином, спільним доступом буде лише оновлена модель на централізованих серверах, що зробить навчання федеративним. Тим не менш, для ефективного впровадження ІІІ найпершою

проблемою є наявність високоякісних навчальних наборів даних. Іншим викликом є включення ШІ в мережі 5G і майбутні мережі 6G [16]. Крім того, слід додатково вивчити вузькі місця ШІ, спричинені бездротовими мережами 6G з багатьма новими передовими технологіями, неоднорідністю пристроїв і появою нових інтелектуальних додатків. Що стосується FL, то пристрої потрібно стимулювати до участі в процесі навчання, а також якомога раніше виявляти "ручні" пристрої. Крім того, необхідно вирішити такі проблеми, як витік конфіденційності через оновлення моделей і неоднорідність апаратного забезпечення [42].

Блокчейн, як один з основних типів DLT, виявився дуже перспективною технологією для забезпечення безпеки завдяки вбудованому в нього потужному механізму захисту. З одного боку, вона може покращити технічні аспекти 6G, такі як динамічний розподіл спектру, управління ресурсами, управління мобільністю, а з іншого - уможливити непередбачувані додатки, такі як голографічна телеприсутність, XR, повністю підключений автономний транспортний засіб, Індустрія 5.0 та багато іншого. Проте, щоб найкращим чином використовувати блокчейн для вирішення завдань 6G, необхідно зменшити обчислювальні накладні витрати, полегшені алгоритми розподілу, високу пропускну здатність транзакцій, квантову стійкість і масштабованість сховищ даних.

Квантовий зв'язок - це дуже перспективне застосування принципів квантової фізики у світі комунікацій. Деякі з методів, що надаються квантовим зв'язком, включають квантову телепортацію, квантову мережу, QKD, QSDC і QSS. Різні майбутні застосування квантового зв'язку - це квантові оптичні двійники, голографічна телеприсутність, тактильний Інтернет, інтерфейс "мозок-комп'ютер" та інтелектуальний зв'язок на великі відстані.

## 4 АРХІТЕКТУРНІ НАПРЯМКИ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ 6G

Передбачається, що архітектура мобільних мереж 6G зазнає значної еволюції порівняно з 5G, щоб забезпечити гнучку інфраструктуру, необхідну для майбутніх технологій і додатків. Для цього необхідно зрозуміти еволюцію архітектури мобільних мереж у напрямку до 6G. Описати, як 6G перетворюється на інтелектуальну та енергоефективну мережу.

### 4.1 Розвиток мережевої архітектури

Мобільні мережі епохи 0G-4G надавали універсальні мережеві рішення для мобільних додатків. Таким чином, мережі 0G-4G склалися з фіксованої і негнучкої мережевої архітектури. Однак з розвитком мобільних додатків, які вимагали швидшого, надійнішого зв'язку в режимі реального часу, універсальних мережевих рішень стало недостатньо. У відповідь на це, з появою 5G, архітектура мобільних мереж стала динамічною та гнучкою завдяки програмному забезпеченню мережі [7]. Таким чином, мережі 5G змогли забезпечити індивідуальні мережеві та обчислювальні рішення для різноманітних мобільних додатків завдяки розширеній мобільній смузі частот (eMBB), наднадійному зв'язку з низькою затримкою (uRLLC) та масовому зв'язку машинного типу (mMTC).

Еволюція звичайних мобільних мереж до "м'яких" мереж відбувається завдяки віртуалізації та хмарним технологіям, міграції послуг, оркестровці мереж і сервісів та автоматизації мережевих послуг [21].

Віртуалізація мережі забезпечується за допомогою програмно-визначених мереж (SDN), віртуалізації мережевих функцій (NFV) і хмарних обчислень [22]. SDN розділяє площину управління та площину даних мереж. Тому мережева інфраструктура може бути абстрагована, запрограмована і керована за допомогою м'яких мережевих функцій [23]. Таким чином, NFV відокремлює м'які мережеві функції від пропрієтарного мережевого обладнання, щоб

запускати мережеві функції як програмні екземпляри у віртуальних машинах [24]. Ці віртуальні машини, що обслуговують мережеві елементи та мережеві функції, можуть бути розміщені в хмарі за допомогою мережевої хмарності [25]. Крім того, мережеві функції організуються для синхронізації мережевих операцій E2E для забезпечення безперебійної роботи мобільних мереж. Крім того, мережеві операції та послуги автоматизуються за допомогою таких технологій, як периферійні обчислення з множинним доступом (MEC) і мережеве розщеплення [21]. MEC здатна розширити хмарні обчислення до межі мережі радіодоступу (RAN), щоб забезпечити доступ до ресурсів радіомережі в режимі реального часу [26]. Мережеве розшарування налаштовує мережеві функції для виділення наскрізних логічних мереж, визначених як мережеві зрізи, щоб полегшити різноманітні мережеві вимоги додатків 5G.

Однак нові додатки, такі як "розумні будинки", "розумні міста", підключені автономні транспортні засоби, передові системи охорони здоров'я, Індустрія 5.0, глибоководні та космічні комунікаційні додатки вимагають від мобільних мереж кращого зв'язку та інтелектуальних можливостей, що виходять за рамки можливостей, передбачених мережами 5G [25].

Це вимагає, щоб архітектура мобільних мереж 5G/6G еволюціонувала за межі "софтверізації" мережі, зокрема, в напрямку підтримки додатків на основі штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання (МН) і глибокого навчання (DL). Отже, архітектура 6G повинна наївно підтримувати ШІ, ML і DL, щоб уможливити мережеву інтелектуальну лігенізацію. Це дозволить мобільним мережам 6G бути більш потужними, гнучкими та ефективними, одночасно вивчаючи динаміку мережі та вимоги користувачів [16].

Враховуючи ці вимоги, кілька дослідницьких робіт запропонували своє бачення та пропозиції щодо формування архітектури для мереж 6G.

## 4.2 Інтелектуальна мережа з підмереж

Мережева архітектура, запропонована Летайфом та ін. [16], передбачає, що мережі 6G стануть більш інтелектуальними, водночас дозволяючи мережам бути ефективними та гнучкими завдяки вивченню характеристик і динаміки мережі та користувачів. Відповідно, 6G також буде розвиватися як мережа підмереж, яка буде більш гнучкою, ефективною, масштабованою і модернізованою, спираючись на можливості ШІ. Крім того, розділення алгоритму і апаратного забезпечення дозволяє гетерогенним пристроям в мережах підтримувати динамічну модернізацію.

Ці підмережі можуть оновлюватися як окремі комірки, так і сусідні комірки. Це полегшить підтримку нових технологічних розробок і протоколів в підмережах з мінімальним тестуванням. Таким чином, в кінцевому підсумку, вся мережа буде модернізована з мінімальними зусиллями, на відміну від налаштування всієї мережі відразу, що не тільки забирає багато часу, але й коштує дорого.

Однак, еволюція існуючих мереж до інтелектуальної мережі підмереж вимагає подолання кількох викликів. Три з них коротко описані нижче. Підмережі необхідні для збору даних про динамічне бездротове середовище і вимоги користувачів. Ці дані можуть бути проаналізовані за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання для забезпечення ефективної роботи мережі та її безперешкодної модернізації. Керуйте будь-якими змінами протоколів у підмережах за допомогою ігрових методів та методів навчання, щоб забезпечити координацію між вузлами. Кожне оновлення в підмережах повинно оцінюватися на рівні управління. Це можна зробити за допомогою ШІ/МН, враховуючи стан мережі та вимоги користувачів.

Крім того, швидкий розвиток апаратного забезпечення 6G, такого як радіомережі та інша інфраструктура, вимагатиме архітектури з розділенням алгоритмів і апаратного забезпечення. Наприклад, в мережах 0G-5G алгоритми зв'язку і трансиверів розробляються спільно. Тому апаратні можливості, такі як



кількість антен, частота дискретизації аналого-цифрових перетворювачів і обчислювальні можливості декодера, залишаються фіксованими. Однак у 6G трансивери можна автоматично конфігурувати, оцінюючи їхні апаратні можливості, що дає змогу модернізувати апаратні можливості базових станцій 6G і мобільних пристроїв. Цьому може сприяти наявність операційної системи, яка працює між мережевим обладнанням і алгоритмами трансивера. Операційна система вимірюватиме параметри мережі, оцінюватиме можливості обладнання та налаштовуватиме алгоритм роботи трансивера. Таким чином, цей тип фреймворку можна визначити як "інтелектуальне радіо", яке розвивається на архітектурі, де алгоритми та апаратне забезпечення відокремлені. Ця архітектура також підтримує протоколи вище мережевого рівня для підтримки послуг і додатків на основі Ш/МН для аналізу вузьких місць в мережі, спричинених апаратними компонентами. Цей тип аналізу може допомогти виробникам апаратного забезпечення виробляти більш ефективні та економічно вигідні мережеві пристрої, скорочуючи час їх виходу на ринок. На рис. 4.1 показано огляд архітектурних змін 6G, запропонованих у цій концепції.

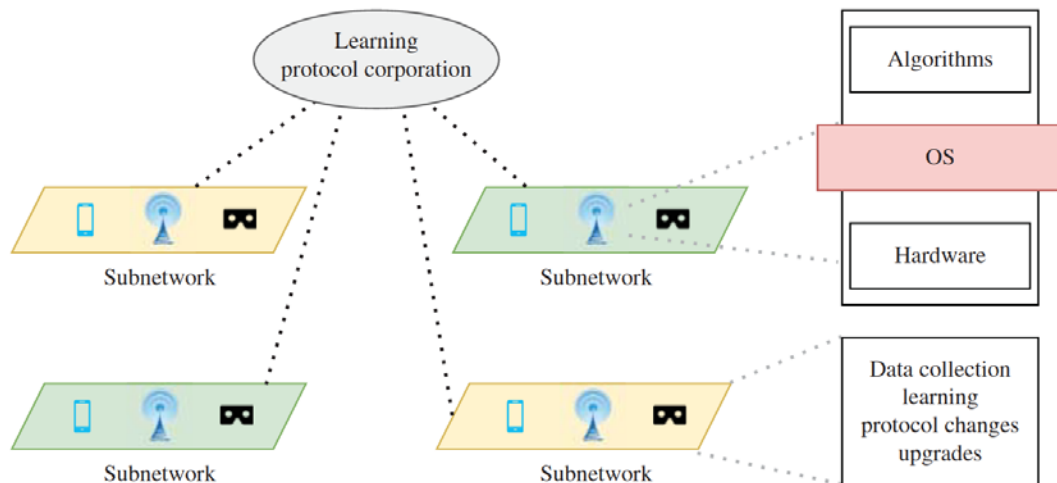


Рисунок 4.1 – Оптимізація архітектури мережі 6G

Відповідно, еволюція інтелектуальних підмереж та інтелектуального радіо в наступних поколіннях 5G і 6G сприятиме розробці нових протоколів і

технологій, що враховують динамічні умови мережі і вимоги мережі/користувача.

### 4.3 Екологічно чиста інтелектуальна мережа

Очікується, що мережі 6G будуть більш "зеленими", тобто більш енергоефективними, при цьому задовольняючи екстремальні вимоги до зв'язку, які очікуються від майбутніх мереж зв'язку. Однак це вимагає розвитку мережевої архітектури в декількох напрямках [27]. Очікується, що мережі 6G перейдуть від наземних мереж до забезпечення тривимірного мережевого покриття. Крім того, застарілі мобільні мережі не здатні сприяти розвитку нових комунікаційних додатків, починаючи від глибоководного зв'язку і закінчуючи космічним зв'язком. Передбачається, що 6G об'єднає кілька неземних мереж в одну повсюдну мережу 3D-покриття. Одним з таких перспективних видів неземного зв'язку є космічні мережі. Вони складаються з високопродуктивних супутників, які здатні забезпечити зв'язок, подібний до наземних мереж. Значні затримки, спричинені супутниками на геостаціонарній орбіті (GEO), можна звести до мінімуму, використовуючи супутники на негеостаціонарній орбіті (NGSO), які можуть бути інтегровані з наземними мережами, сприяючи створенню космічних магістральних мереж, міжсупутникових каналів зв'язку і мереж космічного доступу для забезпечення глобального покриття з низькою затримкою і високою швидкістю передачі даних. Деякі з систем NGSO, які, як очікується, будуть комерціалізовані, включають Starlink, OneWeb і Hongyan. Крім того, повітряні мережі, що складаються з висотних платформ (HAP) і низьковольтних платформ (LRF), забезпечать гнучкі ретрансляційні послуги для мереж 6G. HAP забезпечать більш широке покриття.

З іншого боку, LRF, що складаються з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), забезпечать більш гнучку комунікаційну інфраструктуру для зв'язку на короткі відстані з високою швидкістю передачі даних і низькою затримкою.

БПЛА також уможливають зв'язок у надзвичайних ситуаціях. Однак використання БПЛА вимагає енергоефективних заходів, таких як оптимізація траєкторії і розвантаження обчислювальних ресурсів. Крім того, підводні мережі в майбутній інфраструктурі 6G використовуватимуть радіочастотні, оптичні та акустичні канали.

Інтелектуальні мережі на основі ШІ та ML, що самоконфігуруються, самосвідомі та самопідтримувані енергоефективні мережі, також потребують можливостей ШІ та ML у мережевій структурі. Одним з ключових факторів розвитку інтелектуальних мереж є периферійний інтелект, який використовує обчислювальні ресурси високопродуктивного апаратного забезпечення в навколишньому середовищі. На відміну від централізованих хмарних ресурсів, периферійний інтелект забезпечує доступ в режимі реального часу до потужних обчислювальних ресурсів для критично важливих додатків, таких як автономне водіння. Таким чином, мережевий інтелект буде забезпечуватися через децентралізовані ресурси, що призведе до розподіленого штучного інтелекту для обчислень, зв'язку, кешування та управління мережами 6G.

Також очікується розробка нового стеку мережевих протоколів, який підтримуватиме такі функції, як гнучка архітектура пакетів і можливості міжрівневого зв'язку.

Крім того, архітектура мережі 6G повинна підтримувати такі технології, як ТГц-зв'язок зі швидкістю передачі даних Тбіт/с з передовими технологіями формування променя, енергоефективні схеми модуляції та енергоефективні алгоритми кодування каналів. Крім того, архітектура повинна підтримувати технологічні розробки, такі як зв'язок на основі видимого світла (VLC), молекулярний зв'язок, технології блокчейн, а також інтелектуальний збір та управління енергією.

Архітектура, запропонована в рамках цієї роботи, представлена на рисунку 5.2 [27].

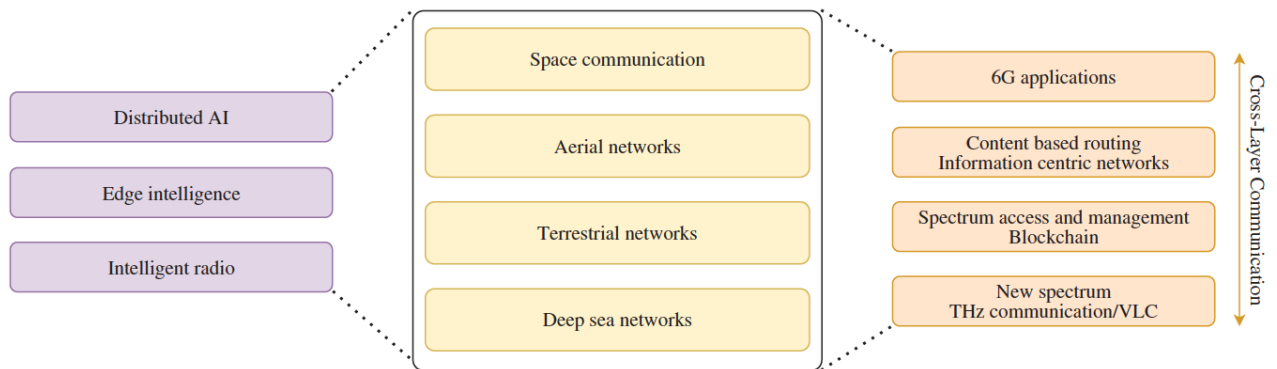


Рисунок 4.2 - Розвиток екологічних інтелектуальних мереж

#### 4.4 Мережева архітектура на базі кібернетичного зв'язку

Передбачається, що мережі 6G будуть використовувати мережеву архітектуру на основі кібернетичного зв'язку для кращого використання спектру, енергоефективності та покращення користувацького досвіду. Мережева архітектура на основі кіберпростору пропонує модель на основі кіберпростору з хмаро орієнтованим Інтернетом і новою архітектурою мережі радіодоступу [28].

Кібервік - це цифрове представлення людини або об'єкта, до якого можна отримати доступ через мережу. Кібервін надає функції комунікаційного асистента, реєстратора мережевої поведінки та цифрових активів для покращення функціональності мережевої архітектури. Функція асистента зв'язку отримує необхідні послуги від мережі, в той час як функція реєстратора мережевої поведінки отримує і реєструє дані для користувачів. Крім того, функціонал цифрових активів вилучає особисту інформацію з даних користувачів для створення цифрових активів.

Комунікаційна модель на основі кібердруку може бути розроблена на основі хмаро орієнтованої архітектури. Хмарна архітектура спирається на два компоненти мережевої архітектури, а саме: ядро хмари і периферійну хмару, як

показано на рисунку 4.3. Ядро хмари забезпечує обчислення, кешування та комунікаційні послуги. З іншого боку, периферійна хмара, яка знаходиться між мережею доступу і основною хмарою, задовольняє запити з низькою затримкою і високою надійністю. Хмарний оператор може керувати мережею за допомогою хмарної мережевої операційної системи. Постачальники прикладних послуг можуть розгорнути свої сервіси поверх послуг, що надаються хмарними операторами.

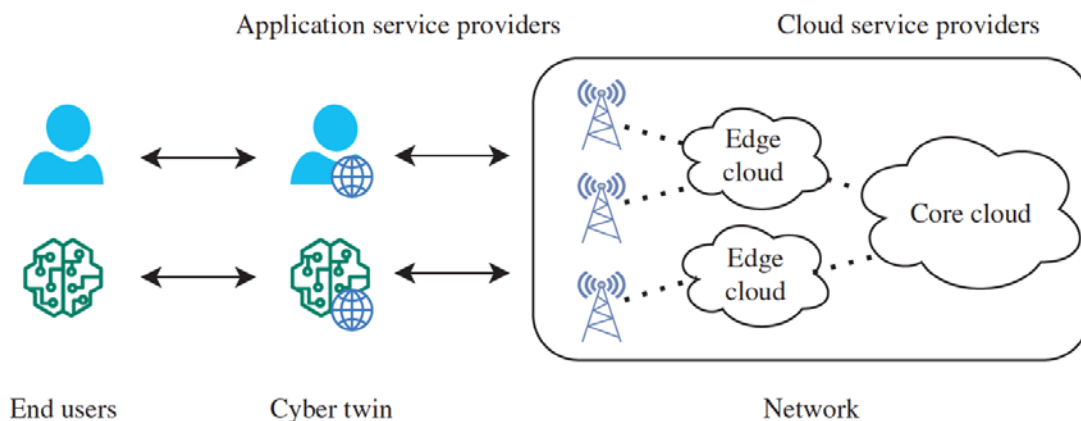


Рисунок 4.3 – Схема оптимізації хмаро орієнтованої мережевої архітектури

Крім того, мережеві функції з підтримкою кібердруку будуть використовуватися для надання послуг зв'язку і безпеки в мережах 6G - архітектура повністю розділеної мережі радіодоступу (Fully Decoupled Radio Access Network, FD-RAN). Ця архітектура фізично розділяє площину управління і площину користувача мережі для ефективного управління мережевими ресурсами. Крім того, висхідна і низхідна лінії зв'язку будуть фізично розділені для підвищення ефективності використання спектру та енергії. Крім того, завдяки централізованому управлінню ресурсами і скоординованій багатоточковій мережі можна оптимізувати використання спектру, енергоспоживання і використання хмарних ресурсів в мережах 6G.

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Досліджена архітектура мобільних мереж 6G зазнає значної еволюції порівняно з попередніми поколіннями (наприклад, 5G), для того щоб забезпечити гнучку інфраструктуру, відповідну майбутнім технологіям і додаткам. Ключові аспекти, які можуть визначати архітектуру мереж 6G.

Архітектура 6G повинна бути гнучкою і легко масштабовуватися для підтримки різноманітних вимог і нових варіантів зв'язку. 6G повинна забезпечувати велику пропускну здатність і низьку затримку для підтримки передових застосувань, таких як віртуальна та доповнена реальність, голографія, високоякісний стрімінг тощо. Архітектура мережі повинна бути інтелектуальною, використовуючи штучний інтелект для оптимізації управління мережею, прогнозування вимог та реагування на зміни в реальному часі.

Врахування енергоефективності стане важливим аспектом, оскільки мережі 6G повинні демонструвати сталий розвиток при зменшенні впливу на навколишнє середовище. Архітектура повинна бути готовою до обробки великої кількості даних від різних сенсорів та пристроїв для підтримки розширеної реальності (XR). Використання сегментації та віртуалізації ресурсів дозволить ефективно використовувати інфраструктуру та гнучке розгортання послуг.

Врахування роботи в нових частотних діапазонах, таких як терагерцовий спектр, для забезпечення більшої пропускну здатності та швидкості зв'язку. Збільшення заходів безпеки та захисту приватності для забезпечення надійності мережі перед передовими загрозами.

Архітектура 6G повинна бути здатною коіснувати з попередніми технологіями, такими як 5G, LTE та Wi-Fi, забезпечуючи плавний перехід. Мережі 6G мають взаємодіяти з іншими системами, такими як блокчейн, квантові обчислення та інші нові технології.

Розглянуті аспекти спільно спрямовані на створення інтелектуальних, гнучких та ефективних мереж 6G, які можуть відповідати потребам майбутніх інновацій та викликів.

## 5 МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ 6G

У розділі розглянемо три ключові концепції мереж радіодоступу 6G, включаючи повітряну мережу радіодоступу (ARAN), мережу радіодоступу з підтримкою штучного інтелекту (AI-RAN) і відкриту мережу радіодоступу (O-RAN). Зокрема основні вимоги до проектування RAN в майбутніх бездротових системах 6G. Дослідити ключові особливості та застосування трьох концепцій 6G RAN: ARAN, AI-RAN та O-RAN. Виконаємо прогнозування мережевого трафіку.

### 5.1 Основні аспекти та вимоги

RAN є важливою частиною будь-якої бездротової системи зв'язку, яка з'єднує кінцевих користувачів з іншими компонентами мережі за допомогою каналів радіозв'язку. Мережі RAN еволюціонували через кілька поколінь мереж: Удосконалена система мобільного зв'язку (AMPS) в 1G, Глобальна система мобільного зв'язку (GSM) в 2G, Універсальна служба мобільного зв'язку (UMTS)/Міжнародний мобільний зв'язок-2000 (IMT-2000) в 3G, LTE/Всесвітня інтероперабельність для мікрохвильового доступу (WiMAX) в 4G і Нове радіо (NR) в 5G [1]. Тепер, завдяки масовому підключенню до Інтернету речей (IoT), різноманітним вимогам до якості обслуговування (QoS) і численним варіантам використання, очікується, що радіорелейні мережі 6G підтримуватимуть гнучкість, масовість взаємозв'язку та енергоефективність: Гнучкість дозволяє 6G RAN реконфігурувати різні мережеві функції, послуги та ресурси для задоволення потреб користувачів 6G з різними вимогами до якості обслуговування, затримок, надійності та щільності мережі.

Масштабна взаємопов'язаність дозволяє 6G RAN підтримувати передачу та обмін даними між дуже великою кількістю пристроїв Інтернету речей, відповідаючи при цьому ключовим вимогам, таким як спектральна ефективність, щільність мережі та енергоефективність. Енергоефективність



сприяє більш ефективному використанню енергії в мережі 6G і збільшує час роботи пристроїв з обмеженим ресурсом акумулятора (наприклад, мініатюрних пристроїв Інтернету речей, датчиків, повітряних компонентів і автономних транспортних засобів), забезпечуючи таким чином економічно ефективну і стабільну роботу.

Для забезпечення гнучкості 6G RAN необхідно врахувати кілька аспектів, включаючи структуру рамки, розмір комірки, пропускну здатність, віртуалізацію і "софтверізацію" мережі, а також управління ресурсами. Структура кадру: Ортогональне мультиплексування з частотним поділом на основі циклічних префіксів (CP-OFDM) було досліджено в 5G NR для підтримки різних сценаріїв і вимог [27]. Зокрема, LTE використовує CP-OFDM лише для низхідної лінії зв'язку і має лише одну нумерацію (тобто відстань між піднесучими 15 кГц). У 5G NR інтервал між піднесучими задається  $15 \times 2n$ , де  $n = \{0, \dots, 5\}$  - параметр нумерології. Застосування форми сигналу CP-OFDM і нумерології, поряд з іншими технологіями фізичного рівня, дозволяє гнучким RAN для 6G відповідати більш жорстким вимогам. Тому очікується, що масштабований OFDM закладе основу для проектування фізичного рівня 6G і гнучкості мереж 6G RAN. Розмір комірки: гнучкість 6G RAN може бути досягнута за рахунок розміру комірки шляхом розгортання макрокомірок, малих комірок, крихітних комірок в терагерцових (THz) комунікаціях і повітряних базових станціях (наприклад, БПЛА, HAP і супутники). Наприклад, динамічність реалізації топології низьковисотної платформи (LAP)/висотної платформи (HAP) і мережеве накладання між системами зв'язку LAP, HAP і низької навколоземної орбіти (LEO) допомагають 6G ARAN гнучко адаптуватися до різноманітних вимог наземних і повітряних користувачів. Крім того, як ключовий фактор, що сприяє розвитку 6G там, де немає кордонів між стільниками, мережі без стільників допомагають ще більше підвищити гнучкість радіорелейного зв'язку в 6G. Смуга пропускання: розподіл смуги пропускання відіграє важливу роль у досягненні гнучкості RAN. Наприклад, перевантажена комірка може запозичити ресурси пропускну здатності у

сусідніх недовантажених комірок, щоб збільшити свою пропускну здатність для обслуговування великої кількості користувачів. Необхідність ефективного розподілу пропускну здатності ще більше зростає, коли в 6G використовується кілька частотних діапазонів, таких як до 6 ГГц, міліметрові хвилі (mmWave), ТГц і видимий спектр. Наприклад, зв'язок у видимому діапазоні (VLC), також відомий як Li-Fi, може бути використаний для підтримки як сценаріїв зв'язку всередині приміщень, так і для позиціонування користувача [28]. Більш того, інтеграція БПЛА і VLC обіцяє забезпечити зв'язок і освітлення одночасно і ще більше підвищити продуктивність і гнучкість мережі [29].

Віртуалізація та софтверізація мережі: Передбачається, що віртуалізація мережі та софтверізація є невід'ємними компонентами для підвищення гнучкості 6G RAN. Віртуалізація мережі була прийнята в 5G, щоб дозволити різним мережам з десятками орендарями співіснувати в єдиній мережевій інфраструктурі. Автори в [30] пропонують архітектуру віртуалізації на основі цифрових двійників для гнучкого управління мережею. Зокрема, фреймворк складається з шести рівнів, включаючи збір даних, абстракцію-1, локальну обробку, абстракцію-2, обробку на рівні зрізу та управління цифровою двійниковою моделлю. Рівень 1 відповідає за збір даних від фізичних осіб, а рівень 2 об'єднує дані з різних джерел і створює цифрові двійники для окремих користувачів. Далі вихідні дані обробляються та агрегуються на прикордонній мережі на рівні 3. Після цього агреговані дані передаються на рівень 4 для оновлення цифрових двійників зрізів, які потім обробляються на рівні 5 для створення прогнозів для конкретних послуг і управління рішеннями на рівні зрізів. Нарешті, цифрові моделі-близнюки оновлюються на основі доступності ресурсів, управління мережею, а також надання послуг і попиту на них. Завдяки цій архітектурі 6G RAN можуть поєднувати переваги мережевого розгалуження і цифрових двійників, щоб забезпечити надання послуг і створити мережу, орієнтовану на користувача. Крім того, штучний інтелект (ШІ) є перспективним інструментом для оптимізації управління ресурсами і підвищення продуктивності у віртуальних і програмно керованих мережах 6G. Управління

ресурсами: Гнучкість 6G RAN може бути реалізована за допомогою ефективного управління мережевими ресурсами. Дійсно, управління ресурсами відіграє життєво важливу роль у всіх нових поколіннях мереж, від 4G до 5G і 6G, щоб мережа могла адаптуватися до навантаження трафіку, вимог QoS і стану каналу. Крім того, управління ресурсами стає більш важливим для 6G RAN через співіснування багатьох ресурсів у майбутніх мережевих системах, включаючи радіо, обчислення, кешування, управління, зондування. Наприклад, різні методи ШІ (наприклад, машинне навчання, глибоке навчання, федеративне навчання і навчання з підкріпленням) можуть бути використані для вирішення проблем оптимізації, пов'язаних з обчисленнями і управлінням ресурсами в периферійних обчислювальних системах, управлінням мобільністю і хендовер в надщільних мережах 6G і управлінням спектром в гетерогенних мережах [40].

Необхідність забезпечення взаємозв'язку між кінцевими пристроями в мережах 6G обумовлена появою багатьох нових послуг, додатків і ряду підключених пристроїв, кількість яких експоненціально зростає. Очікується, що до 2024 року кількість підключених пристроїв становитиме 27 мільярдів, а щільність зв'язку - 10 мільйонів пристроїв на квадратний кілометр [21]. Різноманітність додатків Інтернету речей також розшириться від простих рішень для розумного будинку до більш просунутих додатків, таких як критично важливі, розумні системи охорони здоров'я, повністю автономне водіння і мета-версії. Ці сценарії застосування вимагають різних вимог до продуктивності, таких як низька затримка, наднадійність, висока безпека і висока швидкість передачі даних [22]. Для проектування 6G RAN для майбутнього IoT можна виділити кілька перспективних технологій, таких як периферійний інтелект, реконфігуровані інтелектуальні поверхні, мережі повітряного доступу (AAN), ТГц-зв'язок, масовий наднадійний зв'язок з низькою затримкою (uRLLC) і блокчейн. Наприклад, для інтелектуальних додатків IoT, федеративне навчання може бути використане для поліпшення конфіденційності даних пристроїв IoT. Приклад федеративного навчання для

розумної охорони здоров'я показаний на рисунку 5.1, де будинки інтегрують навчену глобальну модель зі своїми локальними медичними даними, щоб мати різні персоналізовані моделі.

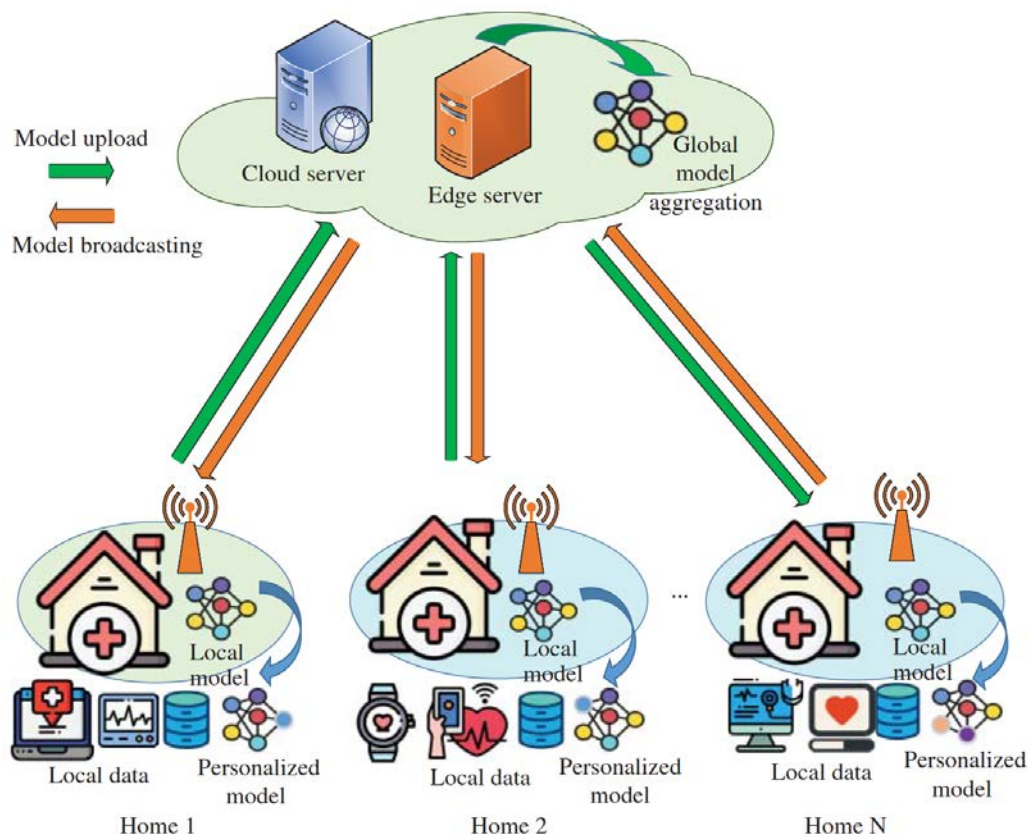


Рисунок 5.1 – Оптимізація інтелектуальної мережі IoT з периферійним навчанням

Через величезну кількість пристроїв Інтернету речей і поширення мобільних даних енергоефективність стала важливим показником для проектування і розвитку мереж 5G, а також майбутніх бездротових систем 6G. Очікується, що порівняно з мережами 5G, 6G підвищить енергоефективність щонайменше в 10 разів [6], і в той же час у кілька разів перевищить 5G за піковою швидкістю передачі даних, середньостатистичною швидкістю передачі даних, пропускною здатністю трафіку, щільністю з'єднання, затримкою, ефективністю використання спектра і мобільністю. Енергоефективність ще більше підкреслюється, коли очікується, що 6G буде надавати різні послуги зв'язку, обчислень, кешування, управління і зондування. Наприклад,

користувачі мобільного зв'язку та Інтернету речей в мережах 4G зазвичай користуються лише послугами зв'язку, тоді як користувачі мереж 5G і 6G мають багато нових додатків, наприклад, віртуальну реальність (VR), доповнену реальність (AR), автономні транспортні засоби та мобільний блокчейн, що значно збільшує споживання енергії та потужності. Більше того, енергоефективність є ключовим показником для нових мережевих сценаріїв, таких як AAN, Інтернет біо-нано-речей (IoBNT) та Інтернет нано-речей (IoNT). Зокрема, повітряні компоненти, наприклад, БПЛА і літаки, споживають велику кількість енергії для зависання в повітрі, і ця кількість може бути в багато разів більшою, ніж для комунікаційних і обчислювальних цілей. У зв'язку з цим, поповнення запасів енергії є першочерговим питанням для досягнення стійких рішень для AAN. Як показано на рис. 5.2, повітряні компоненти можуть збирати енергію на зарядних станціях і самозаряджатися завдяки використанню технологій збору енергії і бездротової зарядки.

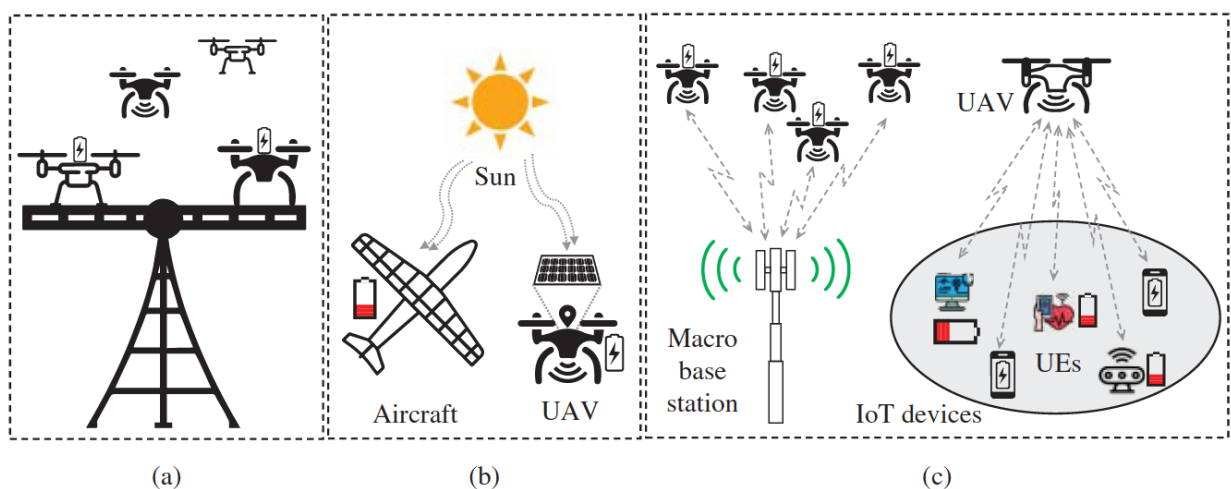


Рисунок 5.2 – Схеми відновлення енергії в мережах повітряного доступу

Незважаючи на те, що було проведено багато досліджень для підвищення енергоефективності мереж 4G і 5G, розробка енергоефективних мереж 6G все ще залишається складним завданням через появу нових послуг, розгортання мереж, а також масового підключення і доступності даних.

## 5.2 Мережі ефірного радіодоступу

У контексті комплексної інфраструктури доступу 6G, ARAN розміщуються на рівні повітряного зв'язку для обслуговування висотних і наземних користувачів.

Як показано на рисунку 5.3, ARAN охоплює три системи, включаючи зв'язок LAP на висоті 0-10 км, зв'язок HAP на висоті 20-50 км і зв'язок LEO на висоті 500-1500 км над відносним рівнем моря [22]. Порівняно з наземними, підземними і водними RAN, ARAN обслуговують великий простір покриття з високодинамічними і мобільними користувачами для розваг у польоті, повітряного спостереження, управління літаючими транспортними засобами та ізольованими групами населення.

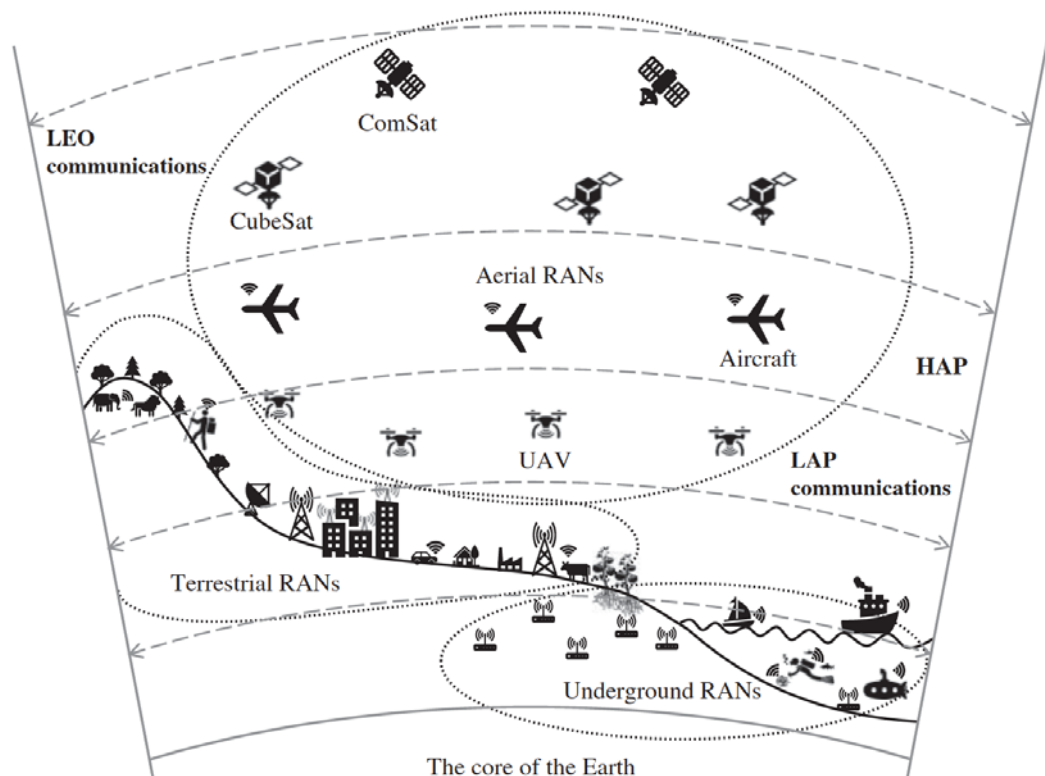


Рисунок 5.3 – Топологія безпроводної літаючої мережі доступу 6G

Огляд літератури показує кілька класів повітряного зв'язку, які тісно пов'язані з ARAN. Деякі терміни, подібні до повітряного зв'язку, що підтримують мобільні мережі, можна узагальнити наступним чином: Дрон/БПЛА РАН (DA-RAN): DA-RAN означає RAN за допомогою дронів/БПЛА, де дрони допомагають розширити зону покриття і пропускну здатність наземної інфраструктури доступу. У цьому контексті дрони можуть підключатися або безпосередньо до наземних базових станцій, або через головний вузол у (багатохопових) комірчастих, зіркоподібних, деревоподібних і ланцюгових топологіях. Неліцензований/ліцензований спектр може використовуватися дронами в DA-RAN [23]. Мережі радіодоступу, що літають (FlyRAN): FlyRAN розшифровується як FlyRAN, де літаки і дирижаблі, обладнані радіопередавачами, використовуються як повітряні базові станції для надання мобільних послуг в районах з недостатнім рівнем обслуговування. У FlyRAN рівень LAR використовує неліцензований/ліцензований спектр, тоді як рівень HAR зазвичай використовує ліцензований спектр, щоб уникнути некерованих конфліктів з наземними системами [24]. Термін "літаюча спеціальна мережа (FANET)" охоплюється цим визначенням [25]. Супутниково-земні інтегровані мережі (STIN): STIN - це STIN, за допомогою якої супутниковий зв'язок доповнює наземні системи, пропонуючи глобальні безперебійні і повсюдні Інтернет-послуги користувачам в ізольованих районах.

STIN використовує ліцензований спектр для наземно-повітряного зв'язку. Повітряна інфраструктура включає кілька рівнів, таких як супутникові угруповання на низькій, середній і геостаціонарній орбітах [26]. ARAN: ARAN - це багаторівнева та ієрархічна інфраструктура повітряного доступу, що поєднує системи зв'язку FlyRAN та LEO STIN для забезпечення середовища радіодоступу з неба до кінцевих користувачів для послуг Інтернету через повітряні базові станції, обладнані гетерогенними бездротовими приймачами.

Базовими станціями можуть бути БПЛА, дрони, повітряні кулі та літаки. Визначення ARAN було вперше представлено в [27] з оригінальною назвою AAN на Міжнародній конференції IEEE з комунікацій (ICC) у червні 2020 року.

Якщо коротко, то це DA-RAN, що зосереджуються на LAP-зв'язку [23], FlyRAN, спрямовані на LAP/HAP-зв'язок [24], і STIN, що включають супутниковий зв'язок [26]. Оскільки кожен з подібних термінів представляє частковий рівень ARAN, який використовується для спеціальних застосувань, взаємозв'язок між цими системами є слабким і асинхронним. Таким чином, введення визначення ARAN є значним внеском в об'єднання вищезгаданих систем в загальну модель.

На рис. 5.4 показано широку перспективу для демонстрації детальної архітектури ARAN в контексті повного шляху від користувача до ядра.

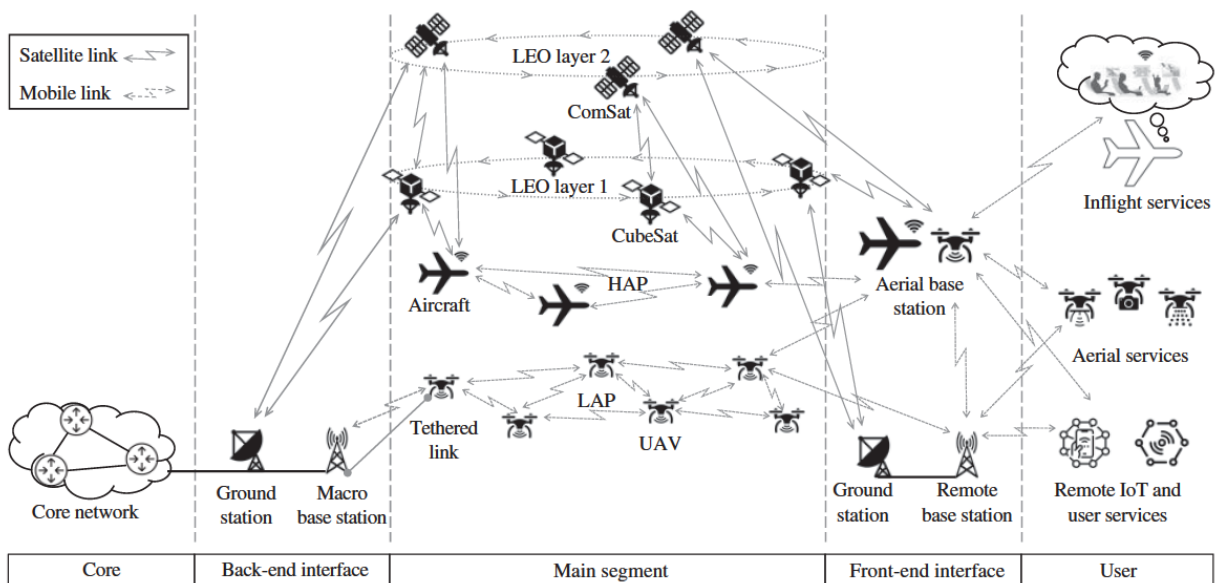


Рисунок 5.4 - Архітектура літаючої безпроводної системи доступу

Як правило, архітектура ARAN складається з трьох сегментів: ● Основний сегмент - це багаторівнева мережева інфраструктура, яка спільно використовується наземними базовими станціями на трьох платформах, включаючи LAP, HAP і LEO. Зовнішній інтерфейс забезпечує наземні та



повітряні точки доступу, які збирають з'єднання користувачів. Внутрішній інтерфейс з'єднує інфраструктуру ARAN з наземними базовими мережами.

Зауважте, що системи зв'язку LEO використовують супутникові канали для зв'язку з наземною мережею через наземні станції, тоді як системи LAP і NAP використовують мобільні (бездротові) канали для прямого зв'язку з повітряними базовими станціями і наземними базовими станціями (наприклад, gNB в 5G і eNB в 4G).

В основному сегменті ARAN системи LAP знаходяться на найнижчому рівні. Дрони і БПЛА в системах LAP діють як повітряні базові станції, забезпечуючи зв'язок безпосередньо з наземними і повітряними кінцевими користувачами або віддаленими базовими станціями за допомогою бездротових технологій, таких як 5G NR і Wi-Fi. З іншого боку, ці повітряні базові станції можуть використовувати або супутникові технології для з'єднання з системами зв'язку на LEO, або бездротові технології з наземними макро-базовими станціями для транзитного передавання даних до опорних мереж. LAP можна класифікувати за розміром, дальністю, швидкістю і витривалістю. За даними Міністерства армії США [28], LAPs поділяються на п'ять категорій, тобто малі < середні < великі < великі < найбільші групи. Більшість LAPs - це відносно легкі та економічно вигідні пристрої, які можна швидко і гнучко розгортати.

Однак вони мають відносно низьку витривалість і обмежені енергетичні та мережеві ресурси. Щоб пом'якшити ці проблеми, можна розглядати прив'язну технологію як доцільний підхід або для створення надійного ширококутового транзиту через волоконний кабель, або для живлення LAP за допомогою лінії електропередач між LAP і наземними станціями [29]. Тим не менш, точки доступу ефективно підтримують чутливі до часу і засновані на подіях сценарії, такі як аварійно-рятувальні роботи, повітряне спостереження, розвантаження трафіку і мобільні точки доступу в місцях масових зібрань.

На середньому рівні основного сегмента ARAN NAPs визначаються Регламентом радіозв'язку (PP) МСЕ як радіостанції, розташовані у визначеній, номінальній, фіксованій точці відносно Землі. Смуги частот 2, 6, 27/31 і 47/48

ГГц були виділені для зв'язку НАР у двонаправлених лініях НАР-земля [22] на трьох всесвітніх конференціях з радіозв'язку. Системи НАР обслуговують повітряних і віддалених наземних кінцевих користувачів бездротовими технологіями в широкій зоні покриття з великої висоти. Для зворотного зв'язку з наземними основними мережами системи НАР здебільшого використовують супутникові технології через системи зв'язку на низьких орбітах. На практиці деякі галузі реалізували пробні проекти з використанням легких літаків на сонячних батареях і дирижаблів для забезпечення стабільного широкосмугового зв'язку в сільських і віддалених районах [30].

У верхній частині основного сегмента ARAN дворівневі системи низькоорбітального зв'язку складаються з мініатюрних супутників внизу (тобто CubeSat) і супутників зв'язку вгорі (тобто ComSat), що обертаються на орбіті на висоті 500-1500 км. CubeSat мають на меті забезпечити низьку затримку і високу пропускну здатність інтернет-послуг, в той час як ComSat призначені для широкого покриття і доступності послуг. Ці два низькоорбітальні супутники взаємодіють між собою за допомогою інтерлінків, які забезпечують надмірність, резервне копіювання та інтерфейси спільної роботи для динамічної організації мережі. Порівняно з іншими класами супутників, низькоорбітальні супутники характеризуються меншою затримкою, економічністю, швидким виробництвом і розгортанням. Більшість низькоорбітальних супутників працюють у діапазонах Ku, Ka і V, забезпечуючи підключення до Інтернету повітряних і наземних станцій із затримкою в десятки мс [31]. На відміну від систем LAR/НАР, системи зв'язку LEO зазвичай не надають послуги кінцевим користувачам безпосередньо. Як прямий зв'язок з кінцевими користувачами, так і зворотний зв'язок з основними мережами - це супутникові передачі через наземні станції і термінали з дуже малою апертурою (VSAT). Для організації міжрівневих мережеских операцій в ARAN системи зв'язку LEO додатково підтримують транзитні тунелі, що дозволяє системам LAR/НАР підключатися до опорних мереж. Останніми роками з'явилося кілька нових комерційних супутникових проектів на основі систем

зв'язку на LEO, таких як OneWeb, Telesat і Starlink, з сотнями успішно виведених на орбіту супутників і тисячами запусків супутників, запланованих на найближче майбутнє [32].

В ARAN зовнішній інтерфейс включає повітряні базові станції на рівнях LAR/HAR, віддалені базові станції і наземні станції, що дозволяють кінцевим користувачам отримати доступ до мереж. Повітряні та віддалені базові станції є точками доступу ARAN, які забезпечують бездротове з'єднання безпосередньо з повітряними та наземними користувачами.

Наземні станції є кінцевими пунктами супутникових каналів зв'язку систем зв'язку на низькій орбіті, які передають трафік до віддалених базових станцій і назад.

Залежно від обставин, що склалися, повітряні базові станції і віддалені базові станції можуть перехресно обслуговувати як повітряні, так і наземні послуги, як показано на лівій стороні рис. 5.4. І навпаки, внутрішній інтерфейс включає в себе макро-базові станції і наземні станції для забезпечення транзитного трафіку до опорних мереж. Як правило, макробазові станції допомагають передавати потоки трафіку від систем LAR, в той час як наземні станції підтримують переадресацію трафіку від (систем HAR до) систем зв'язку LEO; див. праву частину рисунку 5.4.

### 5.3 RAN з підтримкою штучного інтелекту

Для звичайних радіорелейних мереж досить складно досягти жорстких вимог майбутніх бездротових систем 6G, таких як пікова швидкість передачі даних понад 1 Тбіт/с, наскрізна затримка менше 0,1 мс, надійність 99,99999%, щільність з'єднання понад  $10^7$  пристроїв на квадратний кілометр і мобільність понад 1000 км/год. Щоб вирішити існуючі проблеми і відкрити більше можливостей для майбутніх RAN, в RAN з'явився штучний інтелект, який створив нову концепцію, а саме RAN з підтримкою штучного інтелекту. На останньому пленарному засіданні 3GPP RAN було досягнуто домовленості про

включення ШІ до стандарту 5G NR, що матиме великий вплив на розвиток і стандартизацію 6G RAN на основі ШІ в найближчому майбутньому (близько 2025 року). Далі ми спочатку представимо трирівневу обчислювальну архітектуру, яка дозволяє розгорнути ШІ в RAN в ієрархічному порядку. Потім ми проаналізуємо деякі перспективні застосування ШІ для майбутніх RAN, включаючи обробку даних і розподіл ресурсів.

З появою хмарних обчислень, периферійних обчислень і вбудованого інтелекту ресурси для зберігання даних і обчислювальні можливості можуть бути надані в будь-якій точці мережі. Більш конкретно, мережа зазвичай складається з трьох рівнів, включаючи рівень хмарних обчислень, рівень периферійних обчислень і рівень пристроїв Інтернету речей, як показано на рис. 5.5: ● Рівень хмарних обчислень: Цей рівень включає сервери хмарних обчислень, такі як Amazon Web Services, Google Cloud Platform та Microsoft Azure, кожен з яких має потужні обчислювальні ресурси та пам'ять.

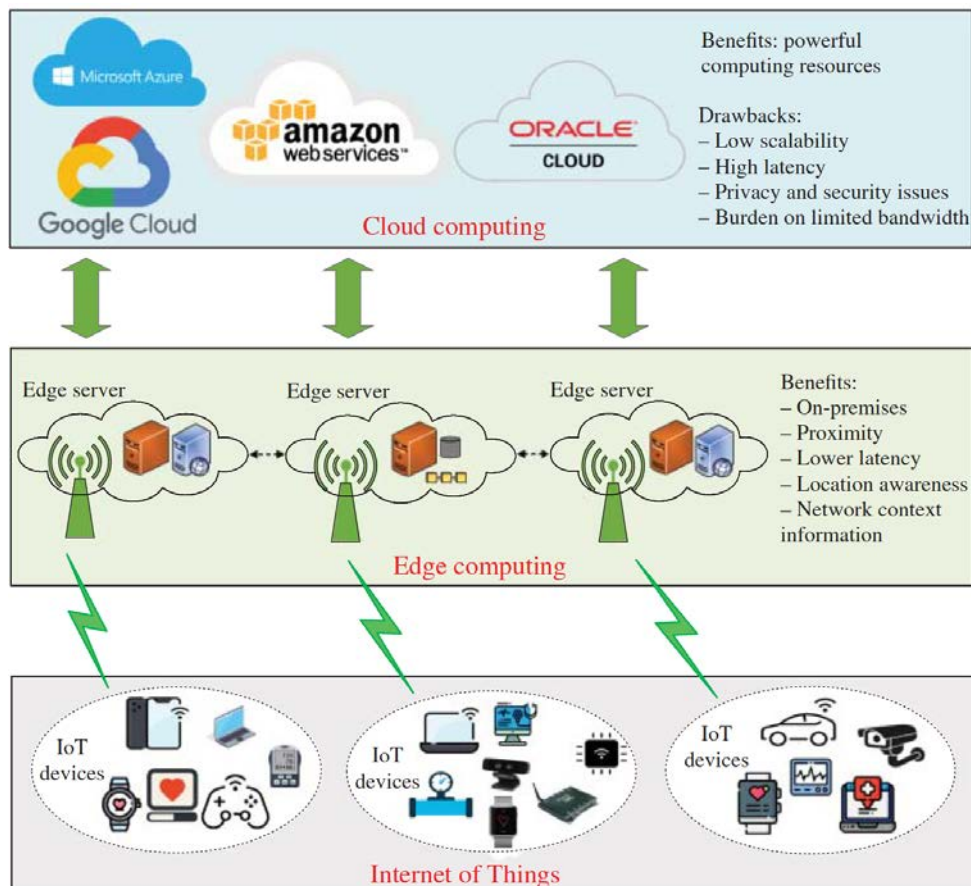


Рисунок 5.5 - Архітектура трирівневої обчислювальної інфраструктури інтелектуальної мережі IoT

Таким чином, цей рівень може забезпечити велику кількість ресурсів для централізованого навчання алгоритмів з великими обсягами даних. Однак хмарні обчислення страждають від основних недоліків, таких як низька масштабованість, висока затримка, проблеми з конфіденційністю та безпекою, а також надмірне навантаження на обмежену пропускну здатність. Наприклад, проблеми з конфіденційністю та безпекою, спричинені високою концентрацією даних, роблять хмару дуже вразливою до насильницьких атак, а дані/додатки, вивантажені в хмару через бездротове середовище, можуть бути підслухані підслуховуючими пристроями [7].

Граничний обчислювальний рівень (Edge Computing Layer): Для того, щоб зменшити час передачі даних, необхідно, щоб обчислювальні вузли виконували їх обробку ближче до кінцевих користувачів. Для вирішення цієї проблеми хмарних обчислень з'явилися периферійні обчислення, які виконують завдання зберігання даних і обчислень у своїй периферійній мережі на невеликій відстані від кінцевих користувачів. Оскільки вузли периферійних обчислень знаходяться ближче до користувачів, потік трафіку полегшується, а також зменшуються вимоги до пропускну здатності і затримки при зберіганні даних і обчисленнях в мережі IoT. Парадигми периферійних обчислень, наприклад, туманні обчислення і периферійні обчислення з множинним доступом (MEC), можуть бути охарактеризовані деякими особливостями, а саме: локальність, близькість, менша затримка, обізнаність про місцезнаходження і інформація про мережевий контекст. Наприклад, функція prox-imity означає, що периферійні сервери зазвичай розташовуються в безпосередній близькості від мобільних користувачів; таким чином, MEC може збирати інформацію від мобільних користувачів для подальших цілей, таких як аналіз даних і обробка великих обсягів даних. Більше того, ця функція також вказує на те, що MEC може отримати прямий доступ до мобільних користувачів, таким чином надаючи кращі послуги та специфічні додатки. Рівень пристроїв IoT: Пристрої Інтернету речей, такі як датчики і мобільні телефони, можуть генерувати або збирати дані з фізичного середовища, а потім передавати їх на сусідні

периферійні сервери через точки доступу або базові станції [24]. Пристрої Інтернету речей з певними обчислювальними ресурсами (наприклад, смартфони і ноутбуки) можуть виступати в ролі периферійних вузлів для обробки локальних даних і навчання локальних моделей навчання. Це можна проілюструвати концепцією федеративного навчання на рисунку 5.1, де пристрої Інтернету речей з обчислювальними ресурсами тренують локальні навчальні моделі, а потім передають оновлення моделі на хмарний/граничний сервер для агрегації моделей. В іншому випадку, легкі пристрої Інтернету речей з невеликими обчислювальними ресурсами (наприклад, крихітні датчики і вузли зворотного розсіювання) можуть брати участь в процесі навчання, вивантажуючи свої дані і обчислювальне навантаження на периферійні і хмарні обчислювальні сервери через свої репрезентативні шлюзи.

З огляду на доступність обчислювальних ресурсів, починаючи від пристроїв Інтернету речей і закінчуючи периферійною мережею і централізованою хмарою, механізми ШІ можуть бути розгорнуті для оптимізації роботи, управління і продуктивності майбутніх RAN. Різні методи ШІ (наприклад, машинне навчання, глибоке навчання, навчання з підкріпленням і федеративне навчання) можуть мати численні застосування, такі як управління мережею, мережева безпека, мережеві додатки, обробка сигналів, виявлення кібератак, кешування і розвантаження обчислень, розподіл ресурсів і управління мережею. Завдяки можливостям навчання, доступності обчислювальних ресурсів і величезним обсягам даних, рішення на основі ШІ мають явні переваги над традиційними схемами, що базуються на моделях, які застосовуються в RAN. Вважається, що ШІ має три основні сфери застосування в RAN, які розглядаються нижче [29].

Алгоритмічне наближення: Загальним обмеженням, що заважає алгоритмам знаходити оптимальне рішення, є складність виконання в реальному часі; тому вони непрактичні для реалізації в реальному часі. Для оптимізації компромісу між обчислювальною складністю та продуктивністю

було запропоновано кілька підходів, наприклад, евристика, метаявристика та декомпозиція проблеми.

Однак реалізація цих алгоритмів у реальному часі є досить складним завданням. У цьому випадку використання методів штучного інтелекту видається перспективним рішенням. Зокрема, фази генерації даних та навчання можуть бути виконані в автономному режимі, а система працюватиме в реальному часі, використовуючи навчену модель. Наприклад, в роботі [31] пропонується архітектура DL для автоматичної класифікації модуляції (AMC), а саме MCNet, яка показала точність 93,59% при відношенні сигнал/шум (SNR) 20 дБ з часом виведення всього 0,095 мс.

Невідома модель та нелінійності: Багато фізичних явищ неможливо точно змоделювати. Тому звичайні алгоритми, засновані на моделях, зазвичай не дають ефективних рішень. Наприклад, нелінійності волокна (наприклад, спотворення сигналу і самофазна модуляція) в оптичних системах разом з впровадженням когерентного зв'язку роблять методи, засновані на моделях, неефективними для оптимізації мережі. Для пом'якшення нелінійностей і виявлення сигналів можна використовувати технології ШІ (наприклад, підхід наскрізного навчання) з дуже низьким коефіцієнтом бітових помилок (BER). Підхід наскрізного навчання [33] знайшов багато застосувань у сценаріях, в яких модель каналу невідома або добре відомі математичні моделі недоступні. Іншим застосуванням є використання DL для усунення апаратних нелінійностей в системах з множинним входом і множинним виходом (MIMO), таких як погіршення якості обладнання. Нелінійність також спостерігалася в системах MIMO з низькорозрядними аналого-цифровими перетворювачами. У спробі пом'якшити цей нелінійний ефект у роботі [34] запропоновано модель глибокої нейронної мережі для спільної оптимізації оцінки каналу і навчального сигналу. Модель перевершила лінійний оцінювач каналу в різних практичних умовах.

Прискорення алгоритмів: Інший напрямок розвитку інтелектуальної обробки сигналів - це використання ШІ для полегшення і прискорення

існуючих алгоритмів. Цей підхід помітно відрізняється від двох сценаріїв, розглянутих вище, тим, що існуючий алгоритм, заснований на моделі, повністю замінюється алгоритмом на основі ШІ, тобто парадигмою наскрізного навчання. Наприклад, було запропоновано багато алгоритмів на основі DL для покращення та прискорення схем виявлення, близьких до оптимальних.

У роботі [35] запропоновано модель DL, а саме FS-Net, для ініціалізації високонадійного рішення для схеми пошуку табуляцій (TS), а також запропоновано схему раннього завершення для подальшого прискорення процесу оптимізації.

Порівняно з оригінальною схемою TS, DL-детектор TS може зменшити обчислювальну складність приблизно на 90% при SNR 20 дБ з аналогічною продуктивністю.

#### 5.4 Відкрий RAN

Відкриті RAN, також відомі як O-RAN, вважаються перспективною концепцією RAN для майбутніх бездротових систем 6G. O-RAN базується на концепції відкритості та інтелектуальності елементів мережі. Тому O-RAN вважається перспективною технологією RAN для подолання обмежень існуючих RAN, таких як віртуальна RAN і хмарна RAN, як показано на рисунку 5.6.

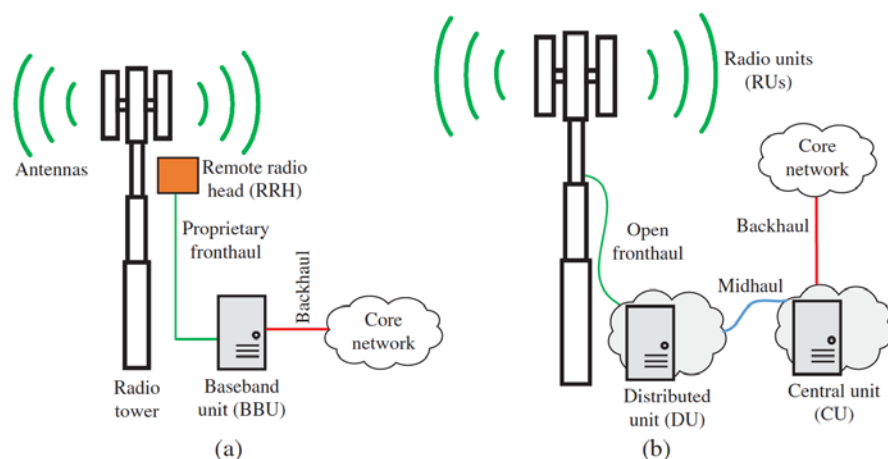


Рисунок 5.6 - Узагальнена архітектура традиційного RAN та O-RAN



Багато хто вважає, що O-RAN має численні переваги порівняно з існуючими технологіями RAN. Зокрема, традиційні RAN значною мірою покладаються на пропрієтарне обладнання, програмне забезпечення та радіоінтерфейси. Відкритість дозволяє залучати менших і нових гравців на ринку RAN для розгортання своїх індивідуальних послуг, а інтелектуальність - підвищити автоматизацію і продуктивність за рахунок оптимізації елементів RAN і мережевих ресурсів. Крім того, O-RAN пропонує мережевим операторам багато рішень та елементів RAN, щоб зробити мережу більш відкритою та гнучкою. Крім того, завдяки функції віртуалізації, оператори можуть скоротити час виходу на ринок нових додатків і послуг, щоб максимізувати загальний дохід.

Існує дві основні організації O-RAN: Telecom Infra Project (TIP) і альянс O-RAN. Програма O-RAN від TIP - це ініціатива, яка зосереджена на розробці рішень для майбутніх регіональних мереж на основі дезагрегації обладнання різних виробників, відкритих інтерфейсів і програмного забезпечення.

Крім O-RAN, TIP також реалізує кілька проектів, основною метою яких є забезпечення доступу до Інтернету і бездротового зв'язку в усьому світі. Зокрема, група проектних проектів TIP поділяє наскрізну мережу на три сегменти: доступ (наприклад, фіксований широкосмуговий зв'язок і O-RAN), транспорт (наприклад, неземна мережа, оптичний зв'язок і бездротовий транзит), а також ядро і послуги (наприклад, наскрізне розгалуження мережі і відкрита магістральна мережа). TIP також створює проектну групу з розробки рішень для кодифікації мережевих елементів і технологій, щоб мережеві рішення могли використовуватися різними операторами, постачальниками послуг і зацікавленими сторонами. Крім того, TIP має проектну групу з програмного забезпечення для розробки рішень з відкритим вихідним кодом для відкритих і сумісних мереж 6G RAN. Іншою організацією O-RAN є TIP, метою якої є розробка більш конкурентоспроможних рішень RAN, які характеризуються декількома принципами відкритості, інтелектуальності, віртуалізації та інтероперабельності. Високорівнева архітектура O-RAN



Основними елементами архітектури O-RAN є SMO, RIC, O-Cloud, центральний блок O-RAN (O-CU), розподілений блок O-RAN (O-DU) та O-RU.

SMO: Фреймворк SMO є основним компонентом архітектури O-RAN, основним обов'язком якого є управління доменом RAN, наприклад, надання інтерфейсів з мережевими функціями, RIC в режимі близькому до реального часу для оптимізації RAN, а також управління обчислювальними ресурсами та робочим навантаженням в O-Cloud. Як згадувалося раніше, ці послуги SMO можуть надаватися через чотири інтерфейси, включаючи A1, O1, O2 і відкриту площину M. RIC: Ця логічна функція дозволяє O-RAN виконувати оптимізацію функцій і ресурсів в режимі реального часу на основі даних, зібраних від мережі та кінцевих користувачів в режимі реального часу (від 10 мс до 1 с). O-Cloud: Це фізична обчислювальна платформа, яка може бути використана для функцій O-RAN, таких як RIC в режимі близькому до реального часу, площина управління O-CU, площина користувача O-CU та O-DU. O-DU: Цей логічний вузол має функції фізичного та MAC рівнів. Цей елемент завершує E2 з інтерфейсами F1. O-CU: Це логічний вузол в архітектурі O-RAN, який виконує всі функції як площини управління, так і площини даних. Ці дві площини O-CU з'єднуються з логічним вузлом O-DU через інтерфейс F1-c та F1-u відповідно. Для послуг з низькою затримкою, O-CU можуть бути розміщені разом з O-DU в одному граничному вузлі. O-RU: Цей логічний вузол має можливості фізичного рівня і обробки радіосигналів для з'єднання з фреймворком SMO через відкритий інтерфейс M-площини і з'єднується з кінцевими користувачами через радіоінтерфейси. Таким чином, користувачі можуть передавати свої обчислювальні завдання/дані на периферійний вузол через бездротове з'єднання з O-RU і через зовнішній інтерфейс, який з'єднує O-RU і периферійний вузол.

Переваги O-RAN супроводжуються певними проблемами, наприклад, безпекою, детермінованою затримкою, а також управлінням на фізичному рівні і в режимі реального часу. Наприклад, в роботі [37] обговорюються шість проблем безпеки O-RAN, включаючи відключені шифри, неавторизований доступ, незахищену синхронізацію, вразливості серед елементів O-RAN,

відсутність заходів безпеки для відкритості та дезагрегації O-RAN, а також загрози безпеки програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом. Всі ці виклики вимагають значних зусиль від дослідницької та промислової спільнот у напрямку стандартизації та впровадження O-RAN у майбутніх бездротових системах 6G. У зв'язку з цим, O-RAN має відмінні риси, які привносять інтелект в майбутні мережі, в той час як ШІ, зокрема, глибоке навчання і машинне навчання, допомагає подолати різні проблеми 6G O-RAN за допомогою інтелектуальних і керованих даними рішень [38], таких як управління ресурсами, управління мобільністю і управління спектром.

### 5.5 Прогнозування мережевого трафіку з використанням ШІ

Системи 6G значно збільшують мережевий трафік завдяки масовому підключенню смартфонів, планшетів, пристроїв Інтернету речей тощо. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) дозволяє системам 6G встановлювати гнучкі та масштабовані мережеві з'єднання в залежності від запитів на трафік. Управління VNF є одним з ключових викликів для ефективної роботи базових мереж 6G. Адаптивне забезпечення VNF може бути одним з ключових методів, коли обсяг трафіку збільшується і зменшується. У системах 5G функція управління доступом і мобільністю (AMF) відповідає за вирішення завдань управління з'єднанням і мобільністю. Вона повинна збільшувати або зменшувати масштаби, якщо кількість запитів на ресурси є високою або низькою, відповідно. Для того, щоб збільшити або зменшити ресурси VNF, важливим є швидке і точне прийняття рішень. Якщо рішення приймається повільно і неточно, користувачі будуть відчувати затримку або відмову в з'єднанні. Для того, щоб прийняти швидке і точне рішення, прогнозування мережевого трафіку буде ключовим методом. Оскільки цей метод може прогнозувати запити користувачів на ресурси, ми можемо правильно масштабувати або зменшувати їх і уникати затримки або відхилення запитів. Прогнозування мережевого трафіку як проактивний підхід відіграє важливу

роль у стільникових мережах 6G. Методи штучного інтелекту відповідають цій темі дослідження. Зокрема, рекурентні нейронні мережі (RNN) є потужним інструментом для прогнозування часових рядів даних на основі минулих даних. Багато дослідницьких груп застосовують RNN для прогнозування мережевого трафіку. Ми можемо застосувати RNN для прогнозування часових рядів даних безпосередньо. Основні кроки для прогнозування мережевого трафіку можна підсумувати наступним чином: збір навчальних та тестових даних, форматування даних, навчання моделі нейронної мережі та тестування нейронної мережі. На етапі збору даних оператори мобільного зв'язку повинні зібрати набір даних у власній інфраструктурі. Це можуть бути потокові або пакетні дані зі статистичною інформацією, дані журналів тощо. Залежно від мети прогнозування, буде зібрано певний набір даних. На етапі форматування даних набір даних повинен бути відформатований для навчання. Цей крок впливає на точність прогнозування. Залежно від ключового показника ефективності, ми можемо відформатувати набір даних шляхом класифікації або маркування. На етапах навчання та тестування ми повинні вибрати відповідний алгоритм RNN та визначитись з конфігурацією нейронної мережі. У випадку LSTM це дозволяє зберігати набір даних під час прогнозування. У системах 6G RNN буде корисним для прогнозування необхідних ресурсів AMF та ефективного управління трафіком. Оркестратор NFV може включити RNN і знайти оптимальний розподіл віртуальних ресурсів для проактивного розгортання, прогножуючи зміни трафіку. Якщо у нас є добре навчена модель RNN, то немає необхідності часто контролювати продуктивність VNF і зменшити накладні витрати в площині управління.

Прогнозування даних за допомогою RNN. Розглянемо невелику компанію з даними про мережевий трафік за 450 днів, як показано на рис. 5.8.

Спрогнозуйте використання мережевого трафіку на наступні 50 днів, використовуючи RNN.

Використовуючи комп'ютерне моделювання, ми спрогнозуємо майбутнє використання мережевого трафіку на 50 днів. Конфігурацію симуляції можна

узагальнити наступним чином: Алгоритм RNN = LSTM, до 100 епох, до 100 ітерацій, функція втрат RMSE, прихованих одиниць LSTM 200, поріг градієнта 1, початкова швидкість навчання 0,05, період падіння швидкості навчання 125, коефіцієнт падіння швидкості навчання 0,2. Після виконання LSTM ми можемо отримати майбутні 50 днів використання мережевого трафіку. На рис. 5.8 показано порівняння спостереження і прогнозу. У верхній частині рис. 5.8 крива "Спостереження" означає спостереження (фактичні дані). Крива "Прогнозування" означає результат роботи алгоритмів LSTM. У нижній частині рис. 5.8 показано втрату між спостережуваними і передбачуваними даними.

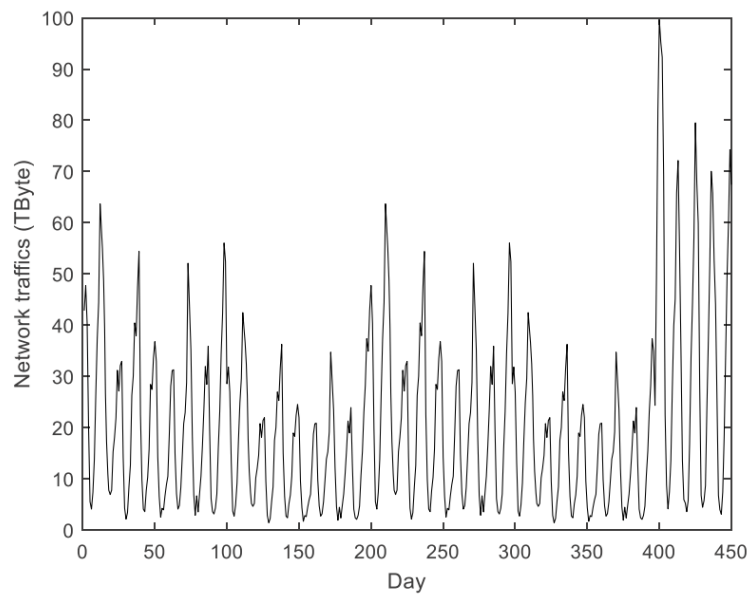


Рисунок 5.8 - Використання мережевого трафіку за 450 днів

Після оновлення LSTM-мережі на 100 ітерацій ми порівняли спостереження та прогноз, як показано на рис. 5.9. Як видно зі значень RMSE (10.3808 та 4.9954) на рис. 5.9 та 5.10, оновлення моделі LSTM-мережі забезпечує кращу продуктивність. Після достатнього навчання ми можемо отримати кращий результат. Рисунок 5.11 ілюструє спостереження за 450 днів і прогноз на майбутні 50 днів.

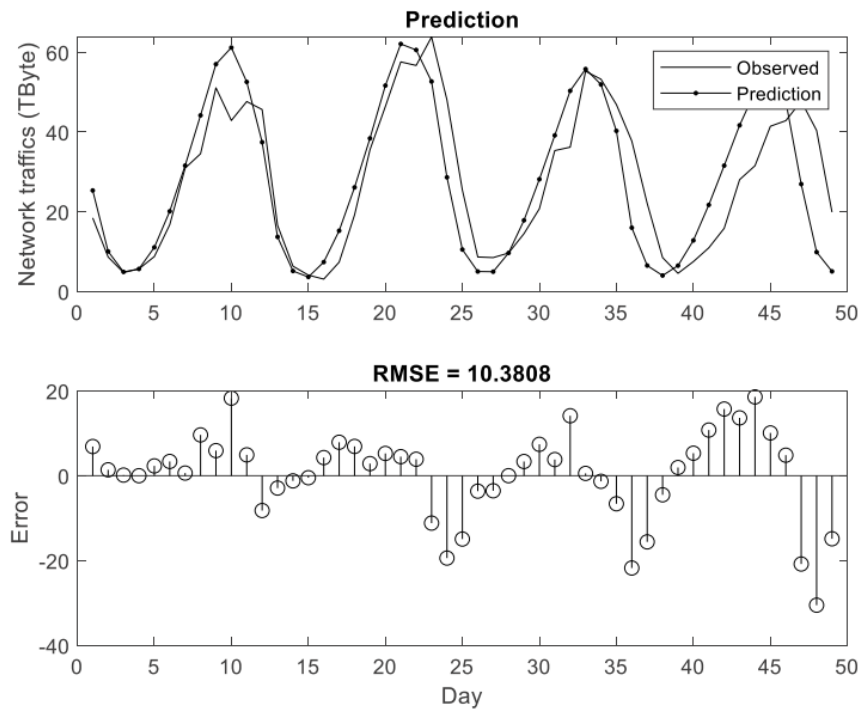


Рисунок 5.9 - Порівняння спостереження та прогнозу на наступні 50 днів

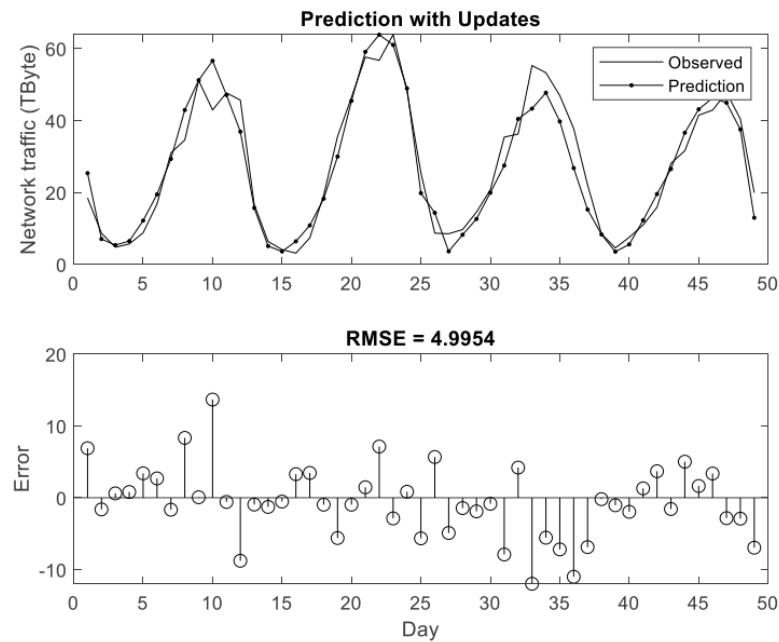


Рисунок 5.10 - Порівняння спостереження та прогнозу на наступні 50 днів  
після оновлення

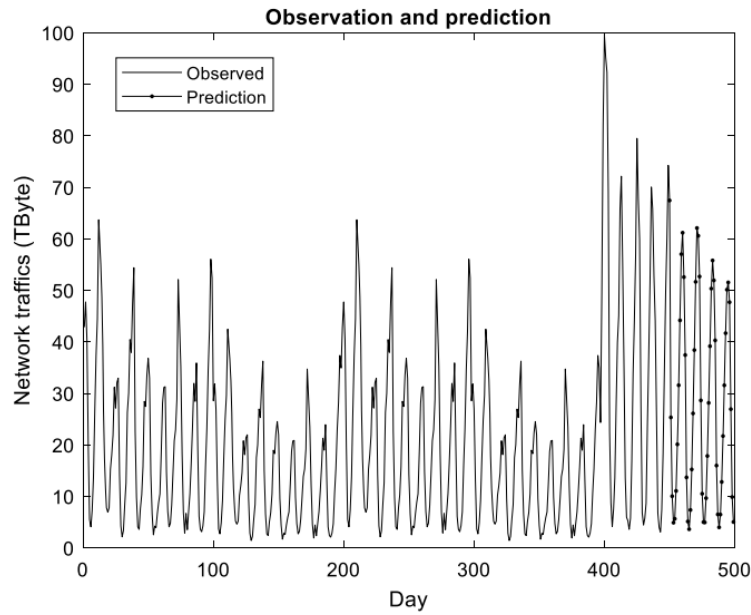


Рисунок 5.11 - Спостереження та прогнозування

### 5.6 Висновки до розділу 5

Досліджено три ключові концепції мереж радіодоступу 6G, включаючи повітряну мережу радіодоступу (ARAN), мережу радіодоступу з підтримкою штучного інтелекту (AI-RAN) і відкриту мережу радіодоступу (O-RAN). Зокрема основні вимоги до проектування RAN в майбутніх бездротових системах 6G. Визначено ключові особливості та застосування трьох концепцій 6G RAN: ARAN, AI-RAN та O-RAN. Отримано результати прогнозування мережевого трафіку.



## 6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

Дослідження на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

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

### 6.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 6.1 та 6.2.

Таблиця 6.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	68	65
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	60	0	0
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0

Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		64,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як принципово нова, тобто робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження.

Таблиця 6.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	72	75
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	70,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як

глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [56]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (6.1)$$

де  $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{\text{нов}} = 64,3, k_{\text{теор}} = 70,7$  балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 64,3 + 0,4 \cdot 70,67 = 66,87 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{\text{нау}}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій», даний рівень становить 66,87 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 6.2.1 Витрати на оплату праці

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

#### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [56]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (6.2)$$

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

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

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

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

$$Z_o = 14750,00 \cdot 44 / 22 = 29500,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	14750,00	670,45	44	29500,00
Інженер-розробник телекомунікаційних систем 1-ї категорії	14000,00	636,36	32	20363,64
Провідний фахівець проблем моделювання систем зв'язку	8400,00	381,82	24	9163,64
Старший науковий співробітник	14000,00	636,36	32	20363,64
Технік I-ї категорії	7200,00	327,27	40	13090,91
Лаборант	6800,00	309,09	22	6800,00
Всього				99281,82

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.3)$$

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

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

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

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.4)$$

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

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [56];

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

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

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

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

$$Z_{pl} = 56,53 \cdot 3,50 = 197,86 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місяця старшого наукового співробітника	3,50	2	1,10	56,53	197,86
Підготовка робочого місяця інженера-розробника телекомунікаційних мереж	6,10	3	1,35	69,38	423,21
Введення програмних блоків моделювання поведінки мереж 6G	4,35	5	1,70	87,37	380,04
Інсталяція програмного забезпечення математичного моделювання мереж 6G	7,50	4	1,50	77,09	578,16
Введення програмних блоків моделювання поведінки мереж 6G	8,20	5	1,70	87,37	716,41

Продовження таблиці 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Налагодження програмних блоків математичної моделі дослідження	3,50	5	1,70	87,37	305,78
Формування (введення) бази даних дослідження моделі мережі	11,50	3	1,35	69,38	797,86
Тестування взаємодії моделей приймача, передавача, антенного обладнання мереж 6G	4,60	4	1,50	77,09	354,61
Контроль результатів дослідження	3,50	5	1,70	87,37	305,78
Всього					4059,71

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (6.5)$$

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

$$Z_{\text{дод}} = (99281,82 + 4059,71) \cdot 11 / 100\% = 11367,57 \text{ грн.}$$

### 6.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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



$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{одд}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (6.6)$$

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

$$Z_n = (99281,82 + 4059,71 + 11367,57) \cdot 22 / 100\% = 25236,00 \text{ грн.}$$

### 6.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Безпровідні системи та мережі із використанням 6G технологій».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (6.7)$$

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

$n$  – кількість видів матеріалів;

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

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

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

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

$$M_1 = 3,0 \cdot 213,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 670,95 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний (A4)	213,00	3,0	-	-	670,95
Папір для заміток (A5)	136,00	4,0	-	-	571,20
Начиння канцелярське	195,00	3,0	-	-	614,25
Органайзер офісний	208,00	3,0	-	-	655,20
Картридж для принтера	1240,00	1,0	-	-	1302,00
Диск оптичний (CD-R)	20,50	3,0	-	-	64,58
Диск оптичний (CD-RW)	22,00	1,0	-	-	23,10
FLASH-пам'ять (16 ГБ)	107,00	1,0	-	-	112,35
FLASH-пам'ять (64 ГБ)	329,00	1,0	-	-	345,45
Всього					4359,08

#### 6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_{\epsilon} = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.8)$$

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

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

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

$K_{\epsilon} = 1 \cdot 7640,00 \cdot 1,05 = 8022,00$  грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Роутер з підтримкою технології МІМО	1	7640,00	8022,00
Антенні решітки спеціалізовані (комплект)	1	4510,00	4735,50
Всього			12757,50

### 6.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (6.9)$$

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

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

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

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 3420,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 3591,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Контроллер Controller HD16qj	1	3420,00	3591,00
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	1	4570,00	4798,50
Маршрутизатор XA16	1	3860,00	4053,00
Імітатор магістральної мережі FITCH	1	4910,00	5155,50
Термінал (імітатор передавача)	1	11860,00	12453,00
Термінал (імітатор приймача)	1	6700,00	7035,00
Всього			37086,00

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

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (6.10)$$

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

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

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

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npr} = 5400,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 5670,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	5400,00	5670,00
Пакет Microwave Office	1	6800,00	7140,00
Пакет Matlab 2020	1	5380,00	5649,00
Модель імітатора передавача	1	2750,00	2887,50
Модель імітатора приймача	1	3380,00	3549,00
Всього			24895,50

### 6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

$$A_{обл} = \frac{C_{об}}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (6.11)$$

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

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

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

$$A_{обл} = (79899,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 6658,25 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронно-обчислювальний комплекс моделювання мереж 6G HP ELITEONE 870 G9 TOUCH AIO / I5-13500 (7B0E4EA)	79899,00	2	2	6658,25
Лазерний принтер HP LASERJET M211D (9YF82A)	7599,00	4	2	316,63
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних мереж	7840,00	5	2	261,33
Робоче місце старшого наукового співробітника	7899,00	5	2	263,30
Приміщення лабораторії досліджень	423000,00	25	2	2820,00
ОС Windows 11	8380,00	2	2	698,33
Пакет Microsoft Office 2019	7864,00	2	2	655,33

Продовження таблиці 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Контроллер Controller HD16qj	3591,00	3	2	199,50
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	4798,50	3	2	266,58
Маршрутизатор XA16	4053,00	3	2	225,17
Всього				12364,43

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

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

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (6.12)$$

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

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

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

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

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

$$B_e = 0,42 \cdot 320,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 1008,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронно-обчислювальний комплекс моделювання мереж 6G HP ELITEONE 870 G9 TOUCH AIO / I5-13500 (7B0E4EA)	0,42	320,0	1008,00
Лазерний принтер HP LASERJET M211D (9YF82A)	0,32	12,0	28,80
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних мереж	0,10	320,0	240,00
Робоче місце старшого наукового співробітника	0,08	320,0	192,00
Контроллер Controller HD16qj	0,02	200,0	30,00
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	0,03	200,0	45,00
Маршрутизатор XA16	0,03	200,0	45,00
Роутер з підтримкою технології MIMO	0,04	200,0	60,00
Всього			1648,80

### 6.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

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

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (6.13)$$



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

$$B_{cb} = (99281,82 + 4059,71) \cdot 20 / 100\% = 20668,31 \text{ грн.}$$

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

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

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (6.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо  $H_{cn} = 35\%$ .

$$B_{cn} = (99281,82 + 4059,71) \cdot 35 / 100\% = 36169,54 \text{ грн.}$$

6.2.11 Інші витрати

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

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

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{в}}}{100\%}, \quad (6.15)$$

де  $H_{\text{в}}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{\text{в}} = 65\%$ .

$$I_{\text{в}} = (99281,82 + 4059,71) \cdot 65 / 100\% = 67172,00 \text{ грн.}$$

### 6.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (6.16)$$

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

$$B_{\text{нзв}} = (99281,82 + 4059,71) \cdot 100 / 100\% = 103341,53 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_v + B_{стел} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (6.17)$$

$$B_{заг} = 99281,82 + 4059,71 + 11367,57 + 25236,00 + 4359,08 + 12757,50 + 37086,00 + 24895,50 + 12364,43 + 1648,80 + 20668,31 + 36169,54 + 67172,00 + 103341,53 = 460407,78 \text{ грн.}$$

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

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (6.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ZB = 460407,78 / 0,9 = 511564,20 \text{ грн.}$$

6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій»

використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.19)$$

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

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

$T_C$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_C = 2$ ;

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

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 511564,20$  грн;

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

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_C$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [56].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^3 \cdot 2 \cdot 4}{511,6 \cdot 0,17} = 6,01.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 6.4 Висновок до розділу 6

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» складають 511564,20 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням в процесі виробничої діяльності. Вона є важливою складовою будь-якого підприємства, оскільки забезпечує безпеку та здоров'я працівників, а також сприяє підвищенню продуктивності праці. Важливою складовою охорони праці є також культура безпеки праці. Це культура відповідального ставлення працівників до власної безпеки та безпеки інших людей. Культура безпеки праці формується за допомогою навчання та прикладу. Науковий підхід до охорони праці є ефективним способом забезпечення безпечних умов праці. Він дозволяє використовувати сучасні знань і технології для зменшення ризику нещасних випадків і професійних захворювань

Розробка та дослідження безпроводної системи та мережі із використанням 6G технологій відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника, відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Хімічні: шкідливі речовини в повітрі робочої зони.

3. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.

## 7.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

### 7.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Сучасне виробництво характеризується автоматизацією та оптимізацією виробничих процесів. Комп'ютерна техніка є невід'ємною частиною діяльності практично будь-якого підприємства. У зв'язку з цим законодавство України встановлює нормативні вимоги щодо використання комп'ютерної техніки на підприємствах, зокрема, в галузі охорони праці. До таких вимог належать ДСанПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015 та інші. Ці норми та стандарти регламентують умови та вимоги щодо безпечного та ефективного використання комп'ютерної техніки на підприємствах. Вони передбачають впровадження заходів щодо охорони праці, забезпечуючи безпеку працівників під час взаємодії з комп'ютерами та іншими технічними засобами. Такий підхід допомагає запобігти професійним захворюванням, зменшити ризики пов'язані з використанням комп'ютерної техніки і забезпечити загальний комфорт та безпеку працівників.

Перед початком роботи з комп'ютерами та офісною технікою на робочому місці необхідно виконати наступні умови: до роботи допускається особа, яка досягла 18-річного віку, пройшла медичний огляд, знайома з інструкцією щодо охорони праці при взаємодії з офісною технікою і не має жодних медичних протипоказань.

Помешкання, призначені для роботи з комп'ютерами, повинні відповідати проектній документації будівлі, яка була узгоджена з відповідними державними органами. Крім цього, роботодавець повинен дотримуватися санітарних норм і вимог, що стосуються освітлення, мікроклімату (температури та вологості), вібрації, рівня шуму та пожежної безпеки в приміщенні. Конкретні параметри цих санітарних норм зазначені в вищезазначених нормативних документах.

Організація робочого місця дослідника відповідає наступним вимогам:

1. Робочі місця з відеотерміналами та ПК розміщуються на відстані не

менше 1 метра від стін зі світловими прорізами.

2. Відстань між бічними поверхнями відеотерміналів повинна бути не менше 1,2 метра.

3. Відстань між тильною поверхнею одного відеотерміналу та екраном іншого не повинна бути менше 2,5 метра.

4. Прохід між рядами робочих місць повинен бути не менше 1 метра.

5. Робоче сидіння (крісло) розробника складається з наступних основних елементів: сидіння, спинки і стаціонарних або знімних підлокітників.

Організація робочого місця дослідника має на меті забезпечити комфортні умови для виконання роботи з відеотерміналами та ПК, а також зберегти здоров'я та забезпечити безпеку працівника. Відповідно до цього, дотримання вищезазначених вимог до розташування обладнання є важливим етапом в організації робочого простору дослідника. Сидіння (крісло) дослідника важливо розглядати як ключовий елемент, що впливає на комфорт та продуктивність роботи. Воно повинно бути зручним, підтримувати правильну позу тіла та сприяти запобіганню втоми і неприємностям у хребті та спині протягом тривалого робочого дня. Для цього важливо мати на увазі не лише дизайн крісла, але й такі параметри, як регулювання висоти, нахилу та підтримки для плечей.

Загальна площа робочого приміщення становить 20,5 м<sup>2</sup> та об'єм 65,6 м<sup>3</sup>. Кількість працівників у приміщенні – 4 особи, всі робочі місця комп'ютеризовані. На одного працівника в даному приміщенні припадає в середньому  $\frac{20,5}{4} = 5,2$  (м<sup>2</sup>/ос.) робочої площі. Об'єм повітря на одного працівника припадає  $\frac{65,6}{4} = 16,4$  м<sup>3</sup>.

Відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18, норми щодо площі та об'єму приміщень для використання відеотерміналів передбачають мінімальні значення в розмірі не менше 6,0 квадратних метрів площі та не менше 20,0 кубічних метрів об'єму на одне робоче місце з відеотерміналом, враховуючи при цьому максимальну кількість осіб, які одночасно працюють у зміні. Після



аналізу відповідності цих нормативів фактичним розмірам приміщень, стало очевидним, що встановлені вимоги не були дотримані. Така ситуація може негативно вплинути на здоров'я працівників, адже неадекватні робочі умови можуть спричинити виникнення проблем з комфортом і безпекою праці. У зв'язку з цим було запропоновано вирішити цю проблему, перенесавши одне робоче місце з комп'ютером в інше приміщення. Ця заходи спрямована на поліпшення умов праці та дотримання нормативів безпеки для працівників, що використовують відеотермінали.

### 7.1.2 Електробезпека приміщення

Згідно з проведеним дослідженням, визначаємо, що приміщення, де виконувалася робота, відноситься до 1-го класу безпеки, що свідчить про відсутність підвищеної електричної небезпеки. У цьому приміщенні переважають безпечні умови для праці: воно має низьку вологість, обмежене накопичення пилу, умови щодо температури повітря в ньому є комфортними, а також наявні ізольовані підлоги та обладнання з обмеженою кількістю заземлених приладів. На робочому місці одним із елементів обладнання є металевий корпус системного блоку комп'ютера. Важливо відзначити, що цей корпус має властивості ізоляції для забезпечення безпеки, а також містить елементи для заземлення та провід зі заземлюючим проводом для підключення до джерела живлення. Ці заходи спрямовані на забезпечення безпеки та запобігання можливим електричним ризикам при використанні комп'ютерної техніки у відповідному приміщенні.

Для забезпечення надійної роботи електротехнічного устаткування в умовах як нормальної експлуатації, так і під час коротких замикань, перенапруг і перевантажень, були впроваджені ряд технічних рішень та заходів з безпеки:

1. Струмopровідні частини недоступні для працівників, використовується схована проводка або кабелі прокладені у спеціальних ринвах, що мінімізує можливість контакту з електричними компонентами.

2. Струмопровідні частини ізолювані з використанням ізоляції, опір якої не менше 1 кОм/В, і регулярно перевіряються та обслуговуються для забезпечення надійності ізоляції.

3. Напруга в системі освітлення становить 220 В і має заземлену нейтраль для підвищення безпеки при можливих неполадках.

4. Для захисту від коротких замикань і перевантажень використовуються запобіжники та автоматичні вимикачі.

5. Всі металеві частини обладнання та електричних систем заземлені, щоб ефективно забезпечити відведення надлишкової напруги та запобігання ураженню електричним струмом.

6. Використовуються високоякісні кабелі, які відповідають стандартам безпеки та електробезпеки для запобігання можливим проблемам.

Забезпечується постійний нагляд та планова профілактика електротехнічного обладнання та ізоляції для попередження можливих проблем та забезпечення безпеки працівників.

## 7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 7.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат в приміщенні, включаючи такі параметри, як температура, швидкість руху повітря та вологість, має важливе значення для збереження працездатності людини. Щоб забезпечити належну функціональність організму, необхідно збалансувати теплові процеси, які виникають в результаті фізичної діяльності працівника. Зниження температури в офісному приміщенні може призвести до збільшення втрат тепла, що потенційно може спричинити переохолодження організму. У високих температурах організм регулює температуру шляхом виділення поту, але це може призвести до втрати важливих ресурсів. Отже, важливо дотримуватися оптимальних параметрів мікроклімату.

Робота дослідника відповідає категорії 1a за гігієнічною класифікацією праці, оскільки вона характеризується невисоким рівнем фізичної активності та невисокими енергетичними витратами. Для цієї категорії праці допустимі параметри мікроклімату наведені в таблиці 7.1 і включають температурний режим та вологість повітря.

Таблиця 7.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов у приміщенні використовується система кондиціонування повітря з можливістю індивідуального регулювання температури, система центрального опалення та систематичне вологе прибирання приміщення.

### 7.2.2 Склад повітря робочої зони

Для забезпечення нормальних умов виробничої діяльності, необхідно враховувати не лише комфортні метеорологічні умови, але й забезпечувати належну якість повітря в приміщенні. Під час проведення дослідження у повітрі робочої зони можуть з'являтися різноманітні шкідливі речовини, які використовуються в технологічних процесах. Шкідливими вважаються речовини, які, при недотриманні необхідних заходів безпеки, можуть призвести до виробничих травм, професійних захворювань або негативно вплинути на стан здоров'я працівників. Тому важливо дотримуватися вимог безпеки та вживати заходи для забезпечення якості повітря виробничих приміщень.

В приміщенні, де виконувалося дослідження, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин,

згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	10	6	4
Озон	0,1	0,03	1
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення відповідного складу повітря в робочій зоні здійснюється за допомогою таких заходів:

– система кондиціонування, яка регулює температуру, вологість та чистоту повітря в робочій зоні;

– регулярне провітрювання, яке допомагає видаляти з повітря шкідливі речовини, такі як пил, гази та пари;

вологе прибирання, яке сприяє видаленню пилу, бруду та мікроорганізмів з поверхонь.

### 7.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень визначається рядом кількісних і якісних показників, які мають велике значення для комфорту та безпеки працівників. Серед основних кількісних параметрів зокрема виділяють світловий потік, силу світла, яскравість і освітленість. Як для якісних показників візуального сприйняття в робочому середовищі важливі фон, контраст між об'єктом і фоном, та видимість. Недостатнє або, навпаки, надмірне освітлення, нерівномірний розподіл світла в полі зору, пульсація світла, а також зміна кольорів освітлюваних об'єктів можуть призвести до втоми зору та загальної втомлюваності працівників. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, блимання перед очима і порушення гостроти зору. Усі ці аспекти представляють потенційні ризики нещасних випадків та можуть сприяти виникненню професійних захворювань. Забезпечення належних параметрів освітлення має важливе значення для забезпечення безпечних і комфортних умов праці.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018) зазначені у таблиці 7.4:

Таблиця 7.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Робоче місце було організовано з урахуванням запобігання прямого потрапляння світла в очі. Для усунення відблисків світла використовується обладнання з матовою поверхнею. Захисні козирки та жалюзі встановлені на вікнах, щоб захистити очі від прямого сонячного світла або штучного освітлення. Система вимикачів дозволяє регулювати інтенсивність штучного освітлення в залежності від природного освітлення та освітлювати тільки ті зони приміщення, які необхідні для роботи. Для забезпечення відповідного рівня освітленості важливо максимально використовувати доступне природне освітлення, регулярно очищати вікна від бруду та вчасно замінювати випалені лампи.

#### 7.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Норми шумового навантаження на працівника в процесі дослідження наведені в табл. 7.5.

Таблиця 7.5 - 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

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

### 7.2.5 Виробничі випромінювання

Сучасна комп'ютерна техніка є високоефективною та споживає невелику кількість електроенергії, зазвичай в діапазоні від 200 до 250 Вт. Вона включає в себе різні електро- та радіоелектронні пристрої, які працюють на різних фізичних принципах. Важливо враховувати, що ця техніка створює електричні та магнітні поля з різним частотним спектром та просторовим розподілом навколо себе. Крім того, на робочому місці з комп'ютерною технікою можуть існувати інші потенційно шкідливі фактори, такі як електромагнітне випромінювання в радіочастотному діапазоні та електромагнітні поля, що генеруються іншими джерелами. Ці фактори можуть впливати на здоров'я працівників і, отже, вимагають належних заходів безпеки та контролю. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівників наведені в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м <sup>2</sup>
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	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 ВВ/м

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

### 7.2.6 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час розробки та дослідження безпроводної системи та мережі із використанням 6G технологій здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни;

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 5-75%;

Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6год.

Навантаження на голосовий апарат ( протягом тижня) – від 16 до 20.



Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

Тривалість робочого дня – 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

### 7.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Запобігання пожежам є пріоритетним завданням, і для цього необхідно усунути можливість утворення горючих або вибухонебезпечних середовищ та джерел запалювання. На підприємстві необхідно прийняти ефективні заходи з пожежної безпеки, які допоможуть знизити ризики для людей і обмежити матеріальні збитки у разі пожежі. Забезпечення пожежної безпеки об'єкта включає в себе систему запобігання пожежам, систему протипожежного захисту і організаційно-технічні заходи.

Основна мета пожежної безпеки полягає в тому, щоб відповідати нормативним вимогам та запобігати виникненню пожеж. У разі виникнення пожежі, метою є обмеження поширення вогню, вчасне виявлення та загашення пожежі, а також захист людей і матеріальних цінностей. Зазначене приміщення класифікується як категорія "Д".

Варто відмітити, що пожежна безпека є важливою складовою безпеки на робочому місці, і вона повинна бути серйозною перевіреною та врахована в усіх аспектах діяльності підприємства.

### 7.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

У приміщенні існують фактори, які можуть спричинити пожежу. Серед них:

- перевантаження електромережі та перегрів струмоведучих частин і з'єднань;
- порушення правил експлуатації технічного обладнання;
- недостатня електрична безпека, така як перевантаження електричних мереж і недостатнє заземлення, що може спричинити перегрів і коротке замикання;
- порушення правил використання електроприладів, наприклад, неправильне підключення або залишення увімкненими приладів без нагляду;
- несправність електричного обладнання, включаючи пошкоджену ізоляцію, старі та зношені кабелі, дефекти в електричних приладах.

Система запобігання пожежі передбачає наступні заходи:

- регулярна перевірка цілісності ізоляції;
- наявність спеціально відведених місць для куріння;
- проведення періодичних навчань та інструктажів з протипожежної безпеки;
- уникання накопичення горючих матеріалів у приміщенні;
- встановлення системи захисту від атмосферних розрядів.

Ці заходи мають на меті зменшити ризик пожежі, зберегти безпеку людей і майна, а також забезпечити відповідність нормам протипожежної безпеки.

### 7.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Згідно з ДБН В.2.5-56:2014, системи протипожежного захисту для офісних приміщень можуть включати в себе різноманітні компоненти та підсистеми з метою забезпечення найвищого рівня захисту від пожеж та інших надзвичайних ситуацій. Розглянемо ці компоненти докладніше:

1. Автоматичні системи пожежогасіння: включають різні види систем, такі як водяні, пінні, аерозольні, газові, порошкові, локального застосування. Ці системи автоматично виявляють пожежу та подають гасіння, знижуючи ризик поширення пожежі.

2. Системи пожежної сигналізації: вони призначені для раннього виявлення пожежі або диму. Це включає датчики диму та тепла, мануальні вимикачі, індикатори та системи оповіщення персоналу.

3. Системи оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей: ці системи включають в себе динамічні оповіщувачі, світлові сигнали, динамічні плани евакуації, а також засоби комунікації для організації та керування евакуацією персоналу.

4. Системи протидимного захисту: дим виникає під час пожежі і може створити значні труднощі для евакуації та рятувальних операцій. Системи протидимного захисту включають вентиляцію, димовідведення та димосмоктування, які допомагають контролювати та видаляти дим з будівлі.

5. Системи передавання тривожних сповіщень: ці системи дозволяють автоматично повідомляти служби пожежної безпеки та інших рятувальних служб про пожежу чи іншу надзвичайну ситуацію. Вони також можуть включати системи автоматичного виклику.

Ці компоненти працюють разом для створення комплексної системи протипожежного захисту, яка забезпечує вчасне виявлення, гасіння та евакуацію в разі пожежі або іншої надзвичайної ситуації в офісних приміщеннях.

Несправності пожежної техніки слід повідомляти пожежній охороні. В приміщенні розташований один порошковий вогнегасник ПВ-3, який буде розміщуватись на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника, знаходитися на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Для позначення місцезнаходження вогнегасника буде встановлений вказівний знак, який розташовують на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 м від рівня підлоги.



## ВИСНОВКИ

Виконано дослідження ключових тенденцій розвитку мобільних мереж із високочастотним діапазоном (THz). Визначено перспективи використання міліметрового та терагерцового діапазонів для мобільного зв'язку. Проаналізовано властивості THz-зв'язку, включаючи обмеження та можливості передачі даних в цих діапазонах.

Досліджено методи створення інтелектуальних, безпечних та ефективних мереж 6G із використанням методів машинного навчання для оптимізації мереж 6G. Разом з тим виконано дослідження алгоритмів для автоматизації мережевих процесів та управління ресурсами.

Розглянуто особливості розроблення архітектури мобільних систем і мереж 6G. Створення гнучкої та енергоефективної архітектури для мереж 6G. Розробку інтелектуальних інтерфейсів та систем автоматизації для кращого взаємодії з користувачами та підтримки нових сервісів.

Визначено методи та вимоги впровадження мереж радіодоступу в майбутніх системах 6G. Виконані дослідження визначають напрямки розвитку технологій 6G та створюють основу для подальших інновацій у безпроводних системах та мережах.

Соціальні та технологічні тенденції, передбачені суспільством 2030 року, підкреслюють обмеження існуючих мобільних мереж 5G. Зважаючи на різноманітні вимоги гіперзв'язного світу 2030 року, передбачається нова мережева парадигма, яка сприятиме розвитку нових додатків. Ці додатки вимагають від мереж 6G надзвичайної швидкості передачі даних, надзвичайно низьких затримок, надзвичайної надійності і доступності, масової масштабованості, надзвичайної енергоефективності і надзвичайної мобільності. Реалізація цього бачення 6G вимагає використання нових мережевих архітектур, мережевого інтелекту та інших технологій, які, як передбачається, сприятимуть впровадженню 6G. Ці технології, які все ще перебувають на стадії розробки,

повинні бути повністю розроблені та стандартизовані для реалізації 6G у 2030 році.

Здійснено далекоглядний погляд на теперішній та майбутній розвиток 6G. Зокрема визначено безліч аспектів 6G, включаючи те, якими будуть вимоги до 6G, і як будувати різні архітектури для спільної роботи. Також відображено технологію 6G, яка зачіпає багато цікавих технічних аспектів, таких як софтверізація інтелектуальних мереж, відкрита мережа радіодоступу (RAN), безпека, конфіденційність і довіра, гармонізована мобільна мережа, а також правові погляди, включаючи ініціативи щодо стандартів. Розглянуто особливості проектування інтелектуальних, "розумних" і автономних телекомунікаційних мереж. Здійснено дослідження особливостей застосування 6G, включаючи розумні міста і суспільство 5.0, майбутню охорону здоров'я і промисловість 5.0, а також захоплюючі дикі застосування 6G, такі як метaprостір, глибоководні дослідження і космічний туризм.

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

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М. Васильківський, Г. Варгатюк, і О. Болдирева, «Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G», ВОТТП, вип. 4, с. 62–70, Груд 2022.
2. Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52\\_](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52_)
3. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>
4. Z. Na, Y. Liu, J. Shi, C. Liu, and Z. Gao, “UAV-supported clustered NOMA for 6G-enabled Internet of Things: Trajectory planning and resource allocation,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 20, pp. 15 041–15 048, 2021.
5. K. K. Munasinghe, M. N. Dharmaweera, U. L. Wijewardhana, C. De Alwis, and R. Parthiban, “Joint minimization of spectrum and power in impairment-aware elastic optical networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43 349–43 363, 2021.
6. S. Nayak and R. Patgiri, “6G communication technology: A vision on intelligent healthcare,” in *Health Informatics: A Computational Perspective in Healthcare*. Springer, 2021, pp. 1–18.
7. C. De Alwis, Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W.-J., and Liyanage, M., “Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836–886, 2021.
8. M. Alsenwi, N. H. Tran, M. Bennis, S. R. Pandey, A. K. Bairagi, and C. S. Hong, “Intelligent resource slicing for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond: A deep reinforcement learning based approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, pp. 4585–4600, 2021.

9. N.-N. Dao, Q.-V. Pham, N. H. Tu, T. T. Thanh, V. N. Q. Bao, D. S. Lakew, and S. Cho, "Survey on aerial radio access networks: Toward a comprehensive 6G access infrastructure," *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1193–1225, 2021.

10. D. C. Nguyen, M. Ding, Q.-V. Pham, P. N. Pathirana, L. B. Le, A. Seneviratne, J. Li, D. Niyato, and H. V. Poor, "Federated learning meets blockchain in edge computing: Opportunities and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 16, pp. 12 806–12 825, 2021.

11. М. Васильківський, О. Городецька, О. Стальченко, Б. Климчук «Підвищення ефективності інтелектуальних мереж МІМО на основі 6G», Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>

12. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будащ, М. (2023). Оптимальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки.* – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55. doi: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-48-55

13. Y. Qiao, M. Zhang, Y. Zhou, X. Kong, H. Zhang, J. Bi, M. Xu, and J. Wang, "NetEC: Accelerating erasure coding reconstruction with in-network aggregation," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 33, pp. 2571–2583, 2022.

14. Q.-V. Pham, R. Ruby, F. Fang, D. C. Nguyen, Z. Yang, M. Le, Z. Ding, and W.-J. Hwang, "Aerial computing: A new computing paradigm, applications, and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 8339–8363, 2022.

15. J. Prados-Garzon and T. Taleb, "Asynchronous time-sensitive networking for 5G backhauling," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 144–151, 2021.

16. C. Benzaid, T. Taleb, and M. Z. Farooqi, "Trust in 5G and beyond networks," *IEEE Network*, vol. 35, pp. 212–222, 2021.



17. Q. Duan, "Intelligent and autonomous management in cloud-native future networks—a survey on related standards from an architectural perspective," *Future Internet*, vol. 13, no. 2, p. 42, 2021.
18. A. Boudi, M. Bagaa, P. Pöyhönen, T. Taleb, and H. Flinck, "AI-based resource management in beyond 5G cloud native environment," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 128–135, 2021.
19. K. Dev, R. K. Poluru, L. Kumar, P. K. R. Maddikunta, and S. A. Khowaja, "Optimal radius for enhanced lifetime in IoT using hybridization of rider and grey wolf optimization," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 5, pp. 635–644, 2021.
20. T. R. Gadekallu, Q.-V. Pham, D. C. Nguyen, P. K. R. Maddikunta, N. Deepa, B. Prabadevi, P. N. Pathirana, J. Zhao, and W.-J. Hwang, "Blockchain for edge of things: Applications, opportunities, and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 964–988, 2022.
21. D. C. Nguyen, Q.-V. Pham, P. N. Pathirana, M. Ding, A. Seneviratne, Z. Lin, O. Dobre, and W.-J. Hwang, "Federated learning for smart healthcare: A survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 55, no. 3, pp. 1–37, 2022.
22. T. Huynh-The, Q.-V. Pham, T.-V. Nguyen, and D.-S. Kim, "Deep learning for coexistence radar-communication waveform recognition," in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) IEEE*, 2021, pp. 1725–1727.
23. Q.-V. Pham, N. T. Nguyen, T. Huynh-The, L. B. Le, K. Lee, and W.-J. Hwang, "Intelligent radio signal processing: A survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 83 818–83 850, 2021.
24. S. Maghsudi and M. Davy, "Computational models of human decision-making with application to the internet of everything," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 152–159, 2021.
25. X. Shen, J. Gao, W. Wu, M. Li, C. Zhou, and W. Zhuang, "Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G," *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 24, pp. 1–30, 2022.

26. D. C. Nguyen, M. Ding, P. N. Pathirana, A. Seneviratne, J. Li, D. Niyato, O. Dobre, and H. V. Poor, "6G Internet of Things: A comprehensive survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 359–383, 2021.
27. S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Survey on network slicing for Internet of Things realization in 5G networks," *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 957–994, 2021.
28. A. Garcia-Saavedra and X. Costa-Perez, "O-RAN: Disrupting the virtualized ran ecosystem," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, pp. 96–103, 2021.
29. A. S. Abdalla, P. S. Upadhyaya, V. K. Shah, and V. Marojevic, "Toward Next Generation open Radio Access Network—What O-RAN Can and Cannot Do!" *arXiv preprint arXiv:2111.13754*, 2021.
30. L. Bonati, S. D'Oro, M. Polese, S. Basagni, and T. Melodia, "Intelligence and learning in O-RAN for data-driven NextG cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 10, pp. 21–27, 2021.
31. P. Porambage, G. Gür, D. P. M. Osorio, M. Liyanage, and M. Ylianttila, "6G security challenges and potential solutions," in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications (EuCNC) and 6G Summit IEEE*, 2021, pp. 1–6.
32. Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylianttila, "AI and 6G security: Opportunities and challenges," in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications (EuCNC) and 6G Summit. IEEE*, 2021, pp. 1–6.
33. S. Li, S. Zhao, G. Min, L. Qi, and G. Liu, "Lightweight privacy-preserving scheme using homomorphic encryption in industrial Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, pp. 14542–14550, 2021.
34. M. Bloch, O. Günlü, A. Yener, F. Oggier, H. V. Poor, L. Sankar, and R. F. Schaefer, "An overview of information-theoretic security and privacy: Metrics, limits and applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*, vol. 2, no. 1, pp. 5–22, 2021.
35. Q. Huang, M. Lin, W.-P. Zhu, J. Cheng, and M.-S. Alouini, "Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 4, pp. 2413–2426, 2021.

36. X. Wu, M. D. Soltani, L. Zhou, M. Safari, and H. Haas, “Hybrid LiFi and WiFi networks: A survey,” *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1398–1420, 2021.
37. S. Szott, K. Kosek-Szott, P. Gawłowicz, J. T. Gómez, B. Bellalta, A. Zubow, and F. Dressler, “WiFi Meets ML: A Survey on Improving IEEE 802.11 Performance with Machine Learning,” *arXiv preprint arXiv:2109.04786*, 2021.
38. R. Xie, Q. Tang, S. Qiao, H. Zhu, F. R. Yu, and T. Huang, “When serverless computing meets edge computing: Architecture, challenges, and open issues,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 5, pp. 126–133, 2021.
39. M. S. Alam, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, P. Zhu, and N. D. Dào, “High altitude platform station based super macro base station constellations,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 103–109, 2021.
40. G. K. Kurt, M. G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. Darwish, M. S. Alam, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future,” *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 729–779, 2021.
41. P. K. R. Maddikunta, S. Hakak, M. Alazab, S. Bhattacharya, T. R. Gadekallu, W. Z. Khan, and Q.-V. Pham, “Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: Applications, requirements, and challenges,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 16, pp. 17 608–17 619, 2021.
42. V. Jamali, H. Ajam, M. Najafi, B. Schmauss, R. Schober, and H. V. Poor, “Intelligent reflecting surface assisted free-space optical communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 10, pp. 57–63, 2021.
43. L. Wei, S. Zhao, O. F. Bourahla, X. Li, F. Wu, Y. Zhuang, J. Han, and M. Xu, “End-to-end video saliency detection via a deep contextual spatiotemporal network,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 1691–1702, 2021.
44. S. Wang, M. A. Qureshi, L. Miralles-Pechuaán, T. Huynh-The, T. R. Gadekallu, and M. Liyanage, “Explainable AI for B5G/6G: Technical aspects, use cases, and research challenges,” *arXiv preprint arXiv:2112.04698*, 2021.

45. N. Deepa, Q.-V. Pham, D. C. Nguyen, S. Bhattacharya, B. Prabadevi, T. R. Gadekallu, P. K. R. Maddikunta, F. Fang, and P. N. Pathirana, "A survey on blockchain for big data: Approaches, opportunities, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 131, pp. 209–226, 2022.

46. P. Kumar, R. Kumar, G. Srivastava, G. P. Gupta, R. Tripathi, T. R. Gadekallu, and N. Xiong, "PPSF: A privacy-preserving and secure framework using blockchain-based machine-learning for IoT-driven smart cities," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 2326–2341, 2021.

47. A. Gohar and G. Nencioni, "The role of 5G technologies in a smart city: The case for intelligent transportation system," *Sustainability*, vol. 13, no. 9, p. 5188, 2021.

48. T. R. Gadekallu, Q.-V. Pham, T. Huynh-The, S. Bhattacharya, P. K. R. Maddikunta, and M. Liyanage, "Federated Learning for Big Data: A Survey on Opportunities, Applications, and Future Directions," *arXiv preprint arXiv:2110.04160*, 2021.

49. S. A. A. Abir, A. Anwar, J. Choi, and A. Kayes, "IoT-enabled smart energy grid: Applications and challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50 961–50 981, 2021.

50. Y. Liu, X. Yang, W. Wen, and M. Xia, "Smarter grid in the 5G era: Integrating power Internet of Things with cyber physical system," *Frontiers in Communications and Networks*, vol. 2, p. 23, 2021.

51. A. K. Bashir, S. Khan, B. Prabadevi, N. Deepa, W. S. Alnumay, T. R. Gadekallu, and P. K. R. Maddikunta, "Comparative analysis of machine learning algorithms for prediction of smart grid stability," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, p. e12706, 2021.

52. Z. Yan and H. Wen, "Electricity theft detection base on extreme gradient boosting in AMI," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–9, 2021.

53. I. Taboada and H. Shee, "Understanding 5G technology for future supply chain management," *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 24, no. 4, pp. 392–406, 2021.

54. V. Priya, I. S. Thaseen, T. R. Gadekallu, M. K. Aboudaif, and E. A. Nasr, “Robust attack detection approach for IIoT using ensemble classifier,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 66, no. 3, pp. 2457–2470, 2021.

55. M. Azeem, A. Haleem, and M. Javaid, “Symbiotic relationship between machine learning and industry 4.0: A review,” *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 6, p. 2130002, 2021.

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

57. 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](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)

58. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.

59. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>

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

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

62. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>

63. 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\\_praop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php)

64. 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](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

65. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Київ Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України 2019

## ДОДАТКИ

Додаток А  
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА  
БЕЗПРОВІДНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ 6G  
ТЕХНОЛОГІЙ  
назва магістерської кваліфікаційної роботи



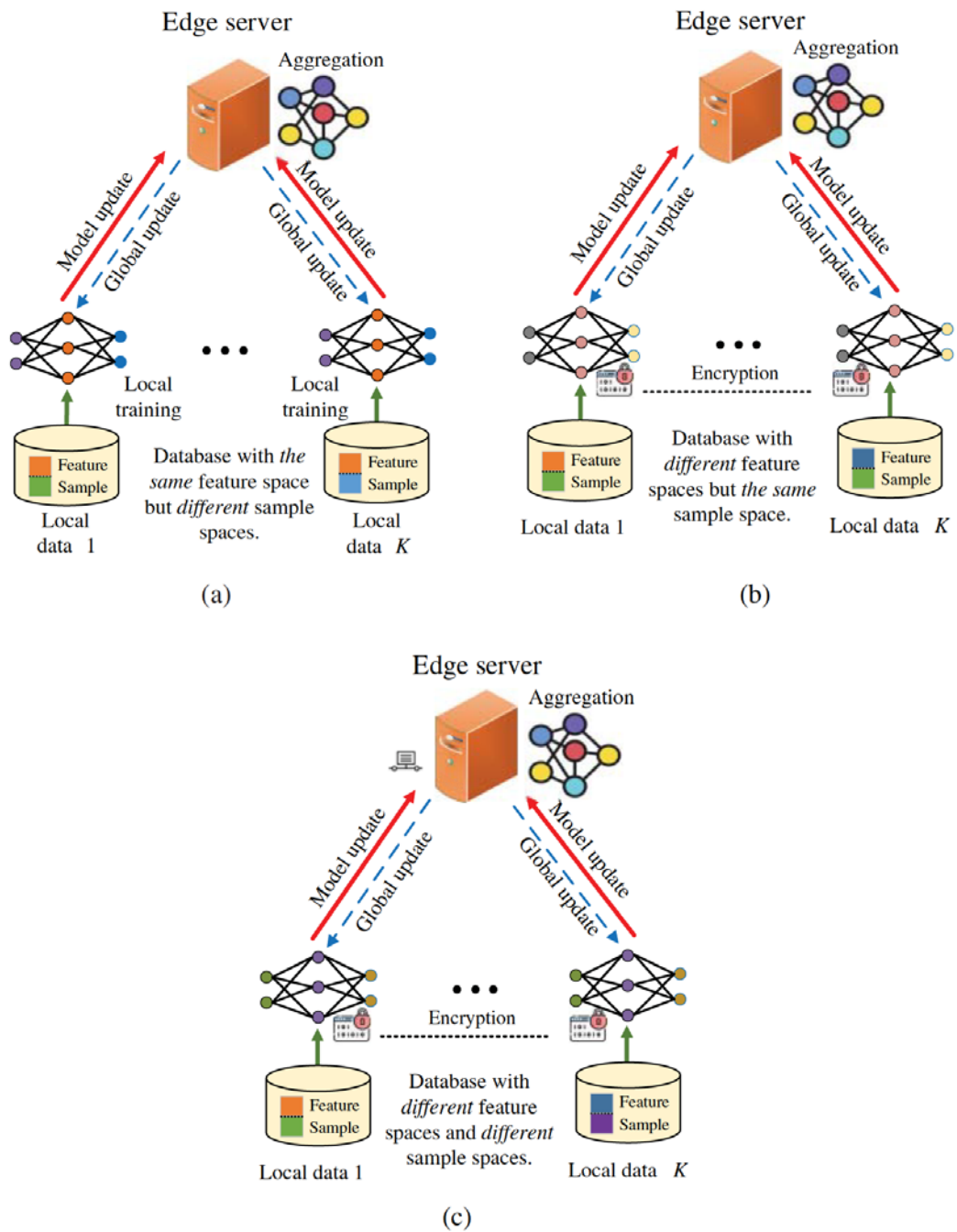


Рисунок 1 – Алгоритм федеративного навчання моделі безпроводної системи

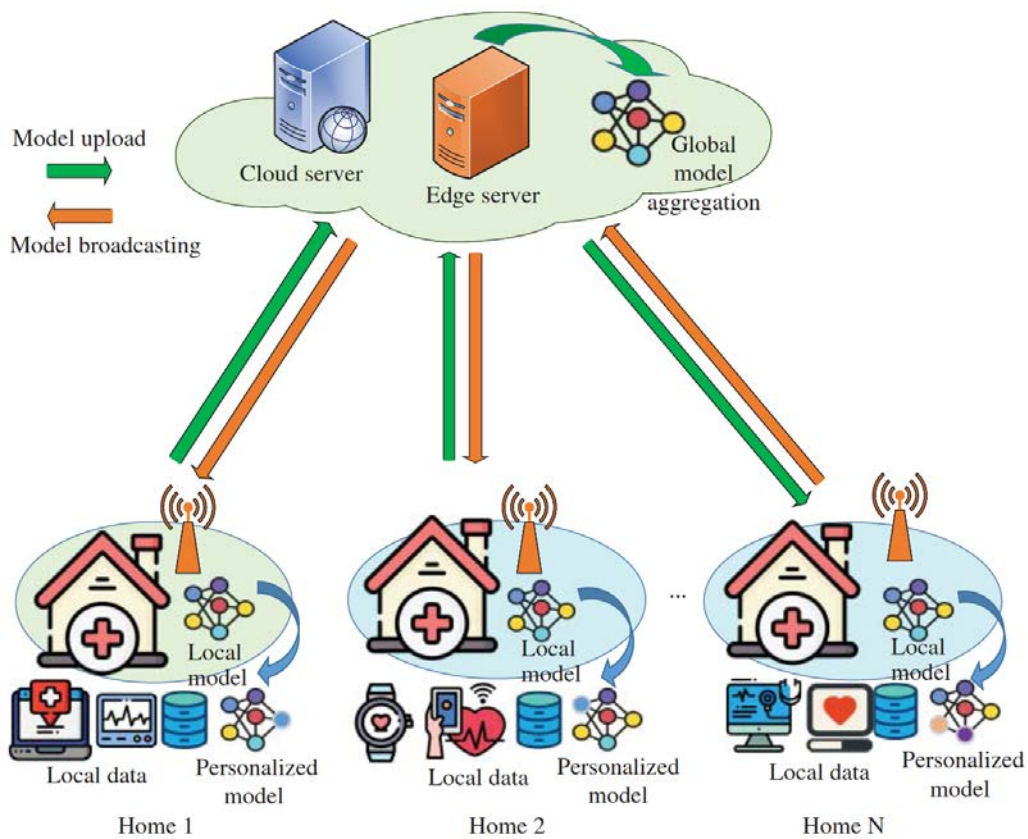


Рисунок 2 – Оптимізація інтелектуальної мережі IoT з периферійним навчанням

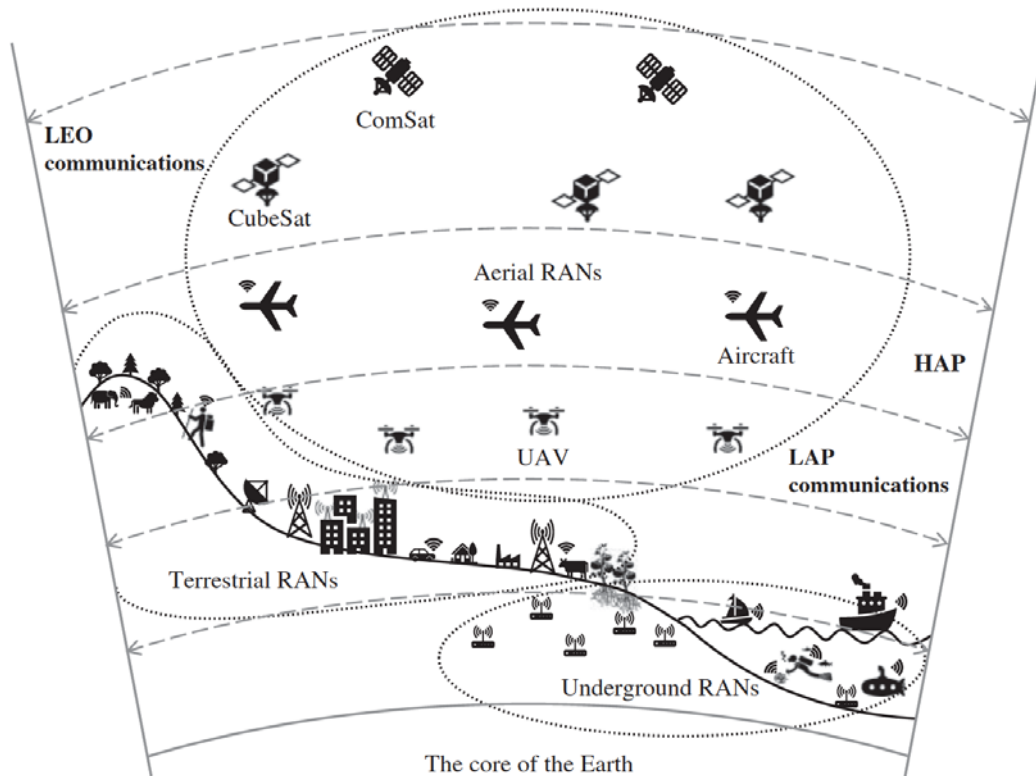


Рисунок 3 – Топологія безпроводної літаючої мережі доступу 6G

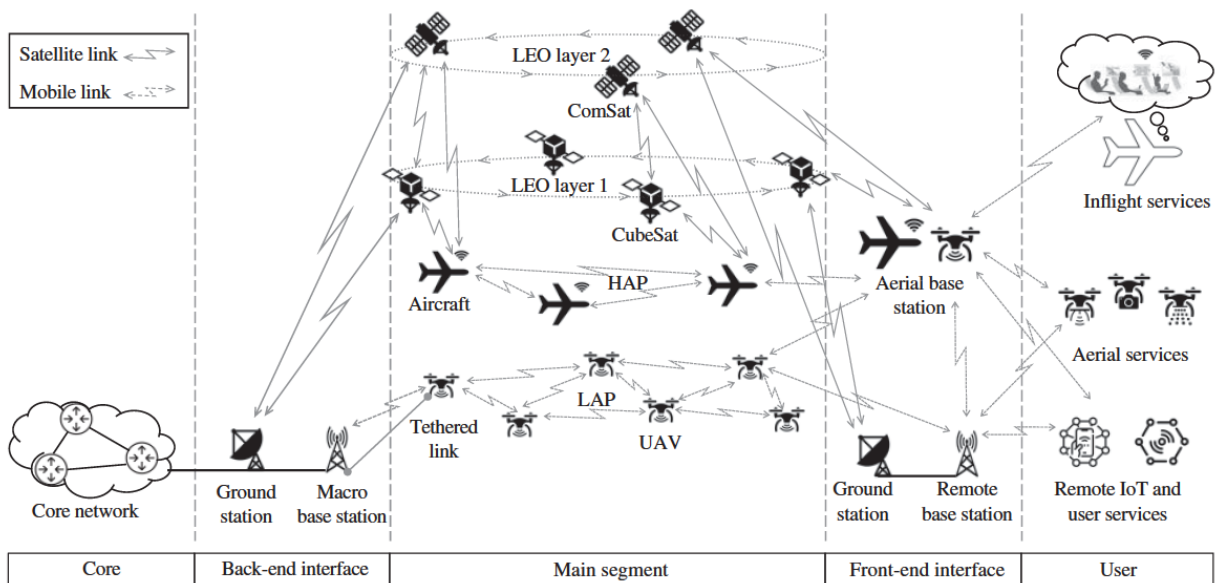


Рисунок 4 - Архітектура літаючої безпроводної системи доступу

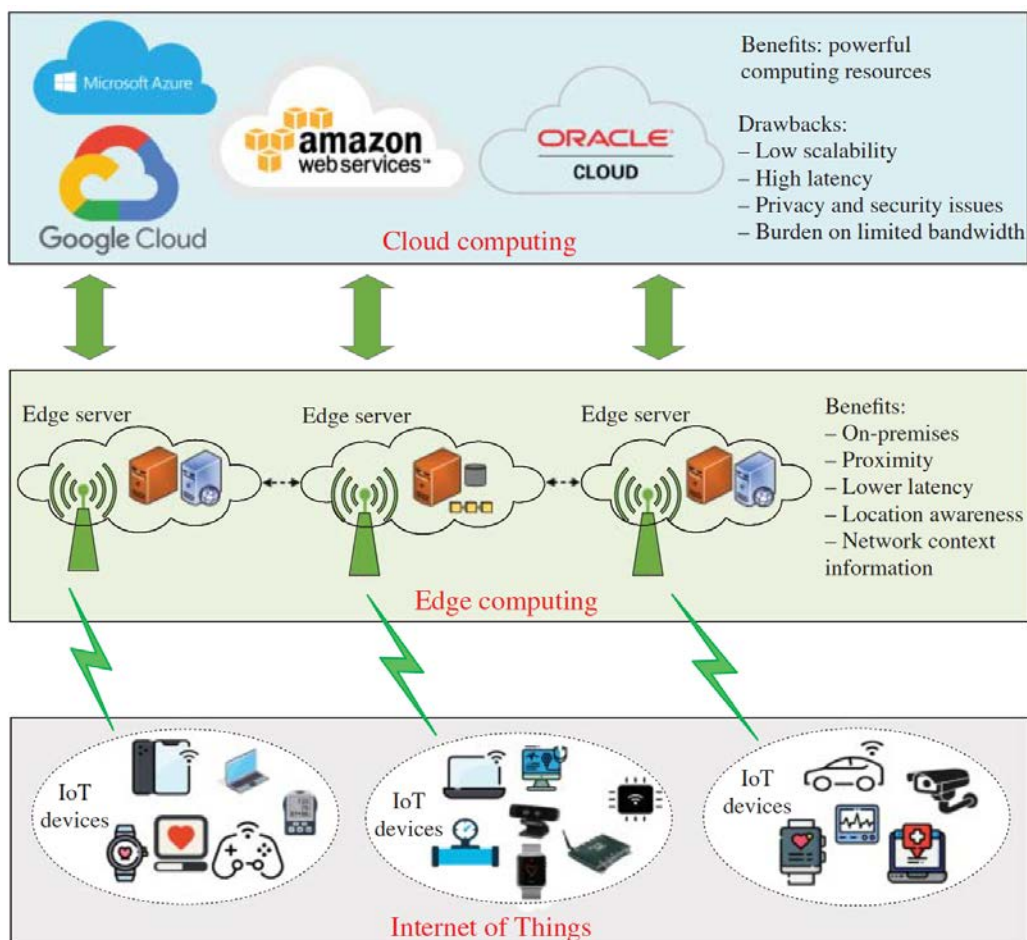


Рисунок 5 - Архітектура тривірневої обчислювальної інфраструктури інтелектуальної мережі IoT

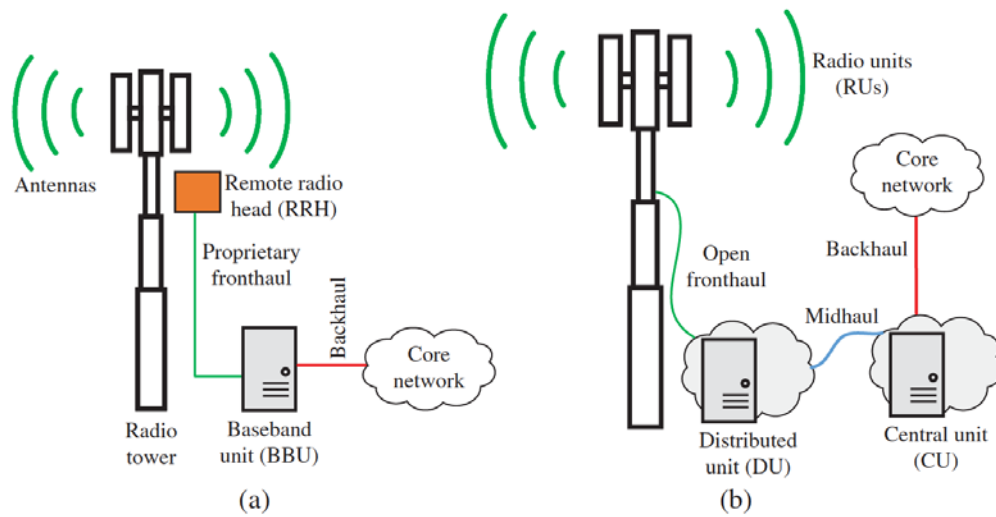


Рисунок 6 - Узагальнена архітектура традиційного RAN та O-RAN

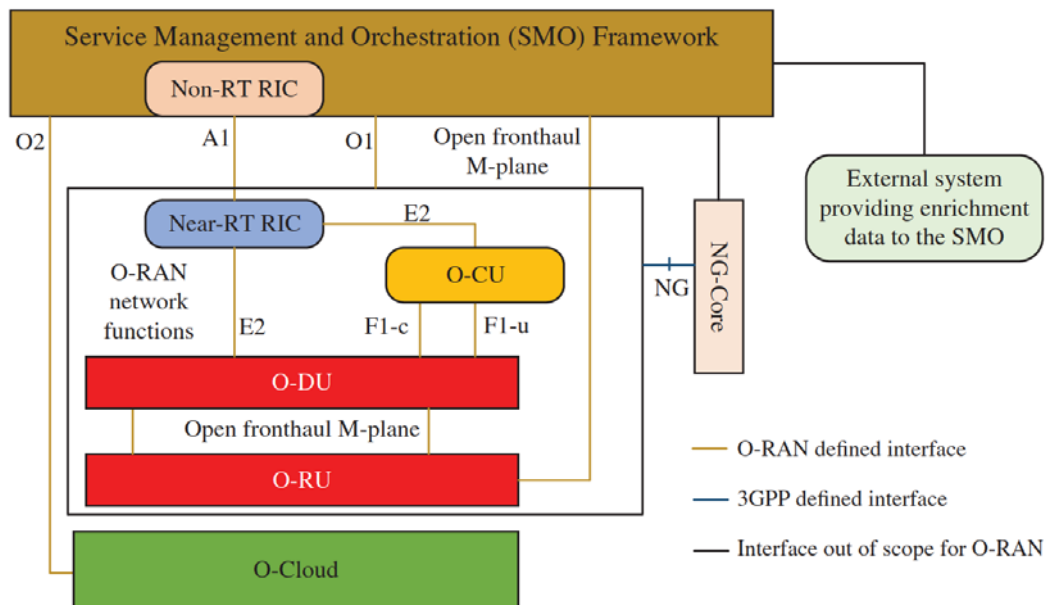


Рисунок 7 - Архітектура високого рівня O-RAN

Додаток Б  
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень



ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Безпроводні системи та мережі із використанням 6G технологій

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

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

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 99,36 % Схожість 0,64 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

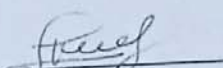
1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

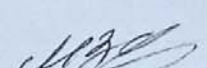
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

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

Особа відповідальна за перевірку  Васильківський М.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

Автор роботи  Крещенко М.С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Васильківський М.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)