

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ТРАФІКОМ ІОТ-ПРИСТРОЇВ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ»

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

за спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Ярослав КУЛІШЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти гр.ІСД-42

Ярослав КУЛІШЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

к.т.н.

Олег СЕНЬКОВ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2026

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК

“_____” _____ 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Кулішєнка Ярослава Валерійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Модель управління ресурсами та трафіком IoT-пристроїв у мобільних мережах п'ятого покоління
керівник кваліфікаційної роботи Олег СЕНЬКОВ к.т.н.

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “20” лютого 2026 р. № 51

2. Строк подання кваліфікаційної роботи “01” червня 2026 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Архітектура мережі;
2. Модель управління ресурсами;
3. IoT-мережа;
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку IoT у бездротових мережах 5G.
2. Аналіз концепцій 5G та IoT, їх архітектури і технологій.
3. Дослідження ефективності агрегації трафіку та розподілу радіоресурсів IoT у мережах 5G.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання “20” лютого 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір технічної літератури	24.02.26-03.03.26	
2.	Огляд сучасного стану і перспектив розвитку IoT у бездротових мережах 5G.	04.03.26-17.03.26	
3.	Аналіз концепцій 5G та IoT, їх архітектури і технологій	18.03.26-31.03.26	
4.	Дослідження ефективності агрегації трафіку та розподілу радіоресурсів IoT у мережах 5G	01.04.26-24.04.26	
5.	Оцінка результатів роботи, розробка висновків.	25.04.26-16.05.26	
6.	Формування демонстраційних матеріалів та доповіді	19.05.26-20.05.26	
7.	Оформлення роботи	21.05.26-30.05.26	

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Ярослав КУЛІШЕНКО

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Олег СЕНЬКОВ

(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступня бакалавр: 75 стор., 67 рис., 4 табл., 33 джерел.

Мета роботи - підвищення ефективності управління трафіком та радіоресурсами IoT-пристроїв у мережах 5G.

Об'єкт дослідження – процес передачі та обробки трафіку даних пристроїв Інтернету речей у мобільних мережах 5G.

Предмет дослідження – методи агрегації трафіку даних та алгоритми розподілу радіоресурсів у мережах 5G

Короткий зміст роботи. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку Інтернету речей у мережах 5G, досліджено динаміку зростання IoT-трафіку та визначено його основні особливості. Проаналізовано особливості інтеграції IoT у мережі 5G. У другому розділі розглянуто архітектуру протоколів 5G та ключові технології функціонування мереж нового покоління. Проаналізовано гетерогенні та малі стільникові мережі, а також принципи інтеграції IoT у 5G. Окрему увагу приділено архітектурі IoT, технологіям обміну даними та інструментам мережевого моделювання.

Практична частина присвячена дослідженню модель агрегації трафіку IoT у мережах 5G та запропоновано схему розподілу радіоресурсів на основі мережевої сегментації. Розглянуто роботу релейних вузлів, агрегацію на рівні PDCP і динамічний розподіл PRB з урахуванням пріоритетів сервісів. Проведено моделювання в OPNET та оцінено вплив рішень на пропускну здатність, затримку і використання ресурсів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МЕРЕЖА, 5G, СЕГМЕНТАЦІЯ, АРХІТЕКТУРА, ПЛАТФОРМА, РЕСУРС, ЧАСТОТА, АРХІТЕКТУРА, LoRaWAN, ПРОТОКОЛ, ТЕХНОЛОГІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІОТ У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ 5G.....	10
1.1 Дослідження та оцінка динаміки зростання ІоТ-трафіку в бездротових мережах.....	10
1.2 Розмір та прогнози ринку бездротового зв'язку 5G.....	15
1.3 Технології для реалізації рішень ІоТ.....	20
1.4 Інтеграція застосунків Інтернету речей у мережі 5G.....	22
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЇ 5G І ІОТ: АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНОЛОГІЇ.....	27
2.1 Огляд архітектури протоколів 5G.....	27
2.2 Аналіз технологій забезпечення 5G.....	29
2.3 Гетерогенні мережі та розгортання малих стільникових мереж.....	35
2.4 Мережева структура та технології обміну даними в ІоТ.....	39
2.5 Інструменти мережевого моделювання.....	45
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ АГРЕГАЦІЇ ТРАФІКУ ДАНИХ ТА СХЕМА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ІОТ-МЕРЕЖАХ 5G.....	49
3.1 Мобільні мережі 5G як платформа підтримки інтелектуальних систем.....	49
3.2 Релейні вузли на базі інфраструктури (RN).....	51
3.3 Модель агрегації трафіку даних.....	54
3.4 Моделі та стратегія розподілу ресурсів.....	57
3.5 Варіанти використання розподілу послуг.....	61
3.6 Методика моделювання та аналіз результатів.....	64
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	83
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	86

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному етапі розвитку інформаційно-комунікаційних технологій вагоме значення набуває концепція Інтернету речей (IoT), яка передбачає об'єднання великої кількості різномірних пристроїв, сенсорів та систем у єдине інформаційно-комунікаційне середовище. Стрімке зростання кількості підключених пристроїв, а також обсягів трафіку, що ними генерується, обумовлює необхідність модернізації існуючої телекомунікаційної інфраструктури та впровадження інноваційних технологічних рішень.

Актуальність дослідження визначається тим, що традиційні мережі зв'язку не в повній мірі відповідають сучасним вимогам IoT-застосунків, зокрема щодо забезпечення масштабованості, енергоефективності, низьких затримок та достатньої пропускну здатності. У цьому контексті впровадження мереж п'ятого покоління (5G) створює принципово нові можливості для функціонування масових IoT-сервісів завдяки підтримці наднадійного зв'язку з малою затримкою, високої щільності підключень і гнучкого розподілу мережевих ресурсів.

Отже, дослідження сучасного стану, характеристик трафіку та перспектив розвитку Інтернету речей у бездротових мережах 5G є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме створенню ефективних, масштабованих і енергоощадних телекомунікаційних систем майбутнього.

Мета роботи - підвищення ефективності управління трафіком та радіоресурсами IoT-пристроїв у мережах 5G.

Для досягнення мети, у бакалаврській роботі успішно виконано наступні завдання:

1. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку IoT у бездротових мережах 5G.
2. Аналіз концепцій 5G та IoT, їх архітектури і технологій.
3. Дослідження ефективності агрегації трафіку та розподілу радіоресурсів IoT у мережах 5G.

Об'єкт дослідження – процес передачі та обробки трафіку даних пристроїв Інтернету речей у мобільних мережах 5G.

Предмет дослідження – методи агрегації трафіку даних та алгоритми розподілу радіоресурсів у мережах 5G.

Методи дослідження. У процесі виконання бакалаврської роботи було застосовано методи теоретичних досліджень, методи математичного та імітаційного моделювання, методи комп'ютерного моделювання, методи порівняльного аналізу, статистичні методи обробки результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає у вдосконаленні моделі агрегації трафіку IoT у мережах 5G та реалізації схеми розподілу радіоресурсів на основі мережевої сегментації з урахуванням пріоритетів сервісів, що забезпечує підвищення ефективності використання ресурсів і зменшення затримок.

Практична значущість одержаних результатів. Досліджені рішення можуть бути використані для оптимізації управління трафіком і радіоресурсами в мережах 5G, а також при проєктуванні IoT-систем для підвищення якості обслуговування та ефективності використання мережевих ресурсів.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІОТ У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ 5G

1.1 Дослідження та оцінка динаміки зростання ІоТ-трафіку в бездротових мережах

Інтернет речей (ІоТ) є одним із ключових напрямів розвитку сучасних мобільних телекомунікацій і важливим етапом переходу до мереж п'ятого покоління New Radio. Основна ідея ІоТ полягає у підключенні до мережі Інтернет різноманітних пристроїв, зокрема сенсорів і датчиків, які періодично передають результати вимірювань різних параметрів. На сьогодні реалізація передачі даних у ІоТ переважно здійснюється на базі існуючих мереж четвертого покоління LTE у двох основних варіантах: Narrowband ІоТ (NB-ІоТ) та LTE-M.

Хоча вузькосмугові ІоТ-мережі не завжди розглядаються як найбільш масовий сегмент, вони відіграють важливу роль у забезпеченні підключення пристроїв у різних галузях економіки. Такі рішення дозволяють реалізовувати широкий спектр застосувань, які складно або неможливо впровадити за допомогою інших типів бездротового зв'язку [1].

Слід зазначити, що зазначені технології не є повністю самостійними стандартами, а представляють собою модифікацію існуючих систем стільникового зв'язку, адаптованих до потреб малопотужних пристроїв. Такі пристрої, як правило, працюють від батареї та не потребують високої пропускної здатності.

Окрім цього, існує значна кількість (понад десять) різних відкритих і пропрієтарних стандартів вузькосмугових ІоТ-мереж, які функціонують у неліцензованих діапазонах частот. Серед них найбільш поширеними у світі є LoRaWAN та SigFox.

З огляду на перспективи розвитку, оператори зв'язку поступово розширюватимуть спектр своїх послуг, переходячи від надання лише каналів

передачі даних до комплексних рішень, що включають системну інтеграцію та IoT-платформи.

У сучасних мережах зв'язку основний обсяг трафіку формується користувачами мобільних мереж. До найбільш поширених видів належать відеотрафік, передача голосу та різноманітні дані. Саме тому мобільні мережі займають провідні позиції як за кількістю абонентів, так і за обсягами переданого трафіку.

Розвиток сучасних систем передачі сигналів (СПС) спрямований на створення нових поколінь мереж зв'язку, що характеризуються удосконаленням технологічної бази, а також впровадженням нових структурних і організаційних рішень [1, 2]. До ключових особливостей таких мереж належать:

- гетерогенна архітектура;
- значно вища пропускна здатність у порівнянні з існуючими мобільними мережами;
- підтримка прямих з'єднань між пристроями (D2D – Device-to-Device), які можуть реалізовуватися як у ліцензованих, так і в неліцензованих діапазонах;
- використання більш високочастотних ділянок радіочастотного спектра.

Очікується, що мережі п'ятого покоління забезпечать інтеграцію з IP-мережами, яка може бути як повною, так і частковою. Це, у свою чергу, зумовлює появу нових підходів до обслуговування трафіку з урахуванням його специфіки, зокрема впровадження D2D-комунікацій.

Застосування прямих з'єднань між пристроями дозволяє передавати частину трафіку безпосередньо між користувацькими терміналами, обходячи базові станції та інші елементи мережі. Такий підхід отримав назву «вивантаження трафіку». Його використання сприяє зменшенню навантаження на мережеву інфраструктуру та підвищенню ефективності використання ресурсів.

Крім того, застосування неліцензованих частотних діапазонів дає змогу оптимізувати використання радіочастотного ресурсу [3]. У цілому це підвищує ефективність функціонування мережі. D2D-з'єднання можуть використовуватися

як для взаємодії IoT-пристроїв, так і для інших типів терміналів, причому вимоги до ресурсів у таких випадках можуть суттєво відрізнятися як за обсягами переданих даних, так і за рівнем енергоспоживання.

На рис. 1.1 наведено динаміку зміни частки трафіку, що вивантажується з мобільних мереж для сучасних і перспективних систем зв'язку. Прогноз побудовано на основі даних, наведених у [1].

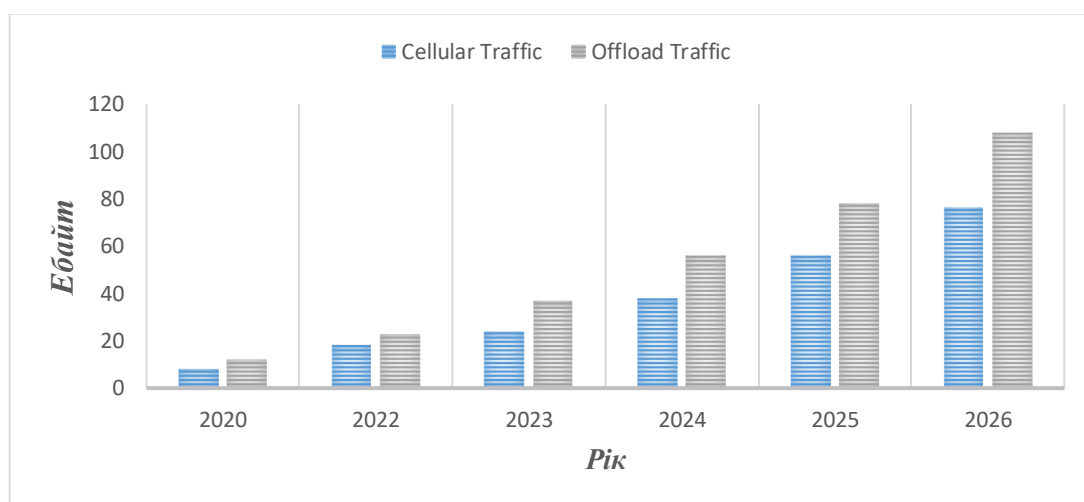


Рис.1.1. Динаміка розвитку і прогноз трафіку МРЗ і обсягу вивантажується трафіку (за даними Cisco)

З аналізу даних, представлених на рис. 1.1, видно, що частка трафіку, який вивантажується з мережі, має стійку тенденцію до зростання і до кінця прогнозованого періоду (2026 рік) перевищує 50% від загального обсягу обслуговуваного трафіку. При цьому зазначений прогноз охоплює всі основні технології, що використовуються в мережах рухомого зв'язку. На рис. 1.2 наведено результати оцінки цієї частки окремо для різних поколінь мобільних мереж.

Отримані дані свідчать, що в мережах п'ятого покоління частка вивантаженого трафіку перевищуватиме 70% від загального обсягу. Це приблизно вдвічі більше порівняно з мережами другого покоління. Така різниця зумовлена насамперед тим, що абонентські пристрої у 5G здатні ефективно взаємодіяти з широким спектром підключених об'єктів і сервісів.

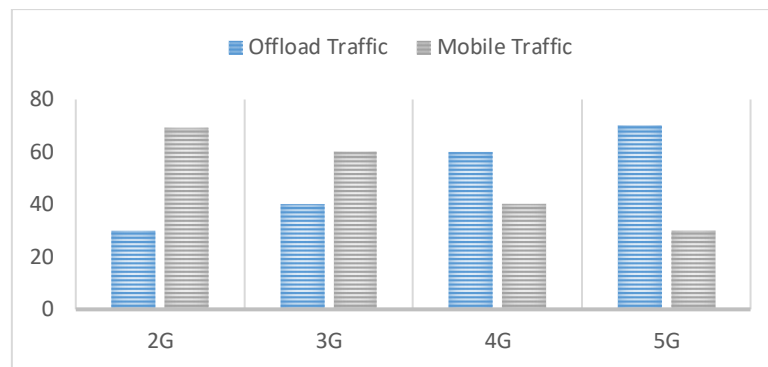


Рис.1.2. Прогноз частки вивантажується трафіку

Прогнозні дані свідчать про зменшення обсягу трафіку, який обслуговується безпосередньо в мережах рухомого зв'язку, що пояснюється активним використанням механізмів вивантаження. Зокрема, це стосується таких сервісів, як передача голосу, мультимедійного контенту та даних, особливо при застосуванні прямих з'єднань типу D2D.

На сьогодні під час побудови більшості IoT-мереж використовуються бездротові стандарти, зокрема NB-IoT, структура яких допускає організацію взаємодії між окремими пристроями. Такі технології потенційно створюють передумови для реалізації D2D-комунікацій і побудови мереж на їх основі [4]. Використання подібних підходів дозволяє суттєво зменшити навантаження на мобільні мережі, особливо в умовах різкого зростання IoT-трафіку.

Частка IoT-трафіку в загальному обсязі переданих даних наразі залишається відносно невеликою. Як показано на рис. 1.3, за прогнозами (на прикладі M2M-взаємодії), до 2022 року вона становить близько 2% від загального трафіку. Хоча це значення не дозволяє віднести IoT до основних джерел навантаження, воно все ж є суттєвим.

Водночас варто враховувати, що наведені оцінки відображають лише усереднені значення і не включають трафік, створюваний, наприклад, системами відеоспостереження. Оскільки межі поняття IoT залишаються нечіткими, такі

пристрої, як камери, також можуть бути віднесені до Інтернету речей. У цьому випадку загальна частка IoT-трафіку може бути значно більшою.

Якщо ж розглядати переважно пристрої телеметрії, обсяг IoT-трафіку дійсно виглядає обмеженим. Проте навіть у цьому випадку можливі ситуації, коли велика кількість підключених пристроїв створює суттєве навантаження на мережу [5]. Це пов'язано як із масштабом розгортання IoT-систем, так і з особливостями їх функціонування.

На відміну від трафіку, що генерується користувачами, IoT-трафік значною мірою залежить від зовнішніх факторів. Це може призводити як до поступових змін його інтенсивності, так і до різких пікових навантажень, що створює ризики перевантаження мереж. Крім того, для IoT характерні інші закономірності формування трафіку, які визначаються специфікою збору даних у системах моніторингу та керування, а не безперервними потоками, типовими для мультимедійних сервісів.

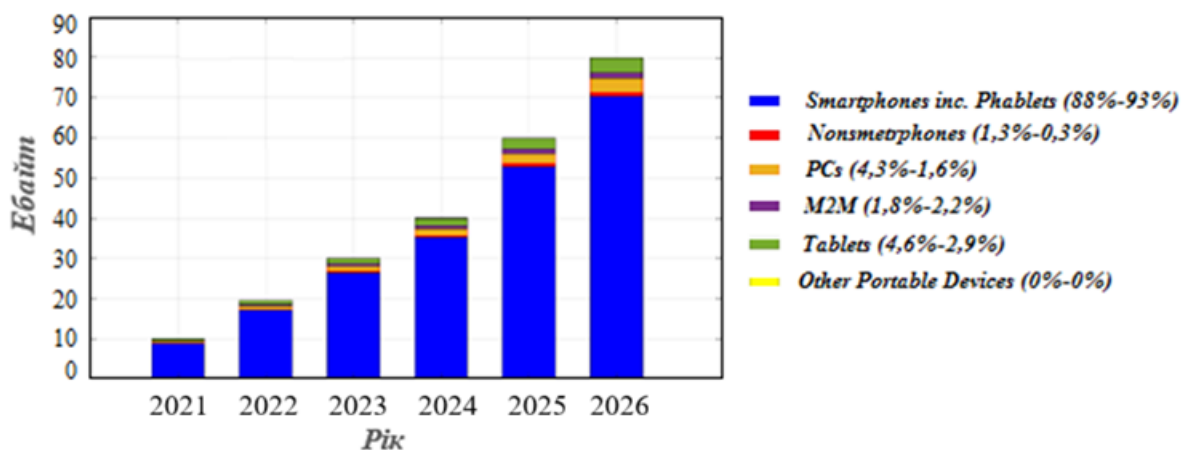


Рис. 1.3. Зміна часток трафіку різних пристроїв (за даними Cisco)

На рис. 1.4 подано прогноз кількості різних типів пристроїв, які можуть бути підключені до мереж зв'язку. Із наведених даних видно, що чисельність IoT-пристроїв (оцінена за кількістю M2M-об'єктів) наближається до загальної кількості інших підключених пристроїв. Водночас такий прогноз, імовірно, є заниженим, оскільки враховує лише M2M-сегмент.

Отже, навіть за мінімальними оцінками, масштаби розгортання Інтернету речей у найближчій перспективі будуть надзвичайно значними, що свідчить про стрімке зростання кількості підключених пристроїв.

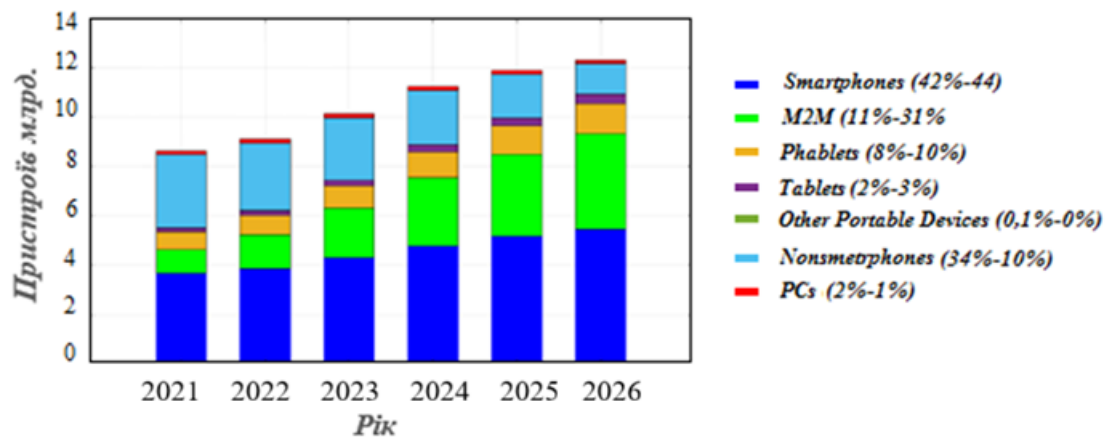


Рис.1.4. Прогноз зміни підключень

У зв'язку з цим виникає потреба у розробці підходів, які забезпечують як ефективне проектування, так і результативне управління мережами з великою кількістю підключених пристроїв. Крім того, важливим є контроль трафіку в таких мережах, оскільки значна кількість потенційних джерел даних може призводити до перевантажень і, як наслідок, до погіршення якості обслуговування інших типів трафіку [6].

1.2 Розмір та прогнози ринку бездротового зв'язку 5G

Мобільні мережі за відносно короткий період зазнали стрімкого розвитку, посівши важливе місце на ринку телекомунікацій. Згідно з аналітичними прогнозами, їх роль і надалі зростатиме. Така тенденція зумовлена постійним впровадженням нових функціональних можливостей, які вже виходять за межі традиційних послуг голосового зв'язку та передачі повідомлень. Сучасні мобільні технології орієнтовані на підтримку широкого спектра застосувань у різних сферах

життя, зокрема в медицині, індустрії розваг, промисловій та побутовій автоматизації, а також у сфері автомобільних комунікацій.

Активне впровадження технології 5G RedCap, що передбачає знижену пропускну здатність для IoT-рішень середнього рівня, розпочалося ще у 2024 році, передусім у Китаї. Очікується, що її використання сприятиме зростанню кількості підключень у стільниковому Інтернеті речей до приблизно 5,4 мільярда до 2030 року, що становить орієнтовне збільшення на 70 % у порівнянні з показниками 2023 року. Водночас прогнозується, що технології 2G та 3G практично втратять актуальність і зникнуть з ринку до 2027 року.

У той же час IoT-підключення, що базуються на технології 4G/LTE, збережуть домінуючі позиції. Їх кількість зросте з приблизно 2,6 мільярда у 2023 році до близько 3,2 мільярда у 2030 році, що відповідатиме приблизно 82 % та 60 % від загального обсягу ринку стільникового IoT відповідно. Підключення на основі 5G, у свою чергу, демонструватимуть стрімке зростання та досягнуть близько 1,2 мільярда до 2030 року, що становитиме приблизно 22 % ринку, порівняно з майже нульовими показниками у 2023 році, рис. 1.5.

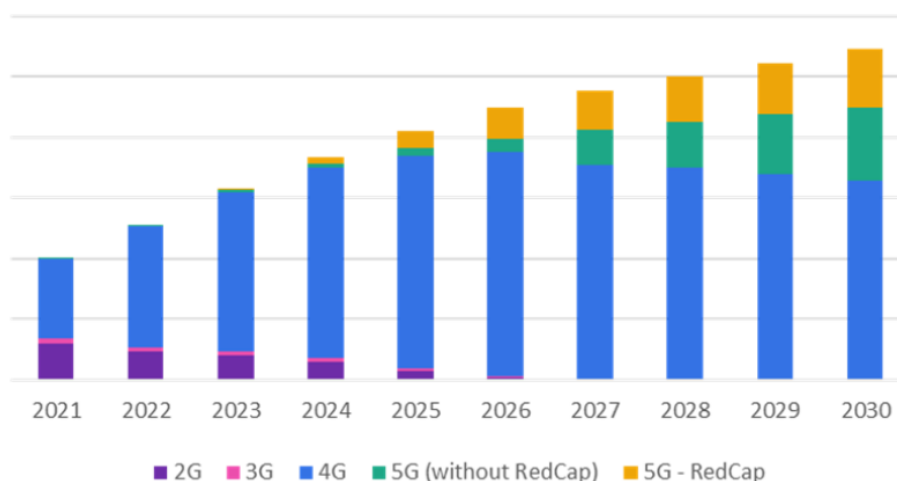


Рис.1.5. Стільникові з'єднання Інтернету речей через Air Interface, 2021-2030

Дослідження свідчать, що модулі Cat-1 bis, побудовані на базі 5G (за винятком RedCap), разом із LTE-рішеннями також сприятимуть зростанню

загальної кількості підключень. Водночас категорія «масового Інтернету речей» привертає значну увагу, хоча її трактування у контексті 5G залишається не до кінця визначеним. До початкових технологій 3GPP, які відносять до цього сегмента, належать дві LTE-орієнтовані розробки — NB-IoT та LTE-M, що спеціально призначені для масштабних енергоефективних IoT-рішень [7].

Проведений аналіз показав, що до 2019 року кількість підключень у мережах 5G залишалася незначною. Проте, починаючи з 2020 року, спостерігається стрімке зростання, зумовлене активним розгортанням інфраструктури та поширенням смартфонів із підтримкою 5G. Уже у 2023 році кількість таких підключень досягла 1 мільярда, а до кінця 2024 року цей показник збільшився вдвічі — до 2 мільярдів, рис. 1.6.

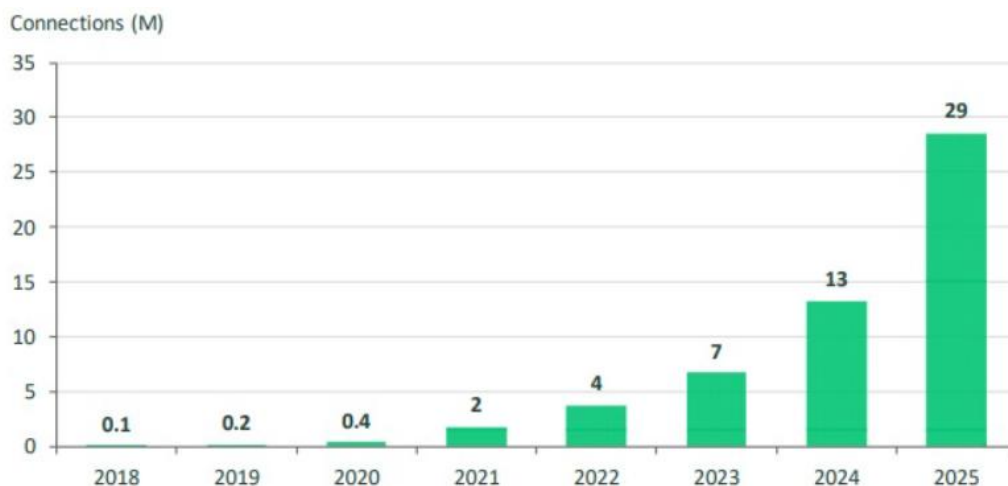


Рис.1.6. Фіксовані бездротові з'єднання 5G по всьому світу

Станом на 2025 рік частка мереж п'ятого покоління становить близько 21% від загальної кількості стільникових підключень у світі, включно з M2M-з'єднаннями, рис. 1.7.

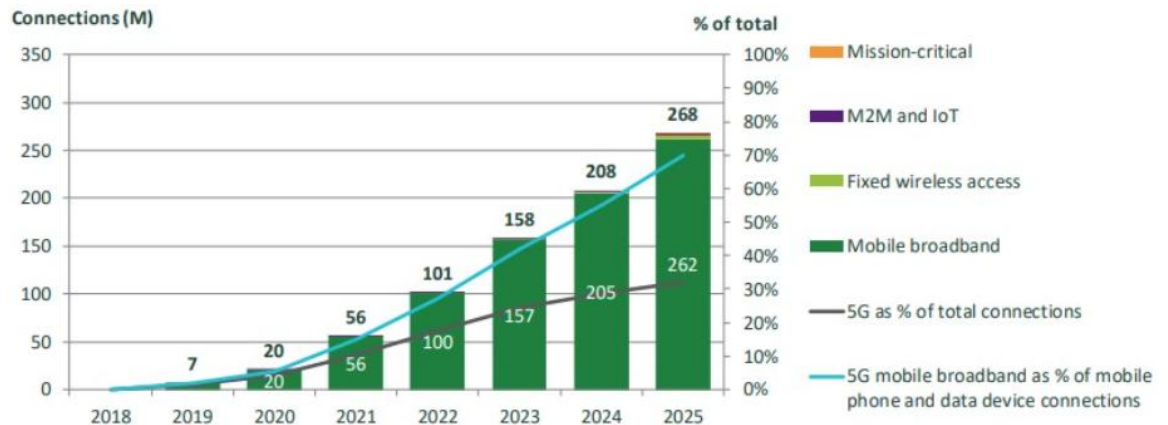


Рис.1.7. 5G-з'єднання за типом

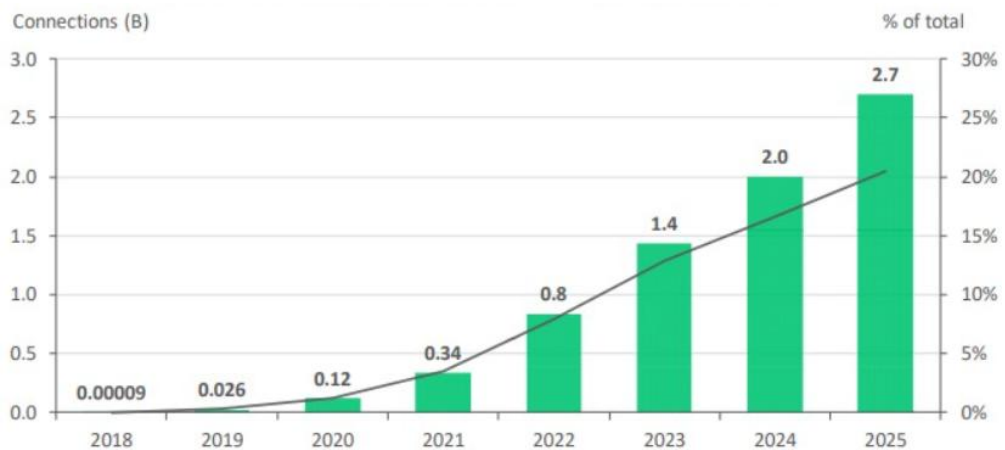


Рис.1.8. 5G-з'єднання та частка загальної кількості стільникових з'єднань у світі

Обсяг ринку інфраструктури 5G у 2019 році становив приблизно 784 млн доларів США. За прогнозами, до 2027 року цей показник може зрости до 47 775 млн доларів США, демонструючи середньорічний темп зростання на рівні 67,1%, рис. 1.9.

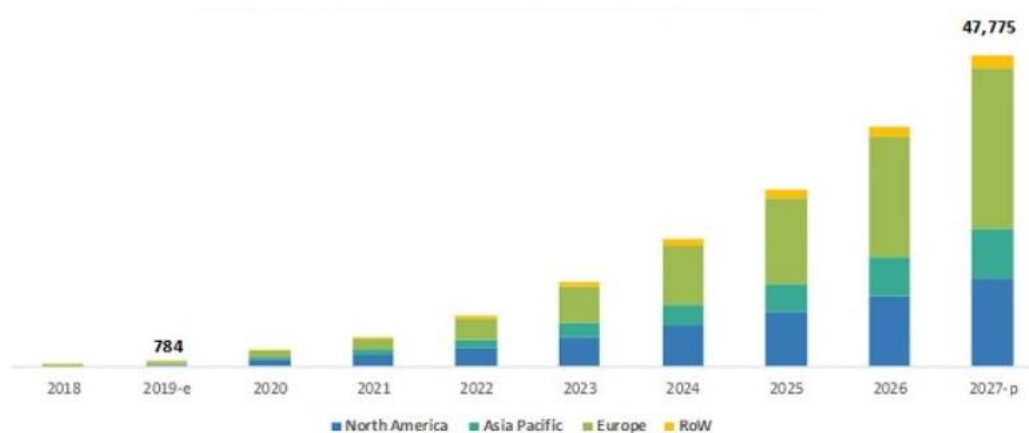


Рис.1.9. Ринок інфраструктури 5G за регіонами (млн дол. США)

Незважаючи на наявні економічні труднощі, що спостерігаються в різних регіонах світу, кількість користувачів мереж п'ятого покоління продовжує стабільно зростати. Очікується, що до кінця поточного року загальна кількість підписок на 5G перевищить один мільярд, а до 2028 року сягне приблизно п'яти мільярдів.

Зокрема, у період з липня по вересень 2022 року було зафіксовано приріст близько 110 мільйонів нових підключень, у результаті чого загальна кількість користувачів досягла орієнтовно 870 мільйонів. Відповідно до попередніх прогнозів, технологія 5G здатна подолати позначку в один мільярд підписок значно швидше, ніж це відбулося з 4G — приблизно на два роки раніше від моменту її впровадження [8].

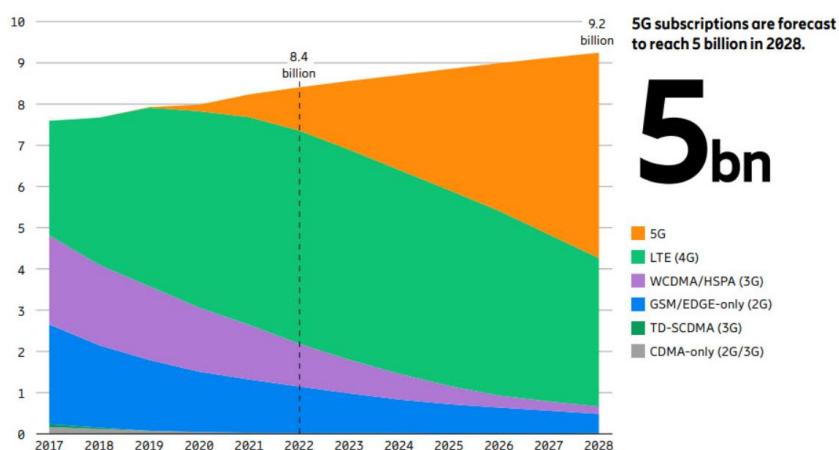


Рис.1.10. Мобільні підписки за технологією (млрд)

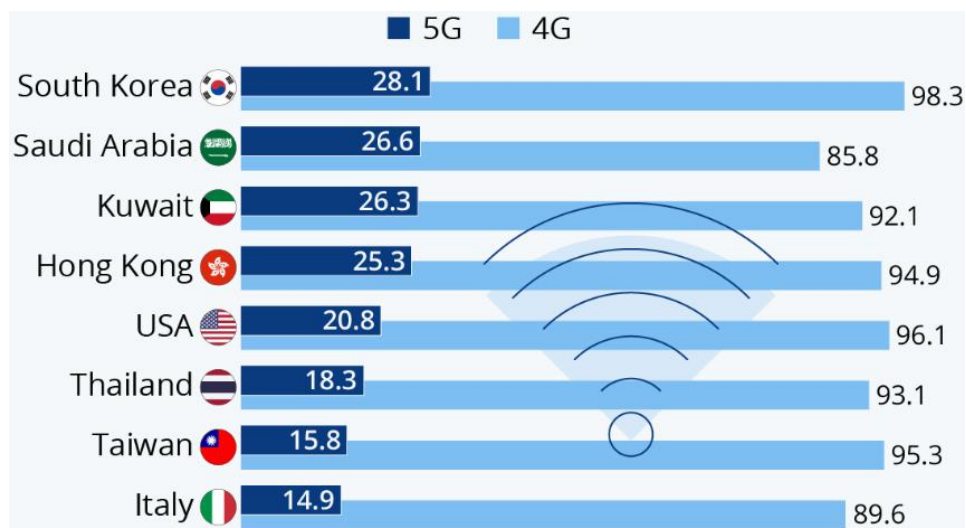


Рис.1.11. ТОП-8 місць за доступністю 5G та 4G

1.3 Технології для реалізації рішень IoT

Ключовими вимогами до сучасних рішень у сфері Інтернету речей є низьке енергоспоживання, доступність апаратних компонентів, значна дальність передачі сигналу та можливість масштабного розгортання великої кількості пристроїв. Сукупність цих характеристик формує концепцію енергоефективних мереж великого радіусу дії, відомих як Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN). Розвиток таких технологій відбувався паралельно в межах діяльності провідних організацій зі стандартизації, зокрема IEEE, ETSI та 3GPP, а також за участю окремих компаній і галузевих об'єднань. Серед найбільш поширених пропріетарних LPWAN-рішень варто відзначити SIGFOX і LoRaWAN. Обидві технології функціонують у неліцензованих ISM-діапазонах і використовують архітектуру, подібну до стільникових мереж, однак принципи їхньої роботи суттєво відрізняються.

SIGFOX базується на використанні ультравузькосмугових сигналів (приблизно 100 Гц для висхідного та 600 Гц для низхідного каналу). Швидкість передачі даних у напрямку до мережі становить близько 100 біт/с, при цьому обсяг корисного навантаження одного повідомлення обмежується 12 байтами, а тривалість передачі досягає однієї секунди. До недоліків цієї технології належать

використання лише однієї схеми модуляції та кодування, а також жорсткі обмеження на кількість переданих повідомлень (до 140 у висхідному та лише 4 у низхідному напрямку на пристрій). Попри низьке енергоспоживання і тривалий термін автономної роботи, такі обмеження істотно звужують сферу застосування SIGFOX, зокрема для задач crowdsensing.

На відміну від цього, LoRaWAN підтримує декілька схем модуляції та кодування, що дозволяє досягати швидкостей передачі до 50 Кбіт/с і значно розширює можливості використання. Проте обидві технології поки що не мають повної глобальної стандартизації, а рівень їх підтримки з боку великих промислових гравців, зокрема телекомунікаційного та автомобільного секторів, залишається обмеженим. Через це їх довгострокова перспектива широкого впровадження може бути під питанням, хоча на початкових етапах розвитку IoT вони є доволі ефективними.

Альтернативний підхід запропоновано в рамках стандартів 3GPP, які з самого початку орієнтувалися на масштабованість і масове використання. Так, у специфікації LTE Release 12 була введена спрощена категорія користувацького обладнання Cat.0 з пропускнуою здатністю до 20 МГц і максимальною швидкістю передачі до 1 Мбіт/с. При цьому складність таких пристроїв приблизно на 50% нижча порівняно з попередньою категорією Cat.1. Подальшим розвитком стала категорія Cat.M1 (LTE Release 13), що працює у смузі 1,4 МГц і дозволяє знизити потужність передавача до 20 дБм, забезпечуючи при цьому достатнє покриття.

Для регіонів із низьким рівнем розвитку LTE було розроблено рішення EC-GSM, яке базується на мережах GSM і здатне обслуговувати до 50 тисяч пристроїв у межах однієї стільниці, одночасно покращуючи покриття приблизно на 20 дБ. Ще одним важливим напрямом є NB-IoT, де використовується вузька смуга пропускання, поділена на 12 підканалів по 15 кГц. Це забезпечує швидкість передачі до 250 Кбіт/с у висхідному та до 227 Кбіт/с у низхідному напрямках. Завдяки цьому технологія здатна підтримувати тисячі підключених пристроїв, забезпечуючи покриття до 10 км у міських умовах і до 30 км у сільській місцевості.

Зменшена ширина каналу також сприяє спрощенню апаратної частини пристроїв, що веде до зниження їх вартості. Крім того, оптимізуються розміри переданих блоків і процедури сигналізації. У результаті очікується, що пристрої NB-IoT будуть значно дешевшими у порівнянні з традиційними LTE-рішеннями та зможуть конкурувати за ціною з LoRaWAN і SIGFOX. Таким чином, саме NB-IoT розглядається як одна з найбільш перспективних технологій для масового впровадження Інтернету речей.



Рис.1.12. Технології, пов'язані з 5G-IoT

1.4 Інтеграція застосунків Інтернету речей у мережі 5G

Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) із мережами 5G є важливим етапом розвитку сучасних телекомунікацій, що відкриває можливості для повної реалізації потенціалу підключених систем. Завдяки наднизькій затримці, високій пропускній здатності та здатності підтримувати масову кількість підключень, мережі 5G створюють сприятливе середовище для розвитку IoT-рішень. Це забезпечує впровадження широкого спектра застосувань, зокрема у сфері розумних міст, автономного транспорту, промислової автоматизації, систем моніторингу здоров'я та сільського господарства. Використання таких можливостей, як мережеве сегментування, периферійні обчислення та покращений мобільний

широкосмуговий доступ, дозволяє підвищити надійність, швидкість обміну даними та масштабованість IoT-систем. Крім того, поєднання IoT і 5G сприяє кращій сумісності різнорідних пристроїв і забезпечує безперервну взаємодію між ними [13].

Завдяки підвищеній швидкості передачі даних, зменшеній затримці та розширеним можливостям підключення, поєднання 5G та IoT здатне суттєво трансформувати багато галузей. Водночас така інтеграція супроводжується серйозними викликами у сфері безпеки, що потребують комплексного підходу, інвестицій та впровадження сучасних механізмів захисту. Подальший розвиток досліджень і технологій відкриває нові можливості для інноваційних застосувань IoT в умовах 5G-мереж [13].

Основні переваги використання 5G у системах IoT включають:

1. Розширені можливості підключення та ємність мережі – 5G дозволяє одночасно обслуговувати величезну кількість пристроїв IoT, що є критично важливим для таких сфер, як медицина, промислова автоматизація та розумна міська інфраструктура [14].

2. Зниження затримки передачі даних – наднизька затримка забезпечує ефективну роботу застосунків реального часу, включаючи автономні транспортні засоби та дистанційні медичні операції.

3. Підвищена швидкість передачі даних – 5G дозволяє ефективно обробляти великі обсяги інформації, які генеруються пристроями IoT.

Мережі п'ятого покоління також відзначаються низкою технологічних удосконалень у порівнянні з попередніми стандартами. Серед них можна виділити:

- Сегментацію мережі (network slicing), яка дозволяє створювати кілька логічних мереж у межах однієї фізичної інфраструктури. Це забезпечує гнучке налаштування параметрів під конкретні IoT-додатки з урахуванням вимог до безпеки та продуктивності [15].

- Сучасні технології зв'язку, такі як міліметрові хвилі (mmWave), зв'язок у видимому спектрі (VLC) та технологія MIMO, які значно підвищують ефективність передачі даних.

Впровадження 5G також має суттєві економічні та операційні наслідки. Незважаючи на значні початкові інвестиції, у довгостроковій перспективі очікується зниження витрат на обслуговування, підвищення енергоефективності та можливість підключення більшої кількості пристроїв IoT. Це формує позитивний економічний ефект та стимулює бізнес до стратегічного впровадження 5G-технологій.

Подальший розвиток IoT у поєднанні з 5G тісно пов'язаний із впровадженням новітніх технологій, зокрема штучного інтелекту, хмарних і периферійних обчислень. Це дозволяє покращити обробку даних, оптимізувати управління мережею та підвищити ефективність прийняття рішень. Водночас важливими залишаються питання безпеки, які можуть частково вирішуватися за рахунок застосування блокчейн-технологій та сучасних механізмів захисту даних.

Серед перспективних напрямів застосування 5G та IoT можна виділити промислову автоматизацію, автономний транспорт, системи V2X, розумні міста та аграрні рішення. Особливо важливим є використання наднадійного зв'язку з низькою затримкою для критично важливих систем. Водночас існують і виклики, зокрема питання безпеки, сумісності пристроїв, можливих перешкод і високої вартості впровадження інфраструктури.

Таким чином, поєднання 5G та IoT створює як значні можливості для розвитку цифрових сервісів, так і низку технічних та економічних викликів, які потребують подальшого дослідження. Узагальнена характеристика співіснування сервісів 5G та IoT наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Співіснування послуг і мереж 5G і застосунків Інтернету речей

Сервіс	Бездротові технології	Використані алгоритми	Співіснування послуг	Застосування та опис системи
5G NR	NR-U	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою для промислової автоматизації та автономних транспортних засобів
5G-V2X	PC5	OFDMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Комунікація між транспортним засобом та всіма іншими системами для управління дорожнім рухом та безпеки
5G-mMTC	NR-MTC	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Масштабні машинні комунікації для розумних міст та сільського господарства
5G-UHD	NR-U	OFDMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Відеозв'язок надвисокої чіткості та віртуальна реальність
5G-IoT	NR-MTC	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Інтернет речей – комунікації для розумних будинків та носимих пристроїв
5G-eMBB	NR-eMBB	OFDMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Покращений мобільний широкосмуговий доступ для високошвидкісної передачі даних та потокового передавання
5G-URLLC	NR-URLLC	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою для критично важливих застосувань
5G-mIoT	NR-mIoT	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Масштабні комунікації Інтернету речей для розумних міст та сільського господарства
5G-gNB	NR-gNB	OFDMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Гігабітний зв'язок для високошвидкісної передачі даних та потокового передавання
5G-Slicing	NR-Slicing	NOMA	Співіснування з 4G та Wi-Fi	Розподіл мережі для кількох сервісів та програм

У таблиці розглянуто бездротові технології, застосовувані алгоритми, а також особливості співіснування сервісів 5G із мережами 4G та Wi-Fi. Зокрема, наведено основні сервіси 5G, серед яких 5G NR, 5G-V2X, 5G mMTC, 5G-UHD, 5G-IoT, 5G-eMBB, 5G-URLLC, 5G-mIoT, 5G-gNB та 5G Slicing. Для кожного з них подано короткий опис функціонального призначення та можливих сфер застосування.

Зазначені сервіси орієнтовані на різні сценарії використання та забезпечують специфічні переваги. Зокрема, URLLC використовується для задач, що потребують наднадійного зв'язку з мінімальною затримкою (наприклад, промислова автоматизація), V2X – для взаємодії транспортних засобів і інфраструктури з метою підвищення безпеки руху, mMTC та mMTC – для масового підключення пристроїв у розумних містах і сільському господарстві, eMBB та UHD – для високошвидкісної передачі даних і потокового відео, а мережеве сегментування (network slicing) – для одночасної підтримки різних сервісів із різними вимогами до якості обслуговування.

Окрім цього, сервіси 5G забезпечують підтримку як критично важливих застосувань, так і побутових IoT-рішень, включаючи розумні будинки та носимі пристрої. У цілому, наведена таблиця дозволяє систематизувати взаємодію сервісів 5G з IoT та іншими мережевими технологіями, а також краще зрозуміти їх потенційні переваги й виклики при спільному впровадженні.

РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЇ 5G І ІОТ: АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНОЛОГІЇ

2.1 Огляд архітектури протоколів 5G

Інтерфейси мобільної мережі 5G, що забезпечують взаємодію між користувацьким обладнанням (UE), розширеною наземною радіомережею (E-UTRAN), ядром мережі EPC та шлюзом SGW, реалізуються через відповідні стекові структури протоколів. Саме ці стеки відповідають за передачу як сигнальних повідомлень, так і користувацьких даних між елементами мережі [21]. Загалом протокольну архітектуру 5G можна умовно поділити на дві основні складові: площину керування та площину користувача, кожна з яких виконує власні функції.

До першої групи належать сигнальні протоколи, що забезпечують обмін службовою інформацією між різними мережевими вузлами. Друга група — це протоколи площини користувача, які відповідають за ефективну доставку даних між UE та вузлами ядра мережі, зокрема S-GW. Окремо виділяють транспортні протоколи, що здійснюють передачу як даних, так і сигналізації між пристроями через радіоінтерфейс Uu.

Вищі функції керування зосереджені у вузлі MME, однак прямого з'єднання між ним і UE не передбачено. Передача інформації відбувається через базову станцію eNB, яка виступає проміжною ланкою та водночас ускладнює апаратну структуру системи. Для оптимізації цієї архітектури інтерфейс Uu поділяють на два логічні рівні: Access Stratum (AS) і Non-Access Stratum (NAS). При цьому сигналізація високого рівня, що генерується MME, належить до рівня NAS, але передається за допомогою протоколів AS.

Підтримка як керуючих, так і користувацьких процесів частково покладається на eNB. До складу протоколів площини користувача входять PDCP,

MAC і PHY, тоді як у площині керування ключову роль відіграє протокол RRC. Основні функціональні можливості цих рівнів можна описати так [22].

Рівень доступу (AS) забезпечує можливість підключення UE до мережі та використання її сервісів. Він охоплює такі механізми, як розподіл радіоресурсів, управління каналами передачі, контроль доступу до середовища, організацію трафіку, планування, а також впливає на показники пропускної здатності та якості передачі.

Рівень без доступу (NAS) відповідає за встановлення з'єднання між UE та мережею, а також реалізує процедури реєстрації, автентифікації та керування мобільністю користувача.

Протокол керування радіоресурсами (RRC) виконує функції передачі системної інформації, встановлення та підтримки з'єднання, забезпечення мобільності, реалізації механізмів безпеки та контролю якості обслуговування. Крім того, він забезпечує взаємодію між UE та рівнем NAS.

Протокол конвергенції пакетних даних (PDCP) відповідає за повторну передачу службових блоків, стиснення заголовків, шифрування інформації та виявлення дубльованих пакетів.

Рівень керування радіоканалом (RLC) здійснює сегментацію даних відповідно до доступного розміру транспортних блоків, реалізує механізми виправлення помилок (ARQ), а також забезпечує повторну передачу, об'єднання даних і контроль їхньої цілісності.

Протокол керування доступом до середовища (MAC) виконує мультиплексування та демультиплексування даних, забезпечує корекцію помилок за допомогою HARQ, а також відповідає за планування передачі, пріоритезацію каналів і доповнення пакетів.

Фізичний рівень (PHY) забезпечує безпосередню передачу сигналів у радіоефірі. Для цього використовується інтервал передачі тривалістю 1 мс, що дозволяє координувати обмін даними з вищими рівнями стеку. У системах LTE

застосовуються методи OFDM та SC-FDMA, зокрема з інтервалом між піднесучими 15 кГц [22].

Узагальнена структура стеку протоколів наведена на рис. 2.2.

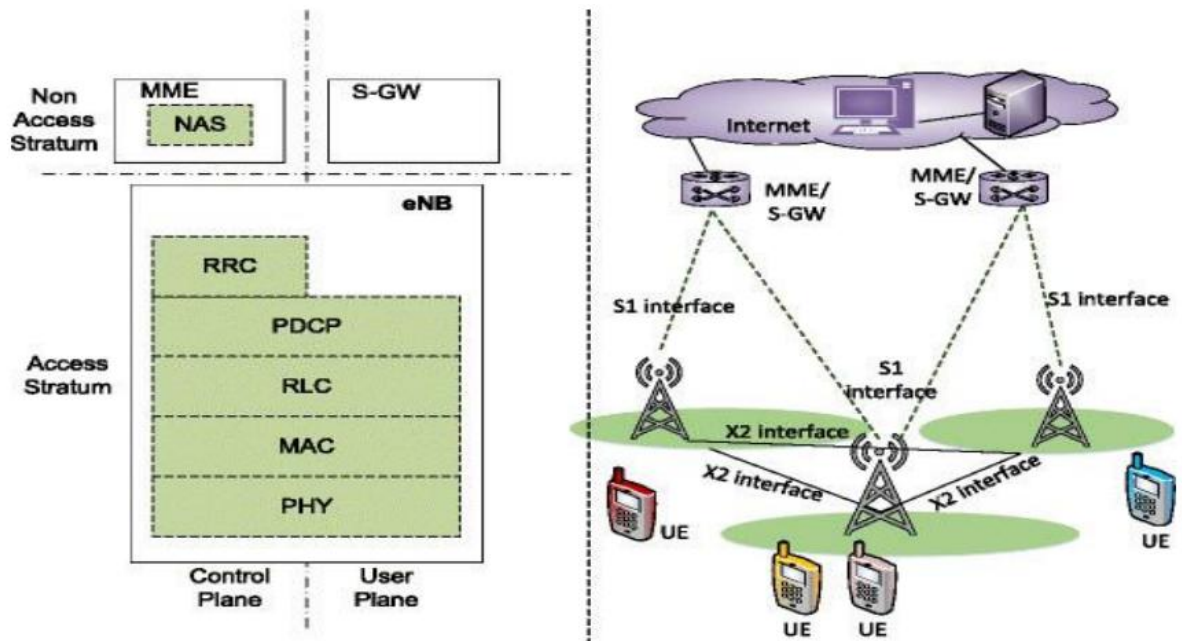


Рис.2.1. Зосередження протоколів 5G

2.2 Аналіз технологій забезпечення 5G

У мережах п'ятого покоління зазнають змін насамперед радіоінтерфейс і підсистема радіодоступу, тоді як архітектура ядра EPS суттєво не трансформується. Система EPS виступає базовою платформою для технологій Long Term Evolution (LTE), LTE-Advanced (LTE-A) та 5G. До ключових технологічних рішень, що застосовуються в 5G, належать агрегація несучих (CA), удосконалені схеми MIMO, координувана багатоточкова передача (CoMP), а також використання малих комірок, зокрема релейних вузлів (RN). Детальніший розгляд цих підходів подано в наступних підрозділах.

Щодо ресурсів передачі в LTE, структура радіокадру для висхідного та низхідного каналів є практично однаковою. Відповідно до специфікацій 3GPP, системна смуга пропускання поділяється на декілька стандартних діапазонів у

межах від 1 до 20 МГц, які використовуються для організації передачі в обох напрямках [23]. У низхідному каналі кожен радіокадр складається з десяти підкадрів, а кожен підкадр, у свою чергу, містить два часові слоти тривалістю по 0,5 мс. Кожен слот включає 6 або 7 OFDM-символів залежно від типу циклічного префікса (розширений або звичайний).

Базовою одиницею радіоресурсу, що виділяється користувачькому обладнанню, є фізичний ресурсний блок (PRB). Один PRB формується з 12 суміжних піднесучих і охоплює часовий інтервал 0,5 мс. У випадку звичайного циклічного префікса він містить 84 ресурсні елементи, тоді як при розширеному — 72, що пояснюється меншою кількістю OFDM-символів. Максимальна ширина смуги одного PRB становить 180 кГц, а фізичні канали можуть об'єднувати декілька таких блоків.

Агрегація несучих (Carrier Aggregation, CA) є однією з ключових можливостей LTE-Advanced, запровадженою у специфікаціях 3GPP Release 10. Суть цієї технології полягає в об'єднанні кількох компонентних несучих як у висхідному, так і в низхідному напрямках — як у суміжному, так і в рознесеному спектрі. При цьому кожна з несучих зберігає зворотну сумісність із пристроями попередніх версій (Release 8 і 9), забезпечуючи передачу синхронізаційних сигналів і службової інформації.

Основне призначення CA — підвищення швидкості передавання даних за рахунок розширення доступної смуги пропускання. У межах LTE-Advanced допускається об'єднання до п'яти компонентних несучих [23].

Ключова відмінність між LTE та LTE-Advanced полягає в способі використання несучих частот. У класичних LTE-системах передача здійснюється в межах однієї несучої як для висхідного, так і для низхідного каналів. Натомість у LTE-Advanced завдяки CA можливе одночасне використання кількох несучих, що значно підвищує ефективність використання спектра.

У частотній області кожна компонентна несуча може складатися до 100+ PRB (типово до 112), які залишаються сумісними з попередніми стандартами [23].

Доступні варіанти ширини каналу включають 1,4; 3; 5; 10; 15 і 20 МГц, причому кількість PRB прямо залежить від обраної смуги пропускання (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Кількість PRB у смузі пропускання каналу E-UTRA [29]

Спектр у МГц	1.4	3	5	10	15	20
Кількість блоків фізичних ресурсів	6	15	25	50	75	100
Кількість зайнятих рейсів у PRB	72	180	300	600	900	1200

У межах розглядуваної тематики можна зробити висновок, що користувачке обладнання (UE) має можливість об'єднувати кілька компонентних несучих (CC) як у висхідному, так і в низхідному напрямках. На рис. 2.2 ілюструється принцип реалізації агрегації несучих для обох каналів зв'язку. Пристрої, що відповідають релізам 8 і 9, здійснюють передачу даних, використовуючи лише одну компонентну несучу. Водночас UE, реалізовані відповідно до релізу 10, здатні працювати як з однією, так і з кількома несучими одночасно в обох напрямках.

Для організації зв'язку застосовуються як суміжні, так і рознесені (несуміжні) схеми агрегації. Згідно з [23], стандарти 3GPP також передбачають використання несуміжної агрегації, коли компонентні несучі можуть розташовуватися як у межах одного частотного діапазону, так і в різних діапазонах і при цьому не бути сусідніми. Такий підхід обумовлений тим, що оператори не завжди мають у своєму розпорядженні суцільний спектр шириною 100 МГц. Саме тому в LTE-Advanced агрегацію несучих поділяють на три основні типи, рис. 2.2.

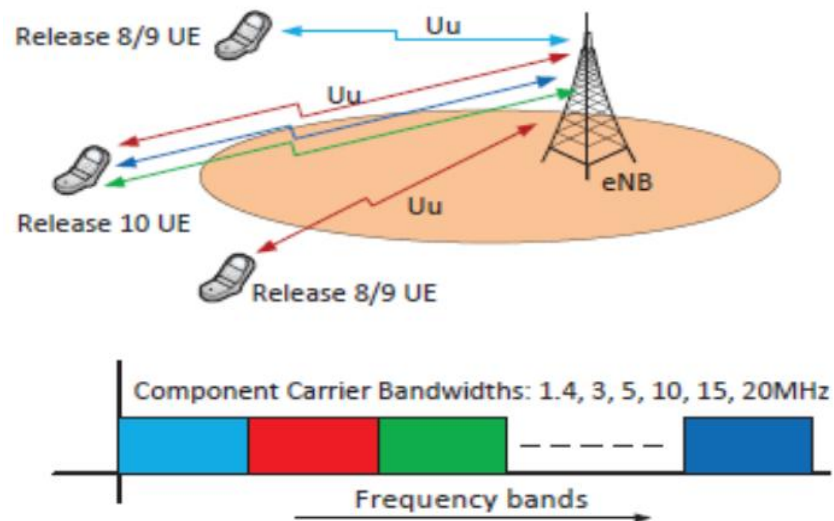


Рис.2.2. Агрегація компонентних несучих у LTA-A

Схема багатокористувацького MIMO ґрунтується на використанні декількох антен для передавання та приймання радіосигналів. За умови некорельованості каналів зв'язку можливе одночасне передавання кількох потоків даних у межах одних і тих самих частотних ресурсів. Якщо такі операції виконуються для одного користувача, йдеться про однокористувацький режим (SU-MIMO). У випадку, коли передавання та приймання здійснюються для кількох користувачів одночасно, використовується підхід багатокористувацького MIMO (MU-MIMO).

Ефективність систем зв'язку значною мірою визначається тим, наскільки раціонально використовуються доступні канали для паралельної передачі даних. На швидкість обміну інформацією впливають такі чинники, як кількість антен на передавальній і приймальній сторонах, доступна смуга пропускання, а також ефективність налаштування радіоресурсів, зокрема параметрів керування каналом. Використання MU-MIMO дозволяє реалізувати просторове мультиплексування, що сприяє підвищенню пропускної здатності, розширенню зони покриття та зростанню надійності мережі.

Серед ключових технологій, впроваджених у LTE-Advanced, MU-MIMO відіграє важливу роль у досягненні високих швидкостей передавання даних, які можуть сягати кількох гігабіт за секунду в низхідному каналі [24]. У стандарті 3GPP LTE передбачена підтримка MU-MIMO з використанням до чотирьох антен

у низхідному напрямку, тоді як для висхідного каналу зазвичай застосовується одна антена. У релізі 10 можливості цієї технології були розширені: у LTE-A допускається використання до восьми антен на передавання та приймання в низхідному каналі, а також до чотирьох передавальних і восьми приймальних антен у висхідному напрямку. Крім того, було вдосконалено структуру опорних сигналів, що підвищило ефективність роботи в багатоантенних конфігураціях.

У висхідному каналі застосування MU-MIMO забезпечує суттєве зростання швидкості передачі та спектральної ефективності. При цьому SU-MIMO є більш ефективним у мережах із невеликим навантаженням, тоді як MU-MIMO демонструє значні переваги навіть у разі використання пристроїв з однією антеною, підвищуючи загальну продуктивність мережі при відносно невеликих витратах. У системах LTE-A передбачена можливість динамічного перемикання між цими режимами залежно від умов роботи мережі.

Варто зазначити, що в низхідному каналі технологія MU-MIMO була впроваджена ще у 3GPP Release 8. Рішення щодо побудови опорних сигналів і кодових книг, запропоновані в цьому релізі, оптимізовані для конфігурацій із 2 та 4 антенами. Водночас точність оцінки стану каналу (CSI), що передається від UE до базової станції, могла бути підвищена. Зі збільшенням кількості антен у релізі 10 досягається додатковий вигреш у продуктивності, однак це супроводжується зростанням накладних витрат, зокрема через введення нових опорних сигналів. Також спостерігається певне зниження ефективності загального каналу керування.

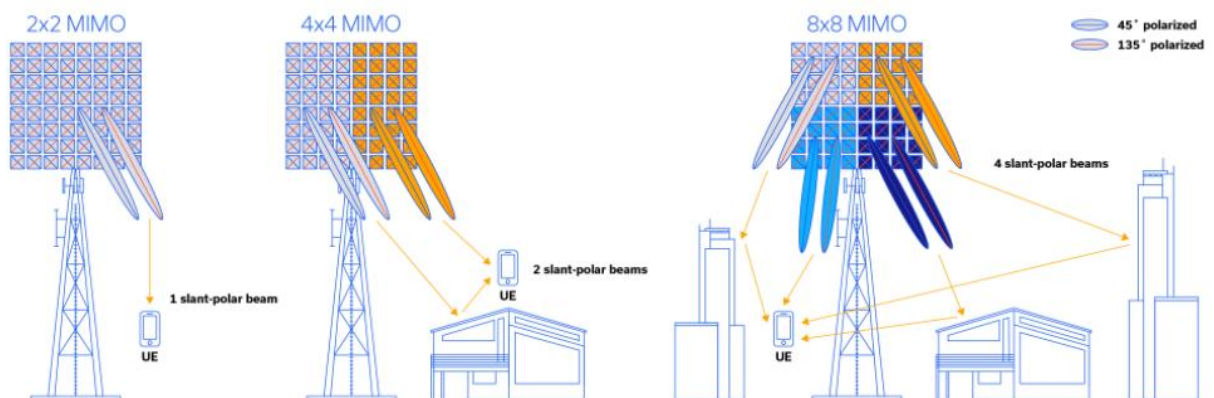


Рис.2.3. Приклад функціонування технології MIMO

Неортогональний множинний доступ (NOMA) розглядається як одна з ключових технологій, здатних забезпечити зростання пропускної здатності мережі, підтримку більшої кількості одночасних підключень і зменшення затримок під час обслуговування користувачів.

На відміну від традиційного ортогонального множинного доступу (OMA), підхід NOMA базується на іншій концепції розподілу ресурсів. Замість жорсткого поділу за часом або частотою, кілька користувачів можуть одночасно використовувати ті самі ресурси, що суттєво ускладнює процес планування. У такому випадку задача вже не зводиться до простого вибору користувачів, а потребує комплексної оптимізації з урахуванням розподілу потужності, методів кодування та особливостей приймальної сторони. Згідно з теоретичними підходами в галузі інформаційних мереж, застосування NOMA дозволяє підвищити як кількість одночасно обслуговуваних абонентів, так і загальну ефективність використання спектра, особливо за умови використання сучасних алгоритмів багатокористувацького детектування.

Додатковою перевагою є те, що відсутність ортогональності знижує вимоги до точності оцінки стану каналу та спрощує процедури планування ресурсів при обслуговуванні кількох користувачів. У деяких сценаріях це навіть дозволяє мінімізувати або повністю усунути необхідність складного зворотного зв'язку.

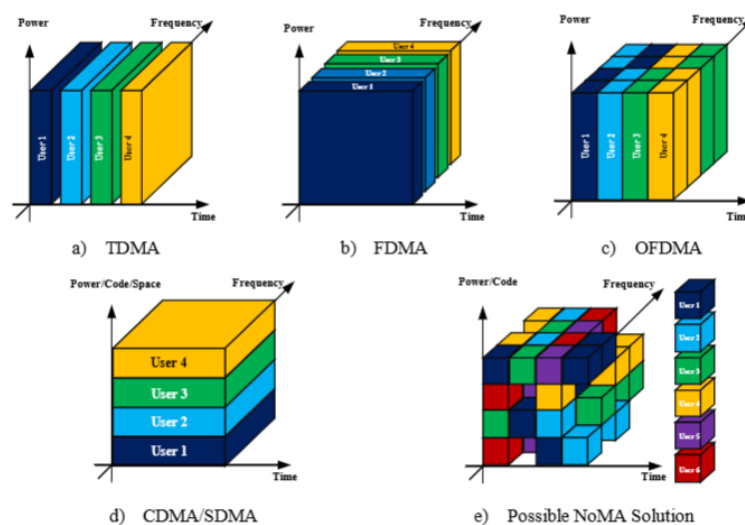


Рис.2.4. Схеми множинного доступу

2.3 Гетерогенні мережі та розгортання малих стільникових мереж

Під терміном HetNet у цьому контексті розуміється мережа радіодоступу (RAN), якій притаманна неоднорідність за розмірами комірок і їх розташуванням у межах однієї технології. У загальному випадку можна виокремити макро- та малі комірки. Макрокомірки являють собою потужні базові станції, що традиційно застосовуються для покриття значних територій із радіусом дії до приблизно 20 км. Натомість малі комірки — це малопотужні вузли доступу, які можуть працювати як у ліцензованому, так і в неліцензованому спектрі, та характеризуються значно меншим радіусом покриття (до 2 км).

У мережах LTE такі малі комірки зазвичай розгортаються без жорсткого попереднього планування, переважно в густонаселених районах. Їх основне призначення — підвищення спектральної ефективності за рахунок розвантаження макромережі або покращення якості сигналу в проблемних зонах. Залежно від радіусу дії, малі комірки поділяють на кілька типів: релейні вузли (RN), мікрокомірки (до 2 км), піко-комірки (близько 200 м) та фемтокомірки (приблизно 10 м). Останні зазвичай встановлюються всередині будівель і належать до мереж закритого типу, доступ до яких мають лише визначені користувачі.

Спільне функціонування різних типів малих комірок у межах однієї макрокомірки часто призводить до виникнення міжкоміркових завад. Це, своєю чергою, потребує застосування спеціальних механізмів координації, зокрема методів покращеної міжкоміркової взаємодії (eICIC). У межах даної роботи під терміном «мала комірка» надалі розумітимуться передусім RN, Pico- та Femto-комірки з малим радіусом покриття [25].

Релейні вузли (RN) інфраструктурного типу можуть бути як стаціонарними, так і мобільними, залежно від умов їх розгортання. Вони застосовуються для підвищення швидкості передавання даних, розширення зони покриття та забезпечення безперервності зв'язку під час переміщення користувачів. Зокрема, RN можуть забезпечувати стабільний зв'язок під час переходу користувача з

приміщення на відкритий простір. Також їх встановлення на транспортних засобах, наприклад автобусах або поїздах, дозволяє покращити якість покриття для абонентів у русі.

Стаціонарні релейні вузли переважно використовуються для розширення покриття в тих зонах, де сигнал від основної базової станції (донорної eNB) є недостатнім, зокрема на межах комірок або в умовах затінення. Вони дозволяють забезпечити зв'язок для користувачів, які знаходяться поза межами ефективного покриття традиційних базових станцій. Антенні системи RN, як правило, мають менші розміри порівняно з антенами донорних станцій і розміщуються на будівлях, щоглах або інших підвищених конструкціях. Функціональні особливості стаціонарних RN наведено на рис. 2.5 [26].

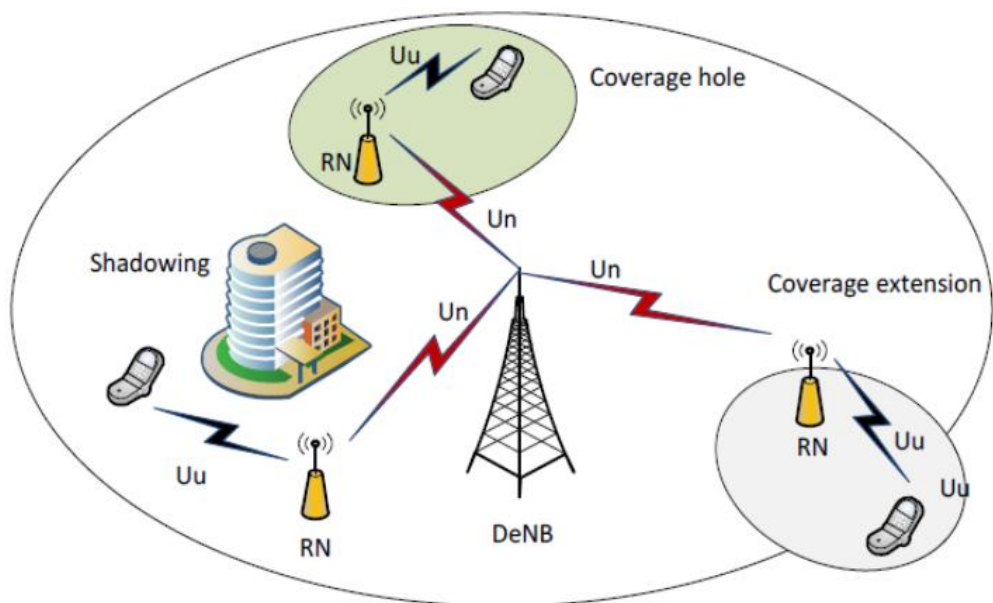


Рис.2.5. Фіксована RN

У роботі [26] організація 3GPP розглядала мобільні ретрансляційні вузли (RN) як ефективний засіб забезпечення належного рівня обслуговування користувачів у швидкісних поїздах. Водночас сучасні дослідження демонструють, що застосування мобільних RN є доцільним і в інших видах громадського транспорту, зокрема в автобусах та трамваях, де вони сприяють підвищенню якості зв'язку.

Основне призначення мобільних ретрансляторів полягає у формуванні стабільного покриття в умовах рухомого середовища. Такі вузли встановлюються безпосередньо у транспортних засобах (наприклад, у вагонах поїздів) і забезпечують передачу даних між користувацьким обладнанням (UE) та базовою станцією типу DeNB.

З'єднання з мережею здійснюється через канал зворотного зв'язку (backhaul), тоді як взаємодія з користувацькими пристроями реалізується через канал доступу. Через конструктивні обмеження транспортних засобів, а також вимоги безпеки, антени мобільних RN мають компактні розміри. Основні функціональні можливості таких вузлів наведено на рис. 2.6.

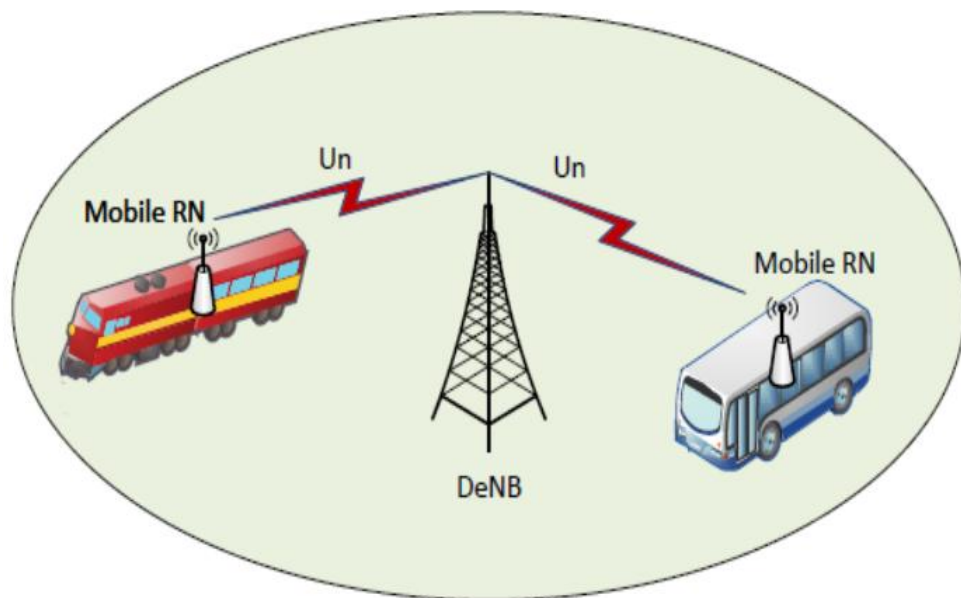


Рис.2.6. Мобільна мережа RN

Розподіл мережі в системах 5G. Технологія 5G як нове покоління мобільного зв'язку є предметом активного дослідження та впровадження, а концепція мережевого розподілу (network slicing) належить до ключових інновацій цього стандарту. Провідні оператори мобільного зв'язку, зокрема China Mobile та SK Telecom, а також виробники телекомунікаційного обладнання, такі як Nokia і Ericsson, розглядають її як базову модель архітектури мереж майбутнього.

Суть цієї технології полягає у можливості логічного поділу єдиної фізичної інфраструктури на декілька незалежних наскрізних (end-to-end) віртуальних мереж. Кожен такий сегмент функціонує ізольовано та охоплює всі рівні мережі — від користувацького обладнання і мережі радіодоступу до транспортної та ядрової частин.

Подібний підхід можна умовно порівняти з поділом одного фізичного накопичувача на окремі логічні диски, що використовуються для різних задач. У випадку 5G це дозволяє виділяти окремі мережеві ресурси для різних типів сервісів із урахуванням їхніх вимог до якості обслуговування.

Кожен мережевий сегмент має власний набір ресурсів і параметрів, які формуються з використанням сучасних технологій, зокрема віртуалізації мережевих функцій (NFV), програмно-визначених мереж (SDN), хмарних обчислень, а також керування пропускнуою здатністю та показниками QoS. Структуру та принципи організації таких сегментів наведено на рис. 2.7 [27].

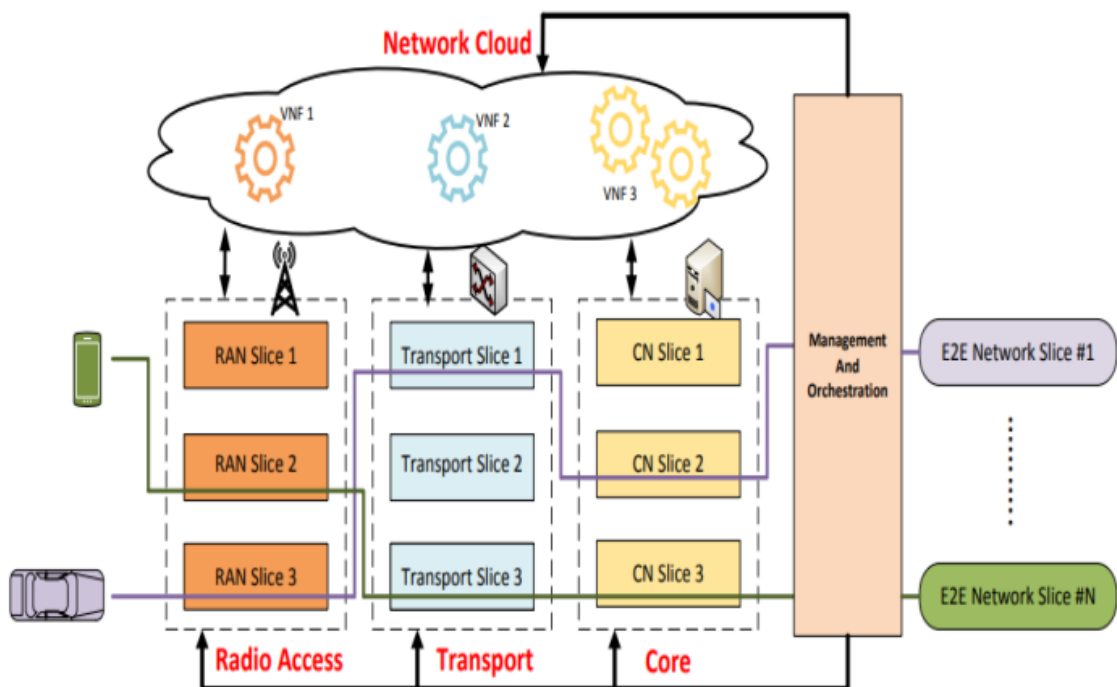


Рис.2.7. Розподіл мережі 5G

2.4 Мережева структура та технології обміну даними в IoT

Комунікація на основі технологій Інтернету речей. Упродовж останніх років значно зросла увага до досліджень у сфері організації взаємодії між великою кількістю інтелектуальних пристроїв, що об'єднуються через дротові та бездротові мережі. Одним із ключових напрямів такої взаємодії є комунікація типу M2M (Machine-to-Machine), також відома як машинна комунікація (МТС). Вона відображає сучасну тенденцію розвитку Інтернету речей, у межах якої пристрої здатні обмінюватися даними між собою з мінімальним втручанням людини або без нього [27].

Поширення IoT-комунікацій зумовлене тим, що інтелектуальні пристрої стають невід'ємною складовою сучасних телекомунікаційних систем і знаходять застосування у різних галузях. Серед них — системи електронної охорони здоров'я, автомобільні мережі зв'язку, транспортні та логістичні системи, а також інтелектуальні системи обліку ресурсів.

На сьогодні ринок пропонує широкий спектр IoT-пристроїв, серед яких ключову роль відіграють сенсори, виконавчі механізми, вбудовані цифрові сигнальні процесори (DSP) та програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA). Використання цих компонентів забезпечує функціонування різноманітних прикладних рішень, включаючи інтелектуальні транспортні системи, системи моніторингу й обліку, домашню автоматизацію, e-health сервіси, системи безпеки та реагування на надзвичайні ситуації, а також логістичні платформи.

Розвиток комунікації M2M ґрунтується на двох основних положеннях [28]:

- об'єднання пристроїв у мережу дозволяє підвищити ефективність їх роботи порівняно з ізольованими автономними системами;
- використання мережевих технологій забезпечує більший рівень автономності функціонування пристроїв, що стало можливим завдяки розвитку Інтернету та бездротового зв'язку.

Таким чином, Інтернет речей відіграє важливу роль у підвищенні якості життя людини, забезпечуючи доступ до широкого спектра інтелектуальних сервісів.

Архітектура мережі Інтернету речей. На загальному рівні архітектура IoT визначає принципи організації взаємодії між пристроями, мережею та прикладними сервісами. Відповідно до підходу Європейського інституту телекомунікаційних стандартів (ETSI), вона включає кілька основних складових.

До ключових елементів належать пристрої Інтернету речей, які здійснюють збір даних із сенсорів та їх подальшу автоматичну передачу. Це можуть бути, наприклад, показники частоти пульсу, температура в приміщенні, рівень вологості та інші параметри.

Зазвичай такі пристрої підключаються до локальних мереж невеликого масштабу (підмереж), через які відбувається передача та отримання даних до прикладних доменів Інтернету речей, зокрема до серверної частини (бекенд-систем), або у зворотному напрямку.

Архітектура IoT може змінюватися залежно від конкретної реалізації, однак загалом вона має спільні риси з архітектурою традиційних автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУТП). Один із можливих варіантів такої архітектури наведено на рис. 2.8.

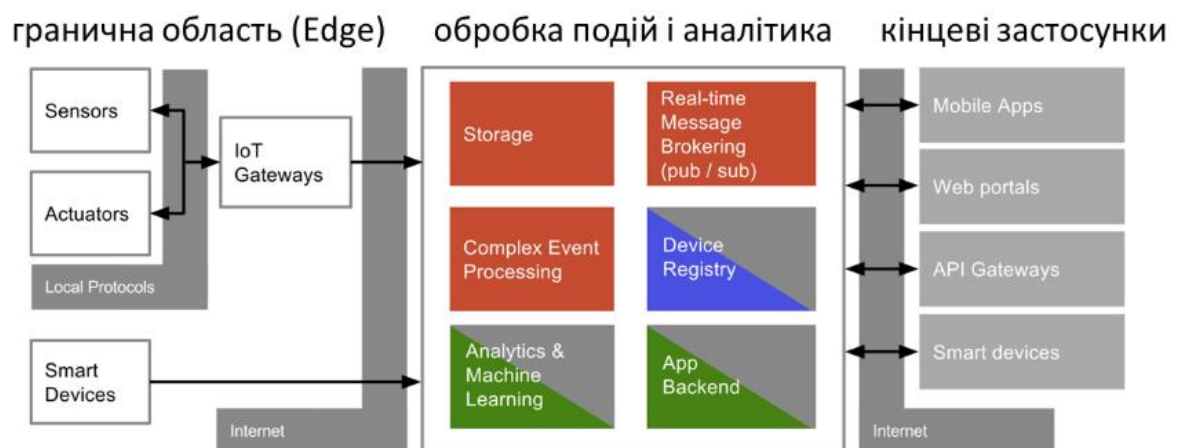


Рис.2.8. Приклад архітектури IoT

На рис. 2.9 представлено архітектурне рішення, яке за своєю структурою близьке до розглянутого раніше, проте інтерпретоване крізь призму сервісної моделі. У межах цієї схеми периферійний рівень (Edge) охоплює сенсорні елементи (Sensors), вузол типу Device Hub/Gateway, призначений для збору та перенаправлення даних, а також модуль Device Management, що забезпечує адміністрування пристроїв. Зазначені функції можуть реалізовуватись як у хмарній інфраструктурі, так і безпосередньо на крайових вузлах.

Акумуляування інформації та її первинна обробка зосереджені в підсистемі Data Management. Подальша обробка, включаючи аналітичні задачі, виконується за допомогою PaaS-рішень, які взаємодіють із сервісами керування даними через відповідні API-інтерфейси.

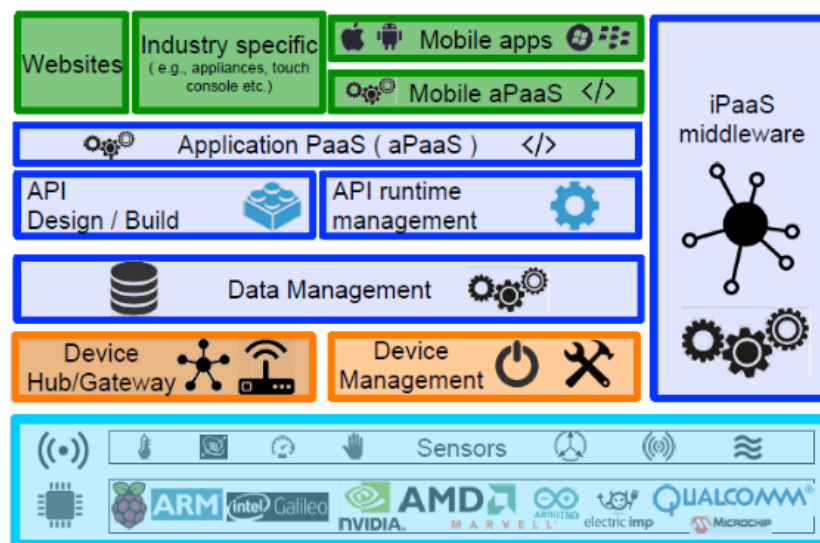


Рис.2.9. Архітектура IoT у форматі сервісної моделі

На рис. 2.10 наведено альтернативний підхід до формування архітектури Інтернету речей. Як свідчить аналіз, попри відмінності у реалізації, усі розглянуті концепції мають низку спільних ознак: їхня структура ґрунтується на трирівневій моделі, функціональне призначення компонентів є подібним, передбачається інтеграція хмарних сервісів, а також використання мережі Інтернет як базового середовища взаємодії між елементами системи.

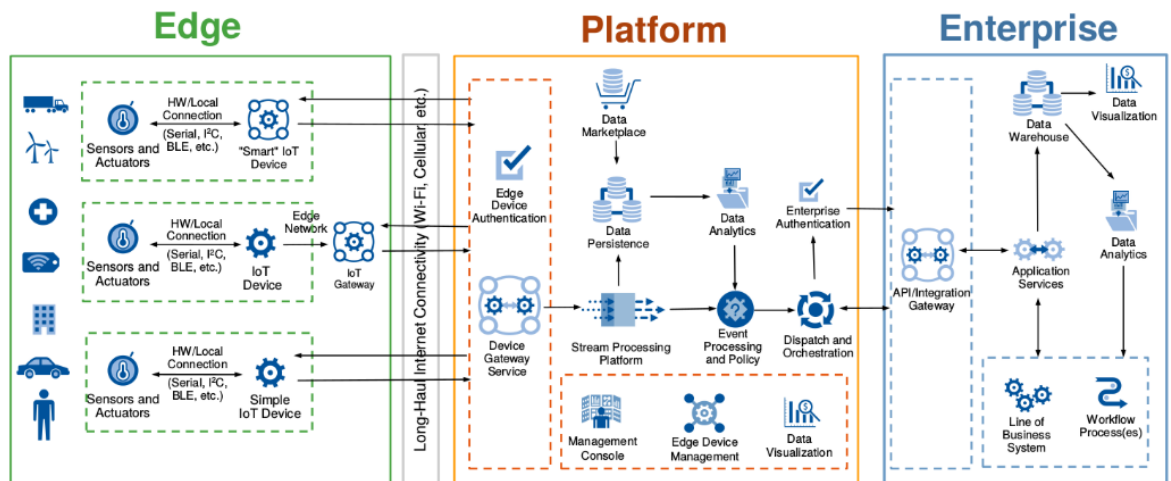


Рис.2.10. Приклад архітектури IoT

Мережі Інтернету речей забезпечують формування каналів обміну даними між IoT-пристроями та відповідними шлюзами. Фактично йдеться про підмережі, основне призначення яких полягає у збиранні інформації з пристроїв і подальшій її передачі до шлюзових вузлів.

Для організації такого зв'язку застосовують різні типи підмереж (див. табл. 2.2), вибір яких визначається використаною мережевою технологією. У розподілених системах усі пристрої функціонують як рівноправні вузли, взаємодіючи між собою без централізованого керування. При цьому один із вузлів, що має доступ до мережі Інтернет, виконує функції маршрутизації. У клієнт-серверній моделі всі пристрої обмінюються даними безпосередньо із серверною частиною, тоді як у кооперативних мережах взаємодія між вузлами відбувається із залученням проміжних шлюзів.

1. Шлюзи Інтернету речей. Розумні сенсори, що використовуються для збору даних, підключаються до мережевої інфраструктури саме через IoT-шлюзи. Таким чином, шлюз виконує роль сполучної ланки між сенсорним рівнем і комунікаційною мережею.

2. Комунікаційні мережі. Їх основне завдання — забезпечити передачу даних від IoT-пристроїв до серверів прикладного рівня, використовуючи дротові або бездротові технології зв'язку.

3. Прикладний рівень IoT. Цей рівень виконує функції обробки даних: отримані пакети проходять через набір сервісів, де вони аналізуються та використовуються відповідними інформаційними системами або організаціями.

Таблиця 2.2

Список основних мереж IoT

Мережі Інтернету речей	
1	Зв'язок по лінії електропередач (PLC)
2	Пристрій малої дальності (SRD)
3	Надширокосмуговий (UWB)
4	ZigBee
5	Шина лічильника (M-BUS)
6	Бездротова шина лічильників (M-BUS)
7	Bluetooth
8	WiMAX
9	Супутник
10	Гібридний оптоволоконний коаксіальний

Під час проєктування IoT-рішень особлива увага приділяється побудові мережевої інфраструктури та забезпеченню її надійного функціонування. Реалізація концепції Інтернету речей безпосередньо залежить від ефективних технологій передачі даних, які дають змогу пристроям, що працюють у різних і часто складних умовах, передавати інформацію до віддалених центрів обробки даних таких компаній, як Google, Amazon, Microsoft та IBM. З огляду на саму назву «Інтернет речей», важливим є розуміння принципів мережевої взаємодії, передачі даних, а також базових положень теорії сигналів. Водночас визначальним чинником функціонування IoT виступає не лише апаратна чи програмна складова, а передусім можливість встановлення стабільного та безпечного з'єднання.

Організація передачі даних у таких системах часто ґрунтується на використанні мереж ближньої дії, зокрема персональних мереж (PAN), які не

завжди базуються на стандартних IP-протоколах. Вони можуть реалізовуватись як у дротовому, так і в бездротовому форматі. Серед бездротових технологій найбільш поширеними є Bluetooth, mesh-мережі, Zigbee та Z-Wave. У сфері промислового Інтернету речей (IIoT) додатково використовуються такі стандарти, як WirelessHART та ISA100, що підкреслює значну різноманітність підходів до організації бездротового зв'язку. Що ж до дротових рішень, їх спектр є ще ширшим і охоплює численні спеціалізовані промислові мережі та протоколи.

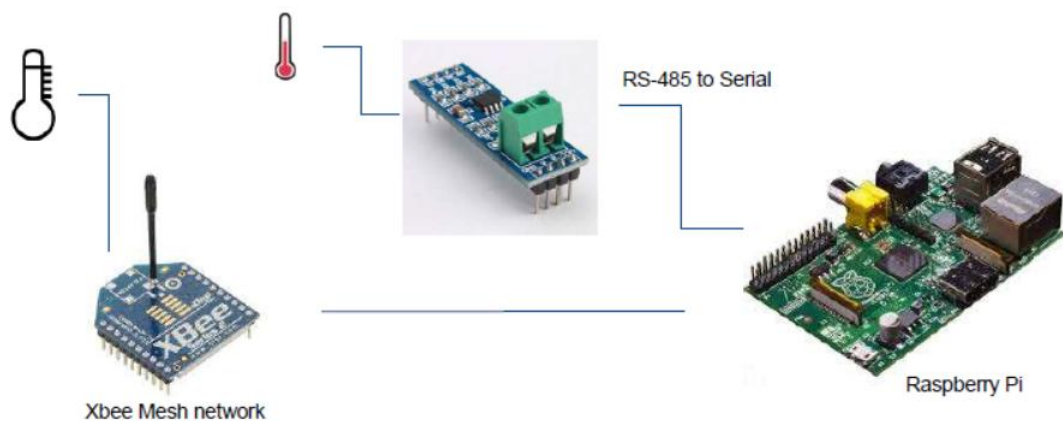


Рис.2.11. Приклад підключення датчиків IoT

Окрім персональних мереж, в екосистемі Інтернету речей широко використовуються бездротові локальні мережі та рішення, що базуються на IP-протоколах. До найпоширеніших належать Wi-Fi-мережі, які функціонують відповідно до стандартів IEEE 802.11, а також такі технології, як 6LoWPAN і Thread.

Окрім цього, для забезпечення зв'язку в IIoT-системах активно залучаються мобільні мережі, побудовані на основі стільникових стандартів, зокрема 3G та 4G LTE. Для задач міжмашинної взаємодії (M2M) і підтримки IIoT також впроваджуються спеціалізовані стандарти, такі як LTE Cat-1 і NB-IIoT.

Додатково в цій сфері застосовуються вузькоспеціалізовані пропріетарні технології зв'язку, серед яких варто відзначити LoRaWAN та Sigfox, що орієнтовані на енергоефективну передачу даних на значні відстані.

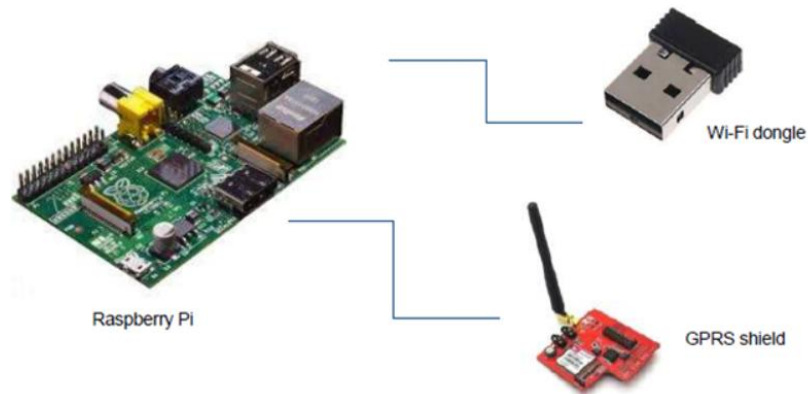


Рис.2.12. Приклад підключення датчиків IoT із застосуванням бездротових локальних мереж

2.5 Інструменти мережевого моделювання

OMNeT++. OMNeT++ — це об'єктно-орієнтоване середовище для моделювання мереж, реалізоване мовою C++, яке належить до класу відкритих дискретно-подійних симуляторів, побудованих на модульному принципі [29]. Графічний інтерфейс цього програмного засобу наведено на рис. 2.13.

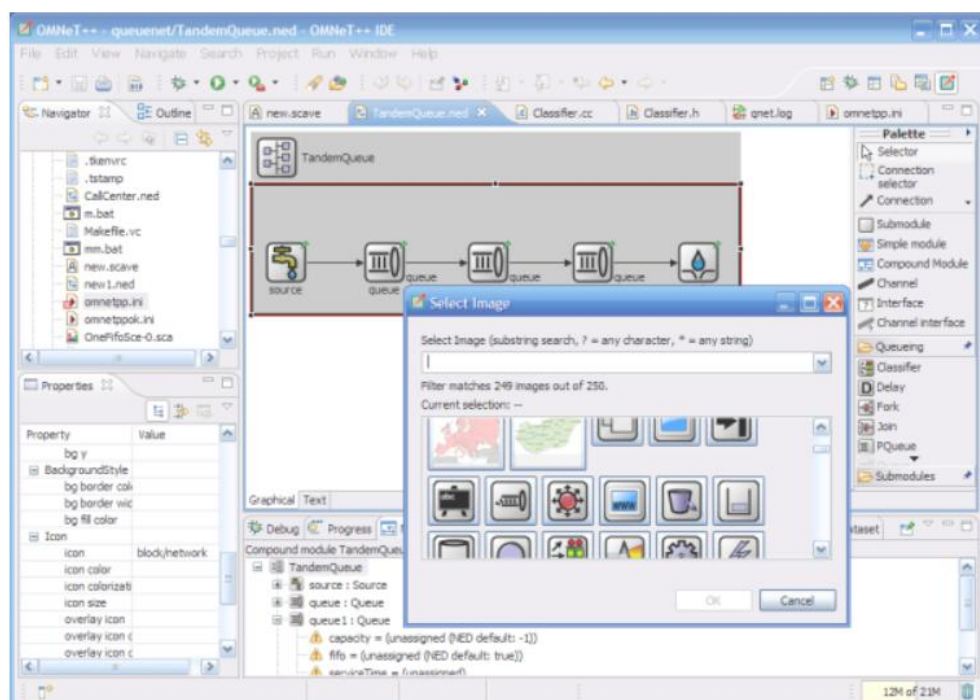


Рис.2.13. Середовище OMNeT++

Симулятор застосовується для моделювання як дротових, так і бездротових IP-мереж, водночас для бездротових сенсорних мереж (WSN) передбачено окремі додаткові розширення. OMNeT++ є поширеним інструментом моделювання, який постійно розвивається та підтримується активною спільнотою користувачів. Для створення моделей використовується мова програмування C++, що забезпечує гнучкість і широкі можливості налаштування.

До важливих переваг цього середовища належить наявність зручних графічних засобів, які спрощують процес побудови та аналізу симуляційних сценаріїв [29]. Водночас одним із обмежень є відносно невеликий набір підтримуваних протоколів у базовій конфігурації.

OPNET Modeler являє собою потужне середовище для моделювання мереж, що дає змогу досліджувати функціонування як окремих сегментів, так і великомасштабних мережевих інфраструктур. Даний інструмент орієнтований на вирішення задач проєктування, імітаційного моделювання та подальшого аналізу мереж різного призначення.

Функціональні можливості системи охоплюють підтримку широкого спектра мережевих технологій і протоколів, зокрема Ethernet, АТМ (асинхронного режиму передачі), IP та TCP. Це забезпечує зручне моделювання різних аспектів функціонування мереж і дозволяє гнучко аналізувати процеси передавання даних на різних рівнях.

Використання OPNET Modeler для оцінювання розроблених моделей зумовлене низкою причин. По-перше, у середовищі реалізовано механізм моделювання на основі кінцевих автоматів (FSM), що дає змогу формалізувати поведінку системи. По-друге, наявний інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, який застосовується для побудови моделей різноманітних мережевих компонентів — від фізичного рівня до прикладних процесів. Зокрема, у середовищі передбачено три основні графічні редактори: редактор мереж, редактор вузлів і редактор процесів, що проілюстровано на рис. 2.13.

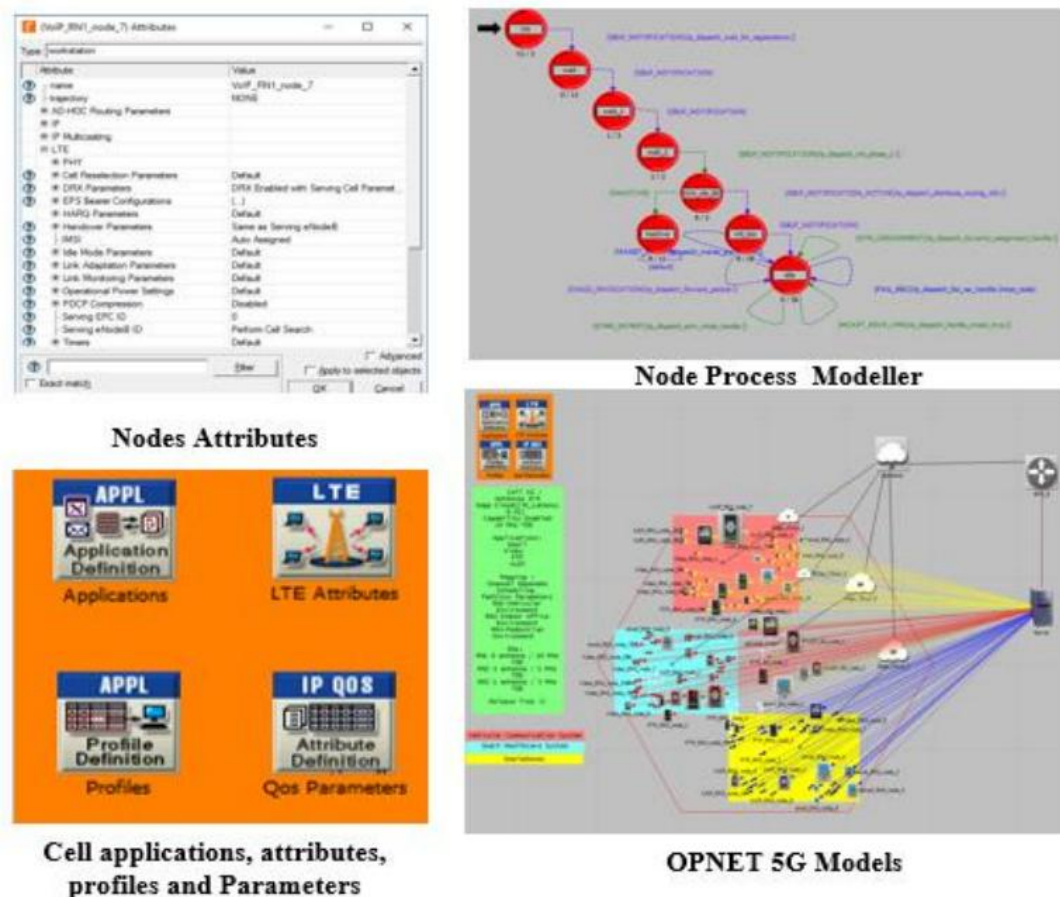


Рис.2.13. Графічний редактор, що використовується в OPNET

Третьою перевагою є можливість інтеграції OPNET Modeler із зовнішніми системами. Така взаємодія реалізується у форматі ко-симуляції через інтерфейс ESYS (External System Interface), який забезпечує керування процесами та обмін даними між залученими середовищами.

Ще одним аргументом на користь використання цього інструмента є його універсальність як платформи для моделювання й аналізу мереж різного призначення та рівня складності. Система дозволяє досліджувати поведінку пристроїв, протоколів і мережевих процесів, пропонуючи широкий набір (близько 400) функціональних можливостей моделювання. Важливою особливістю є можливість адаптації існуючих моделей і створення нових, а також формування декількох сценаріїв у межах одного проекту, що сприяє оптимізації проектних рішень. Для реалізації моделей використовується спеціалізована мова програмування Proto-C [30].

Середовище підтримує роботу з різними типами топологій: як створеними вручну, так і імпортованими або обраними з бібліотеки готових рішень. Програмний пакет містить значну кількість реалізацій мережевих протоколів, а для моделювання бездротових систем передбачено окреме розширення — OPNET Modeler Wireless Suite [27]. Інструмент також оснащений розвиненим графічним інтерфейсом, що використовується для побудови моделей, запуску симуляцій та аналізу отриманих результатів, табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Порівняння інструментів мережевого моделювання

	NS3 OPNET	NS3 OPNET	OMNET++	QualNet	GloMoSim
Інтерфейс	C++/Python	C/C++	C++	Parsec	Parsec (C)
Графічна підтримка	Обмежений	Так	Так	Так	Обмежений
Масштабованість	Великий	Так	Так	Так	Так
Паралелізм	Так	Так	Так	Так	Так
Документація та підтримка користувачів	Відмінний	Відмінний	Добрий	Добрий	Поганий
Розширюваність	Відмінний	Відмінний	Відмінний	Відмінний	Відмінний
Емуляція	Так	Непрямий	Обмежений	Так	Непрямий

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ АГРЕГАЦІЇ ТРАФІКУ ДАНИХ ТА СХЕМА РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ІОТ-МЕРЕЖАХ 5G

3.1 Мобільні мережі 5G як платформа підтримки інтелектуальних систем

У цьому розділі розглядаються мобільні мережі 5G як перспективна платформа для підтримки сучасних інтелектуальних систем, що характеризуються значними обсягами передавання даних. Останніми роками спостерігається стрімке, фактично експоненціальне зростання кількості пристроїв Інтернет речей у мобільних мережах, що зумовлює підвищені вимоги до пропускної здатності та швидкості передавання інформації. У зв'язку з цим очікується виникнення низки викликів, зокрема необхідності обробки великих масивів даних і забезпечення різномірних вимог до якості обслуговування (QoS).

У розділі наведено теоретичні та концептуальні засади формування моделей трафіку в різних середовищах мобільних мереж із урахуванням обсягів переданих даних. Також проаналізовано наявні наукові підходи до агрегації трафіку. Запропоновано модель агрегації даних (DTA) у поєднанні зі схемою розподілу ресурсів (RAS), що базується на принципі сегментації мережі. Ефективність запропонованих рішень підтверджено результатами моделювання.

З огляду на швидкий розвиток мобільних мереж, зокрема 5G, та зростаючі вимоги IoT-пристроїв до QoS, управління мережевими ресурсами стає дедалі складнішим завданням, що потребує ретельного проєктування. Сфери застосування IoT охоплюють широкий спектр напрямів, зокрема «розумні» офіси, системи відеоконференцзв'язку (VCS), інтелектуальні системи оповіщення, «розумні будинки» (SHS) та логістичні платформи [31]. У цьому контексті мережі 5G відіграють ключову роль, оскільки забезпечують гнучке керування радіоресурсами шляхом використання механізму мережевої сегментації (network

slicing), де кожен сегмент формується відповідно до вимог конкретного сервісу щодо QoS.

Важливою складовою такого підходу є віртуалізація ресурсів, яка дозволяє операторам ефективно розподіляти фізичну інфраструктуру між різними сервісами. У досліджуваній моделі радіоресурси 5G представлені у вигляді базових одиниць — блоків фізичних ресурсів (PRB), що розподіляються між вузлами мережі та пристроями відповідно до їхніх потреб. Дані від різних IoT-пристроїв агрегуються та передаються в межах окремих сегментів з урахуванням вимог QoS [32]. Водночас обмеженість ресурсів і різноманітність сервісів ускладнюють задачу їх ефективного розподілу.

Окрему увагу приділено проблемам, що виникають унаслідок масового підключення IoT-пристроїв у мережах 4G і 5G. Значне навантаження на радіомережу доступу (RAN) може призводити до перевантажень і зниження ефективності роботи системи. Оскільки радіоресурси є обмеженими, їх раціональне використання стає критично важливим. У мережах 5G мінімальною одиницею виділення ресурсів є PRB (див. рис. 3.1), який за сприятливих умов здатен передавати значні обсяги даних. Однак у випадку IoT-застосувань, де обсяг переданих даних може бути незначним, неефективне використання PRB призводить до втрат ресурсів.

Крім того, різні IoT-додатки мають відмінні вимоги до параметрів QoS, таких як затримка, точність і пріоритет обробки. Це зумовлює необхідність урахування як вузькосмугових, так і широкосмугових сценаріїв передавання даних. Таким чином, оптимізація використання радіоресурсів і класифікація трафіку є ключовими напрямками для забезпечення ефективного функціонування мереж у умовах стрімкого зростання обсягів даних і кількості підключених пристроїв.

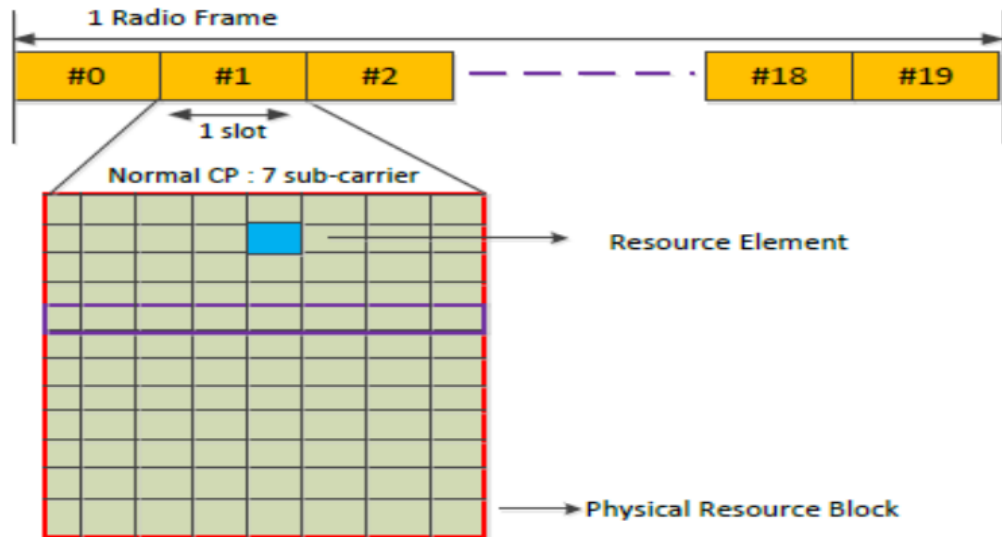


Рис.3.1. Блок фізичних ресурсів (PRB)

3.2 Релейні вузли на базі інфраструктури (RN)

Ретрансляційні вузли (RN) поділяються на фіксовані та мобільні залежно від особливостей їх розгортання в інфраструктурі мережі. Вони застосовуються в різних сценаріях з метою підвищення швидкості передавання даних, розширення зони покриття та забезпечення безперервного обслуговування користувацького обладнання (UE) як у приміщеннях, так і поза ними. Зокрема, використання RN дозволяє організувати стабільний зв'язок навіть під час переміщення користувачів, наприклад, у транспорті — автобусах або поїздах. Детальніша класифікація RN за інфраструктурною ознакою наведена нижче.

Фіксовані RN. Такі вузли переважно використовуються для розширення покриття в тих зонах, де сигнал від донорської базової станції (DeNB) є недостатнім або відсутній, зокрема на межах стільників або в умовах затінення. Вони дозволяють покращити якість обслуговування для користувачів, що перебувають поза зоною впевненого прийому основної станції (див. рис. 3.2). Як правило, фіксовані RN оснащуються антенами меншого розміру порівняно з базовими станціями та встановлюються на будівлях, щоглах або інших підвищених конструкціях.

Мобільні RN. Відповідно до специфікацій 3GPP, мобільні ретранслятори орієнтовані насамперед на забезпечення зв'язку для користувачів у швидкісному транспорті, зокрема поїздах. Водночас сучасні дослідження демонструють ефективність їх застосування і в міському громадському транспорті — автобусах, трамваях тощо. Основне призначення таких вузлів полягає у створенні стабільного покриття в умовах постійного руху. Вони встановлюються безпосередньо в транспортних засобах і забезпечують взаємодію між мобільними UE та базовою станцією (DeNB).

Зв'язок між RN і DeNB здійснюється через канал зворотного зв'язку (backhaul), тоді як обмін даними з користувацькими пристроями відбувається через канал доступу. Через обмеження, пов'язані з габаритами транспортних засобів і вимогами безпеки, мобільні RN зазвичай оснащуються компактними антенами, що, однак, не перешкоджає ефективному виконанню їх основних функцій.

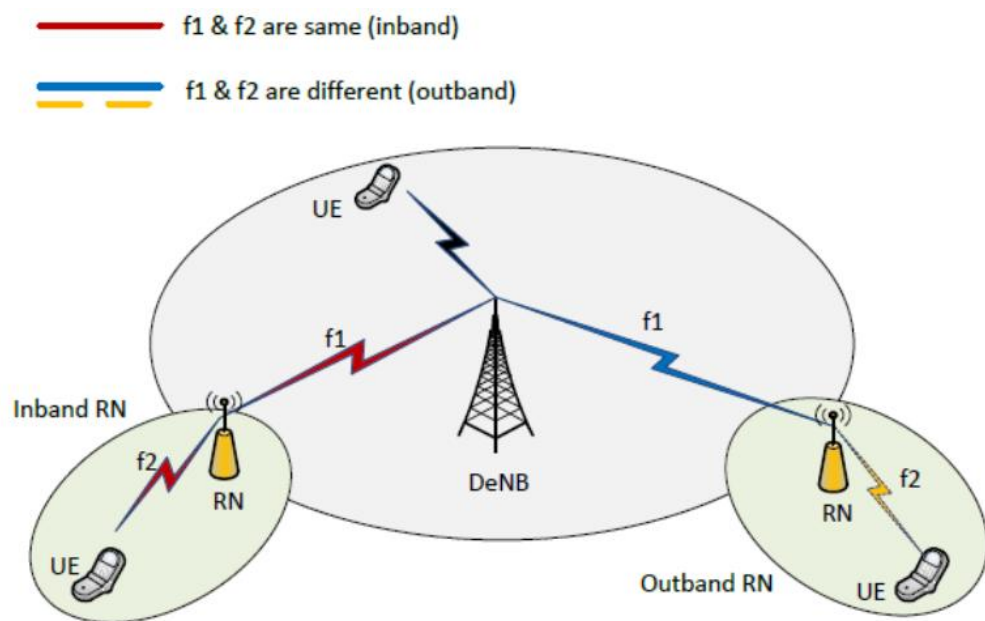


Рис.3.2. Ретрансляція в 5G

Сегментація мережі 5G. Мобільні мережі 5G як новий етап розвитку телекомунікацій активно досліджуються, і одним із ключових напрямів є технологія мережевої сегментації (network slicing). Оператори розглядають її як

основу архітектури майбутніх мереж, що дозволяє підвищити ефективність використання інфраструктури [26].

Суть підходу полягає у можливості поділу єдиної фізичної мережі на кілька логічно ізольованих віртуальних сегментів типу end-to-end (E2E). Кожен із них функціонує як самостійна мережа, охоплюючи всі рівні — від користувацького обладнання та мережі доступу до транспортної та ядрової частин. За аналогією, це подібно до розділення одного фізичного носія даних на декілька логічних дисків, кожен з яких використовується для окремих задач.

Кожен сегмент формується відповідно до вимог конкретного сервісу та має власний набір виділених ресурсів. До них належать обчислювальні потужності, пропускна здатність, параметри якості обслуговування (QoS), а також інструменти віртуалізації та керування мережею, зокрема NFV, SDN і хмарні технології. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість адаптації мережі до різномірних сценаріїв використання, рис. 3.3[32].

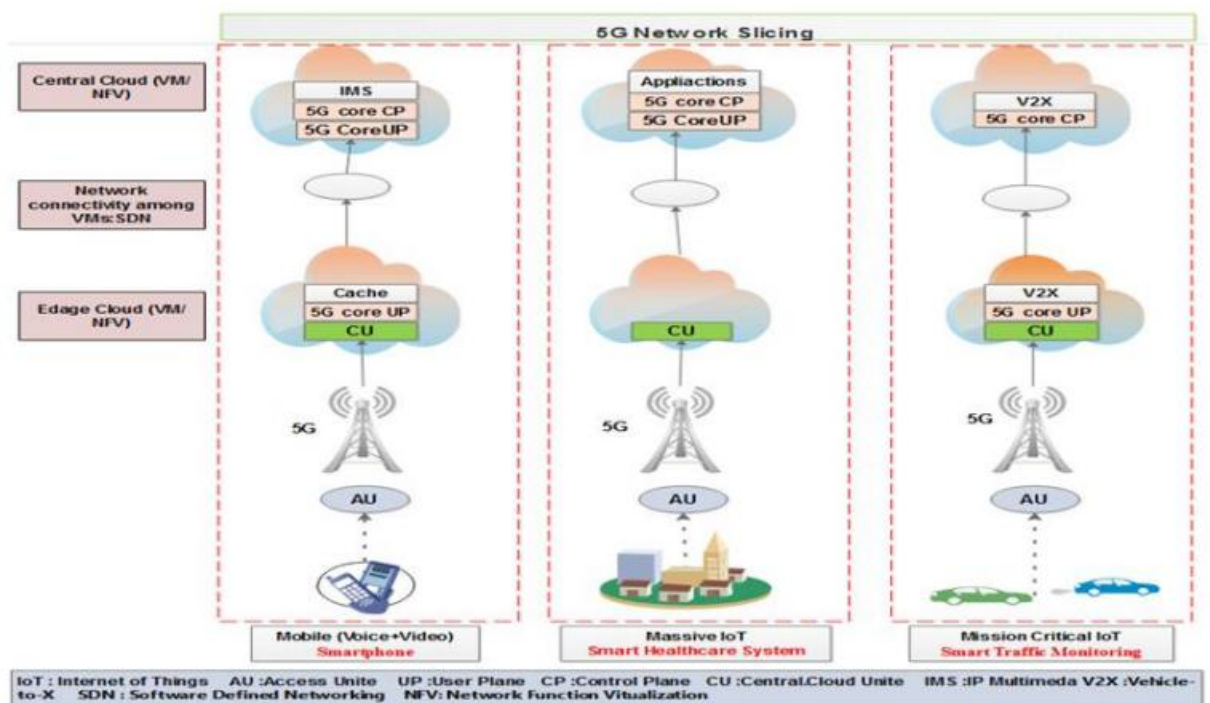


Рис.3.3. Розподіл мережі 5G

3.3 Модель агрегації трафіку даних

Досліджувана модель DTA передбачає об'єднання даних, що надходять від декількох пристроїв Інтернету речей, на рівні протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP) у комірках RN та DeNB. Рівень PDCP забезпечує виконання таких функцій, як стиснення заголовків, організація повторної передачі, доставка блоків сеансових даних (SDU), а також виявлення та усунення дубльованих пакетів.

У межах запропонованої моделі саме рівень PDCP використовується для консолідації даних IoT-пристроїв у висхідному каналі мереж п'ятого покоління (5G). Доцільність його застосування зумовлена можливістю об'єднання пакетів даних із мінімальним службовим навантаженням, зокрема за рахунок зменшення кількості додаткових заголовків, що ілюструється на рис. 3.4.

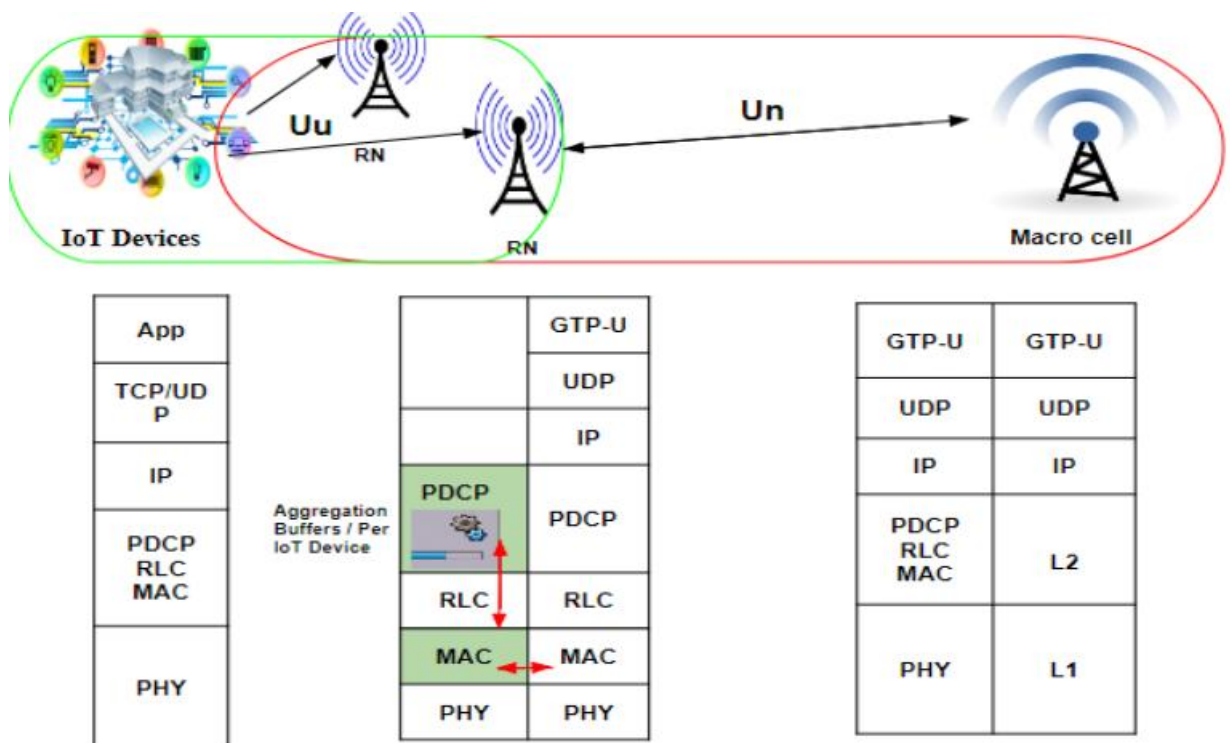


Рис.3.4. Блок-схема пакетів даних пристроїв Інтернету речей

Пакети даних, сформовані різними пристроями Інтернету речей, надходять на фізичний рівень (PHY) вузла агрегації разом із власними службовими

заголовками, зокрема рівнів MAC, RLC та PDCP. У процесі подальшої обробки та передавання інформації на вищі рівні ці заголовки послідовно видаляються. Після досягнення рівня PDCP у даних залишаються виключно корисні навантаження окремих пристроїв, які надалі підлягають об'єднанню [33].

Для реалізації агрегації в комірці RN передбачено використання єдиного буфера B, у якому накопичуються пакети від різних IoT-пристроїв. Такий підхід сприяє підвищенню якості обслуговування (QoS) як для самих пристроїв, так і для вузлів RN та комірок DeNB у межах мобільної мережі п'ятого покоління. У межах даної архітектури комірka RN функціонує як користувацький елемент щодо комірки DeNB при передаванні трафіку.

З метою підвищення ефективності використання спектра, зменшення затримок передавання пакетів і збільшення пропускної здатності розглядаються сценарії, у яких взаємодія всіх IoT-пристроїв із коміркою DeNB здійснюється через RN. Узагальнена модель агрегації даних наведена на рис. 3.5 та в табл. 3.1.

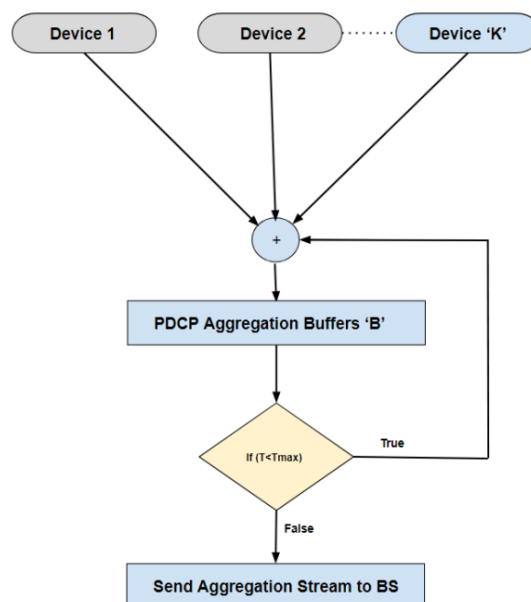


Рис. 3.5: Блок-схема моделі агрегації трафіку даних

Model 1: An overview of the proposed data aggregation Model in the RN PDCP. Aim: Efficient utilization of PRBs among IoT devices initialization; <pre> set expiry timer Tmax == 5 ms; set Bmax == (available TBS – RN Un overhead); set timer T == 0; set multiplexing buffer B == 0; schedule RN and allocate PRBs (e.g., 5 PRBs are set for RN to analyse multiplexing process); schedule IoT devices within the coverage of RN for uplink transmission; while packet arrival == TRUE do start multiplexing process based on the value of timer and the size of the multiplexing buffer; if T < Tmax && B < Bmax then accumulate incoming packet into buffer B; increment timer T; else re-assemble aggregated packet of size available TBS – overhead from buffer B; send large multiplexed packet to RN PHY via RN Un protocols; add RN Un protocols overhead; route multiplexed packet to BS in next TTI; reset timer T; end if end while </pre>

Рис.3.6. Модель агрегації трафіку даних

Максимально допустима затримка $T_{\max}$ є ключовим параметром при обробці пакетів даних пристроїв Інтернету речей і визначається з урахуванням класів трафіку та рівнів їх пріоритетності. Різні IoT-пристрої генерують дані з неоднаковими вимогами до затримки, що безпосередньо залежить від сфери їх застосування. Зокрема, пакети, отримані в межах систем автомобільного зв'язку (VCS), наприклад для передавання аварійних повідомлень або взаємодії між транспортними засобами, мають вищий пріоритет порівняно з даними від інтелектуальних сенсорів. Відповідно, такі пакети потребують мінімальних затримок обробки та передавання.

У зв'язку з цим параметр $T_{\max}$ визначається як граничний інтервал часу між передаванням даних від пристроїв із найвищим пріоритетом. У базовій конфігурації його значення приймається рівним 5 мс, що означає тимчасову буферизацію пакетів у вузлі RN протягом зазначеного інтервалу.

При цьому $T_{\max}$ має адаптивний характер: його значення може коригуватися у випадку надходження до RN пакетів із ще вищим рівнем пріоритету, ніж у вже наявних у черзі. Дані від усіх IoT-пристроїв накопичуються в буферах комірок RN та DeNB, причому їхні індивідуальні IP-заголовки залишаються незмінними. Буферизація триває доти, доки затримка не досягне встановленого значення $T_{\max}$.

3.4 Моделі та стратегія розподілу ресурсів

Схема розподілення ресурсу (RAS).

Для забезпечення роботи досліджуваної моделі DTA разом із механізмом розподілу ресурсів (RAS) передбачається її функціонування переважно на прикладному рівні мобільних мереж 5G. Основною метою такої схеми є задоволення підвищених вимог до якості обслуговування (QoS) з урахуванням пріоритетності пристроїв Інтернету речей. У цьому контексті розглядається підхід, що базується на віртуалізації радіоресурсів, який застосовується для реалізації RAS у межах мережевих сегментів, орієнтованих на різні додатки.

Ключовим аспектом є ефективний розподіл фізичних ресурсних блоків (PRB) між сегментами таким чином, щоб забезпечити виконання їхніх вимог. Ускладнення задачі розподілу ресурсів у середовищі сегментації зумовлене появою дворівневої системи пріоритетів. Перший рівень — міжсегментний — визначає пріоритет окремих сегментів відповідно до умов угод між оператором мережі та орендарем сегмента. Другий рівень — внутрішньосегментний — стосується розподілу ресурсів між користувачами в межах одного сегмента.

Аналіз підходів, застосованих у мобільних мережах четвертого покоління (4G), свідчить про їх здатність забезпечувати високий рівень QoS для користувачів, проте вони не враховують особливості сегментації мережі. Це пов'язано з тим, що в 4G розподіл PRB здійснюється шляхом встановлення пріоритетів для сервісів на рівні користувацького обладнання (UE). Такий підхід є недостатнім для мереж 5G, де різні UE можуть належати до різних сегментів із власними пріоритетами. Відповідно, при розподілі ресурсів необхідно одночасно враховувати як пріоритет сегмента, так і пріоритет запитуваної послуги.

Запропонована схема, зображена на рис. 3.7, реалізує дворівневу модель пріоритетів, у якій мережеві сегменти взаємодіють із модулем RAS, задаючи необхідний рівень QoS. На основі визначеного пріоритету сегмента механізм RAS приймає рішення щодо виділення ресурсів і порядку обслуговування.

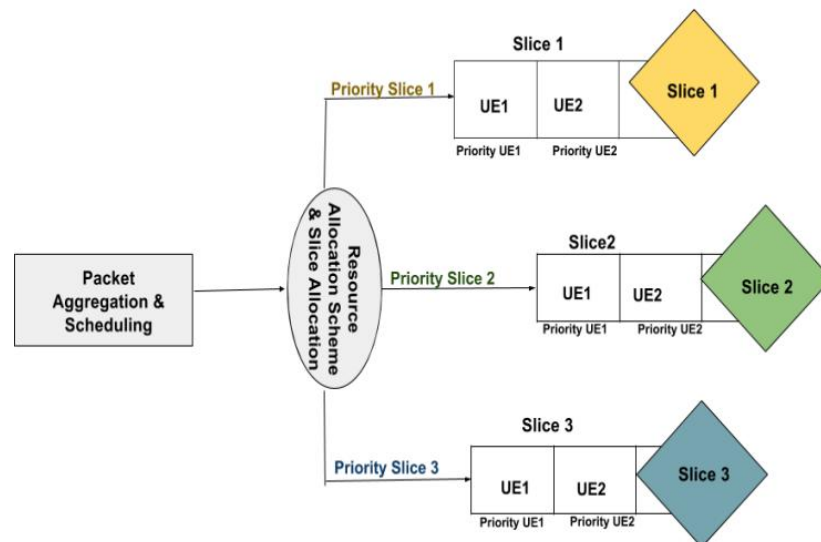


Рис.3.7. RAS з міжсекційним та внутрішньосекційним пріоритетом

З урахуванням міжсегментного та внутрішньосегментного рівнів пріоритету віртуалізована мережа здійснює розподіл PRB між користувацькими пристроями (UE) або IoT-вузлами в межах допущених сегментів. Відповідно, механізм RAS орієнтований на забезпечення максимально можливого рівня якості сприйняття сервісу (QoE) для користувачів кожного сегмента з урахуванням їх пріоритетності.

Оцінювання QoE базується на ефективній пропускній здатності, яку отримує користувач, нормованій відносно його максимально необхідної швидкості передавання даних. У разі потреби ресурси, виділені сегментам із нижчим пріоритетом, можуть бути скориговані до мінімального рівня, достатнього для підтримання базових вимог QoS, що дозволяє обслуговувати нові сегменти з вищим пріоритетом.

Таким чином, запропонований підхід передбачає динамічну адаптацію кількості PRB, що виділяються різним сегментам мережі [34], залежно від інтенсивності трафіку. Це дає змогу підвищити ефективність використання мережевих ресурсів без погіршення якості обслуговування користувачів.

Схема розподілу ресурсів середовища.

Відповідно до концепції мережевої сегментації у технології 5G, основну увагу приділено класифікації та оцінюванню вимог до якості обслуговування (QoS)

і характеристик трафіку даних для застосунків Інтернету речей у сценаріях «розумного міста». До таких сценаріїв належать, зокрема, використання смартфонів, інтелектуальних систем охорони здоров'я та автомобільних комунікаційних систем. Характеристики трафіку в межах сегментованої мережі 5G визначаються типом передаваного контенту, обсягами даних, пріоритетністю передавання та режимами обміну інформацією.

Як показано на рис. 3.8, контент IoT-пристроїв може включати потокову передачу голосу та відео. За обсягом дані поділяються на різні категорії: великі (пакети понад 1 Кбайт) та малі (менше 1 Кбайт) [34]. Режимми передавання охоплюють періодичний, безперервний, пакетний та подієво-орієнтований (із часовими обмеженнями) обмін даними. Водночас пріоритети передавання класифікуються як низькі, середні та високі.

З урахуванням особливостей розподілу застосунків Інтернету речей, у дослідженні запропоновано їх поділ на три основні мережеві сегменти, сформовані на основі вимог до QoS та характеристик трафіку даних.

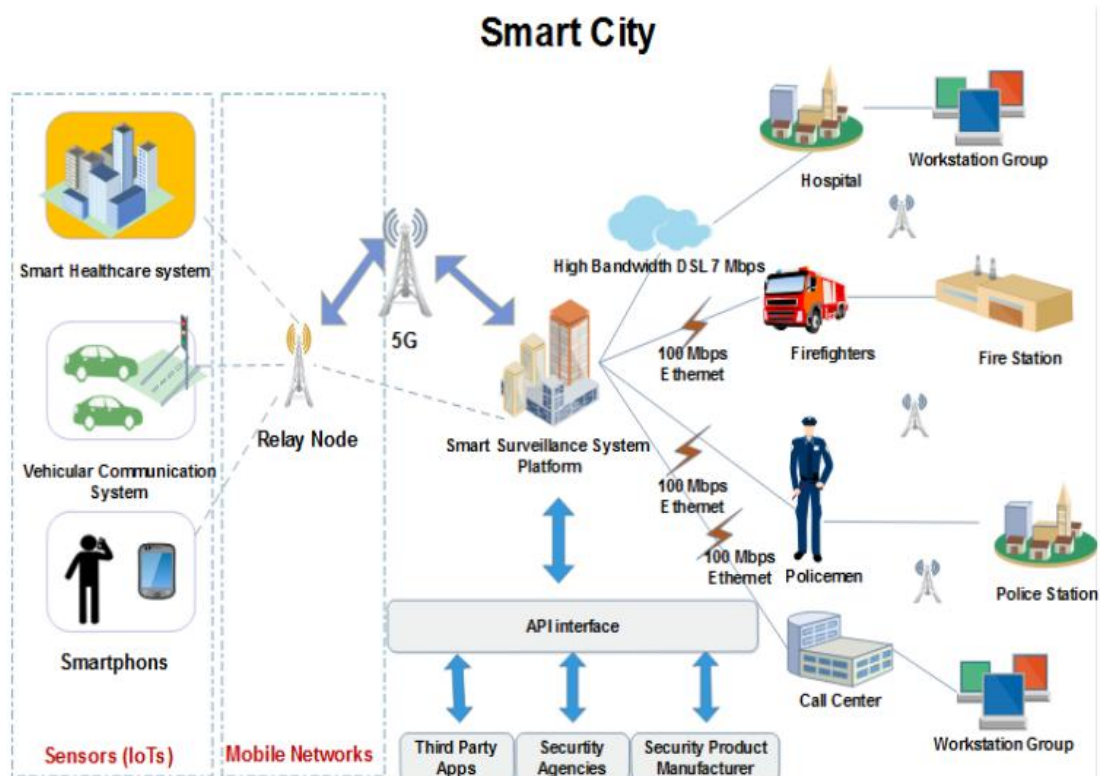


Рис.3.8. Розумні системи у випадку використання розумного міста

Стратегія схеми розподілу ресурсів.

Як ілюструється на рис. 3.9, запропонована схема включає чотири ключові компоненти: фізичні ресурсні блоки (PRB), рівень віртуалізації мережі, рівень сервісних сегментів, а також механізм розподілу ресурсів RAS [34].

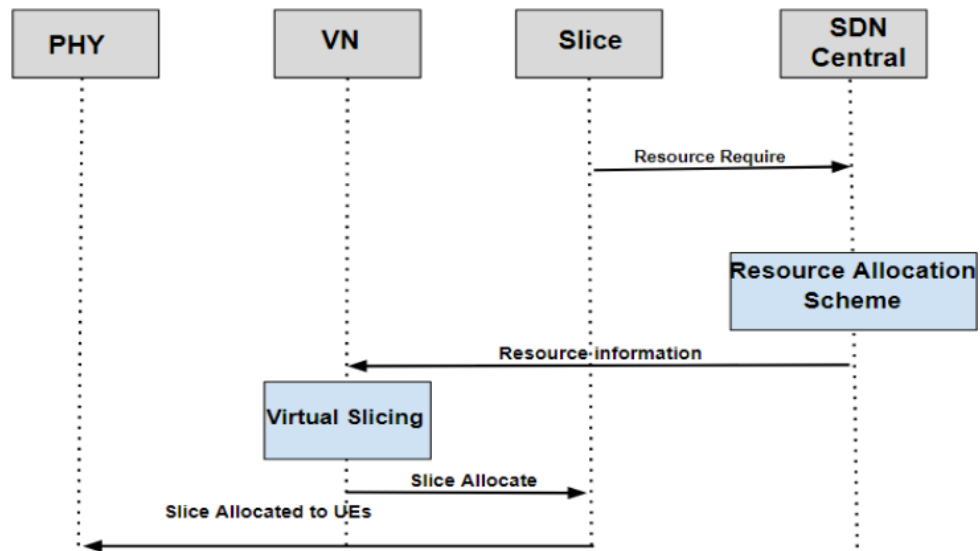


Рис.3.9. Блок-схема RAS

Сервісні сегменти. Сервісні сегменти пропонують різні послуги (наприклад, смартфони, систему автомобільного зв'язку та інтелектуальну систему охорони здоров'я), для обслуговування яких потрібні ресурси. Я позначу $\mathbb{S} = \{1, 2, 3 \dots S\}$ набір сегментів у віртуальній мережі [34]. Кожен сегмент s має набір UE, такий набір символізується як $\mathbb{U}_s = \{1, 2 \dots U_s\}$. Кожен сегмент S виконує запит до RAS з точки зору обмежень QoS. У цьому розділі я змодельовав такий запит за допомогою RS_{mins} та RS_{max} , що позначає мінімальну та максимальну швидкості передачі даних, пов'язані зі зрізом s відповідно. Кожен зріз s характеризується пріоритетом $\mathbb{p}_s$, де такі пріоритети визначаються з обмеженням $\sum_{s \in \mathbb{S}} \mathbb{p}_s = 1$. Аналогічно, кожен користувач u , що належить до зрізу s , тобто U_s , характеризується пріоритетом, де $\sum_{u \in U_s} \mu_{us} = 1$

Віртуальна мережа. Рівень віртуалізації мережі забезпечує представлення фізичних ресурсів (PRB) у вигляді абстрактної моделі. На основі рішень,

сформованих механізмом RAS, здійснюється розподіл цих ресурсів між різними мережевими сегментами. Віртуальний рівень отримує запити від сегментів щодо обслуговування відповідних користувацьких пристроїв (UE) та виконує подальше призначення фізичних ресурсів. При цьому враховуються як міжсегментні, так і внутрішньосегментні пріоритети, а також вимоги до якості обслуговування користувачів.

Фізичні ресурси. Фізичні ресурси позначають PRB, доступні у віртуальній мережі. Для спрощення я посилаюся на канал висхідного зв'язку однієї комірки RN. Загальна доступна пропускна здатність позначена як B МГц. Набір $M = \{1, 2 \dots M\}$ представляє доступні підканали, де пропускна здатність загального підканалу m дорівнює $p_m = \frac{B}{M}$. Загальна потужність передачі P_{TOT} рівномірно розподіляється між кожним підканалом, тобто $p_m = \frac{B}{M}$.

Коли РМ призначає фізичні ресурси, я враховую стан каналу UE. Я припускаю, що стан каналу визначається втратами на шляху передачі та компонентами затінення. Втрати на трасі та втрати на трасі через затінення вважаються гаусовою випадковою величиною з нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням σ , що дорівнює $8dB$. Отже, втрати на трасі базуються на значенні відстані d_{us} між типовим UE та RN.

3.5 Варіанти використання розподілу послуг

Мобільні термінали п'ятого покоління забезпечують високий рівень якості обслуговування (QoS) завдяки можливості роботи в різних мережових середовищах. Наразі користувачі мобільного Інтернету, як правило, самостійно обирають бездротове підключення від різних інтернет-провайдерів (ISP), не маючи інструментів для використання накопичених даних про QoS з метою оптимального вибору мережі для конкретної послуги.

Очікується, що у перспективі 5G-пристрої отримають функціональність аналізу параметрів QoS із можливістю збереження статистики трафіку

безпосередньо в мобільному терміналі. До ключових характеристик QoS належать пропускна здатність, затримка, варіація затримки (джиттер) та надійність, які визначатимуть ефективність роботи пристроїв у мережі. На основі цих показників системні механізми зможуть автоматично обирати найбільш відповідне бездротове з'єднання відповідно до вимог конкретної послуги.

У зв'язку з цим доцільно розглядати різні варіанти використання як окремі категорії сервісів із відповідними рівнями пріоритету, що відображено на рис. 3.10 [34]. Така класифікація базується на відмінностях у вимогах до QoS для різних типів користувачів і застосунків.

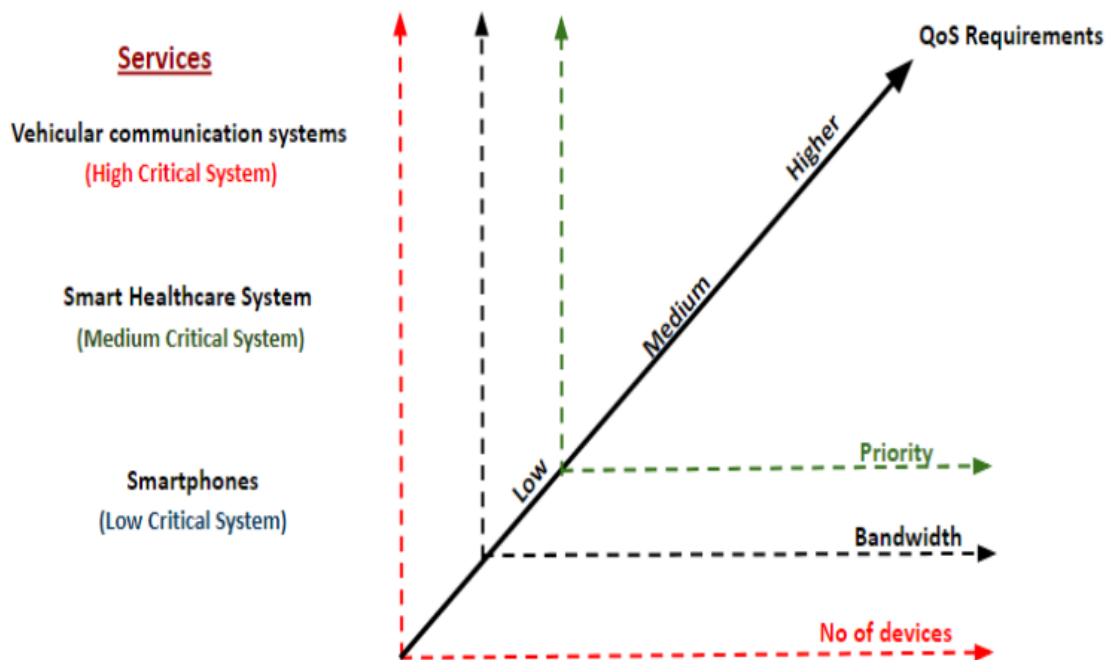


Рис.3.10. Варіанти використання розподілу послуг

Смартфони.

Мобільні пристрої, зокрема смартфони та планшети, сьогодні є одними з основних джерел генерації мережевого трафіку. Очікується, що вони й надалі залишатимуться ключовими персональними інструментами користувача, поступово вдосконалюючись у напрямі продуктивності та функціональних можливостей. Водночас стрімке зростання кількості підключених пристроїв

значною мірою зумовлене поширенням носимих гаджетів і сенсорних систем, кількість яких уже досягла мільйонів.

Основну частку трафіку, що генерується такими пристроями, становить потокове відео. Для нього характерні значні обсяги передаваних даних, які можуть досягати десятків мегабайт у межах одного сеансу, а також безперервний характер передачі. Через високі вимоги до пропускної здатності такі потоки зазвичай мають невисокий пріоритет і можуть піддаватися обмеженням у разі перевантаження мережі.

Інтелектуальні системи охорони здоров'я (SHS).

Сучасні рішення у сфері охорони здоров'я активно інтегрують технології Інтернету речей, формуючи концепцію інтелектуальних медичних систем. Вони передбачають обробку конфіденційних даних і тому є об'єктом підвищеної уваги як з боку науковців, так і промисловості.

У межах таких систем використовуються бездротові сенсорні мережі тіла (BAN), що розміщуються безпосередньо на пацієнті або поруч із ним. Вони забезпечують безперервний збір життєво важливих показників, таких як артеріальний тиск, пульс чи температура. Моніторинг може здійснюватися як у медичних установах, так і поза ними — наприклад, у домашніх умовах.

У разі виявлення критичних відхилень система автоматично формує сигнали тривоги та передає їх медичному персоналу для оперативного реагування. Такий підхід дозволяє забезпечити постійний контроль стану пацієнтів і підвищити ефективність надання медичної допомоги.

Системи автомобільного зв'язку (VCS).

Автомобільні комунікаційні системи призначені для обміну інформацією між транспортними засобами, інфраструктурою та інформаційними сервісами. Вони базуються на різних технологіях передачі даних і забезпечують реалізацію численних функцій у транспортній сфері.

Зокрема, взаємодія може здійснюватися за схемами «транспортний засіб – транспортний засіб» (V2V) або «транспортний засіб – інфраструктура» (V2I). Такі

рішення використовуються для підвищення безпеки дорожнього руху, оптимізації паркування, контролю витрат палива, доступу до Інтернет-сервісів та відеоспостереження.

Особливо важливим є швидке передавання інформації у критичних ситуаціях. Дані про аварійні події мають миттєво поширюватися серед транспортних засобів у зоні зв'язку, що дозволяє попередити інші учасники руху. Через жорсткі вимоги до часу реакції такі системи потребують мінімальної затримки передачі даних, що забезпечується сучасними мережами, зокрема 5G.

При цьому попереджувальні повідомлення, як правило, мають невеликий обсяг і передаються лише за необхідності, що дозволяє ефективно використовувати ресурси мережі.

3.6 Методика моделювання та аналіз результатів

Підходи до моделювання.

Для аналізу ефективності запропонованої моделі DTA та механізму RAS було використано імітаційне середовище OPNET. У процесі дослідження виконано моделювання роботи кількох мережевих протоколів з метою визначення впливу трафіку, сформованого пристроями Інтернету речей, на функціонування мобільних мереж п'ятого покоління.

У межах експерименту враховано типові протоколи передавання даних, зокрема SMTP, VoIP, RTP та FTP, які дозволяють відтворити різні типи мережевого навантаження. Аналіз проводився для трьох варіантів побудови системи: із застосуванням агрегації PRB разом із RAS, із використанням агрегації PRB без RAS, а також без використання як агрегації PRB, так і механізму RAS.

Отримані результати свідчать, що трафік IoT-пристроїв суттєво впливає на обробку даних із високим пріоритетом. Водночас застосування відповідних механізмів розподілу ресурсів дає змогу покращити загальні показники функціонування мережі. Зокрема, зафіксовано підвищення середньої пропускної

здатності на рівні комірки, зменшення часу відгуку при передаванні даних від IoT-вузлів, скорочення затримок у режимі end-to-end, а також більш ефективне використання радіоресурсів.

Налаштування моделювання.

У моделі передбачено використання віддаленого сервера, який забезпечує підтримку сервісів SMTP, VoIP, FTP та RTP як складових інтелектуальних мережевих застосунків. З'єднання між сервером і шлюзом доступу (aGW) реалізовано через Ethernet-канал із середнім значенням затримки близько 5 мс. На рівні шлюзу застосовуються базові мережеві протоколи, зокрема IP та Ethernet.

Взаємодія між вузлами aGW та базовими станціями (RN1, RN2, RN3 і DeNB) здійснюється через IP-мережу, розташовану на периферійному рівні. У транспортній мережі забезпечується підтримка параметрів якості обслуговування, що дозволяє диференціювати трафік відповідно до його типу та пріоритету.

Мобільність користувачів моделюється шляхом періодичного оновлення їхніх координат відповідно до заданої моделі переміщення. Дані про місцезнаходження зберігаються на централізованому сервері (Global-UE-Server), що дозволяє відслідковувати зміну положення абонентів у межах мережі.

Для опису радіоканалу враховано ключові фактори впливу, зокрема втрати сигналу на шляху поширення, повільні та швидкі замирання. Основна увага в моделюванні приділяється користувацькій площині, що дає змогу об'єктивно оцінити показники end-to-end продуктивності.

Параметри якості обслуговування налаштовано відповідно до рекомендацій стандартів 3GPP, що забезпечує узгодженість із сучасними вимогами до телекомунікаційних систем. Додаткові параметри моделювання наведено у відповідній таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри моделювання

Параметри	Налаштування
Тривалість симуляції	1500 с.
Макет комірки	1 Enb
Радіус покриття eNB	350 м.
Мінімальна відстань між базовою станцією (eNB) та користувачем (UE)	35м.
максимальна потужність передавання користувачького пристрою	23 dBm
Параметри 5G	
Стільники 5G	антени 8*8
Хмара	Edge cloud
Технічні можливості	Увімкнено
Параметри RN	
PRBs для RN	DeNB виділяє RN 3 PRB для оцінки використання PRB
Тип RN	фіксований
RN 1	Підтримується 4 антенами, 10 МГц TDD
RN 2	Підтримується 3 антенами, 5 МГц TDD
RN 3	Підтримується 2 антенами, 3 МГц TDD
Ємність транспортного блоку (TBS)	1608 біт проти MCS 16 та PRB 5. Доступні накладні витрати TBS для швидкості обслуговування (біт/TTI), 1608 (TBS) - 352 (накладні витрати) = 1256 біт/TTI.
Симульовані сценарії	Агрегаційні PRB з RAS, агрегаційні PRB без RAS, Без агрегаційних PRB та RAS.
Загальні параметри	
Швидкість терміналу	120 км/год
Модель мобільності	Випадкова точка шляху (RWP)
Коефіцієнт повторного використання частоти	1
Пропускна здатність системи	5 МГц
Втрати на шляху	$28.1 + 37.6 \log_{10}(R)$. R в км
Повільне згасання	Логарифмічно-нормальне затінення, кореляція 1, відхилення 8 Дб
Швидке згасання	Метод, подібний до Джейкса
Розмір буфера UE	∞
Розмір буфера RN PDCP	5мс
Контроль потужності	Дробовий PC, $\alpha = 0,6$, $P_0 = -58$ дБм
Застосування	SMTP, VoIP, RTP і FTP

Опис моделі OPNET для 5G.

Сценарій імітаційного моделювання, побудований на основі архітектури LTE-Advanced, реалізовано в середовищі редактора проєктів OPNET, де визначено ключові компоненти та взаємозв'язки моделі. У процесі дослідження було адаптовано структуру вузлів мережі з урахуванням сучасних вимог до систем п'ятого покоління.

Зокрема, моделі базових станцій типу DeNB та ретрансляційних вузлів (RNs) були модифіковані з метою підтримки характерних для 5G особливостей. До них належать використання багатоантенних технологій, інтеграція периферійних обчислювальних ресурсів (edge/cloud), застосування малих стільників, а також забезпечення підвищеної пропускної здатності мережі.

Описані зміни структури та функціонування вузлів відображені на відповідних ілюстраціях, рис. 3.11 та рис. 3.12, які демонструють удосконалену архітектуру моделі.

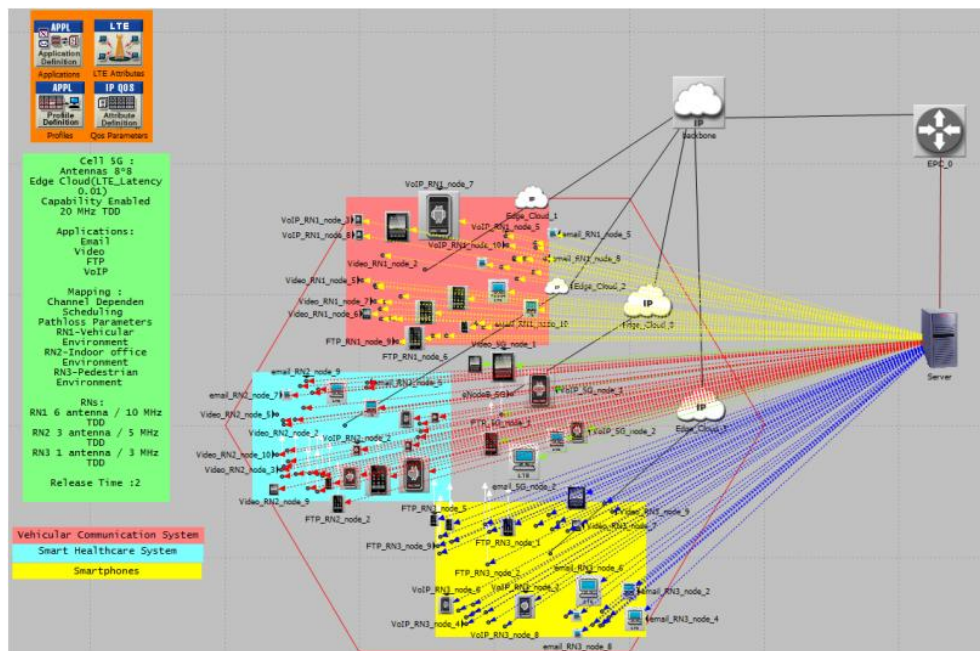


Рис.3.11. Проєкт OPNET 5G

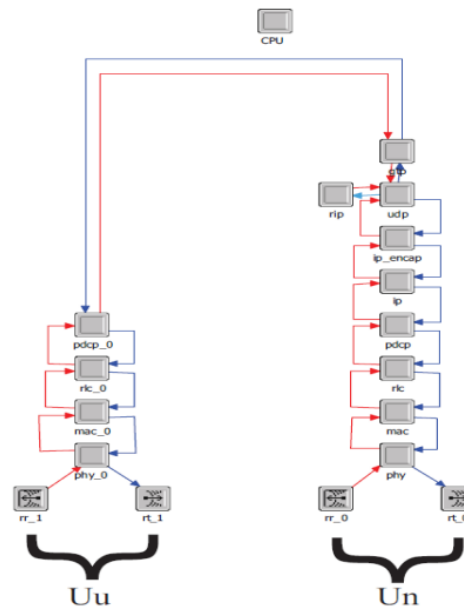


Рис.3.12. Режим RN-комірки

Характеристика основних компонентів моделі.

Для забезпечення коректного функціонування імітаційної моделі в середовищі OPNET було визначено низку ключових об'єктів, кожен із яких виконує окрему роль у процесі формування та обробки мережевого трафіку.

- Застосунки. У моделі реалізовано набір мережевих сервісів, серед яких VoIP, RTP, FTP та SMTP. Вони використовуються для відтворення різних типів трафіку та дозволяють оцінити поведінку мережі за умов різноманітного навантаження.

- Профілі трафіку. Для кожного типу застосунків задано відповідні профілі, що описують характеристики генерації трафіку. Окрім цього, у профілях визначаються параметри роботи моделі, зокрема тривалість моделювання, моменти запуску сервісів та інші часові характеристики, необхідні для коректної імітації сценаріїв.

- Мобільність користувачів. У моделі враховано поведінку абонентів у русі шляхом задання відповідних моделей мобільності. Також на цьому рівні описуються умови поширення сигналу, включаючи втрати на трасі, ефекти завмирання та інші фактори, що впливають на якість зв'язку.

- Глобальний сервер UE. Даний елемент призначений для зберігання інформації про користувачів та реалізації функцій, пов'язаних із передачею даних у транспортній мережі.

- Віддалений сервер. Виконує роль платформи для розміщення застосунків і забезпечує обробку запитів, що надходять від користувацьких пристроїв.

- IP-хмара. Використовується як середовище маршрутизації, через яке здійснюється передавання пакетів між базовими станціями (DeNB), ретрансляційними вузлами (RN) та серверами. Крім того, вона забезпечує взаємодію між транспортною мережею та обчислювальними ресурсами.

- Ethernet-з'єднання (E1–E4). Служать для організації фізичного підключення між елементами мережі та забезпечують обмін даними між відповідними вузлами.

- DeNB. Моделює функціональність базової станції в мережі E-UTRAN, виконуючи обробку радіосигналів і керування ресурсами доступу.

- UE (користувацьке обладнання). Представляє абонентські пристрої, які генерують різні типи трафіку відповідно до заданих застосунків і профілів.

Якість обслуговування радіоносіїв.

Питання забезпечення якості обслуговування (QoS) у мережах LTE є одним із ключових аспектів їх проєктування та ефективного функціонування. Це зумовлено тим, що сучасні мережі обслуговують різномірний трафік: від критично важливих сервісів (наприклад, екстрених викликів) до звичайних мультимедійних і розважальних застосунків. Відповідно, мережа повинна забезпечувати різні рівні обслуговування залежно від типу послуг і їхніх вимог.

У середовищі LTE базовим елементом організації передачі даних є так званий носій (bearer), який представляє собою логічний канал для передавання IP-пакетів між користувацьким обладнанням (UE) та шлюзом пакетної мережі (P-GW). Кожен такий носій характеризується певним набором параметрів QoS, що визначають умови обробки трафіку в мережі.

Для встановлення з'єднання з мережею UE ініціює створення носія за замовчуванням, який забезпечує базовий доступ до пакетної мережі. Окрім нього,

можуть формуватися додаткові — виділені носії, що використовуються для окремих сервісів із підвищеними вимогами до якості передачі. Такий підхід дозволяє одному користувачу одночасно отримувати кілька послуг, кожна з яких обслуговується відповідно до своїх параметрів QoS.

Залежно від характеристик обслуговування носії поділяються на два основні типи:

- носії з гарантованою бітовою швидкістю (GBR). Для цього типу передбачено виділення фіксованого обсягу пропускну здатності, що забезпечує стабільну передачу даних незалежно від поточного навантаження мережі. Такі носії застосовуються для сервісів, чутливих до затримок і втрат пакетів, зокрема для голосового зв'язку та відео. Завдяки резервуванню ресурсів вони забезпечують мінімальні затримки та високу надійність передачі;

- носії без гарантованої бітової швидкості (Non-GBR). У цьому випадку мережа не резервує конкретну пропускну здатність, і передавання здійснюється за принципом «найкращих зусиль». Такі носії характерні для менш критичних сервісів, наприклад веб-серфінгу чи електронної пошти, і можуть зазнавати впливу перевантаження, що проявляється у вигляді затримок або втрат пакетів.

Таблиця 3.2

Значення LTE QCI [6]

QCI	Затримка	Ресурс	Пріоритет	Помилка	Тип послуги
1	GBR не GBR	100 мс	2	10-2	Розмовний (VoIP)
2		150 мс	4	10-3	Розмовний (відео)
3		50 мс	3	10-3	Ігри в реальному часі
4		300 мс	5	10-6	Нерозмовний голосовий зв'язок
5		100 мс	1	10-6	IMS-сигналізація
6		300 мс	6	10-6	Буферизоване потокове відео
7		100 мс	7	10-3	На основі TCP (SMTP, HTTP, FTP)
8		300 мс	8	10-6	Голосові, відео та інтерактивні ігри
9		300 мс	9	10-6	буферизоване потокове відео

Для управління обробкою трафіку використовується ідентифікатор класу якості обслуговування (QCI), який визначає політику обслуговування пакетів у мережі. Значення QCI встановлюються з урахуванням таких параметрів, як пріоритет трафіку, допустима затримка та рівень втрат пакетів. Стандартизаційна організація 3GPP визначає набір типових значень QCI, що застосовуються в мережах LTE.

Моделі агрегації та розподілу радіоресурсів. Процес планування пакетів передбачає розподіл доступних радіоресурсів між радіоносіями в межах комірок RN та DeNB відповідно до підходів DTA та RAS. У мережах стандарту 3GPP LTE ці функції реалізуються на рівні протоколів PDCP і MAC, які відповідають за ефективне управління передачею даних.

Виділення фізичних ресурсних блоків (PRB) у низхідному та висхідному напрямках залежить від стану буферів як у комірці RN, так і в користувацькому обладнанні (UE). У випадку низхідного каналу, якщо в буфері RN наявні дані для певного UE, ресурси можуть бути призначені за умови достатньої кількості доступних PRB та виконання вимог QoS для інших абонентів у зоні покриття.

Для висхідної передачі UE надсилає до RN звіт про стан буфера (BSR), який містить інформацію про обсяг і тип наявного трафіку. На основі цих даних приймається рішення щодо виділення відповідних ресурсів для передачі. Таким чином, механізм BSR дозволяє враховувати поточні потреби користувачів і характер їхнього трафіку.

Розподіл PRB у обох напрямках здійснюється з урахуванням параметрів якості обслуговування, визначених для кожного радіоносія. Одним із застосовуваних алгоритмів є планувальник TD-MT, який працює у часовій області та орієнтований на максимізацію пропускну здатності. Він віддає перевагу користувачам із кращими умовами радіоканалу, зазвичай розташованим ближче до базової станції.

Водночас такий підхід може призводити до нерівномірного розподілу ресурсів, оскільки абоненти на межі комірки отримують менше можливостей

доступу до каналу. Таким чином, досягнення максимальної пропускної здатності здійснюється за рахунок зниження рівня справедливості розподілу ресурсів.

Математичне представлення принципу роботи планувальника TD-MT наведено у формулі (3.1).

$$P_k T_D = r_k(t) \quad (3.1)$$

Оцінювання ефективності моделі та запропонованої схеми виконано для трьох сценаріїв, сформованих з урахуванням використання алгоритмів у комірках RN і DeNB. У першому сценарії застосовується агрегація PRB разом із RAS, у другому — агрегація PRB без RAS, тоді як у третьому не використовується ні агрегація PRB, ні RAS (табл. 3.3).

Трафік від активних IoT-пристроїв, розташованих у зоні покриття RN і DeNB, попередньо об'єднується на рівні RN перед передаванням до DeNB. При цьому використовується періодичний механізм керування на кожному етапі передачі, за якого формуються укрупнені пакети для більш повного використання PRB. Для обмеження затримки мультиплексування введено таймер із значенням 5 мс. У разі його досягнення агрегований пакет передається не пізніше $T_{\max T_{\{\max\}} T_{\max}}$, що особливо важливо при низькому навантаженні між RN та DeNB.

Таблиця 3.3.

Сценарії моделювання

Сценарії	Розумні системи	Типи застосувань
Агрегація PRB з RAS	Усі	SMTP, VoIP, FTP & RTP
Агрегація PRB без RAS	Усі	SMTP, VoIP, FTP & RTP
Без агрегаційних PRB та RAS	Усі	SMTP, VoIP, FTP & RTP

Кожен із сценаріїв додатково поділяється на підсценарії. У першому з них пристрої VCS розміщені в зоні RN1, яка використовує 4 антени та режим TDD із шириною смуги 10 МГц, при цьому встановлено низький пріоритет із затримкою 5 мс. У другому підсценарії пристрої SHS працюють у зоні RN2 з 3 антенами та TDD 5 МГц, для яких задано середній пріоритет і затримку 10 мс. У третьому підсценарії

смартфони обслуговуються коміркою RN3, яка використовує 2 антени та TDD 3 МГц, із низьким пріоритетом і затримкою 15 мс.

Результати моделювання та аналіз.

Усі сценарії для моделі DTA та схеми RAS були змодельовані в середовищі OPNET 18.5 Modeler. Отримані результати середнього пакетного навантаження для вузлів VoIP, RTP і SMTP наведено на рис. 3.13, 3.14 та 3.15.

Аналіз показує, що для пристроїв IoT, які використовують VoIP, RTP і SMTP, спостерігаються відмінності в рівні пакетного навантаження в кожному з трьох сценаріїв, навіть за умов їх роботи з носіями GBR. Це пояснюється різним розподілом пріоритетів трафіку, який реалізується механізмом RAS у першому сценарії порівняно з другим і третім.

Крім того, для всіх розглянутих типів вузлів зафіксовано покращення показників завантаження пакетів завдяки використанню моделі агрегації PRB DTA, що забезпечує більш повне використання доступних ресурсних блоків у комірках RN.

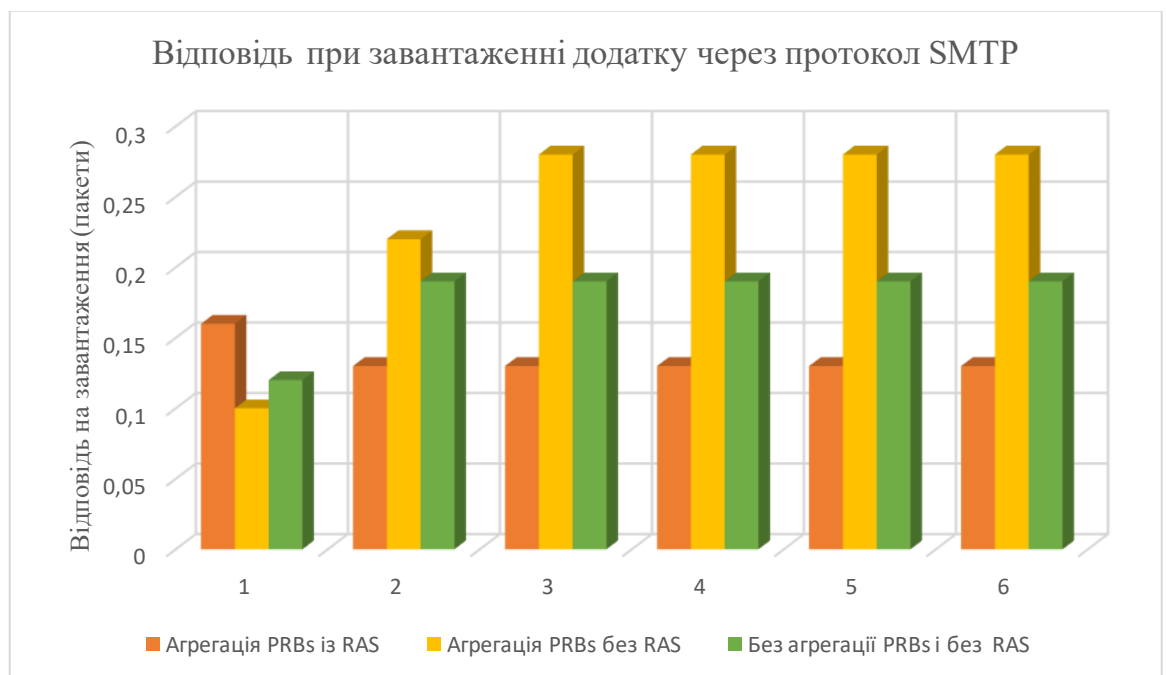


Рис.3.13. Відповідь на завантаження SMTP-застосунку

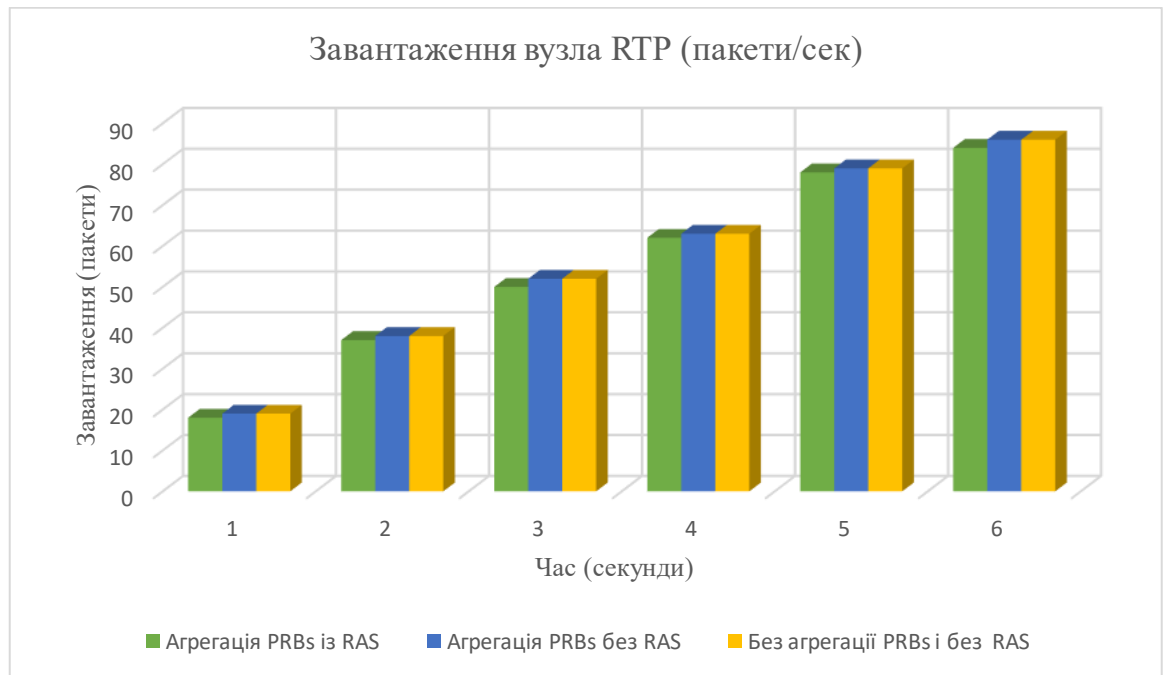


Рис.3.14. Завантаження пакетів вузла RTP

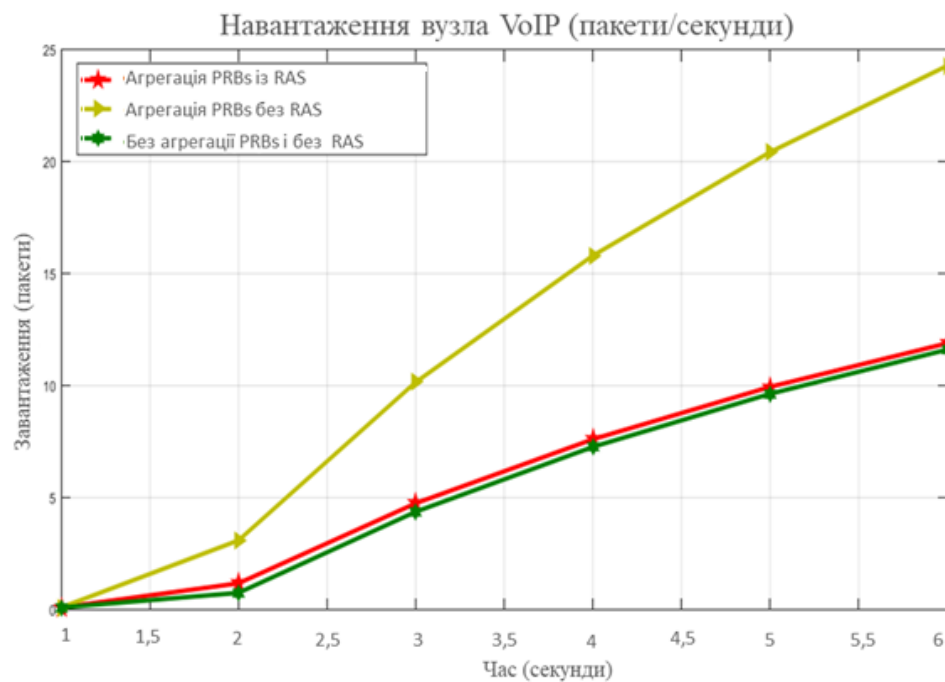


Рис.3.15. Завантаження пакетів VoIP-вузла

Продуктивність затримки E2E вузлів Інтернету речей. З точки зору затримки передачі даних end-to-end, для VoIP-вузлів у першому сценарії спостерігається нижчий рівень затримки пакетів. Це пояснюється тим, що трафік із

вищою накопиченою швидкістю передавання отримує пріоритет і обслуговується першочергово відповідно до механізму RAS.

У другому сценарії, навпаки, рівень завантаження пакетів для VoIP-вузлів є значно вищим через буферизацію вхідного трафіку в комірці RN без урахування його пріоритетності, що відрізняє його від першого сценарію.

Середні значення затримки E2E для VoIP-вузлів, рис. 3.16, також підтверджують перевагу першого сценарію над другим і третім. Це пов'язано з тим, що в першому сценарії для VoIP-трафіку встановлюється вищий клас QoS на рівні MAC, що забезпечує пріоритетний розподіл ресурсних блоків PRB.

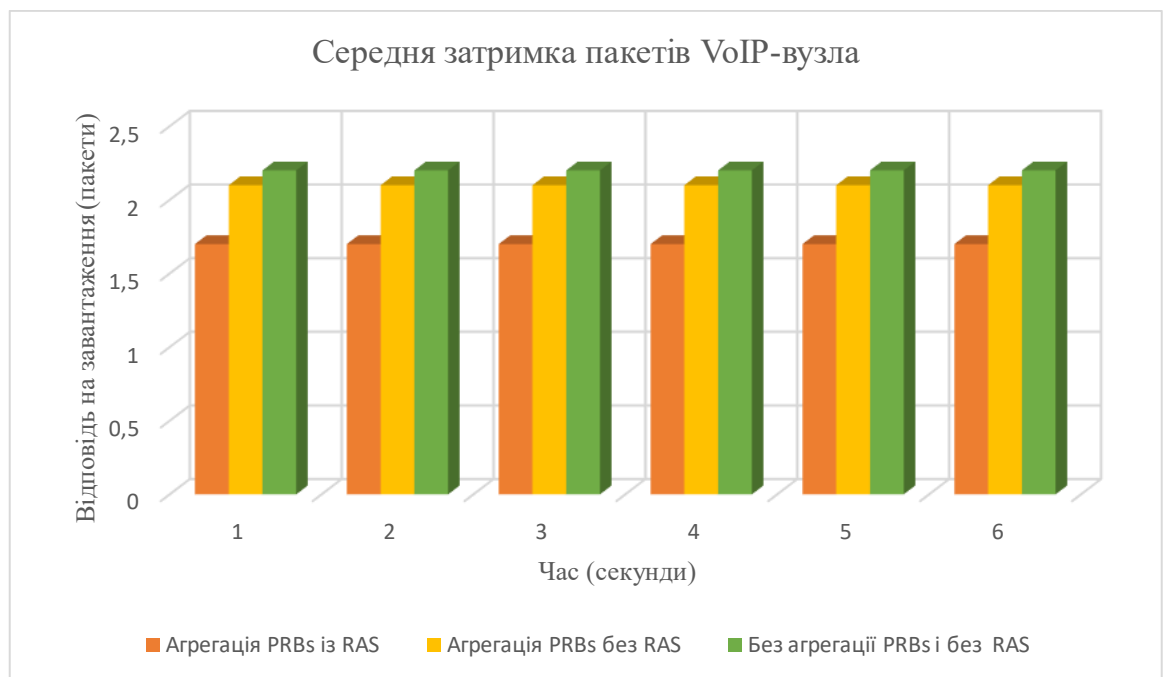


Рис.3.16. Затримка пакетів E2E VoIP-вузла

Крім того, на рис. 3.16 наведено середню зміну затримки пакетів E2E для вузлів RTP. Отримані результати свідчать, що у другому сценарії ці вузли демонструють гірші показники порівняно з першим і третім. Це пояснюється тим, що у сценарії 1 носії RTP розподіляються за допомогою RAS відповідно до класів GBR MAC з урахуванням їх пріоритету.

У третьому сценарії вузли RTP мають однаковий клас QoS без гарантії бітової швидкості разом із вузлами SMTP, FTP та VoIP. При цьому, незважаючи на

високу накопичену швидкість передачі даних (близько 350 кбіт/с), обслуговування не є безперервним, оскільки кожен вузол використовує лише призначені PRB без агрегації пакетів на рівні комірки RN, на відміну від першого сценарію з моделлю DTA.

У другому сценарії продуктивність вузлів RTP знижується, що чітко відображається у збільшенні середньої затримки E2E. Порівняно з першим сценарієм, де застосовується RAS і враховуються пріоритети трафіку, затримка для вузлів RTP є значно вищою.

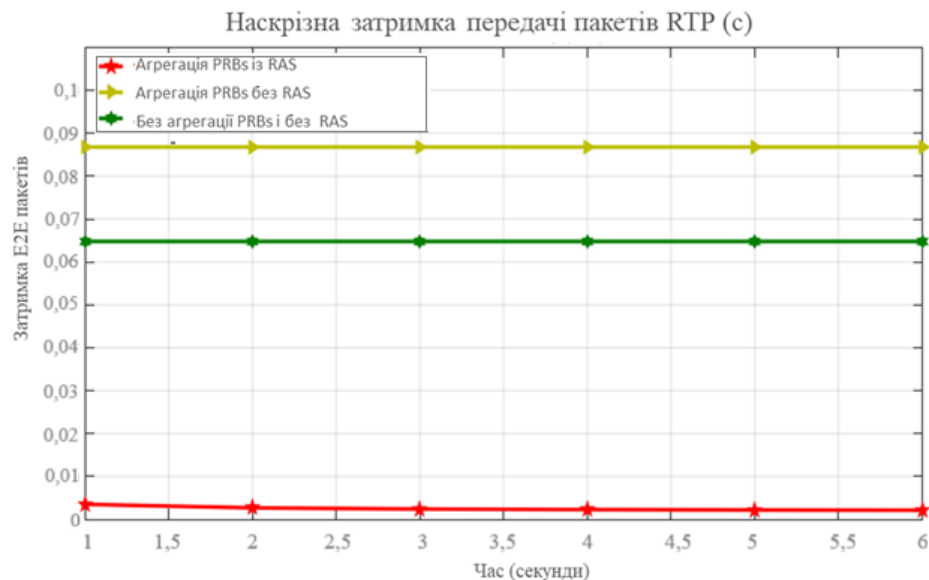


Рис.3.17. Середня затримка пакетів RTP-вузла

Пропускна здатність IoT-вузлів.

Результати аналізу пропускної здатності для вузлів VoIP та FTP наведено на рис. 3.16 і 3.17. З них видно, що у другому сценарії VoIP-вузли демонструють вищу продуктивність порівняно з першим і третім. Це пов'язано із застосуванням моделі DTA для агрегації пакетів на рівні комірки RN, що сприяє підвищенню швидкості передавання даних навіть без віднесення їх до нижчого класу QoS на рівні MAC, як це має місце у першому сценарії.

Крім того, продуктивність VoIP-вузлів покращується у випадках, коли вони не обробляються разом із трафіком FTP, SMTP та RTP, а обслуговуються окремо з нижчим пріоритетом порівняно з FTP-вузлами.

Щодо FTP-вузлів, також спостерігається певне зростання пропускної здатності відносно першого сценарію. Це пояснюється тим, що у першому сценарії розподіл ресурсів визначається вагами QoS, які надають пріоритет іншим типам трафіку відповідно до їх функціонального призначення та вимог, тоді як у другому і третьому сценаріях такий вплив є менш вираженим.

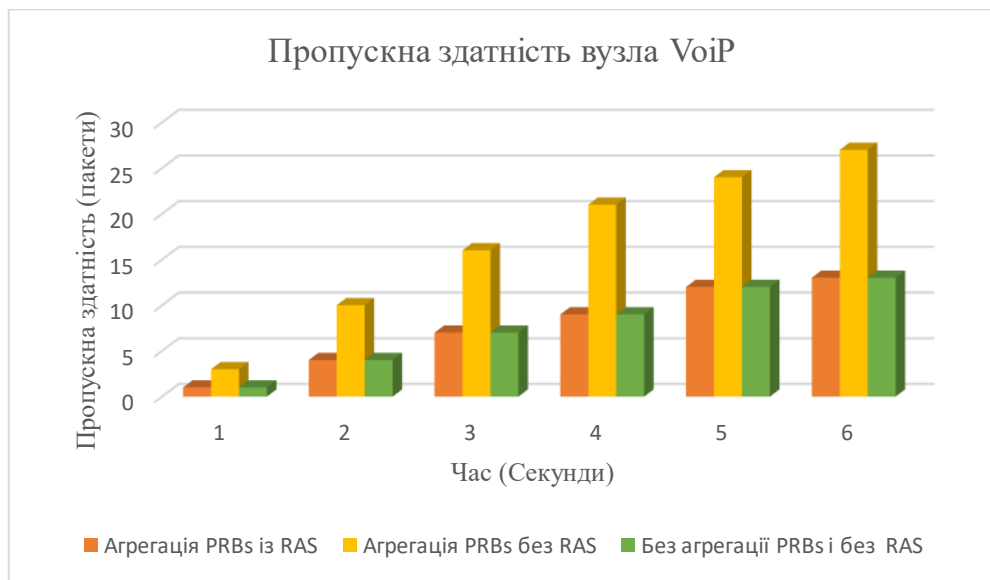


Рис.3.16. Пропускна здатність вузла VoIP

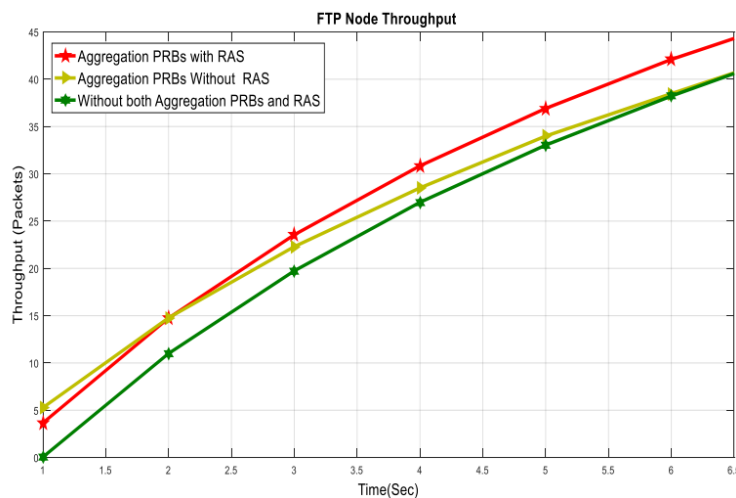


Рис.3.17. Пропускна здатність вузла FTP

Продуктивність RN та комірок DeNB.

Проведено порівняльний аналіз трьох сценаріїв з метою оцінки загальної ефективності малих комірок (RN) та макрокомірок (DeNB). Як показано на рис. 3.18, 3.19 та 3.20, у другому сценарії спостерігається зниження рівня завантаження пакетів у комірках RN порівняно з першим і третім. Це зумовлено застосуванням моделі DTA, при якій пакети від різних IoT-вузлів агрегуються без урахування їх пріоритетів. Натомість у першому сценарії з використанням RAS трафік розподіляється з урахуванням пріоритетності.

Результати також демонструють помітне зменшення затримки E2E у комірках RN у першому сценарії. Це пов'язано з підвищенням пріоритету IoT-пристроїв через відповідне призначення класів QoS на нижніх рівнях MAC (табл. 3.2). У другому та третьому сценаріях, навпаки, спостерігається більша затримка E2E, що пояснюється відсутністю механізму RAS для ефективного розподілу радіоресурсів.

Крім того, результати використання PRB у комірках DeNB (рис. 3.18) свідчать, що у першому сценарії досягається найкращий рівень справедливого розподілу ресурсів між пристроями різних інтелектуальних систем. Це забезпечується поєднанням моделі DTA на рівні PDCP та механізму RAS на рівні MAC, що дозволяє більш ефективно керувати радіоресурсами.

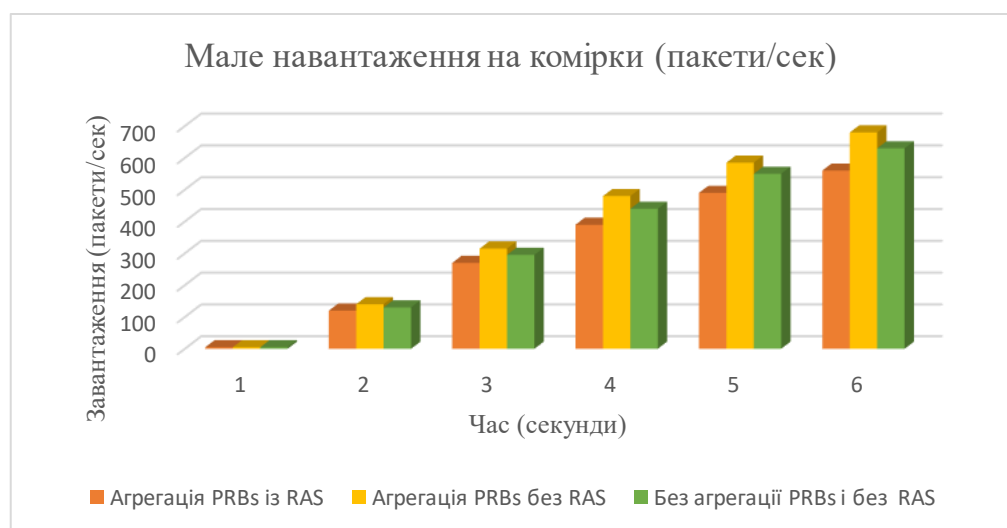


Рис.3.18. Завантаження комірок RN на пакети

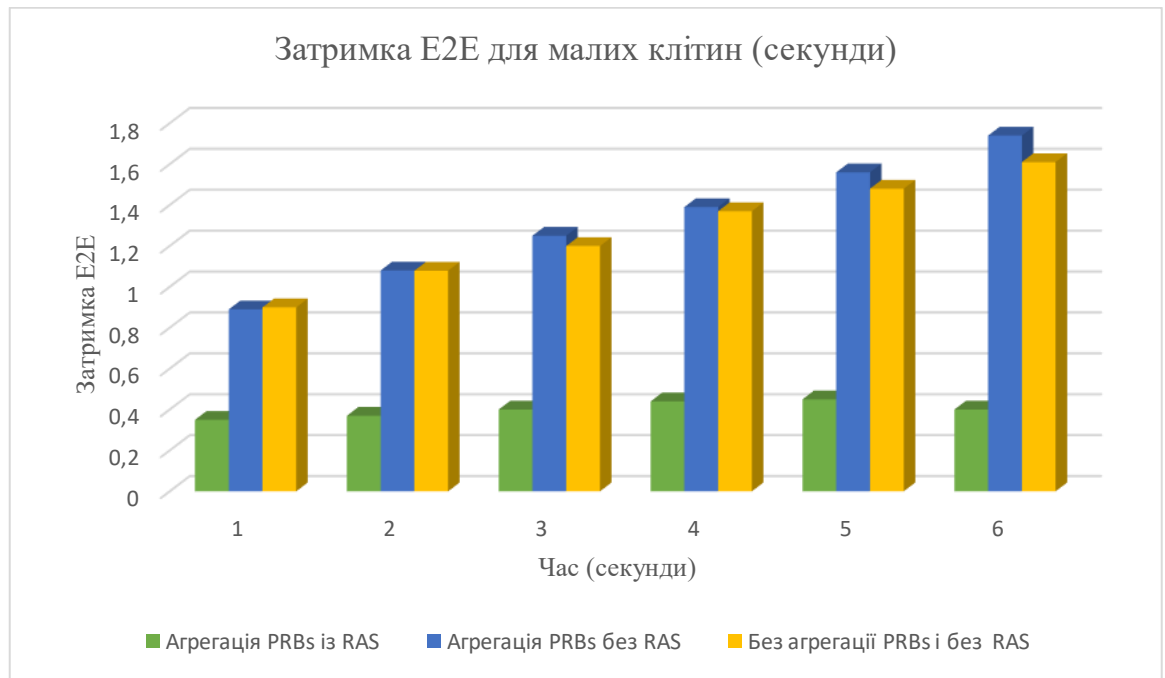


Рис.3.19. Затримка E2E комірки RNs

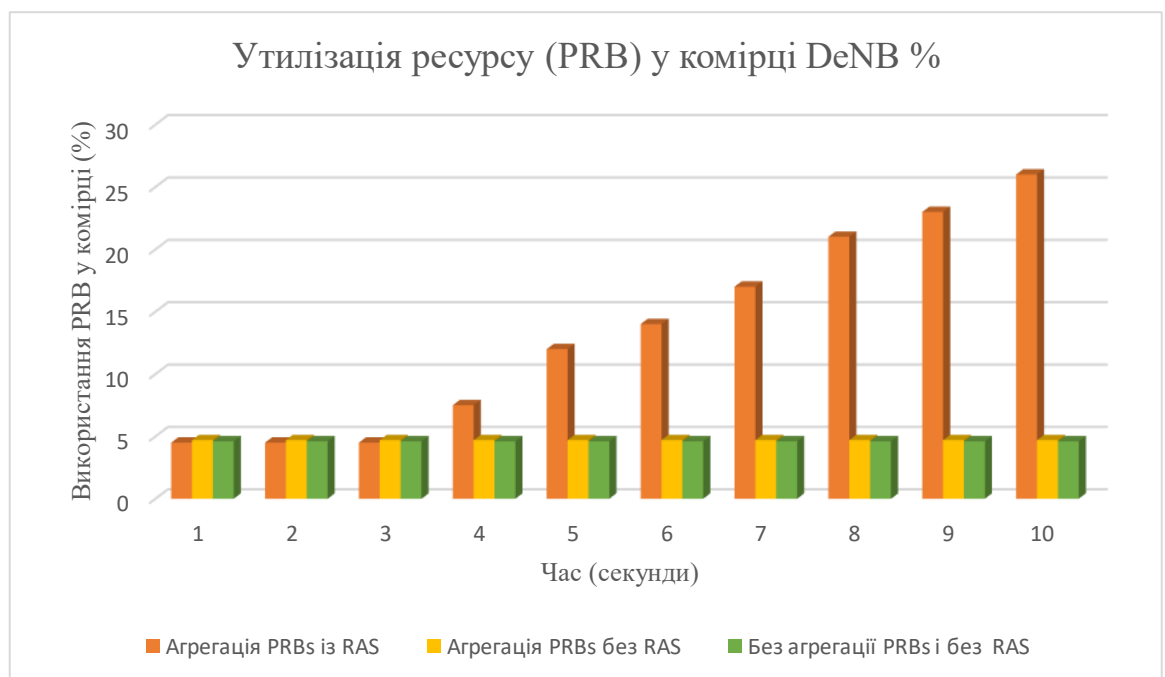


Рис.3.20. Використання PRB комірок DeNB у %

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку Інтернету речей у бездротових мережах п'ятого покоління. Досліджено динаміку зростання IoT-трафіку, що характеризується поступовим збільшенням кількості підключених пристроїв та нерівномірністю навантаження, зокрема виникненням пікових сплесків, які можуть призводити до перевантаження мережі. Встановлено, що навіть при відносно невеликій частці у загальному обсязі трафіку, IoT-системи створюють значні вимоги до управління ресурсами через масовість підключень.

Проаналізовано тенденції розвитку ринку мобільного зв'язку 5G, які свідчать про стрімке зростання кількості IoT-підключень та поступове витіснення застарілих технологій (2G/3G). Визначено, що 5G стає ключовою платформою для масштабного впровадження IoT-рішень завдяки високій пропускну здатності, низькій затримці та підтримці масових з'єднань.

Розглянуто основні технології реалізації IoT, зокрема LPWAN-рішення (LoRaWAN, SigFox) та стандарти 3GPP (NB-IoT, LTE-M), серед яких найбільш перспективною визначено NB-IoT завдяки оптимальному поєднанню енергоефективності, вартості та масштабованості.

Досліджено особливості інтеграції IoT у мережі 5G, включаючи використання таких технологій, як мережеве сегментування, периферійні обчислення та D2D-комунікації. Встановлено, що їх застосування дозволяє підвищити ефективність використання мережевих ресурсів, знизити затримки та забезпечити підтримку різноманітних сценаріїв використання IoT.

Таким чином, результати аналізу підтверджують необхідність розробки ефективних моделей управління ресурсами та трафіком IoT-пристроїв у мережах 5G, що і є актуальним напрямом подальших досліджень.

У другому розділі проведено детальний аналіз архітектури та технологічних основ мереж 5G і Інтернету речей. Розглянуто структуру протокольного стеку 5G,

включаючи площину користувача та площину керування, а також функціональні особливості основних протоколів (PHY, MAC, RLC, PDCP, RRC, NAS), що забезпечують ефективну передачу даних і управління з'єднаннями.

Проаналізовано ключові технології забезпечення 5G, зокрема агрегацію несучих (CA), технології MIMO, неортогональний множинний доступ (NOMA), що дозволяють значно підвищити пропускну здатність, спектральну ефективність та кількість одночасно обслуговуваних пристроїв. Встановлено, що ці технології є критично важливими для підтримки масових IoT-застосувань.

Досліджено особливості гетерогенних мереж (HetNet) та розгортання малих стільникових мереж, які забезпечують покращення покриття, підвищення ємності мережі та ефективне обслуговування користувачів у щільно навантажених середовищах. Окрему увагу приділено технології мережевого сегментування (network slicing), яка дозволяє адаптувати ресурси мережі під різні типи сервісів.

Розглянуто архітектуру мереж Інтернету речей, включаючи багаторівневу модель побудови, принципи організації підмереж, роль шлюзів та мереж зв'язку, а також основні технології передачі даних. Визначено, що IoT-системи характеризуються різноманітністю протоколів та мережевих рішень, що ускладнює їх інтеграцію та управління.

Також проведено аналіз сучасних інструментів мережевого моделювання, зокрема OMNeT++ та OPNET Modeler, які дозволяють здійснювати дослідження поведінки мереж, оцінювати ефективність протоколів і розробляти нові моделі управління ресурсами.

Отже, результати розділу підтверджують складність організації ефективної взаємодії між IoT-пристроями та мережею 5G, що обумовлює необхідність розробки моделей управління ресурсами і трафіком для забезпечення стабільної роботи мережі.

У результаті виконання третього розділу досліджено особливості функціонування мобільних мереж 5G як ефективної платформи для підтримки

інтелектуальних систем Інтернету речей із високими вимогами до якості обслуговування.

Розроблено модель агрегації трафіку даних (DTA), яка дозволяє об'єднувати пакети від різних IoT-пристроїв на рівні PDCP, що забезпечує більш ефективне використання радіоресурсів та зменшення накладних витрат при передачі малих обсягів даних.

Запропоновано схему розподілу ресурсів (RAS), що базується на механізмі мережевої сегментації та враховує дворівневу систему пріоритетів: міжсегментну та внутрішньосегментну. Це дозволяє більш гнучко розподіляти фізичні ресурсні блоки (PRB) відповідно до вимог QoS різних сервісів.

У процесі моделювання встановлено, що поєднання DTA та RAS забезпечує:

- підвищення пропускної здатності мережі;
- зменшення затримки передачі пакетів (E2E);
- більш ефективне використання радіоресурсів;
- підвищення справедливості обслуговування користувачів.

Порівняльний аналіз трьох сценаріїв показав, що найкращі результати досягаються при одночасному застосуванні агрегації трафіку та інтелектуального розподілу ресурсів, тоді як відсутність цих механізмів призводить до перевантаження мережі та погіршення показників QoS.

Отже, запропоновані підходи можуть бути ефективно використані для оптимізації роботи IoT-сервісів у мережах 5G та забезпечення високої якості обслуговування в умовах зростаючого трафіку даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cisco Systems. Cisco Annual Internet Report (2018–2023). – San Jose, 2020. – 35 p.
2. Ericsson. Ericsson Mobility Report. – Stockholm, 2023. – 40 p.
3. ITU-R. IMT-2020 Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. – Geneva, 2020. – 30 p.
4. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. – 2nd ed. – Academic Press, 2020. – 544 p.
5. Osseiran A., Monserrat J. F., Marsch P. 5G Mobile and Wireless Communications Technology. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 760 p.
6. Shafi M. et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment and Practice // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, No. 3. – P. 14–20.
7. Taleb T., Samdanis K., Mada B. On Multi-Access Edge Computing: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23, No. 3. – P. 1657–1681.
8. Zhang Y., Chen X., Li L. Edge Intelligence in 5G Networks: A Survey // IEEE Network. – 2021. – Vol. 35, No. 2. – P. 24–31.
9. Vaezi M., Ding Z., Poor H. V. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. – Springer, 2021. – 350 p.
10. Ratasuk R., Vejlgard B., Mangalvedhe N. NB-IoT System for M2M Communication // IEEE Wireless Communications. – 2020. – Vol. 27, No. 2. – P. 6–12.
11. Mekki K., Bajic E., Chaxel F. A Comparative Study of LPWAN Technologies for IoT Deployment // ICT Express. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–7.
12. Centenaro M. et al. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in IoT // IEEE Wireless Communications. – 2020. – Vol. 23, No. 5. – P. 60–67.
13. LoRa Alliance. LoRaWAN Specification. – Fremont, 2022. – 120 p.

14. Sigfox. Sigfox Technology Overview. – Paris, 2021. – 25 p.
15. 3GPP. Release 13: Narrowband IoT (NB-IoT). – 2020. – 3GPP Technical Specification.
16. 3GPP. Release 17: 5G NR Enhancements (including RedCap). – 2023. – Technical Report.
17. GSMA. The Mobile Economy 2024. – London, 2024. – 52 p.
18. Литвиненко М. С., Гармаш Н. Г. Аналіз розвитку технології 5G у світі // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 3. – С. 45–52.
19. Руденко Н. М., Мадінов М. М. Дослідження сучасних тенденцій розвитку мобільних мереж // Зв'язок. – 2024. – № 2. – С. 10–16.
20. Підлісний Ю. О. Забезпечення безпеки в мережах Інтернету речей // Наукові праці ДУІКТ. – 2025. – № 1. – С. 55–60.
21. Y. Huo, X. Dong, W. Xu, and M. Yuen, “Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment,” IEEE 5G World Forum, 5GWF 2018 - Conf. Proc., pp. 256–261, 2018.
22. B. C. Kuzmaul, “The RACE network architecture,” in Proceedings of 9th International Parallel Processing Symposium, 2019, no. Wiley, pp. 508–513.
23. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 2020.
24. F. Boccardi et al., “Multiple-antenna techniques in LTE-advanced,” IEEE Commun. Mag., 2022.
25. P. Antonio, F. Grimaccia, and M. Mussetta, “Architecture and methods for innovative heterogeneous wireless sensor network applications,” Remote Sens., 2022.
26. H. Wang, P. Zhang, J. Li, and X. You, “Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems,” China Commun., vol. 16, no. 5, pp. 1–18, 2021.
27. L. Ma, X. Wen, L. Wang, Z. Lu, and R. Knopp, “An SDN/NFV Based Framework for Management and Deployment of Service Based 5G Core Network,” no. October, pp. 86–98, 2022.

28. R. Ricart-Sanchez, P. Malagon, J. M. Alcaraz-Calero, and Q. Wang, "Hardware-Accelerated Firewall for 5G Mobile Networks," *Proc. - Int. Conf. Netw. Protoc. ICNP*, vol. 2018-Sept, pp. 446–447, 2023.
29. A. Varga, "A Quick Overview Of The OMNeT ++ IDE," *Omnet++*, 2021.
30. Z. Lu and H. Yang, *Unlocking the power of OPNET modeler*. 2022.
31. M. Chen, J. Wan, and F. Li, "Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 6, no. 2. pp. 480–497, 2022.
32. C. Liang, F. R. Yu, and X. Zhang, "Information-centric network function virtualization over 5g mobile wireless networks," *IEEE Netw.*, vol. 29, no. 3, pp. 68–74, May 2020.
33. X. Li, S. Liu, F. Wu, S. Kumari, and J. J. P. C. Rodrigues, "Privacy preserving data aggregation scheme for mobile edge computing assisted IoT applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 4755–4763, 2019.
34. M. Dighriri, G. M. Lee, and T. Baker, "Resource Allocation Scheme in 5G Network Slices," 2020.
35. J. G. Andrews et al., "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2024.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:
«МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ТРАФІКОМ ІОТ-ПРИСТРОЇВ
У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ»

Виконав: здобувач вищої освіти гр.ІСД-42
Кулішенко Ярослав Валерійович
Керівник: к.т.н.
Сеньков Олег Вікторович

Київ 2026

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

2

Мета роботи - підвищення ефективності управління трафіком та радіоресурсами ІоТ-пристроїв у мережах 5G.

Об'єкт дослідження – процес передачі та обробки трафіку даних пристроїв Інтернету речей у мобільних мережах 5G.

Предмет дослідження – методи агрегації трафіку даних та алгоритми розподілу радіоресурсів у мережах 5G

Завдання бакалаврської роботи:

- Огляд сучасного стану і перспектив розвитку ІоТ у бездротових мережах 5 G.
- Аналіз концепцій 5G та ІоТ, їх архітектури і технологій.
- Дослідження ефективності агрегації трафіку та розподілу радіоресурсів ІоТ у мережах 5G.

ДИНАМІКИ ЗРОСТАННЯ ІОТ-ТРАФІКУ В БЕЗДРотовИХ МЕРЕЖАХ

3

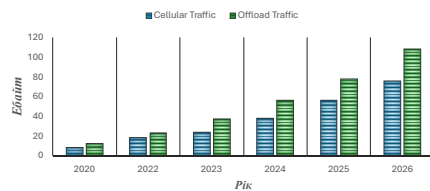


Рис.1.Динаміка розвитку та прогноз зростання трафіку

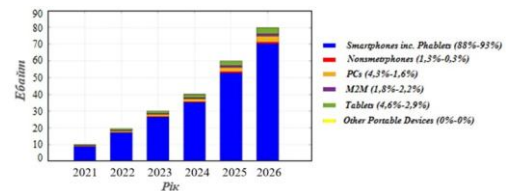


Рис.3.Зміна часток трафіку різних пристроїв

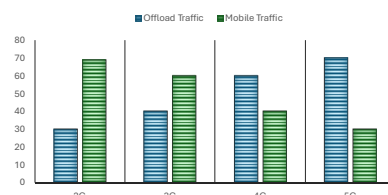


Рис.2. Прогноз частки вивантажується трафіку

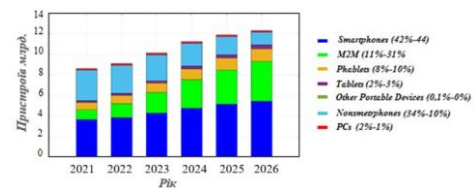


Рис.4.Прогноз зміни підключень

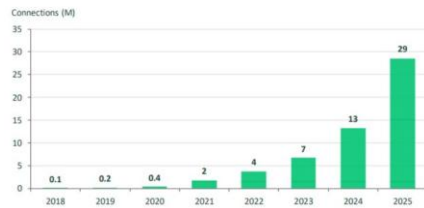


Рис.5. Фіксовані бездротові з'єднання 5G по всьому світу

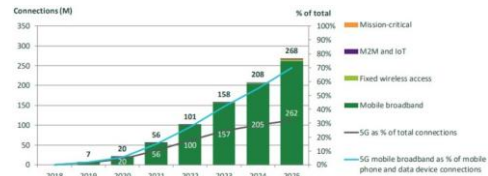


Рис.6. 5G-з'єднання за типом

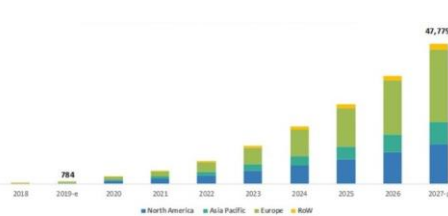


Рис.7. Ринки інфраструктури 5G за регіонами (млн дол. США)



Рис.8. ТОП-8 місць за доступністю 5G та 4G



Рис.9. Технології, пов'язані з 5G-IoT



Рис.10. Перспективні напрями використання 5G

Табл.1. Співівняння послуг і мереж 5G і застосувань Інтернету речей

Служба	Бездротові технології	Використані алгоритми	Співівняння послуг	Застосування та опис системи
5G NR	NR-U	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою для промислової автоматизації та автономних транспортних засобів
5G-V2X	PC5	OFDMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Комунікація між транспортними засобами та всіма іншими системами для управління дорожнім рухом та безпеки
5G-mMTC	NR-MTC	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Масштабні машинні комунікації для розумних міст та сільського господарства
5G-UHD	NR-U	OFDMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Відеозв'язок надвисокої чіткості та віртуальна реальність
5G-IoT	NR-MTC	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Інтернет речей – комунікації для розумних будинків та носимих пристроїв
5G-eMBB	NR-eMBB	OFDMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Покращений мобільний пропусковий доступ для високошвидкісної передачі даних та потокового передавання
5G-URLLC	NR-URLLC	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою для критично важливих застосувань
5G-mIoT	NR-mIoT	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Масштабні комунікації Інтернету речей для розумних міст та сільського господарства
5G-gNB	NR-gNB	OFDMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Глобальний зв'язок для високошвидкісної передачі даних та потокового передавання
5G-Slicing	NR-Slicing	NOMA	Співівняння з 4G, 5G та Wi-Fi	Розподіл мережі для кількох послуг та програм

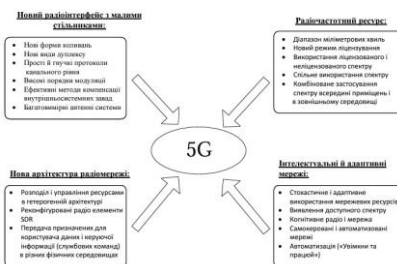


Рис.11. Загальні вимоги до 5G

Табл.2. Порівняння між (UDN) і традиційною стільниковою мережею

Параметри	UDN	Традиційна стільникова мережа
Сценарій розгортання	В приміщенні, гаряча точка	Широкі охоплення
Щільність точки доступу	Порівняно з щільністю користувачів	Малі, ніж щільність користувачів
Типи точок доступу	Small cell, pico, femto, UE relay, relay	Базова станція Macro/micro
Тропічне покриття	Близько 10 м	Кілька сотень метрів і більше
Характеристики покриття	Неоднорідний, нерегулярний	Однорідний, завичай клітинний
Щільність користувачів	Високий	Низький/середній
Зворотний зв'язок	Ідеальний/неідеальний, дровотий/бездротовий	Низький/середній
Мобільність користувачів	Мала мобільність	Висока мобільність
Вимога до швидкості передачі даних	Високий	Низький/середній
Смути спектру	Вище, ширше	Нижчий, обмежений

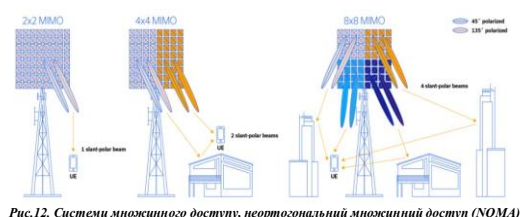


Рис.12. Системи множинного доступу, неортогональний множинний доступ (NOMA)

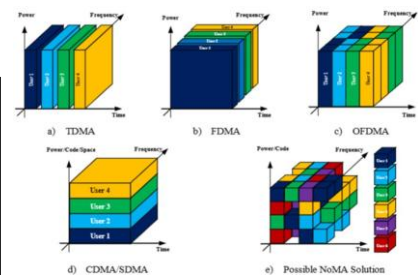


Рис.13. Застосування антенної системи MIMO

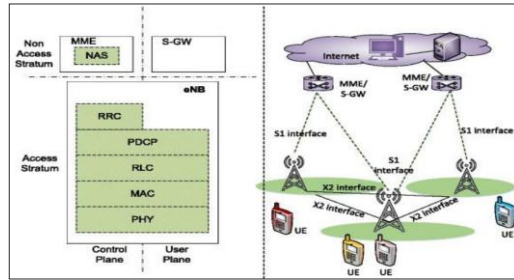


Рис.14. Зосередження протоколів 5G

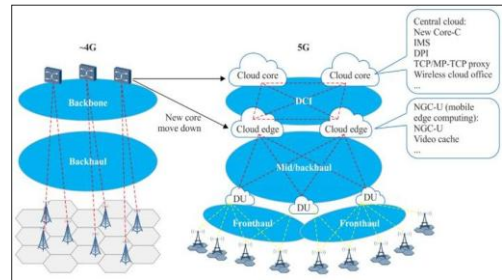


Рис.15. Розгортання ядра мережі у 5G

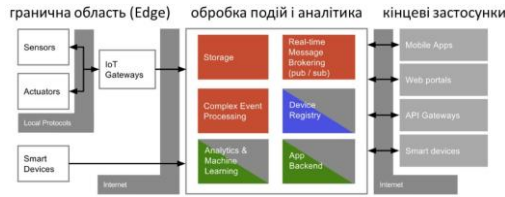


Рис.16. Приклад архітектури ІоТ

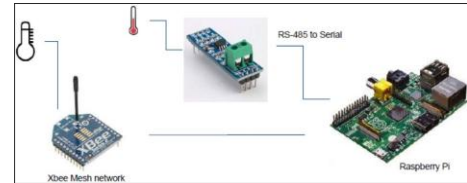


Рис.17. Приклад підключення датчиків ІоТ

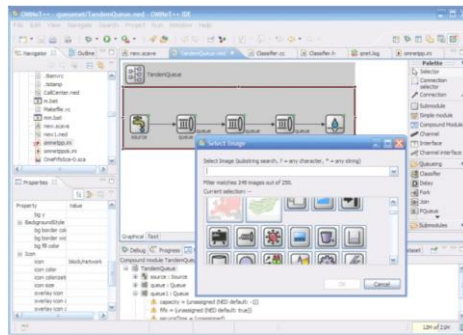


Рис.18. Інтегроване середовище розробки OMNeT++

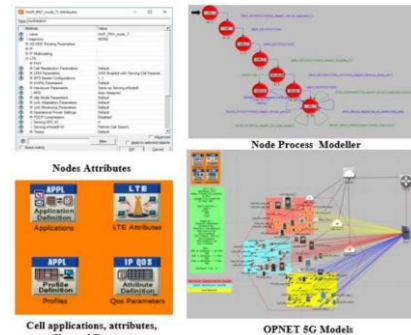


Рис.19. Графічний редактор, що використовується в OPNET

Табл.3. Порівняння інструментів мережевого моделювання

	NS3 OPNET	NS3 OPNET	OMNET++	QualNet	GloMoSim
Інтерфейс	C++/Python	C/C++	C++	Parsec	Parsec (C)
Графічна підтримка	Обмежений	Так	Так	Так	Обмежений
Масштабованість	Великий	Так	Так	Так	Так
Паралелізм	Так	Так	Так	Так	Так
Документація та підтримка користувачів	Відмінний	Відмінний	Добрий	Добрий	Поганий
Розширюваність	Відмінний	Відмінний	Відмінний	Відмінний	Відмінний
Емуляція	Так	Непрямий	Обмежений	Так	Непрямий

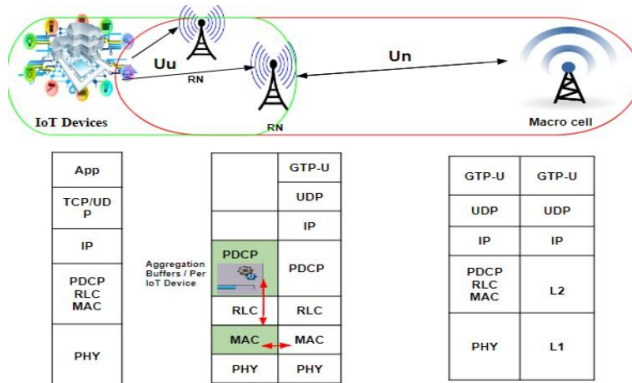


Рис.20. Блок-схема пакетів даних пристроїв Інтернету речей

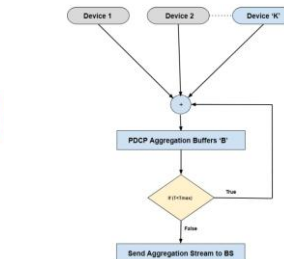


Рис.21. Блок-схема моделі агрегації трафіку даних

Model 1: An overview of the proposed data aggregation Model in the RN PDCP.
 Aim: Efficient utilization of PRBs among IoT devices initialization;
 set expiry timer T_{max} = 5 ms;
 set B_{max} = (available TBS - RN Un overhead);
 set timer T = 0;
 set multiplexing buffer B = 0;
 schedule RN and allocate PRBs (e.g., 5 PRBs are set for RN to analyse multiplexing process);
 schedule IoT devices within the coverage of RN for uplink transmission;
 while packet arrived == TRUE do
 start multiplexing process based on the value of timer and the size of the multiplexing buffer;
 if T < T_{max} && B < B_{max} then accumulate incoming packet into buffer B;
 increment timer T;
 else
 re-assemble aggregated packet of size available TBS - overhead from buffer B;
 send large multiplexed packet to RN PHY via RN Un protocols;
 add RN Un protocols overhead; route multiplexed packet to BS in next TTI;
 reset timer T;
 end if
 end while

Рис.22. Модель агрегації трафіку даних

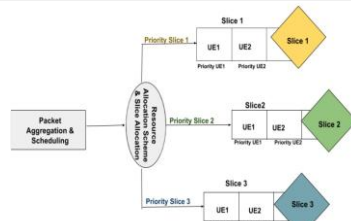


Рис.23. RAS з міжсекційним та внутрішньосекційним пріоритетом

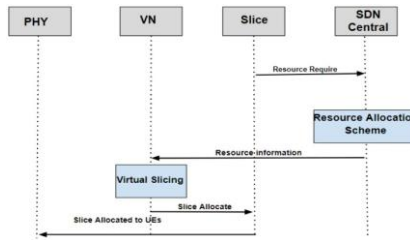


Рис.25. Блок-схема RAS

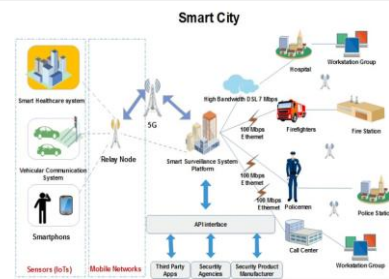


Рис.24. Розумні системи у випадку використання розумного міста

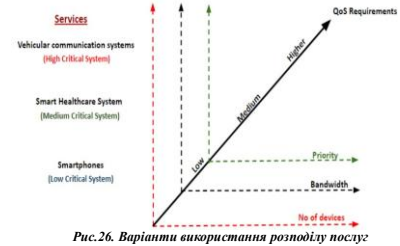


Рис.26. Варіанти використання розподілу послуг

НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛІ

Табл.4. Параметри моделювання

Параметри	Налаштування
Тривалість симуляції	1500 с.
Макет комірки	1 Enb
Радіус покриття eNB	350 м.
Мінімальна відстань між базовою станцією (eNB) та користувачем (UE)	35м.
максимальна потужність передавання користувача	23 dBm
Параметри 5G	
Стільники 5G	антени 8*8
Хмарні	Edge cloud
Технічні можливості	Увімкнено
Параметри RN	
PRB для RN	DeNB виділяє RN 3 PRB для оцінки використання PRB
Тип RN	фіксований
RN 1	Підтримується 4 антени, 10 МГц TDD
RN 2	Підтримується 3 антени, 5 МГц TDD
RN 3	Підтримується 2 антени, 3 МГц TDD
Смисл транспортного блоку (TBS)	1608 біт проти MCS 16 та PRB 5. Доступні накладні витрати TBS для надвимог обслуговування (біт/TTI), 1608 (TBS) - 352 (накладні витрати) = 1256 біт/TTI
Симульовані сценарії	Агрегація PRB з RAS, агрегація PRB без RAS, Без агрегації PRB та RAS.
Загальні параметри	
Швидкість терміналу	120 км/год
Модель мобільності	Випадкова точка шляху (RWP)
Коефіцієнт повторного використання частоти	1
Пропускна здатність системи	5 МГц
Втрати на шляху	28.1+37.6 log ₁₀ (R). R в км
Повільне згасання	Логарифмічно-нормальне згасання, кореляція 1, відхилення 8 дБ
Швидке згасання	Метод, подібний до Джейкса
Розмір буфера UE	oo
Розмір буфера RN PDCP	5мс
Контроль потужності	Дробовий PC, α= 0.6, P ₀ = -58 дБм
Застосування	SMTP, VoIP, RTP і FTP

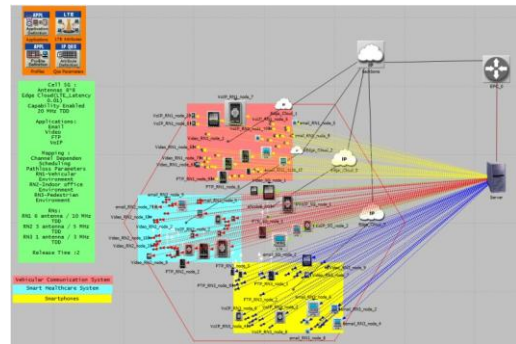


Рис.27. Проект OPNET 5G

Табл.5. Сценарії моделювання

Сценарії	Розумні системи	Типи застосувань
Агрегація PRB з RAS	Yci	SMTP, VoIP,FTP & RTP
Агрегація PRB без RAS	Yci	SMTP, VoIP,FTP & RTP
Без агрегації PRB та RAS	Yci	SMTP, VoIP,FTP & RTP

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

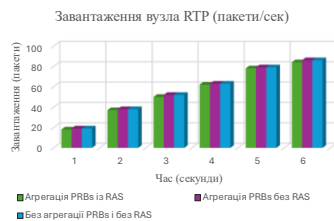


Рис.28. Завантаження пакетів вузла RTP

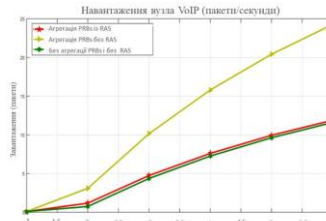


Рис.29. Завантаження пакетів VoIP-вузла

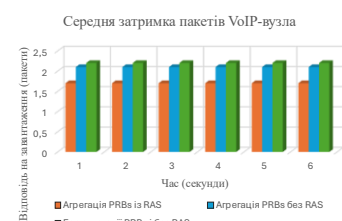


Рис.30. Затримка пакетів E2E VoIP-вузла

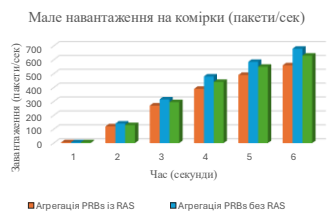


Рис.31. Завантаження комірок RN на пакети

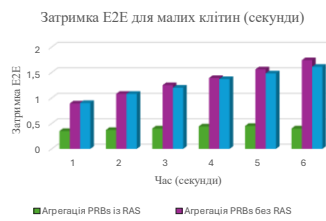


Рис.32. Затримка E2E комірок RNs

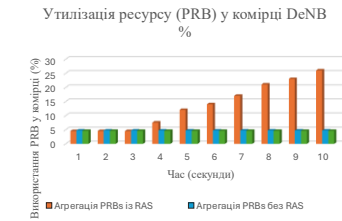


Рис.33. Використання PRB комірок DeNB у %

Таким чином, виконуючи поставлені завдання проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку Інтернету речей у мережах 5G показує значне зростання IoT-трафіку та підвищені вимоги до управління мережевими ресурсами, що підтверджує роль 5G як платформи для масштабного впровадження IoT-рішень.

Дослідження архітектури та технологій 5G, включаючи протоколи PHY, MAC, PDCP, RRC та ключові технології MIMO, NOMA і мережеве сегментування, демонструє ефективні підходи для інтеграції IoT-пристроїв та оптимізації використання мережесих ресурсів.

Моделювання агрегації трафіку даних (DTA) та схеми розподілу ресурсів (RAS) із дворівневою системою пріоритетів показало підвищення пропускнуої здатності, зменшення затримок E2E та ефективне використання радіоресурсів.

Порівняльний аналіз трьох сценаріїв підтвердив переваги одночасного застосування агрегації та інтелектуального розподілу ресурсів.

Отже, запропоновані моделі та стратегії можуть бути ефективно використані для оптимізації роботи IoT-сервісів у мережах 5G та забезпечення високої якості обслуговування.