

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Архітектура приватної мережі на основі 5G технологій зв'язку

Виконав: студент 6 курсу, групи РАМ-61

спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Казьмірук О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Яворський Б.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Хвостівська Л.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Дедів Л.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«26» листопада_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Казьміруку Олегу Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Архітектура приватної мережі на основі 5G технологій зв'язку

Керівник роботи Яворський Богдан Іванович, д.т.н., проф., проф. кафедри РТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» листопада 2025 року № 4/7-1038

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт дослідження: процес обґрунтування архітектури мережі 5G;
предмет дослідження: технологія 5G для приватних мереж.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ.

Розділ 1. Аналітична частина

Розділ 2. Основна частина

Розділ 3. Науково-дослідна частина

Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Загальні висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., зав. кафедри МТ Окіпний І.Б.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Кафедри ОХ Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 26 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Казьмірук О.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Яворський Б.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Архітектура приватної мережі на основі 5G технологій зв'язку // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Казьмірук Олег Петрович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра радіотехнічних систем, група РАМ-61 // Тернопіль, 2025 // С. 74, рис. – 19, табл. – 4, додат. – 1, бібліогр. – 33.

Ключові слова: ПРИВАТНА МЕРЕЖА, ЗАТРИМКА, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, АРХІТЕКТУРА, 5G.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці та дослідженню архітектури приватної мережі на основі технологій зв'язку 5G, що є критично важливим для забезпечення високошвидкісної, надійної та безпечної передачі даних у межах сучасних корпоративних або промислових об'єктів.

У першому розділі проаналізовано еволюцію мобільних технологій від попередніх поколінь до сучасного стандарту 5G. Визначено ключові технічні характеристики та переваги технології 5G.

У другому розділі досліджено концептуальні відмінності між публічними та приватними мережами мобільного зв'язку. Детально розглянуто архітектуру публічної мережі 5G (5G System Architecture), включаючи її ключові компоненти: ядро мережі (5GC) та мережу радіодоступу (NG-RAN).

У третьому розділі проведено порівняльний аналіз 5G приватних мереж та технології Wi-Fi, зокрема в контексті їх застосування у промислових середовищах (Industry 4.0). Оцінено показники надійності, безпеки та мобільності обох технологій.

У четвертому розділі проаналізовано надійність роботи приватної мережі до впливу вражаючих факторів в надзвичайних ситуаціях воєнного часу та вплив електричного струму на організм людини.

ANNOTATION

Architecture of the private network based on 5G technology // Qualification work of the educational level «Master» // Kazmiruk Oleh // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Radio Engineering Systems Department, group RAm-61 // Ternopil, 2025 // P. 74, fig. – 19, tabl. – 4, annexes. – 1, references – 33.

Keywords: PRIVATE NETWORK, DELAY, BANDWIDTH, ARCHITECTURE, 5G.

The master's thesis is dedicated to the development and research of private network architecture based on 5G communication technologies, which is critically important for ensuring high-speed, reliable, and secure data transmission within modern corporate or industrial facilities.

The first chapter analyzes the evolution of mobile technologies from previous generations to the modern 5G standard. The key technical characteristics and advantages of 5G technology are defined.

The second section investigates the conceptual differences between public and private mobile communication networks. The 5G System Architecture is examined in detail, including its key components: the 5G Core (5GC) and the Next-Generation Radio Access Network (NG-RAN).

The third chapter provides a comparative analysis of 5G private networks and Wi-Fi technology, specifically within the context of their application in industrial environments (Industry 4.0). Reliability, security, and mobility metrics for both technologies are evaluated.

The fourth chapter analyzes the operational reliability of a private network under the influence of damaging factors in wartime emergency situations, as well as the physiological effects of electric current on the human body.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1. Розвиток мобільних технологій	10
1.2. Мобільний зв'язок 5G	14
1.3. Порівняння технологій 4G та 5G	17
1.4. Визначення та застосування приватних 5G мереж	21
1.5. Висновок до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА	25
2.1. Ключові відмінності публічних та приватних мереж	25
2.2. Архітектура публічної мережі 5G	26
2.3. Архітектура 5G Standalone	27
2.4. Декомпозиція gNodeB: CU та DU	29
2.5. Декомпозиція gNodeB: CU та DU	31
2.6. Компонент периферійних обчислень MEX	33
2.7. Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	36
3.1. Порівняння 5G приватної мережі з технологією Wi-Fi	36
3.2. Оцінка приватних мереж та Wi-Fi у промислових середовищах	36
3.3. Порівняння часу кругової затримки (RTT)	41
3.4. Порівняння часу кругової затримки (RTT)	45
3.5. Порівняння архітектур приватних мереж 5G	52
3.6. Сфери застосування приватних 5G мереж	55
3.7. Висновки до розділу 3	64
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
4.1. Охорона праці	65
4.2. Забезпечення надійності приватної мережі 5G в умовах надзвичайних ситуацій	67

4.3. Висновок до четвертого розділу	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток технологій стільникового зв'язку, зокрема, перехід від 4G до стандарту 5G знаменує собою значний стрибок вперед у світі телекомунікацій. Якщо мережі 4G забезпечують надійний зв'язок і сприяли розвитку мобільного інтернету, то мережі 5G мають значно більші перспективи, оскільки, розроблені для забезпечення вищої швидкості передачі даних, зменшення затримок і більшої пропускної здатності. Відповідно, такий спектр характеристик забезпечує високу надійність, безпеку та продуктивність, що зумовлює перспективу використання такої технології в приватних мережах.

Приватна мережа 5G – розгортання мережевої інфраструктури 5G, яка призначена для обслуговування певної організації чи місця, а не є частиною загальнодоступної чи комерційної стільникової мережі. Приватні мережі використовують ту саму технологію 5G, що використовується в громадських стільникових мережах, але вони розгортаються незалежно, щоб забезпечити надійний і високопродуктивний зв'язок в окремих місцях. До переваг приватного 5G можна віднести покращений контроль та підвищену безпеку, надійність і низьку затримку, гнучкість налаштування та адаптивність. Використання приватних мереж 5G особливо цінне в таких галузях, як виробництво, логістика, охорона здоров'я, видобуток корисних копалин і розумні міста, де надійне та високопродуктивне з'єднання має важливе значення [1].

На відміну від публічної мобільної мережі, що розгортається операторами, приватна мережа передбачає передачу права власності на розгортання та експлуатацію кінцевому підприємству. Така мережа може функціонувати як на ліцензованих, так і на неліцензованих частотних діапазонах, незалежно від публічної інфраструктури.

Серед ключових переваг приватної 5G мережі можна виділити:

- повна відокремленість автономної мережі від публічного трафіку гарантує безпеку та запобігає витоку внутрішніх корпоративних даних;

- завдяки розміщенню всіх мережесих функцій та Edge Computing на об'єкті, затримка між пристроєм та сервером додатків є мінімальною, що дозволяє надавати критично важливі послуги;

- конфігурації мережі можуть бути детально налаштовані відповідно до специфічних вимог корпоративних додатків, на відміну від типових параметрів публічної мережі;

- автономний характер приватної мережі гарантує її незалежну роботу навіть у разі будь-яких збоїв чи зниження продуктивності в загальнодоступній 5G мережі оператора.

Застосування стандарту 5G для побудови приватних мереж відповідає високим стандартам технологічності та надійності. Тому, незважаючи на високі фінансові та технічні вимоги до її розгортання та підтримки, вона забезпечує максимальний контроль, безпеку та якість обслуговування, що є критично важливими чинниками для сучасних галузей промисловості.

Метою роботи є дослідження та обґрунтування архітектури приватної 5G мережі для підвищення показників ефективності роботи підприємств.

Для вирішення поставленої мети потрібно розв'язати ряд задач:

- провести огляд літературних джерел за тематикою наукового дослідження;
- проаналізувати відомі технології передачі даних;
- провести аналіз показників роботи мережі;
- обґрунтування вибору ефективної архітектури 5G для приватної мережі.

Об'єкт дослідження: процес обґрунтування архітектури мережі 5G

Предмет дослідження: технологія 5G для приватних мереж.

Наукова новизна: обґрунтовано архітектуру мережі 5G для приватних структур.

Практичне значення отриманих результатів: отримані результати можуть бути використані для розробки та проєктування мережі 5G для підприємств.

Структура: робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Розвиток мобільних технологій

Стрімка еволюція безпроводних технологій за останні роки вивела мобільний зв'язок на позицію домінуючого засобу комунікації. Цей прогрес зумовлений експоненціальним зростанням абонентської бази та послідовною зміною технологічних стандартів: від аналогових мереж першого покоління 1G до сучасних систем 5G.

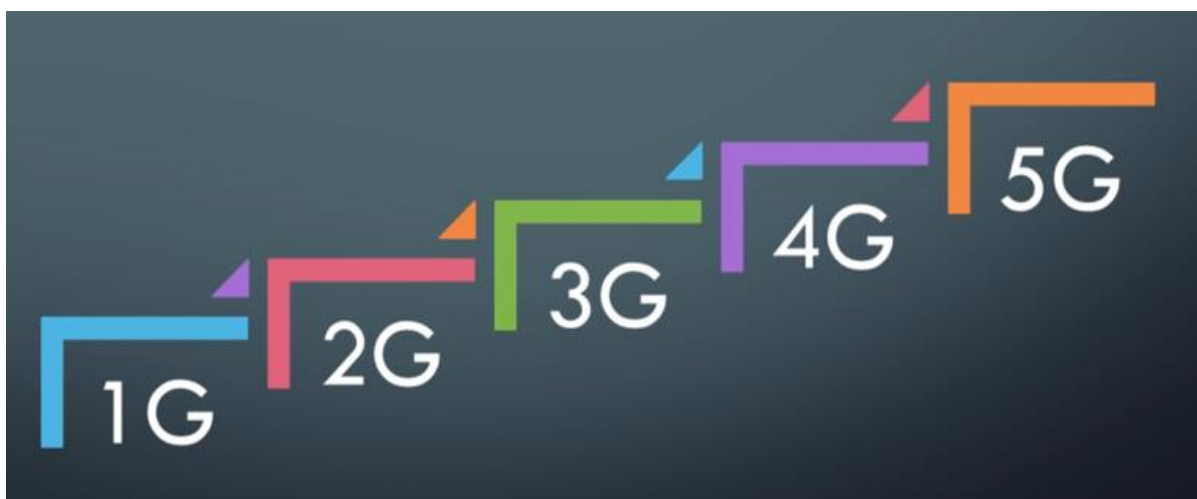


Рис. 1.1. – Еволюція мобільних мереж що призвела до приватних 5G мереж

Перше покоління стільникових мереж (1G) базувалося на використанні аналогових технологій, що обмежувало функціональні можливості систем виключно передачею голосового трафіку. Становлення 1G характеризувалося значною фрагментацією стандартів залежно від регіону: у Північній Америці та Австралії домінував стандарт AMPS, у Великій Британії – TACS, у країнах Північної Європи – NMT, а в країнах Західної Європи використовувалися системи C-450, Radiocom 2000 та RtMI.

Історично першою комерційною мережею 1G стала система NTT (Японія, 1979 р.), а на початку 1980-х аналогічні рішення були розгорнуті в

Скандинавських країнах. Технічний базис 1G спирався на частотну модуляцію для передачі голосу та метод множинного доступу з частотним поділом (FDMA) у діапазонах частот близько 150 МГц.



Рис. 1.2. – Ключові події технології 1G

Становлення другого покоління мобільного зв'язку (2G), активне впровадження якого почалося наприкінці 1980-х років, ознаменувало фундаментальний перехід від аналогових до цифрових методів передачі сигналу. Це дозволило трансформувати стільниковий зв'язок у багатфункціональну систему, що забезпечує не лише голосові виклики, а й передачу текстових (SMS) та мультимедійних (MMS) повідомлень, пакетну передачу даних та сервіси позиціювання. Впровадження SIM-карт стало ключовим етапом у забезпеченні безпеки та ідентифікації абонентів. Важливим стимулом розвитку 2G стала необхідність оптимізації потужності випромінювання терміналів, що призвело до зменшення радіуса дії базових станцій, підвищення щільності мережі та зниження вартості інфраструктурного обладнання. Цифрова модуляція забезпечила ефективніше використання частотного спектра, значно підвищивши пропускну здатність системи.

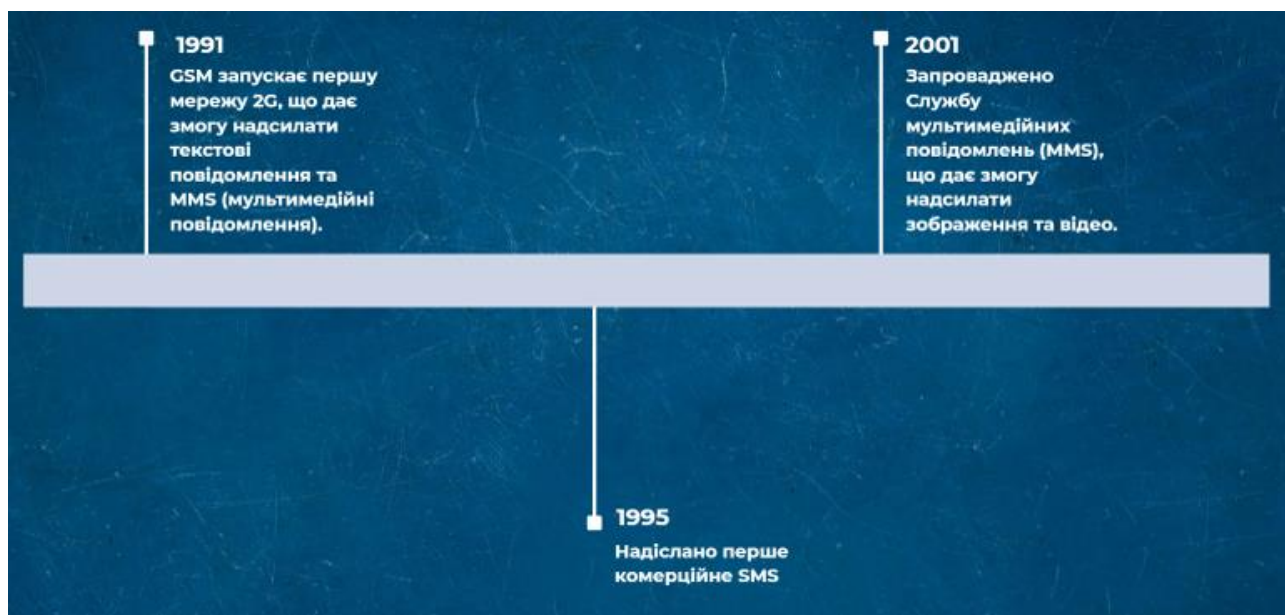


Рис. 1.3. – Ключові події технології 2G

Третє покоління мобільного зв'язку (3G) базується на специфікаціях сімейства IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000), розроблених Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ). Ключовою особливістю цього етапу стала гармонізація регіональних стандартів, що призвело до домінування двох основних технологій: UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), поширеної в Європі, та CDMA2000, яка отримала впровадження у США та Японії.

Для координації розробки глобальних стандартів у 1999 році було створено міжнародне об'єднання 3GPP, метою якого стало створення універсальної та відкритої архітектури. Мережі 3G функціонують переважно у дециметровому діапазоні (близько 2100 МГц) із шириною каналу 15-20 МГц. Це дозволило забезпечити швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с, заклавши фундамент для широкосмугового мобільного доступу та підтримки мультимедійного контенту.

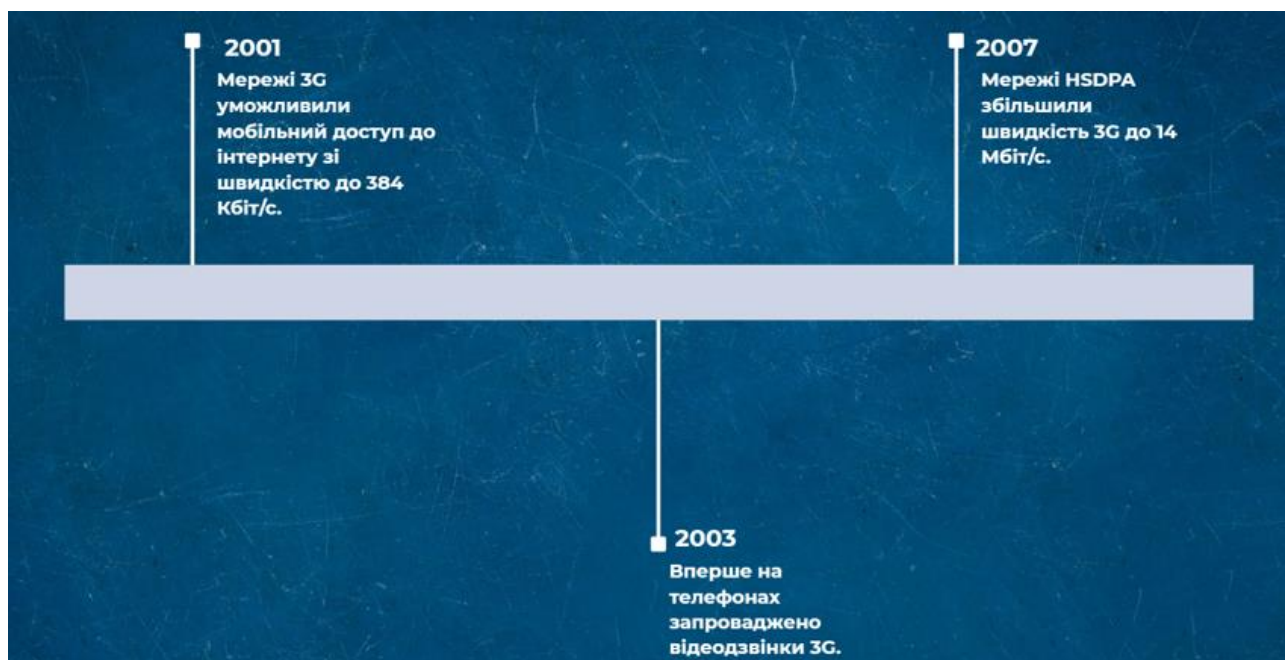


Рис. 1.4. – Ключові події технології 3G

Четверте покоління мобільного зв'язку (4G) базується на концепції All-IP Network, де передача даних та голосу здійснюється виключно на основі пакетної комутації за протоколами TCP/IP. Згідно зі специфікаціями IMT-Advanced, мережі 4G забезпечують пікову швидкість до 1 Гбіт/с для стаціонарних абонентів та до 100 Мбіт/с в умовах високої мобільності. Технологічний базис 4G складають методи ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) та багатоантенні системи (MIMO), що дозволяють суттєво підвищити спектральну ефективність.

Архітектура мережі спроектована для забезпечення високої якості обслуговування (QoS), що є необхідним для функціонування ресурсомістких сервісів: потокового HDTV, відеоконференцій, мобільного телебачення (DVB) та хмарних обчислень. В Україні комерційне впровадження стандарту LTE почалося після проведення частотних тендерів у 2018 році.



Рис. 1.5. – Ключові події технології 4G LTE

1.2. Мобільний зв'язок 5G

П'яте покоління мобільних мереж (5G) являє собою нову парадигму бездротового зв'язку, що виходить за межі простого покращення характеристик смартфонів. Ключовою метою впровадження 5G є створення універсальної інфраструктури для екосистеми Інтернету речей (IoT) та забезпечення критично важливих промислових комунікацій.

Процес стандартування 5G розпочався у 2012 році під егідою консорціуму 3GPP. Важливим етапом стало затвердження наприкінці 2017 року специфікацій Release 15 (Rel-15), які визначили два основні варіанти архітектурного розгортання:

- Non-Standalone (NSA): використовує наявну інфраструктуру мереж LTE як опорну, що дозволило операторам швидко почати впровадження 5G NR (New Radio) на базі наявних базових станцій.

- Standalone (SA): передбачає використання повноцінного нового ядра мережі (5GC), що забезпечує повну функціональну незалежність від 4G та є критично важливим для побудови приватних промислових мереж.

Новий радіоінтерфейс 5G NR охоплює два великі частотні діапазони (Frequency Ranges):

- FR1 (410 МГц – 7,125 ГГц): «Sub-6 GHz», що забезпечує оптимальний баланс між покриттям та ємністю. Включає частоти 600-700 МГц для широкого покриття та 3,5 ГГц для міських мереж.
- FR2 (24,25 ГГц – 52,6 ГГц): міліметрові хвилі (mmWave). Забезпечує надвисоку пропускну здатність на коротких відстанях, що є ідеальним для локальних приватних мереж на підприємствах.

Попри те, що масове розповсюдження 5G-пристроїв триває, прогнозується, що до 2025 року близько 50% мобільних підключень у світі здійснюватимуться через мережі п'ятого покоління. Особливу роль 5G відіграватиме у вертикальних ринках: від логістики (використання дронів для реального часу) до автомобільної промисловості (V2X комунікації). Для розгортання таких систем виробники обладнання використовують стандартизовані платформи тестування, що дозволяють адаптувати мережеві параметри під специфічні потреби приватних інфраструктур.



Рис. 1.6. – Ключові події технології 5G

Сучасні мобільні пристрої стандарту 5G розраховані на роботу в широкому спектрі частот, склад якого варіюється залежно від регіональних особливостей телекомунікаційних ринків. Згідно з чинними специфікаціями, частотний ресурс

поділяється на два ключові діапазони: FR1, де ідентифікатори смуг охоплюють значення від 1 до 255, та FR2, де індекси діапазонів варіюються від 257 до 511. Впровадження дев'яти нових діапазонів у межах частот до 6 ГГц, які раніше не використовувалися в мережах попереднього покоління LTE, дозволило суттєво розширити покриття та пропускну спроможність систем, ефективно компенсуючи дефіцит спектра на низьких частотах. Використання міліметрових хвиль у діапазоні FR2 відкриває можливості для реалізації застосунків із надвисокою пропускну здатністю, що стало можливим завдяки значному розширенню доступних смуг. Зокрема, максимальна ширина каналу для частот нижче 6 ГГц зросла до 100 МГц, а для міліметрового спектра – до 400 МГц, з потенціалом подальшого нарощування через механізми агрегації несучих.

Водночас збільшення ширини смуг та кількості використовуваних діапазонів висуває значно жорсткіші вимоги до апаратної реалізації та процесів верифікації обладнання. У таких умовах стає складніше забезпечити стабільність величини вектора помилки (EVM), плоскості частотних характеристик та необхідного динамічного діапазону. Оскільки наявні вимірювальні інструменти часто не здатні обробляти сигнали з такою високою пропускну здатністю, виникає потреба у використанні дорожчого тестового обладнання та спеціалізованих екранованих камер. Це призводить до зростання кількості тестових точок та загальної вартості випробувань, що стає критичним фактором для виробників у контексті економічної ефективності. Для успішного впровадження технологій 5G NR, Massive MIMO та mmWave розробники змушені шукати баланс між максимальним охопленням тестових сценаріїв та прискоренням часу виходу продуктів на ринок.

Важливим аспектом при розгортанні 5G-інфраструктури є забезпечення гнучкості виробничих процесів в умовах постійної еволюції стандартів 3GPP. Послідовність та уніфікація вимірювань є необхідними умовами для ефективної співпраці між різними етапами розробки та зниження витрат. Перехід до використання спектра міліметрових хвиль спричиняє технологічну трансформацію методів тестування: замість традиційних провідних з'єднань

виробники змушені впроваджувати випробування через ефір (Over-the-Air, OTA), що дозволяє компенсувати високі втрати сигналу на тракті та враховувати інтегровану архітектуру антенних масивів. Таким чином, розгортання сучасних мереж потребує масштабованих рішень, які дозволяють мінімізувати кількість необхідних тестових активів, раціонально використовувати виробничі площі та адаптуватися до динамічних змін у методології тестування 5G.

1.3. Порівняння технологій 4G та 5G

Для початку потрібно зрозуміти термінологію ключових параметрів порівняння двох технологій.

Мережа – це фізична інфраструктура обладнання, пристроїв та з'єднань, яка забезпечує передачу даних та зв'язок між пристроями. Це як система доріг, що з'єднує різні локації.

Пропускна здатність – це максимальна швидкість передачі даних мережі, вимірювана як обсяг даних, що може пройти через мережеве з'єднання за секунду. Це як кількість смуг на шосе – чим більше смуг, тим більше автомобілів може проїхати за секунду.

Затримка – це час, протягом якого дані передаються мережею від одного пристрою до іншого. Нижча затримка забезпечує швидший час відгуку. Це як час, необхідний для поїздки між двома пунктами призначення. Менший трафік означає нижчу затримку.

Також є продуктивність/Фактична пропускна здатність – це обсяг даних, успішно переданий через мережеве з'єднання за секунду. Як кількість автомобілів, що проїжджають шосе за секунду. Цей показник може бути меншим за максимальну пропускну здатність, якщо є перевантаження.

Надійність – це здатність мережі постійно підтримувати з'єднання та успішно доставляти дані без помилок чи перебоїв. Це як надійність системи автомобільних доріг, яка доставляє водіїв до місця призначення без перекриття доріг чи аварій.

Спектр – це радіочастоти, виділені та призначені для передачі даних через бездротові мережі. 5G використовує вищу частоту в міліметровому діапазоні (millimeter wave spectrum). Це як радіостанції, що ведуть мовлення на різних частотах. 5G використовує нові, вищі частоти, подібні до станцій у верхній частині радіодіапазону.

Показники пікової швидкості передачі даних у мережах четвертого покоління (4G), що досягають 1 Гбіт/с, наразі дозволяють забезпечувати стабільне функціонування більшості сучасних користувацьких сервісів. Проте з огляду на стрімке розширення екосистеми Інтернету речей (IoT) та появу нових мультимедійних платформ, що потребують значної пропускної здатності для передачі інформації в режимі реального часу, технічний потенціал технології LTE виявляється обмеженим. Подальше зростання кількості безпроводних пристроїв, які щоденно вводяться в експлуатацію, створює надмірне навантаження на наявну інфраструктуру.

Таблиця 1.1

Порівняння основних характеристик технологій

ХАРАКТЕРИСТИКА	4G	5G
Пікова швидкість завантаження	До 1 Гбіт/с (теоретична)	До 10–20 Гбіт/с (теоретична)
Середня швидкість завантаження	Десятки Мбіт/с (зазвичай 25–100 Мбіт/с)	Сотні Мбіт/с – 1 Гбіт/с
Затримка (Latency)	20–50 мс	< 10 мс (ціль – 1 мс)
Спектр частот	Нижче 6 ГГц (Low-band, Mid-band)	Широкий діапазон (Low-band, Mid-band, mmWave – високі частоти 30–300 ГГц)
Щільність підключень	~100 000 пристроїв на км ²	1 000 000 пристроїв на км ²
Ефективність використання спектру	Нижча	Вища (за рахунок Beamforming, Massive MIMO)
Основна технологія	OFDM, MIMO	OFDM, Massive MIMO, Beamforming
Архітектура мережі	Централізована (Evolved Packet Core – EPC)	Розподілена, Edge-Centric Architecture (5G Core – 5GC), підтримка MEC (Multi-Access Edge Computing)
Ключові сфери застосування	Мобільний широкосмуговий доступ (eMBB), відео, VoIP	eMBB (розширений мобільний ШСД), mMTC (масивне IoT), URLLC (наднадійна зв'язок з низькою затримкою)
Енергоспоживання (на біт)	Вище	Нижче (більша енергоефективність)

Еволюційний перехід до п'ятого покоління мобільного зв'язку супроводжується радикальним покращенням ключових мережевих параметрів. Зокрема, реальна користувацька швидкість передачі даних у мережах 5G зростає до 100 Мбіт/с, що вдсятеро перевищує типові показники 4G

(10 Мбіт/с). Таке масштабування пропускної здатності є необхідною умовою для підтримки зростаючої кількості IoT-вузлів та терміналів, що генерують щільний інформаційний трафік.

Важливою складовою системної оптимізації є спектральна ефективність. Завдяки вдосконаленим методам модуляції та антенним технологіям, стільники 5G здатні використовувати доступний радіочастотний ресурс у три рази ефективніше порівняно з системами LTE. Крім того, архітектура 5G забезпечує вищу мобільність, підтримуючи стабільне з'єднання з пристроями, що рухаються на швидкостях до 500 км/год, тоді як для 4G цей поріг обмежений 350 км/год. Це розширює можливості надання послуг зв'язку у високошвидкісному залізничному транспорті.

Одним із найкритичніших параметрів для впровадження безпілотного транспорту та систем V2X (Vehicle-to-Everything) є мережева затримка. Якщо в мережах 4G сумарна затримка в площинах управління та даних (близько 100 мс та 10 мс відповідно) є занадто високою для забезпечення безпеки руху в реальному часі, то стандарт 5G радикально вирішує цю проблему. Шляхом оптимізації стека протоколів затримка в площині управління знижується до 50 мс (на 50%), а в площині даних – до 1 мс (на 90%). Це створює умови для комерціалізації систем VANET (Vehicular Ad-Hoc Networks), де швидкість реакції системи безпосередньо впливає на запобігання дорожнім інцидентам.

Значне зростання ринку Інтернету речей потребує високої щільності з'єднань. Архітектура 5G дозволяє підтримувати до 1 мільйона підключених пристроїв на квадратний кілометр, що на кілька порядків перевищує можливості 4G, ліміт якої становить близько 100 000 терміналів на аналогічну площу. При цьому пропускна здатність стільника, що вимірюється сумарною швидкістю передачі даних на одиницю площі, у мережах 5G зростає у 100 разів.

Попри інтенсивне навантаження на мережу, особлива увага приділяється енергоефективності інфраструктури. Технологія 5G спроектована таким чином, щоб бути у 100 разів ефективнішою за 4G у розрахунку на одиницю переданих даних. Це дозволяє нарощувати кількість підключених пристроїв без

пропорційного збільшення енергоспоживання, сприяючи зменшенню глобального «вуглецевого сліду» телекомунікаційного сектору та забезпечуючи сталий розвиток бездротових комунікацій.

Перехід від 4G до 5G це можна назвати стрибком, який пропонує збільшену швидкість передачі даних, і низьку затримку. Ці можливості є ключовими для різних галузей, включаючи телекомунікації, охорону здоров'я, виробництво та багато інших.

Щоб надати вам більше контексту, мережі 4G зазвичай забезпечують швидкість завантаження близько 20 до 100 Мбіт/с. На відміну від цього, мережі 5G можуть забезпечувати швидкість до десяти гігабіт на секунду. Це сто кратне збільшення, яке сприяє аналізу даних у режимі реального часу, хмарним обчисленням та миттєвій доставці контенту, що є важливим для сучасних бізнес-операцій.

Хоча швидкість є помітним фактором, низька затримка 5G є ще однією наріжною особливістю. Затримка, або час затримки до початку передачі даних після подачі інструкції на її передачу, знижена до мінімуму – лише до однієї мілісекунди. Це робить 5G ідеальною технологією для критично важливих застосувань, де передача даних у режимі реального часу є необхідною, як-от процедури телемедицини, автономне водіння та промислова автоматизація.

Але те, що робить 5G справді революційною технологією, – це її здатність до масового зв'язку. На відміну від своїх попередників, 5G спроектована для одночасного підключення значно більшої кількості пристроїв. Це критичний компонент для екосистеми Інтернету речей (IoT), де пристрої – від смартфонів до сенсорів на виробничому об'єкті – повинні взаємодіяти бездоганно.

Крім того, 5G пропонує вищу надійність, ніж її попередники. Вона розроблена для забезпечення "п'яти дев'яток", або надійності (uptime) 99,999%, що робить її чудовим вибором для критично важливих послуг і застосувань.

Такий рівень надійності є особливо важливим у таких сферах, як громадська безпека та охорона здоров'я, де навіть незначний збій у зв'язку може мати серйозні наслідки.

Адаптивність та гнучкість 5G, які забезпечуються завдяки таким функціям, як слайсинг мережі (Network Slicing). Це дозволяє розділити єдину мережу 5G на кілька віртуальних мереж, кожна з яких налаштована для задоволення конкретних потреб.

Наприклад, один слайс може бути оптимізований для високої пропускної здатності даних (для потокового відео), тоді як інший може бути спроектований для низької затримки (для підтримки ігор у реальному часі).

1.4. Визначення та застосування приватних 5G мереж

У світі сучасного бездротового підключення центральне місце займають дві потужні технології: приватні мережі 5G і Wi-Fi. Якщо з Wi-Fi всі знайомі, то приватна 5G – це вже щось нове.

Приватна мережа – це корпоративна мережа, яка забезпечує комунікаційні з'єднання для користувачів або пристроїв, що належать приватному підприємству або організації, одночасно пропонуючи специфічні прикладні послуги, адаптовані до потреб кожного бізнесу. Для промислових застосувань здатність проектувати мобільні мережі для задоволення вимог до надійності, затримки та безпеки критичних застосувань. Строгі вимоги кожної галузі не можуть бути задоволені традиційним Ethernet або Wi-Fi, які є технологіями, прийнятими в галузі.

Провідний Ethernet економічний і стабільний з точки зору продуктивності та якості, але обмежений у мобільності, оскільки він дротовий. Wi-Fi простий у побудові та експлуатації, але з точки зору продуктивності зв'язку – таких як дальність зв'язку, затримка, мобільність і безпека – його недостатньо для задоволення вимог цифрової трансформації підприємства.

Приватна 5G означає розгортання мережевої інфраструктури 5G, яка призначена для обслуговування певної організації чи місця, а не є частиною загальнодоступної чи комерційної стільникової мережі. Приватні мережі 5G використовують ту саму технологію 5G, що використовується в громадських

стільникових мережах, але вони розгортаються незалежно, щоб забезпечити надійний і високопродуктивний зв'язок в окремих місцях.

Приватна 5G – це зменшена версія публічної мережі 5G, розроблена для обслуговування конкретної організації чи локації. Вона має три основні компоненти: базову станцію, основну мережу (core network) та кінцеві пристрої.

Відкрита архітектура, якою вона відрізняється, означає, що вона зарезервована для заздалегідь визначених програм і користувачів.

Приватна 5G може принести користь організаціям, надаючи виділене та налаштоване бездротове підключення. Вона пропонує покращену безпеку, надійність та контроль над мережевими ресурсами. За допомогою приватної 5G організації можуть створити виділену мережу, яка відповідає їхнім конкретним вимогам, і дозволяє їм розгортати критично важливі програми без перешкод з боку інших користувачів.

Приватна 5G може бути особливо корисною для галузей із унікальними потребами, таких як виробництво, енергетика, транспорт, охорона здоров'я та багато інших. Вона забезпечує моніторинг у реальному часі, автоматизацію та оптимізацію процесів, що призводить до підвищення ефективності та продуктивності.

Крім того, приватні мережі 5G можуть підтримувати передові технології, як-от граничні обчислення (edge computing) та пристрої Інтернету речей (IoT), дозволяючи організаціям використовувати весь потенціал цих нових технологій шляхом перенесення обчислювальних можливостей у приватну 5G.

Приватні мережі 5G дозволяють підприємствам розгортати власну індивідуальну інфраструктуру 5G окремо від публічних стільникових мереж. Це дає підприємствам більший контроль, безпеку та гнучкість для задоволення їхніх конкретних потреб.

Є кілька причин, чому галузі, включаючи виробництво, енергетику, транспорт, охорону здоров'я та багато інших, повинні розглянути приватну 5G:

- Покращена продуктивність: приватна 5G дозволяє підприємствам максимізувати можливості 5G (наднизька затримка, висока пропускна здатність

і щільність підключень) у межах своїх об'єктів. Для фабрик, енергетичних об'єктів, портів та інших майданчиків приватна 5G може забезпечити роботу передових програм із вимогливими до підключення потребами, які публічні мережі не завжди можуть стабільно підтримувати.

– Посилена безпека: з приватною 5G усі дані та комунікації відокремлені від публічної мережі. Підприємства підтримують повний контроль над своєю мережею та потоками даних, зменшуючи ризик. Приватні мережі використовують нарізку мережі (network slicing) для відокремлення конфіденційних програм і потоків даних (наприклад, для охорони здоров'я). Безпека приватної 5G є значною перевагою.

– Гнучкість налаштування: підприємства можуть налаштовувати свої приватні мережі 5G для пріоритезації критично важливих програм і послуг. Якість обслуговування (QoS) та параметри трафіку можуть бути налаштовані на основі унікальних потреб. Це особливо корисно для промислових середовищ зі спеціалізованими активами, датчиками та вимогами до експлуатації.

– Покращена надійність: приватна 5G дозволяє організаціям забезпечити надійне, стійке підключення для критично важливих бізнес-додатків без залежності від карт покриття на об'єкті. Вона усуває залежність від підключень публічних операторів для виробничих підприємств. Це максимізує час безвідмовної роботи та ефективність виробництва.

Приватна 5G забезпечує бездротову продуктивність наступного покоління, безпеку, контроль та налаштування для галузей і підприємств, що керують критично важливими процесами. Розгортання інфраструктури приватної 5G є життєво важливим для використання повного потенціалу 5G. Ці переваги роблять приватні мережі 5G стратегічною інвестицією для промислової конкурентоспроможності.

До переваг приватного 5G можна віднести покращений контроль та підвищену безпеку, надійність і низьку затримку, гнучкість налаштування та адаптивність. Використання приватних мереж 5G особливо цінне в таких галузях, як виробництво, логістика, охорона здоров'я, видобуток корисних

копалин і розумні міста, де надійне та високопродуктивне з'єднання має важливе значення.

1.5. Висновок до розділу 1

У даному розділі було проведено комплексний аналіз технологічних особливостей мереж п'ятого покоління та здійснено їх ретроспективне порівняння з попередніми стандартами мобільного зв'язку. Визначено ключові відмінності в архітектурі та протоколах передачі даних, а також обґрунтовано переваги та потенційні виклики, пов'язані з впровадженням систем нового покоління.

РОЗДІЛ 2.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Ключові відмінності публічних та приватних мереж

В основі диференціації лежать доступ та кастомізація.

Публічні мережі – це відкриті інфраструктури, доступні для багатьох абонентів. Це можуть бути окремі особи або підприємства, які користуються мережею для різних потреб. Приватні мережі, навпаки, є закритими екосистемами. Вони зазвичай зарезервовані для конкретних користувачів або пристроїв у межах однієї організації.

Великі телекомунікаційні провайдери часто керують публічними мережами, пропонуючи перевагу масштабу, що виражається у ширшому географічному покритті.

Це є безцінним для мобільних користувачів або компаній із багатьма локаціями. Однак, ця широка доступність призводить до універсального підходу ("один розмір для всіх"). Важко налаштувати публічну мережу відповідно до конкретних потреб підприємства.

З іншого боку, приватні мережі можуть бути побудовані "з нуля" з урахуванням конкретного набору потреб. Це означає, що їх можна глибоко адаптувати для специфічних застосувань, чи то низька затримка для аналітики даних у реальному часі, чи висока надійність для критично важливих завдань. Така кастомізація робить приватні мережі дуже привабливими для таких секторів, як виробництво, охорона здоров'я та навіть "розумні міста".

Щодо безпеки: публічні мережі досягли успіху в її підвищенні, але вони не можуть зрівнятися з надійністю приватних мереж. Оскільки приватні мережі є ізольованими екосистемами, вони пропонують більш суворі засоби контролю безпеки. Це життєво важливо для організацій, які обробляють конфіденційні дані, дотримуються суворих стандартів відповідності, або виконують критично важливі операції, що не можуть дозволити собі простою через порушення.

Однак, у приватних мережах є не лише переваги. Одним з обмежень є початкова вартість і складність налаштування. Розгортання приватної мережі може вимагати спеціалізованих знань, обладнання та програмного забезпечення. Крім того, вони зазвичай не мають широкого географічного охоплення публічної мережі, що робить їх менш ідеальними для застосувань, які потребують широкого покриття.

Підсумовуючи, публічні мережі пропонують перевагу ширшого покриття, але можуть поступатися в кастомізації та суворому контролі безпеки. Тим часом приватні мережі вирізняються у наданні індивідуалізованого, безпечного середовища, але можуть бути обмежені початковими витратами на налаштування та обмеженим географічним охопленням.

2.2. Архітектура публічної мережі 5G

Перед обговоренням архітектури 5G потрібно вказати що в багатьох випадках не зважаючи на те що мобільний телефон кінцевого користувача мережі може бути сумісним із 5G, а індикатор на дисплеї показувати "5G", є ймовірність, що насправді девайс використовує не повноцінну мережу 5G.

Це тому, що багато операторів бездротових мереж вирішили перенести обладнання радіодоступу (Radio Access Network – RAN) на 5G, щоб використати новий спектр, поки вони будують ядро своїх мереж.

У галузі ми називається це 5G Non-Standalone (5G NSA), а повноцінний 5G – 5G Standalone (5G SA). Деякі оператори повністю перевели свої мережі та своїх клієнтів на 5G SA, але багато хто все ще використовує 5G NSA, поки розбудовують та готують 5G SA.

5G Non-Standalone (5G NSA) являє собою початковий перехідний етап. У 5G NSA існуюча інфраструктура 4G LTE все ще забезпечує базове ядро мережі (Core Network). Радіомодулі 5G пропонують вищу швидкість і більшу ємність як накладку (overlay) поверх мережі 4G. Однак основні функції ядра мережі, такі як

аутентифікація та управління мобільністю, все ще обробляються застарілими системами 4G.

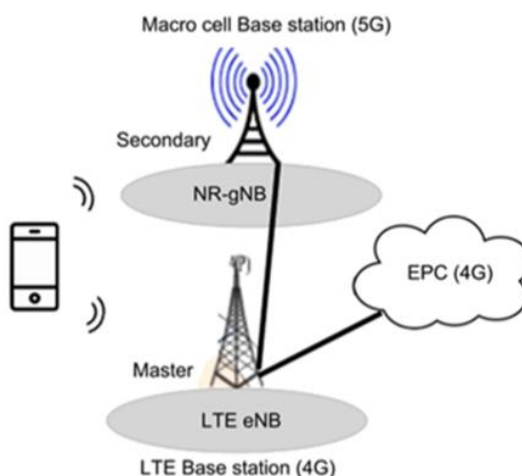


Рис. 2.1. – Архітектура роботи мережі 5G Non-Standalone

Архітектура 5G Standalone (5G SA) являє собою повну наскрізну (end-to-end) систему 5G. У 5G SA як радіодоступ, так і ядро мережі є нативними 5G. Це дозволяє мережі розкрити повний потенціал технології 5G, включаючи ультранизьку затримку (URLLC), розширений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB) та масове міжмашинне спілкування (mMTC). Завдяки наскрізній системі 5G усі функції ядра мережі мігрували на 5G, не покладаючись на застарілі компоненти мережі 4G.

5G NSA – це проміжна відправна точка, а 5G SA – кінцева мета. З метою розуміння архітектури публічної мережі 5G, я планую зосередитися на 5G SA, оскільки це та публічна архітектура, яку всі оператори вже мають або матимуть найближчим часом.

2.3. Архітектура 5G Standalone

Фізичний рівень та спектр. Все починається з фізичного рівня, яким є спектр радіочастот. Існують:

- FR1 (Frequency Range 1) для частот Sub-6 ГГц;

– FR2 (Frequency Range 2) від 24 до 52 ГГц.

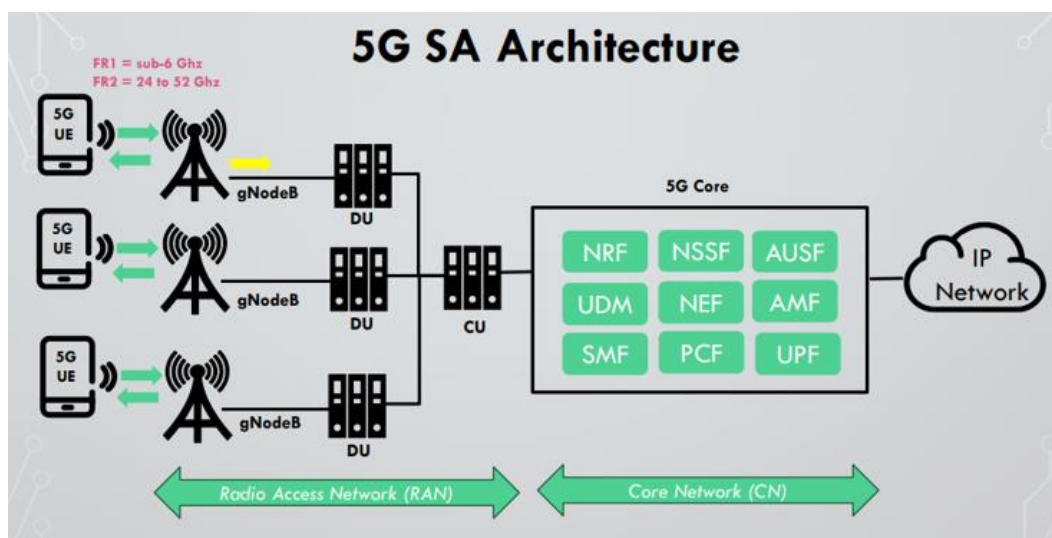


Рис. 2.2 – Архітектура роботи мережі Standalone 5G

FR2 вважається міліметровим діапазоном (millimeter wavelength – mmWave), який має вищу пропускну здатність, але поширюється на коротші відстані.

Важливо зазначити, що можливості цих діапазонів можуть визначати успіх або провал конкретних застосувань.

Наприклад, FR1 зазвичай підходить для ширшого покриття, що робить його ідеальним для сільських і приміських районів при розгортанні фіксованого бездротового доступу (Fixed Wireless Access).

І навпаки, FR2 з його вищою ємністю, але меншим радіусом дії, є найкращим вибором для густих міських середовищ, де існують інтенсивні до пропускну здатності застосунки для автоматизації та масової зв'язності.

Рухаючись зліва направо по схемі архітектури на рисунку 2.2, процес починається з:

1. Абонентське обладнання 5G (5G User Equipment - 5G UE) Це зазвичай ваш смартфон, але це може бути будь-який пристрій із підтримкою 5G: пристрої IoT, планшети, ноутбуки, "розумні" автомобілі або ігрові пристрої.

Встановлення з'єднання: UE відіграє критичну роль в ініціюванні мережевого з'єднання. Воно встановлює те, що ми називаємо Керування радіоресурсами (Radio Resource Control – RRC). RRC – це набір протоколів, які дозволяють UE підключатися та підтримувати зв'язок з радіоелементами мережі, а саме gNB (generic Node B – вузол B наступного покоління).

UE також відповідає за виконання завдань Протоколу нерадіочастотного доступу (Non-Access Stratum – NAS) – рівня, який встановлює та підтримує з'єднання з ядром мережі, відомим як Ядро 5G (5G Core). Після підключення UE ініціює процедури безпеки, відомі як шифрування (Ciphering), щоб гарантувати, що дані, які передаються до та з ядра 5G, є зашифрованими та захищеними.

2. Базова станція gNodeB (gNB) gNB виступає в ролі шлюзу для доступу UE до мережі 5G. Коли UE запитує підключення до мережі, gNB обробляє цей запит, встановлюючи власний набір протоколів RRC для полегшення та захисту цього з'єднання. Після забезпечення безпеки gNB пересилає запити на реєстрацію UE до іншого життєво важливого компонента мережі – Функції управління доступом та мобільністю (Access and Mobility Function – AMF).

Керування та Безпека gNB: Одним із важливих завдань gNB є захист потоку даних між Радіодоступом (RAN) та UE. Як тільки gNB забезпечує цей рівень безпеки, воно активує так звану сесію блоку даних пакета за замовчуванням (default Packet Data Unit – PDU session).

Ця активація дозволяє трафіку даних вільно проходити між мережею та UE, забезпечуючи всі дивовижні високошвидкісні послуги, які може запропонувати 5G.

2.4. Декомпозиція gNodeB: CU та DU

Варто зазначити що мережа радіодоступу складається з розподіленого блоку (Distributed Unit – DU) та централізованого блоку (Centralized Unit – CU). Зображено на рисунку 2.3.

Хоча вони виглядають як додаткові компоненти, важливо розуміти, що ці блоки є по суті підвузлами всередині gNB.

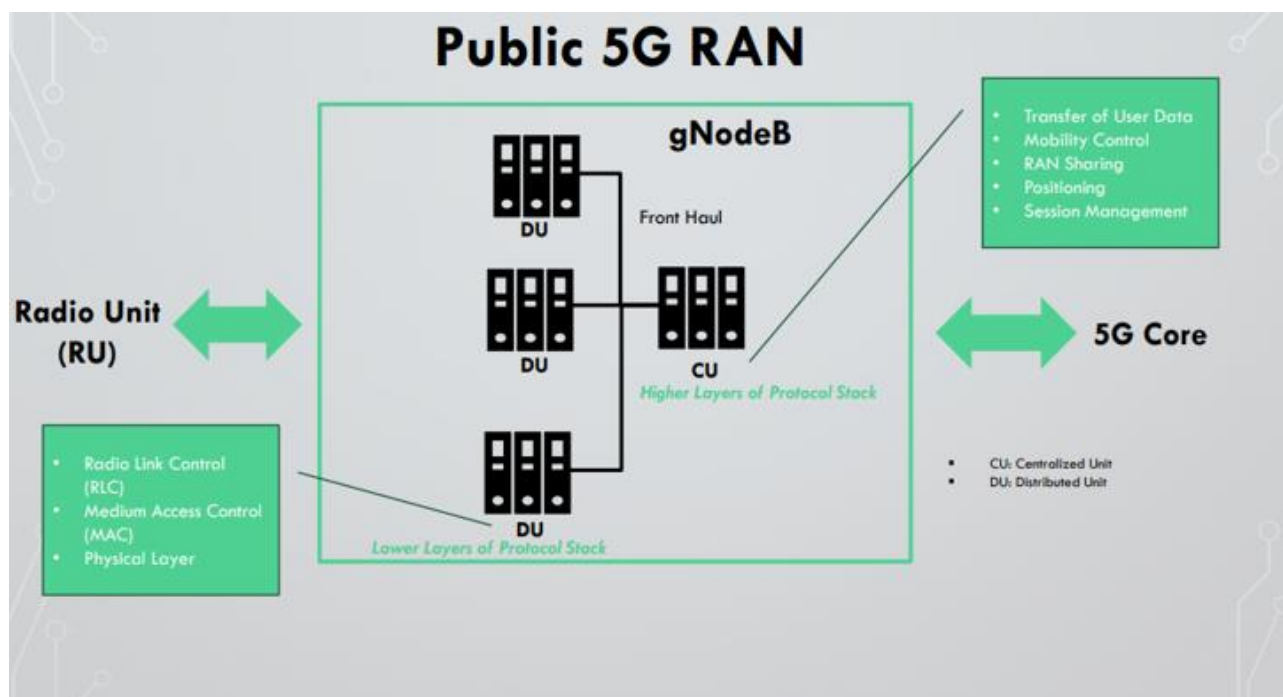


Рис. 2.3. – Структура RAN публічної 5G мережі

Централізований Блок CU, іноді званий центральним вузлом, є логічним вузлом всередині gNB із багатим набором функціональних можливостей. Це операційний мозок, який обробляє життєво важливі завдання для продуктивності мережі та досвіду користувача таких як:

- Передача користувацьких даних. Відповідає за ефективне транспортування пакетів користувацьких даних.
- Керування мобільністю. Керує тим, як ваш пристрій залишається підключеним під час руху, забезпечуючи безперебійну роботу.
- Спільне використання RAN. Дозволяє кільком провайдерам послуг використовувати одну фізичну інфраструктуру.
- Сесійне керування. Керує станом з'єднання між UE та мережею 5G. CU є диригентом оркестру, контролюючи роботу DU через комунікаційне посилення, відоме як Fronthaul interface.

Розподілений Блок (DU) На відміну від CU, DU схожий на спеціалізованого музиканта в оркестрі, зосередженого на підмножині функцій gNB. Ці функції знаходяться під контролем CU і зазвичай ближчі до фізичних радіохвиль. DU відповідає за функції нижнього рівня протокольного стеку:

- Керування радіоканалом (Radio Link Control – RLC). Керує цілісністю каналу даних між UE та мережею.
- Керування доступом до середовища (Medium Access Control – MAC). Контролює, як декілька пристроїв ефективно використовують радіоресурси.
- Фізичний рівень (Physical Layer). Має справу безпосередньо з радіочастотним сигналом, перетворюючи цифрові дані на модульовані хвилі та навпаки.
- Масштабованість: 1 CU може контролювати кілька DU. В деяких випадках одна CU може керувати більш ніж 100 DU. Кожен DU може підтримувати одну або кілька сот. Ця масштабованість є життєво важливою для розширення мережі. Зрештою, gNB підключається до Ядра мережі 5G через CU.

2.5. Декомпозиція gNodeB: CU та DU

Ядро 5G, що є командним центром, побудоване на Сервісно-орієнтованій архітектурі (Service-Based Architecture – SBA). Ядро 5G є осередком спеціалізованих логічних вузлів, також відомих як мережеві функції (Network Functions – NFs).

Кожна функція точно налаштована для виконання конкретних завдань і може взаємодіяти з іншими функціями, створюючи безшовне, високоефективне мережеве середовище.

Архітектура Ядра 5G розгортає численні взаємопов'язані мережеві функції, кожна з яких пропонує окремий сервіс. Ці функції мають дозвіл на доступ до послуг, що надаються іншими мережевими функціями, таким чином забезпечуючи універсальне та динамічне середовище 5G.

Ключові Мережеві Функції (NFs):

– Функція управління доступом та мобільністю (Access and Mobility Function – AMF). Серцем процесу мережевої реєстрації є AMF. Ця функція має вирішальне значення для координації процедури реєстрації 5G Standalone. Вона діє як перша точка контакту, коли Абонентське Обладнання (UE) намагається підключитися до мережі 5G, направляючи UE через необхідні кроки для встановлення безпечного та надійного з'єднання.

– Функція сервера аутентифікації (Authentication Server Function – AUSF). Що стосується безпеки, AUSF відіграє вирішальну роль. Як випливає з її назви, AUSF обробляє процеси аутентифікації для перевірки ідентичності UE та забезпечення його авторизації для доступу до мережевих послуг.

– Уніфіковане управління даними (Unified Data Management – UDM). UDM слугує великою базою даних і виконує подвійну роль. Вона управляє даними абонентів та генерує вектори аутентифікації. Ці вектори використовуються під час процесу реєстрації UE, гарантуючи, що доступ отримують лише аутентифіковані та авторизовані пристрої.

– Функція контролю політик (Policy Control Function – PCF). PCF є ще однією складною функцією, тісно пов'язаною з AMF. Вона отримує асоціацію політик від AMF, що дозволяє їй відстежувати зміни місцезнаходження та статуси зв'язку. Це відстеження забезпечує більш ефективне управління мережевими ресурсами та надання послуг.

– Функція управління сесіями (Session Management Function – SMF). SMF діє як площина управління (control plane) для управління сесіями. Вона вирішує, яка Функція площини користувача (UPF) повинна обробляти сесію даних користувача. Роблячи це, вона керує маршрутизацією даних через мережу, забезпечуючи ефективне використання ресурсів.

– Функція площини користувача (User Plane Function – UPF). Як компонент площини даних (data plane), UPF обробляє користувацькі дані. Це включає маршрутизацію, пересилання та доставку пакетів даних між UE та мережевими сервісами. Вона функціонує під повним контролем SMF.

– Функція мережевого репозиторію (Network Repository Function – NRF). Уявіть NRF як централізований каталог для всіх мережевих функцій 5G. Він дозволяє цим функціям реєструватися та знаходити одна одну через інтерфейси прикладного програмування (APIs), сприяючи безшовній інтеграції та сумісності.

– Функція вибору мережевого слайсу (Network Slice Selection Function – NSSF). NSSF діє як високоспеціалізований регулювальник руху, направляючи UE до оптимального мережевого слайсу, який найкраще відповідає його запитуваній послугі. Чи то високошвидкісна передача даних, зв'язок із низькою затримкою, чи розгортання масового IoT, NSSF забезпечує виділення найбільш ефективних мережевих ресурсів.

Функція експозиції мережі (Network Exposure Function – NEF). Нарешті, NEF є життєво важливою для відкриття мережі 5G для інновацій. Вона надає безпечні, надійні та зручні для розробників API, які дозволяють стороннім розробникам та підприємствам створювати індивідуальні мережеві послуги на вимогу. Це сприяє розвитку екосистеми різноманітних та спеціалізованих послуг.

2.6. Компонент периферійних обчислень MEX

Цей компонент часто називають периферійною хмарою (Edge Cloud) або периферійними обчисленнями (Edge Computing). У традиційних хмарних обчисленнях (cloud computing) обробка та зберігання даних відбуваються в централізованих центрах обробки даних, часто розташованих далеко від кінцевих користувачів.

Однак, у міру зростання попиту на послуги з низькою затримкою та високою пропускнуою здатністю, особливо з впровадженням 5G, актуальності набуває концепція периферійних обчислень. Периферійні обчислення переносять частину обробки даних ближче до місця їх генерації або споживання – зазвичай, на край мережі.

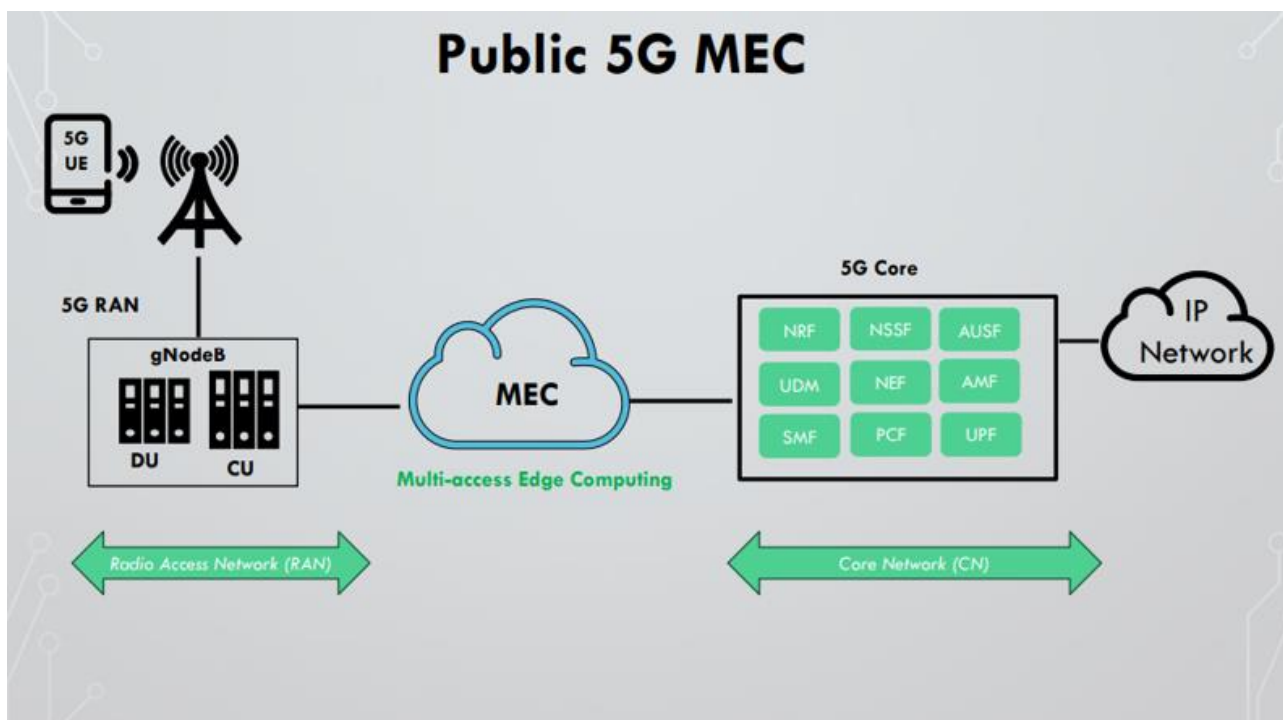


Рис. 2.4. – Роль MEC в мережі 5G

Це дозволяє різко знизити затримку та прискорити швидкість обробки даних, тим самим покращуючи досвід користувача для таких послуг, як доповнена реальність (AR), аналітика в реальному часі та автономні транспортні засоби.

Периферійні обчислення та 5G є ідеальною симбіотичною парою. Можливості 5G з низькою затримкою та високою пропускнуою здатністю підвищують ефективність периферійних обчислень. Водночас периферійні обчислення дозволяють мережам 5G реалізувати обіцяні інноваційні застосунки, які вимагають обробки та аналітики в реальному часі.

Багатодоступні периферійні обчислення (Multi-access Edge Computing – MEC) – це специфічна технологія, яка набула значного поширення. MEC дозволяє інтегрувати можливості периферійних обчислень безпосередньо в архітектуру мережі 5G.

Ця інтеграція дасть змогу застосункам використовувати мережеві дані, приймаючи рішення на основі мережевих умов у реальному часі, тим самим оптимізуючи продуктивність.

Включення периферійної хмари або периферійних обчислень в архітектуру 5G є не просто додатковим кроком, а зміною парадигми. Це відкриває двері для всесвіту застосунків і послуг, які раніше були немислимі через обмеження затримки або пропускної здатності.

2.7. Висновки до розділу 2

У результаті аналізу встановлено, що ключова різниця між публічними та приватними мережами 5G полягає у балансі між масштабом покриття та глибиною кастомізації: приватні мережі пропонують безпрецедентний рівень безпеки та адаптивності для специфічних потреб підприємств. Доведено, що повноцінна реалізація можливостей 5G (URLLC, mMTC) досягається лише в архітектурі Standalone (5G SA), яка, на відміну від перехідної моделі NSA, базується на нативному ядрі 5G.

Важливим аспектом сучасної мережі є декомпозиція базової станції gNodeB на централізовані (CU) та розподілені (DU) блоки, що забезпечує гнучку масштабованість інфраструктури. Сервісно-орієнтована архітектура ядра (5GC) з функціями AMF, SMF та UPF дозволяє інтелектуально керувати потоками даних, а впровадження периферійних обчислень (MEC) стає критичним чинником для мінімізації затримок. Таким чином, синергія 5G SA та MEC створює технологічний фундамент для інноваційних рішень у промисловості, медицині та логістиці, де локалізація обробки даних та стабільність зв'язку є визначальними.

РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Порівняння 5G приватної мережі з технологією Wi-Fi

Є кілька ключових причин, чому підприємствам варто розглянути приватні мережі 5G, а не просто покладатися на Wi-Fi.

Таблиця 3.1.

Порівняння основних характеристик технологій

ХАРАКТЕРИСТИКА	Приватна 5G	Wi-Fi
Пропускна здатність	Значно вищі швидкості та пропускна здатність	Нижчі швидкості, обмеження для додатків із високими вимогами до даних
Затримка (Latency)	Може бути менше 1 мілісекунди (від пристрою до мережевого краю). Критично для промислової автоматизації.	Приблизно 30-90 мілісекунд.
Надійність	Забезпечує стабільне, безперебійне покриття на великих територіях і підтримує швидку мобільність.	Обмежений діапазон і більш переривчасте підключення.
Безпека	Надійна вбудована безпека стільникових мереж. Дозволяє ізолювати мережі та краще контролювати доступ.	Більше вразливостей безпеки.
Масштабованість	Розроблено для підтримки масивної ємності та підключення тисяч датчиків та пристроїв.	Потребує оптимізації для великої кількості підключених пристроїв.

Хоча Wi-Fi простіший і дешевший, він має обмеження порівняно з 5G. Для корпоративних сценаріїв використання з критично важливими програмами, потребами в безпеці, комплексній мобільності та підключенні великої кількості пристроїв, приватна 5G є стратегічною інвестицією для довгострокових можливостей бездротового зв'язку.

3.2. Оцінка приватних мереж та Wi-Fi у промислових середовищах

Для забезпечення бездротового та гнучкого зв'язку в майбутніх виробничих процесах оцінюються різні технології, причому основна увага приділяється придатності приватних мереж 5G у порівнянні з промисловими мережами Wi-Fi. Сучасні дослідження часто виводять технологічні переваги на

основі ізольованих, ідеалізованих прикладів, нехтуючи суттєвим впливом середовища застосування та масштабованості.

Метод STING дозволяє проводити відтворювані процедури тестування для оцінки залежних від середовища системних обмежень та характеристик застосунків шляхом інтеграції в реальні робочі процеси.

Цей підхід був використаний у тематичному дослідженні на діючому підприємстві з виробництва пральних машин для порівняння тимчасово розгорнутої локальної мережі 5G та існуючої інфраструктури Wi-Fi 6. Результати показали, що технологія 5G забезпечила на 75 % вищу надійність порівняно з Wi-Fi 6 для проаналізованого випадку використання AGV (автоматизованих транспортних засобів) у реальних робочих умовах.

STING – просторово розподілена генерація трафіку та перешкод, створення контрольованого "цифрового перевантаження" в різних точках заводу, щоб знайти межу, при якій мережа перестає справлятися з роботою.

Просторово розподіленим – означає, що вимірювальні пристрої та генератори навантаження не стоять в одній точці поруч із сервером. Вони розкидані по всій території заводу.

Генерація трафіку. Метод імітує роботу реальних пристроїв. Замість того, щоб просто качати файл, STING створює трафік, характерний для індустрії:

- Циклічні дані: Короткі пакети від сенсорів (наприклад, кожні 10 мс).
- Відеопотоки: Важкі дані від камер контролю якості.
- Сигнали керування: Критичні команди для зупинки або руху роботів.

Генерація перешкод. STING навмисно створює «затори» в радіоефірі. Система змушує допоміжні вузли мережі передавати дані саме в той момент, коли важливий робот (AGV) намагається надіслати свій сигнал.

Система STING складається з розподілених модулів на базі користувацького обладнання (UE) та центрального бекенд-екземпляра "мережевого супутника" (network companion), як показано на Рис. 3.1. Ця концепція дозволяє здійснювати цілісний моніторинг KPI та стрес-тестування мережі шляхом централізованої оркестрації процесів пасивних вимірювань та

активної генерації трафіку розподіленими модулями. Центральний мережевий супутник STING поєднує в собі платформу для генерації трафіку та базу даних вимірювань KPI з інтерфейсом оцінки та контролю, що дає можливість отримати повне уявлення про продуктивність мережі для ініціювання стратегій пом'якшення наслідків (mitigation strategies), якщо це необхідно.

Розподілені модулі STING побудовані за модульним принципом, що дозволяє інтегрувати кілька мережевих інтерфейсів і технологій, у цій роботі – модеми приватної 5G та Wi-Fi 6. Це забезпечує незалежний від технології та заснований на запитах аналіз продуктивності, а отже, порівняння придатності різних технологій для відповідних сфер застосування. Крім того, представлено мобільний модуль STING, який складається з блоку STING UE, інтегрованого в мобільну робототехнічну платформу. Це дозволяє створювати радіоекологічні карти (REM – Radio Environmental Maps), які надають просторовий контекст даним про продуктивність, наприклад, вимірюванням потужності прийнятого опорного сигналу (RSRP) та швидкості передачі даних, для оцінки роботи мережі на всій території, що цікавить.

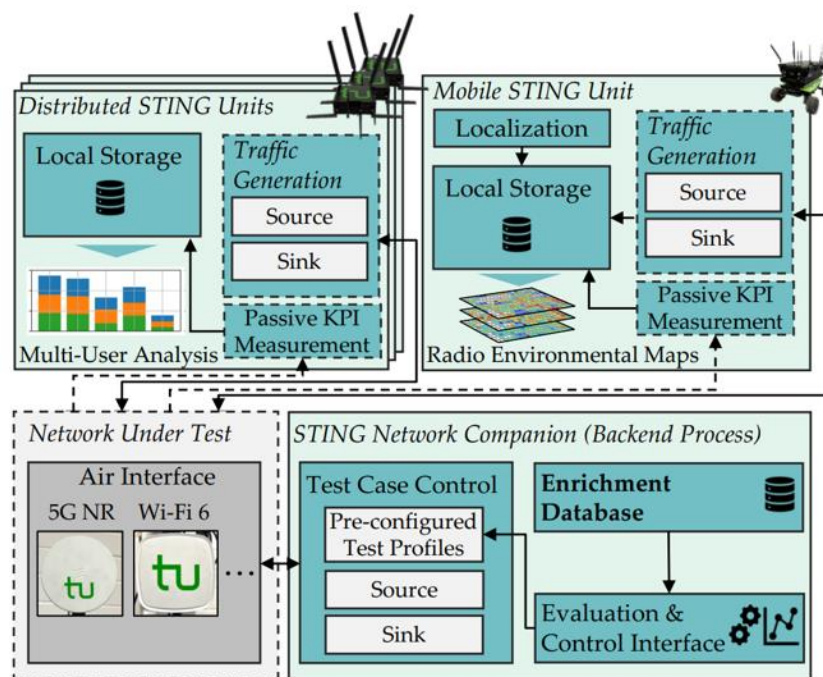


Рис. 3.1. – Огляд архітектури системи STING

В даному експерименті статичні модулі STING використовуються для створення мережевого навантаження як чинника змагання (contention) для досліджуваного застосунку, як описано в Розділі IV-A. Щоб забезпечити справедливе порівняння, мережеве навантаження нормалізується відносно пропускної здатності каналу мережі, що тестується. Це робиться шляхом попереднього вимірювання максимальної пропускної здатності, досяжної з одним активним пристроєм (UE). Потім розподілені модулі STING використовуються для генерації навантаження з певним відсотковим кроком від цієї максимальної пропускної здатності, рівномірно розподіляючи його між усіма модулями.

Цей експеримент проводився на виробничому об'єкті компанії Miele & Cie. KG. Таке середовище є викликом для бездротових технологій, оскільки воно складається з масивних металевих конструкцій, що призводять до інтенсивного затінення (shadowing) та ефектів багатопроменевого поширення (multipath effects).

Тим не менш, бездротовий зв'язок є критично важливим для виробничих процесів, оскільки забезпечує гнучкість та динамічність операцій. Тому для цього аналізу на об'єкті було тимчасово розгорнуто комерційну приватну систему 5G за принципом модернізації існуючого підприємства, на додаток до вже існуючої мережі Wi-Fi 6. На Рис. 3.2 показано розгортання юнітів STING для цього експерименту.

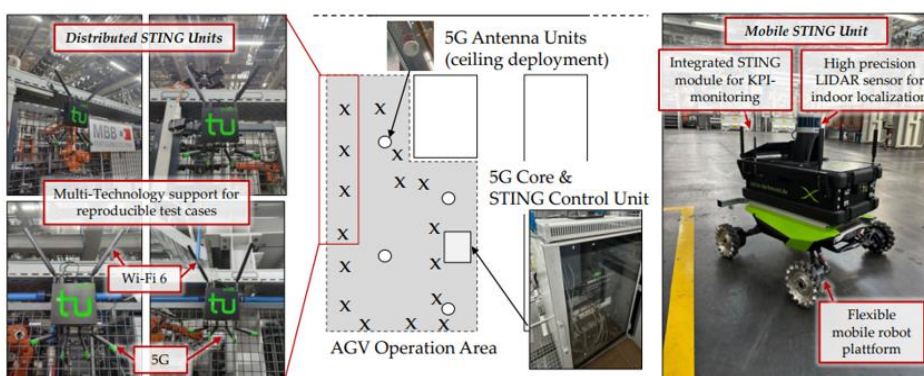


Рис. 3.2. – Впровадження системи STING на виробничому об'єкті

У промислових сценаріях роботи пропускна здатність (throughput) не є пріоритетним питанням, оскільки основна увага зосереджена на надійності та низькій затримці. Ось чому в цьому дослідженні час кругової затримки (RTT) обрано основною метрикою для оцінки продуктивності двох мереж. Основним сценарієм, проаналізованим у цій роботі, є внутрішньозаводська логістика на базі AGV (Розділ IV-A), де напівфабрикати автономно транспортуються до наступного етапу виробництва. Основна зона роботи AGV показана як траєкторія на Рис. 4. Ця зона була забезпечена покриттям 5G з використанням надлишкової кількості антенних блоків (over-provisioning) для гарантування якісного зв'язку в критичній зоні.

На виробничому об'єкті було встановлено дві мережі для тестування. Система Wi-Fi 6 розгорнута на постійній основі для забезпечення роботи AGV. Мережа Wi-Fi 6 використовується виключно для застосунку AGV і не розділяється з іншими програмами. Додаткова мережа Wi-Fi розгорнута для інших потреб заводу; вона не є частиною цього аналізу і працює на інших частотних каналах. Крім того, була розгорнута комерційна приватна мережа 5G для аналізу її придатності для промислових процесів у цьому контексті. Таким чином, обидві мережі можуть бути проаналізовані для справедливого порівняння без перешкод з боку інших програм.

На додаток до компонентів мережі 5G, у зоні було розгорнуто систему STING із 16 розподіленими пристроями (UE) для вимірювання та стрес-тестування мережі, а також для перевірки стійкості застосунку до високих навантажень як у мережі 5G, так і в технології Wi-Fi 6.

Крім того, мобільний модуль STING на гнучкій робототехнічній платформі, оснащений високоточним лідаром (LIDAR) для локалізації, використовується для створення радіоекологічних карт (REM) для цілісного огляду покриття в межах основної робочої зони.

3.3. Порівняння часу кругової затримки (RTT)

Визначальним фактором для мінімально можливого RTT в обох технологіях є їхні методи доступу до каналу. Wi-Fi працює в неліцензованих частотних діапазонах, таких як ISM-діапазони 2,4 ГГц, 5 ГГц, а з Wi-Fi 6E – 6 ГГц. Безліцензійна природа цих діапазонів зумовлює потребу в децентралізованому доступі до каналу, оскільки середовище може використовуватися кількома системами, які не знають про існування одна одної. Тому Wi-Fi використовує схему CSMA/CA (множинний доступ із контролем несучої та запобіганням колізіям), де канал має бути розпізнаний як вільний, перш ніж станція зможе спробувати отримати до нього доступ.

Було проведено двосторонню оцінку продуктивності як приватної мережі 5G, так і розгорнутої мережі Wi-Fi 6. Спочатку за допомогою мобільного модуля STING було визначено покриття приватної системи 5G у зоні роботи рухомих станцій (AGV). Потім були проведені вимірювання кругової затримки RTT зі збільшенням навантаження на мережу в системі 5G, а також у поточній системі Wi-Fi 6 для порівняння.

На Рис. 3.3 показана радіоекологічна карта (REM) показника потужності опорного сигналу, отримана мобільним модулем STING.

Можна побачити, що в межах основної зони роботи AGV досягнуто дуже гарне покриття. Статичні модулі STING, хоча й встановлені вище, демонструють характеристики, аналогічні виміряним мобільним модулем. Модулі 2 і 10 мають найкраще покриття, оскільки вони розташовані безпосередньо під антенними елементами, тоді як 7 і 15 мають найбільшу відстань і, відповідно, найгіршу потужність прийому, хоча загалом залишаються в зоні хорошого рівня покриття.

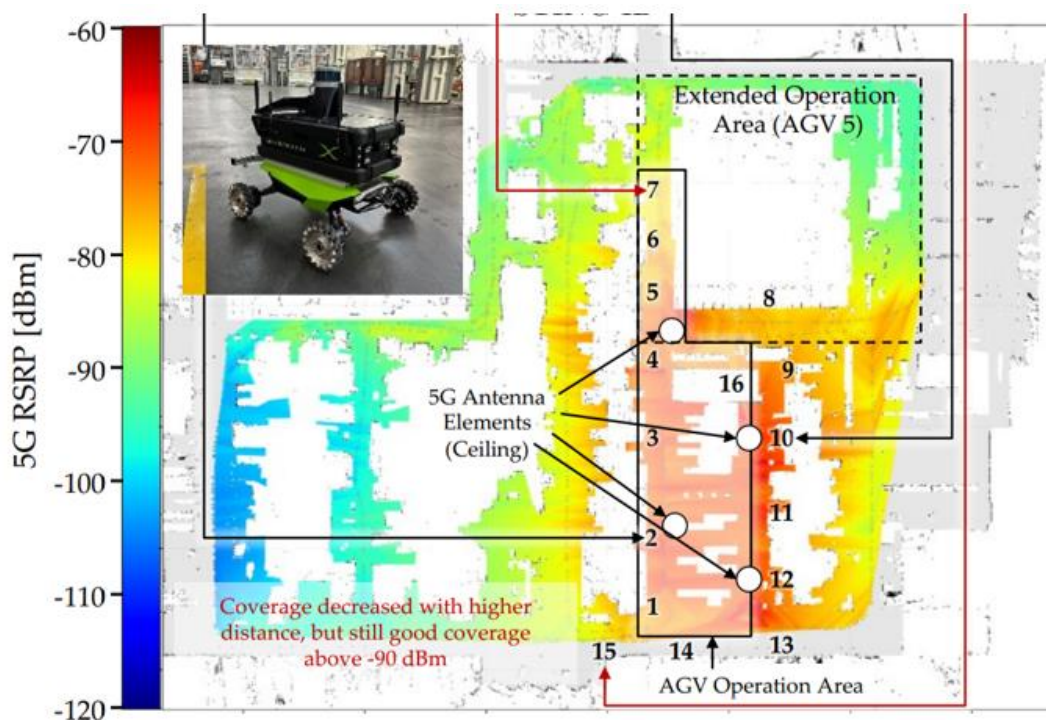


Рис. 3.3. – Радіокарта покриття 5G в зоні роботи мобільного модуля STING

Для порівняння покриття тимчасово розгорнутої приватної системи 5G, аналогічним чином було проаналізовано покриття заводської системи Wi-Fi 6.

Для того, щоб відобразити покриття від усіх розгорнутих точок доступу (AP), мобільний пристрій STING періодично сканував ефір, і для кожної координати обирався показник RSSI (індикатор сили отриманого сигналу) найкращої точки доступу.

Карта REM разом зі статистикою RSSI статичних модулів STING показана на Рис. 3.4.

Мережа знову забезпечує дуже добре покриття: усі модулі STING у зоні роботи AGV досягають значень RSSI вище -65 дБм. Це забезпечується використанням 6 точок доступу, які, на відміну від антенних елементів 5G, працюють на різних частотних каналах.

Це призводить до потреби в процедурах роумінгу для мобільних станцій (таких як логістичні AGV), що перетинають територію, що може призвести до падіння продуктивності в зонах переходу між двома точками доступу.

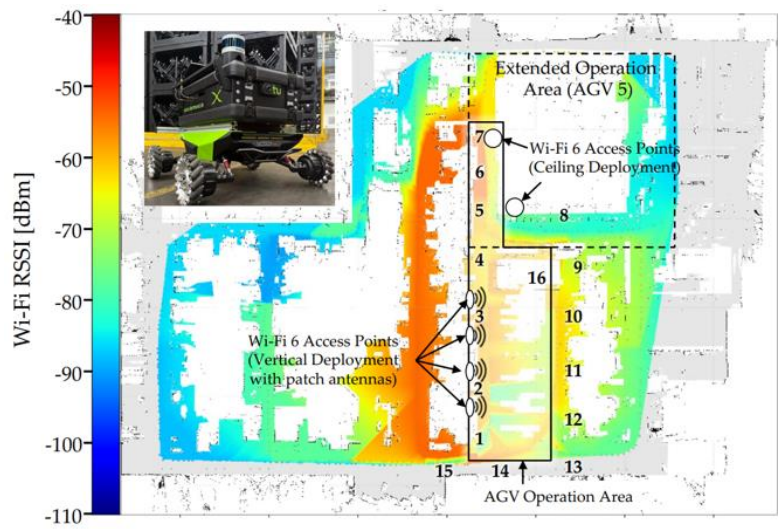


Рис. 3.4. – Радіокарта покриття Wi-Fi в зоні роботи мобільного модуля STING

Для Wi-Fi AGV 1-4 мають аналогічно добре покриття з середнім RSSI близько -57 дБм. AGV 5 має гірше покриття в цій мережі, аж до моментів, коли зв’язок не завжди може бути забезпечений.

Для оцінки найдійності мережі система STING використовувалася для генерації ітераційно зростаючого мережевого навантаження.

Навантаження генерується як відсоток від максимальної пропускної здатності у вихідному каналі (uplink), оскільки він зазвичай є "вузьким місцем". Розраховане навантаження розподілялося між усіма 16 статичними пристроями STING. У Табл.3.2 наведені швидкості передачі даних на один UE для обох технологій та кожної конфігурації.

Таблиця 3.2

Порівняння мережевого навантаження за допомогою 16 модулів STING

	Рівень навантаження	Загальна пропускна здатність	Навантаження на 1 модуль STING
Приватна 5G	20 %	20 Мбіт/с	1,25 Мбіт/с
	50 %	50 Мбіт/с	3,125 Мбіт/с
	90 %	90 Мбіт/с	5,625 Мбіт/с
Wi-Fi 6	20 %	30 Мбіт/с	1,875 Мбіт/с
	50 %	75 Мбіт/с	4,686 Мбіт/с
	90 %	135 Мбіт/с	8,438 Мбіт/с

RTT досліджуваного AGV вимірювався за допомогою повідомлень ping з корисним навантаженням 50 Байт та інтервалом надходження (IAT) 20 мс до центрального сервера.

В доповнення RTT зафіксувала частку втрачених пакетів (loss ratio) за 5-хвилинні експерименти. У мережі 5G жоден ping-пакет не був втрачений.

Під час експериментів з Wi-Fi була втрачена невелика кількість пакетів – до 0,3% при зростанні навантаження. Більшість пакетів, втрачених на фізичному (PHY) та канальному (MAC) рівнях, відновлюються механізмами ретрансляції, що збільшує загальний RTT, а не призводить до повної втрати пакетів на прикладному рівні.

Очевидно, що при низькому навантаженні (20%) обидві технології підтримують низький RTT: Wi-Fi забезпечує середній RTT нижче 5 мс, а 5G – близько 10 мс. Різниця стає помітною в "викидах" (outliers). У той час як Wi-Fi має викиди понад 100 мс вже при низькому навантаженні (що може бути занадто багато для мобільних роботів, 5G у всіх випадках утримує RTT нижче 50 мс.

Зі зростанням навантаження ця різниця стає очевиднішою. 5G утримує RTT нижче 50 мс навіть при 90% навантаженні, тоді як Wi-Fi стає нестабільним, а його середній RTT перевищує 100 мс.

Незважаючи на вищі абсолютні значення через додаткову обробку, характеристики обох технологій відповідають очікуванням.

Цей аналіз доводить, що приватні мережі 5G є ефективним рішенням для промисловості завдяки ексклюзивним ресурсам каналу та суворому плануванню доступу. Wi-Fi залишається життєздатним рішенням для багатьох випадків завдяки низькій вартості, але через механізм CSMA/CA він не може гарантувати низьку затримку для критично важливих завдань.

У цьому дослідженні приватна мережа 5G була тимчасово розгорнута на реальному виробничому об'єкті та оцінена в умовах діючого виробництва. Було проаналізовано покриття системи для зони внутрішньої логістики, а на другому етапі проведено оцінку продуктивності RTT та її порівняння з існуючою мережею Wi-Fi 6.

Було продемонстровано, що приватні мережі 5G можуть перевершувати Wi-Fi за стабільністю затримки, особливо у сильно завантажених мережах, що робить їх вдалим вибором для критично важливих (mission-critical) застосунків, таких як бездротове керування AGV. Wi-Fi, з іншого боку, забезпечує дуже хорошу продуктивність за низької вартості, особливо в сценаріях з низьким навантаженням, чого достатньо для багатьох некритичних завдань.

Хоча Wi-Fi 6 демонструє меншу мінімальну затримку в ідеальних умовах, при високому навантаженні мережі (близько 90%) його затримки стають непередбачуваними та перевищують 100 мс, що призводить до зупинки техніки. Натомість 5G, завдяки централізованому плануванню ресурсів та відсутності колізій, утримує затримку стабільною (нижче 50 мс) навіть при критичних заторах трафіку, забезпечуючи безперервність виробничого процесу.

Таким чином, не існує універсальної технології для майбутнього промислового зв'язку. Різноманітні вимоги застосунків найкраще задовольняються за допомогою підходу Multi-RAT (множинного радіодоступу), що поєднує різні технології, такі як Wi-Fi, приватні та публічні мережі 5G та 6G.

3.4. Порівняння часу кругової затримки (RTT)

Публічна мобільна мережа, як правило, розгортається та експлуатується публічними операторами мобільного зв'язку на ліцензованих частотних діапазонах. Однак у випадку приватної мережі власність на розгортання та експлуатацію може бути передана від мобільного оператора підприємству і може бути розгорнута навіть на неліцензованих частотних діапазонах, незалежно від публічної мережі. Типи розгортання приватних 5G мереж в основному поділяються на дві категорії залежно від того, чи існує залежність від публічної мережі:

Незалежна мережа – автономні приватні мережі, ізольовані від публічної мережі.

Залежна мережа – приватні мережі, розгорнуті спільно з публічною мережею, наступним чином:

- приватна мережа з використанням RAN (мережі радіодоступу) публічної мережі;
- приватна мережа з використанням RAN та Control Plane (система управління мережею) публічної мережі;
- приватна мережа розгорнута безпосередньо в публічній мережі.

Далі ми розглянемо архітектуру кожного із типів розгортання приватних 5G мереж.

Почнемо із незалежної мережі. Така приватна мережа розгортається автономно, яка фізично та за логікою побудови повністю є ізольована від публічної мережі. Більше того, автономна приватна мережа може бути повністю ізольована від публічної мережі за допомогою локального спектру 5G, а не ліцензованого спектру оператора мобільного зв'язку.

Усі функції мережі, такі як gNB (складова інфраструктури RAN що складається із базових радіостанцій), 5G система управління мережею, користувацька сторона розгортаються на території підприємства – заводу чи будівлі – як показано на рис. 3.1 Як тільки підприємство має незалежну мережу 5G з усіма необхідними функціями, воно може застосовувати всі інноваційні технології 5G, що стосуються підприємства, на місці, без обмежень традиційними рішеннями на основі дротової мережі Ethernet або бездротової локальної мережі.

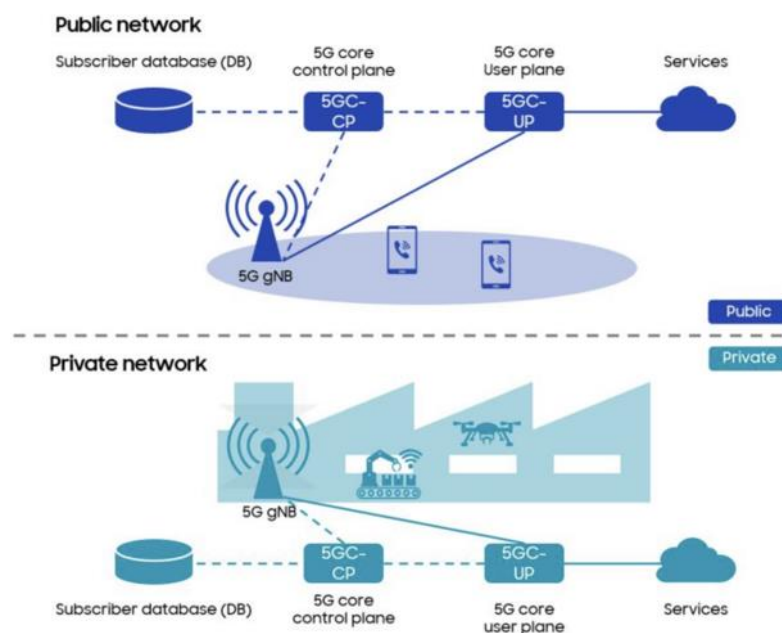


Рис. 3.5. – Автономна приватна мережа 5G ізольована від публічної мережі

Серед переваг автономної мережі можна виділити наступні:

- Безпека: незалежна мережа, повністю відокремлена від публічної мережі, забезпечує безпеку та конфіденційність шляхом запобігання витоку внутрішнього трафіку та даних про абонентів, користувачів мережі.
- Надзвичайно низька затримка: завдяки розміщенню всіх функцій мережі на місці, затримка мережі між пристроєм та сервером додатків є короткою, що дозволяє надавати послуги з надзвичайно низькою затримкою, такі як додатки керування рухом.
- Індивідуальна якість обслуговування: конфігурації приватних мереж можуть бути налаштовані відповідно до вимог корпоративних додатків, на відміну від типової конфігурації публічної мережі. Конфігурація включає всі параметри, які можуть впливати на ключові показники швидкості передачі даних, надійності, затримки, а також структуру кадрів передачі/прийому.
- Автономність: даний характер автономної приватної мережі гарантує її незалежну роботу навіть у разі будь-яких збоїв (наприклад, простою мережі та зниження продуктивності) у публічній мережі 5G оператора мобільного зв'язку.

Однак придбання та розгортання всієї мережі 5G яка буде незалежною та міститиме бездротові технології, може бути складним альтернативним рішенням

для підприємств, які не мають достатнього досвіду та знань у галузі телекомунікаційних технологій, саме тому виключно у цьому випадку потрібно користуватись послугами посередників які вже мають досвід побудови мережі такого типу. Також цей спосіб є найбільш дорогим якщо порівнювати його із іншими типами приватних 5G мереж, їх ми і розглянемо наступними.

Приватна мережа з використанням RAN (мережі радіодоступу), у цьому сценарії приватна мережа ділить частину мережі радіодоступу RAN, зокрема gNB, з публічною мережею, тоді як інші функції мережі розгортаються на території підприємства та залишаються відокремленими від публічної мережі, як показано на рис. 3.2.

Ця архітектура розгортання додатково поділяється на два різних сценарії залежно від того, чи використовує приватна мережа локальні приватні спектри, чи використовує ліцензований спектр оператора, який спільно використовується з публічною мережею. Обидва сценарії ґрунтуються відповідно на багатооператорівській мережі радіодоступу (MORAN) та багатооператорівській мережі ядра (MOCN) спільного використання RAN.

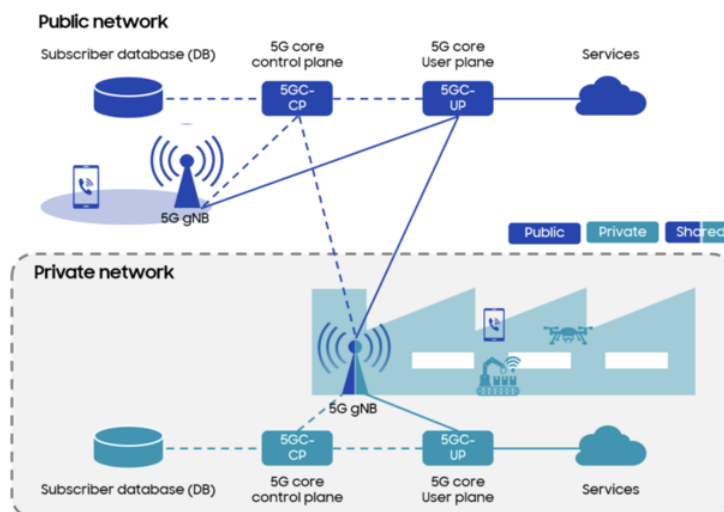


Рис. 3.6. – Спільне використання RAN (мережі радіодоступу) приватною та публічною мережами

Цей сценарій працює дуже схоже на автономну приватну мережу, за винятком того, що в цьому сценарії приватна мережа та публічна мережа ділять частини мережі RAN.

Дані трафіку приватної мережі передаються до користувацької системи 5G приватної мережі на підприємстві, тоді як дані трафіку публічної мережі передаються до користувацької системи 5G core в публічній мережі оператора мобільного зв'язку. Тут також розгортається приватна 5G система управління на території підприємства, щоб інформація про абонентів та операції приватної мережі не витікала назовні.

Таким чином, безпека та конфіденційність приватної мережі все ще можуть бути гарантовані, незважаючи на те, що частини мережі RAN не є повністю відокремленими. Крім того, у цій моделі всі функції мережі розташовані на території підприємства, що забезпечує надзвичайно низьку затримку комунікацій.

Однак у цій архітектури збої у вузлі RAN можуть спричинити збої і в приватній мережі також.

Приватна мережа з використанням RAN та Control Plane (система управління мережею) публічної мережі, у цьому типі приватна мережа та публічна мережа використовують одну і ту ж мережу радіодоступу RAN, тоді як керування мережею здійснює публічна мережа.

Загальна архітектура приватних та публічних мереж та їхніх компонентів представлена на рис. 3.3.

Функції системи управління для абонентів приватної мережі, такі як автентифікація, виконуються на боці управління мережі оператора мобільного зв'язку разом із керуванням абонентами публічної мережі. Іншими словами, пристрої приватної мережі за визначенням є абонентами публічної мережі оператора мобільного зв'язку. Це дозволяє пристроям приватної мережі безпосередньо отримувати доступ до послуг публічної мережі та забезпечує безперервність обслуговування шляхом роумінгу, коли пристрої приватної

мережі переміщуються між приватною мережею, публічною мережею та навпаки.

Однак взаємодія з публічною мережею та її управління створюють проблеми безпеки, такі як операційна інформація та інформація про підписку пристроїв приватної мережі, що зберігаються на сервері оператора мобільного зв'язку, а не на місці.

У цій архітектурі трафік даних між приватною та публічною мережами може бути відокремлений за допомогою спеціальної технології Network Slicing, іншими словами мережевого розділення за допомогою створення віртуальних мереж (слайсів) у межах фізичної мережі 5G.

В такому випадку дані приватної мережі передається до користувацької системи 5G на підприємстві зі своїм ідентифікатором, тоді як трафік даних публічної мережі передається до користувацької системи 5G в публічній мережі оператора мобільного зв'язку, як показано на рис 3.3.

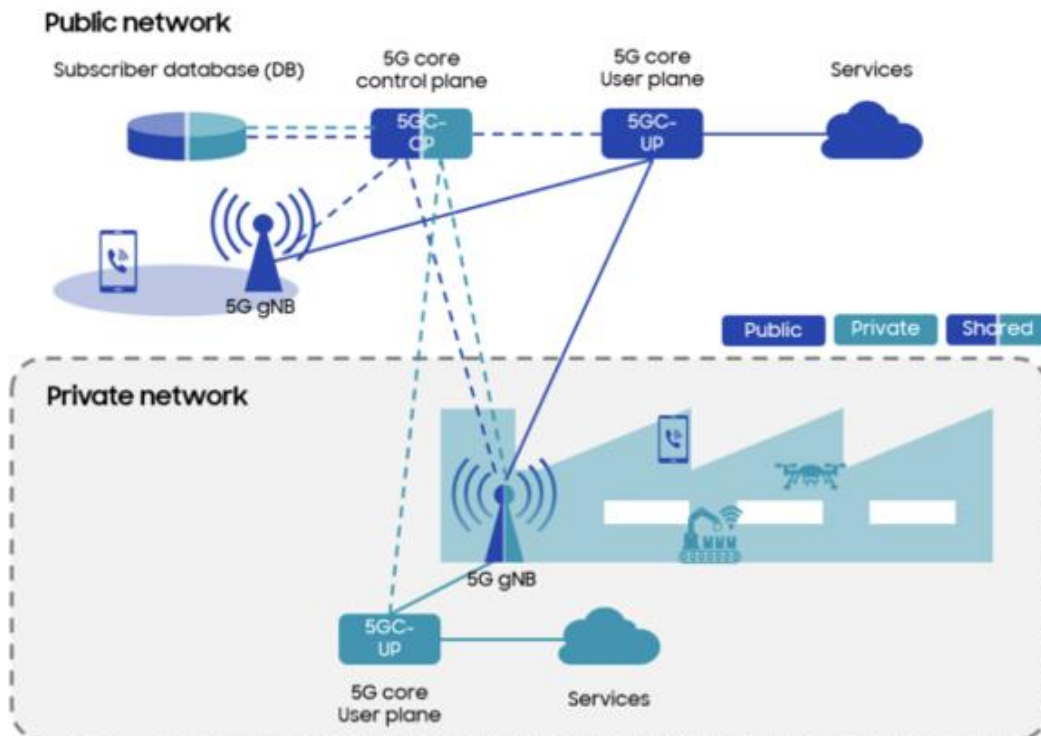


Рис. 3.7. – Приватна мережа з використанням RAN та Control Plane (система управління мережею) публічної мережі

Цей сценарій також гарантує надзвичайно низьку затримку шляхом впровадження обчислень в системі мережі (MEC) на підприємстві. Комунікація з надзвичайно низькою затримкою між пристроєм – gNB-5GC-MEC дозволяє підприємству застосовувати додатки з надзвичайно високою надійністю та низькою затримкою, таке як автономне керування роботами в реальному часі.

Приватна мережа що розгорнута безпосередньо в публічній мережі з використанням мережевого віртуального слайсингу (розділення). На рис. 2.4 показано приватну мережу, яка повністю розміщена в публічній мережі. У цьому сценарії на території підприємства розгортається лише gNB (базова станція), а всі інші функції мережі спільно використовуються з публічною мережею.

Весь потік даних приватної та публічної мереж проходить через публічну мережу, розташовану за межами підприємства, але дані кожної мережі можуть бути логічно розмежовані одні від одного завдяки розділенню за допомогою мережевого слайсингу, іншими словами за допомогою створенню різних віртуальних мереж.

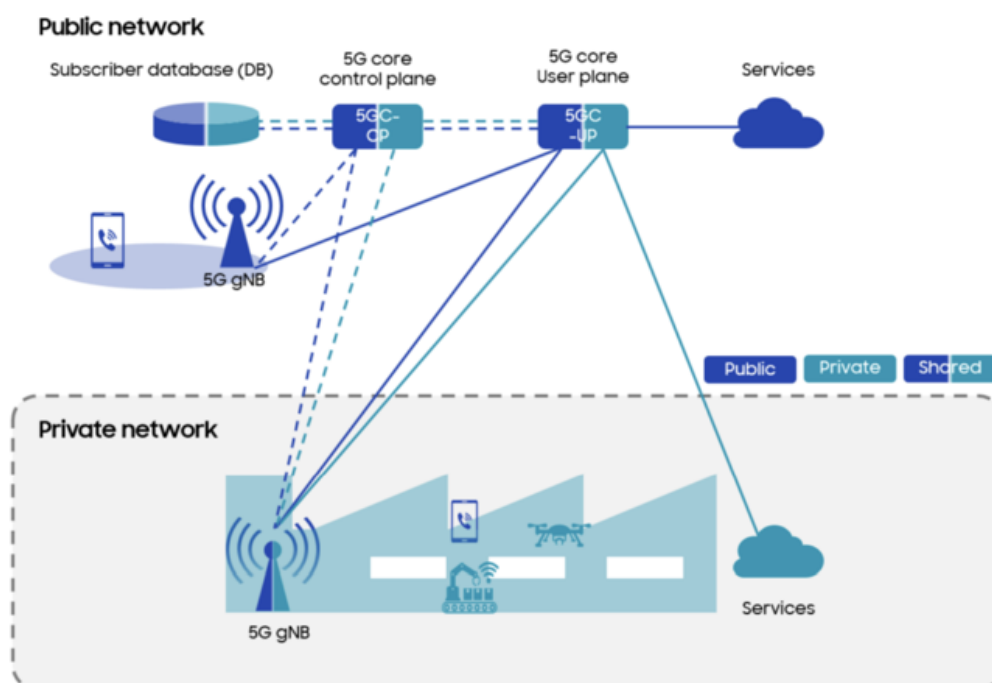


Рис. 3.8. – Приватна мережа розгорнута в публічній мережі

У цій архітектурі постачальник послуг матиме повний контроль над безпекою та конфіденційністю, оскільки сценарій розгортання повністю залежить від публічної мережі, а відмова публічної мережі призводить безпосередньо до відмови приватної мережі.

Крім того, затримка мережі також зростає. Оскільки програмне забезпечення що керує даними також обмежене мережею оператора мобільного зв'язку, час двосторонньої передачі даних мережі може значно збільшуватися залежно від відстані між підприємством та хмарним сервером на боці мережі оператора, де розташована система керування даними.

Ця архітектура розгортання розміщена безпосередньо в мережі оператора, що робить це рішення постійними операційними витратами для підприємства порівняно з іншими сценаріями, де функції мережі необхідно створювати на території підприємства. Крім того, подібно до попереднього сценарію, безперервність обслуговування може бути гарантована шляхом роумінгу, коли пристрої переміщуються між приватною та публічною мережами.

3.5. Порівняння архітектур приватних мереж 5G

Дані архітектури розгортання приватних мереж є дуже схожими за структурою та логікою роботи однак ключові відмінності суттєво впливають на показники ефективності, безпеки мережі та стабільності роботи. На рис. 3.5 відображено типи архітектур:

- автономна приватна мережа;
- приватна мережа зі спільним використанням RAN;
- приватна мережа зі спільним використанням RAN та панелі керування;
- приватна мережа розгорнута в публічній мережі методом віртуального розділення мереж на яких відображено ключові відмінності однієї архітектури від іншої.

Для наочності червоним позначені іконки які керуються публічними операторами зв'язку, синім – керування здійснюється незалежним підприємством.

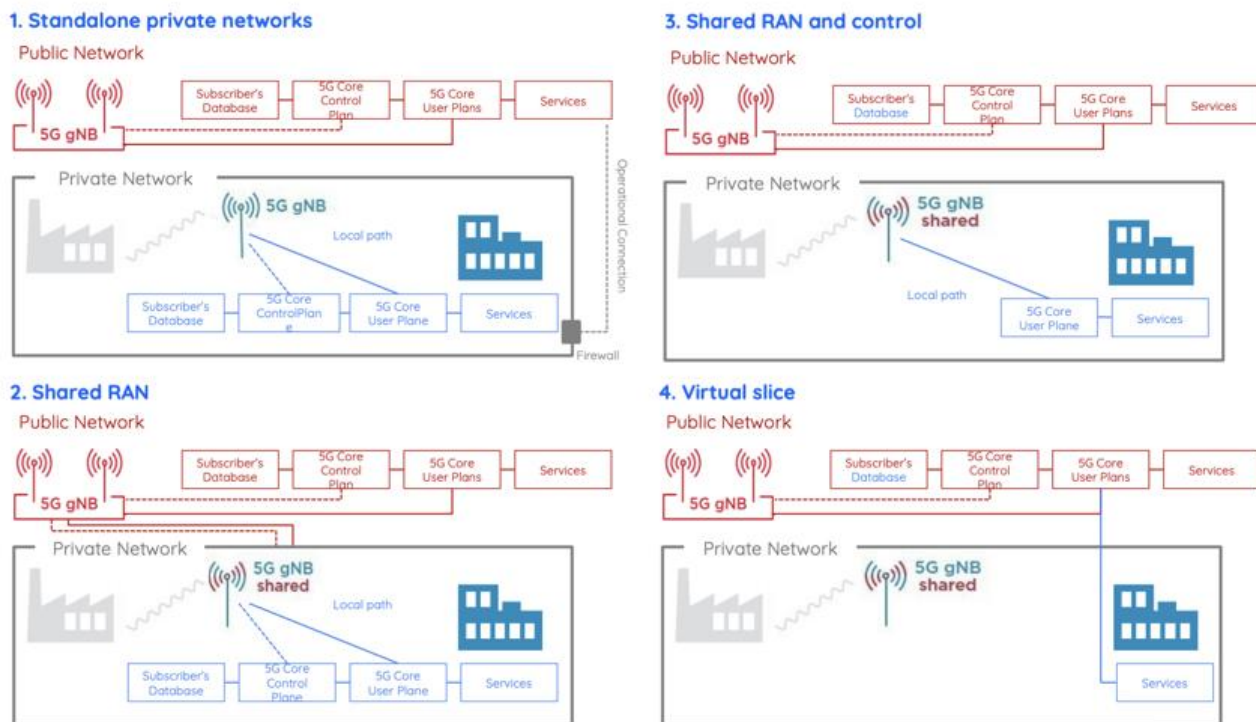


Рис. 3.9. – Типи 5G приватних мереж

Так як два типи архітектур побудови приватних мереж є майже ідентичними з точки зору основних показників, а саме: приватна мережа зі спільним використанням RAN та приватна мережа зі спільним використанням RAN та панелі керування то у порівняльній табл. 3.3 їх буде об'єднано.

Порівняння архітектур приватних мереж 5G

Критерій	Автономна	Зі спільним використанням RAN	Розгорнута в публічній мережі
Затрати часу	високий	нижче середнього	низький
Вартість	високий	нижче середнього	низький
Необхідна компетентність	високий	середній	низький
Безпека даних	високий	середній	низький
Безпека мережі	високий	високий	високий
Гнучкість та адаптивність	високий	нижче середнього	нижче середнього
Запобігання краху мережі	високий	низький	низький
Здатність налаштування	високий	високий	нижче середнього
Потреба придбання частотної ліцензії	потребує	не потрібно	не потрібно

Проаналізувавши особливості кожної із архітектур та порівнявши їх між собою можна дійти до висновку що кожна із приватних архітектур 5G мереж є достатньо технологічною та надійною в плані безпеки щоб використовувати її адже стандарти вже мережі 5G передбачають більшість із сценаріїв застосування. Однак варто зазначити що саме з точки зору користувачів приватних мереж таких як велика промисловість, державні установи найбільш релевантною є автономна приватна мережа однак її конфігурація та керування нею потребує відповідної технічної підтримки та високих фінансових затрат як на розгортання так і на підтримку функціонування мережі.

3.6. Сфери застосування приватних 5G мереж

Роль приватних мереж 5G у трансформації сучасного сільського господарства Впровадження приватних мереж 5G у сільському господарстві відкриває шлях до нового етапу продуктивності та сталого розвитку. Завдяки високій швидкості та мінімальній затримці сигналу, фермери отримують можливість реалізувати концепцію точного землеробства.

Це включає моніторинг стану ґрунту, здоров'я врожаю та погодних умов у реальному часі. Використання технології диференційованого внесення ресурсів (VRT) дозволяє точково застосовувати насіння, добрива та пестициди, що суттєво зменшує витрати та екологічне навантаження. Окрім того, 5G стає фундаментом для роботи автономної техніки – від безпілотних тракторів до дронів, що здійснюють детальне картування полів та аналіз зон, які потребують особливої уваги.

Окремим важливим напрямком є цифровізація тваринництва та управління ресурсами. Натільні сенсори дозволяють безперервно відстежувати здоров'я та поведінку худоби, забезпечуючи вчасну діагностику хвороб та ефективне управління стадом. Схожі принципи автоматизації впроваджуються і в «розумних теплицях», де системи клімат-контролю та поливу самостійно підлаштовуються під потреби рослин. Це тісно пов'язано з інтелектуальним управлінням водними ресурсами та енергоменеджментом, де дані про вологість ґрунту та споживання енергії допомагають мінімізувати втрати та інтегрувати в роботу ферм відновлювані джерела енергії. Значні переваги 5G приносить і в сферу логістики та стратегічного управління. Мережа забезпечує повну простежуваність продукції по всьому ланцюгу постачання – від поля до кінцевого споживача, що підвищує прозорість ринку. Агрегація даних з багатьох джерел у поєднанні з аналітикою на базі штучного інтелекту дозволяє фермерам приймати обґрунтовані рішення, прогнозувати врожайність та ринкові тренди.

Це також спрощує дистанційне керування господарством, даючи можливість контролювати всі процеси з будь-якої точки світу. Нарешті, 5G

відіграє критичну роль у безпеці та соціальному розвитку сільських регіонів. Високошвидкісний зв'язок долає «цифровий розрив», відкриваючи доступ до онлайн-навчання та електронної комерції. Системи відеоспостереження у високій якості та датчики раннього попередження про стихійні лиха (повені, шторми) значно підвищують захищеність бізнесу.

Водночас екологічний моніторинг якості повітря та води сприяє впровадженню практик сталого землеробства, що є ключовим для довгострокового збереження ресурсів.

Приватні мережі 5G у сфері нерухомості. Впровадження приватних мереж 5G у секторі нерухомості докорінно змінює підходи до управління будівлями та операційної ефективності. Завдяки інтеграції з інтелектуальними системами керування (Smart Building Management), 5G дозволяє в реальному часі контролювати освітлення, безпеку та системи HVAC (опалення, вентиляція та кондиціонування). Це не лише знижує експлуатаційні витрати завдяки автоматизації, а й дозволяє впроваджувати стратегії прогностичного обслуговування (predictive maintenance). Використовуючи датчики та аналітику даних, менеджери можуть виявляти та усувати технічні несправності ще до того, як вони стануть критичними, що значно зменшує час простою та кошти на ремонт.

Значний прорив спостерігається у сфері безпеки та контролю доступу. Висока пропускна здатність 5G підтримує роботу камер спостереження надвисокої чіткості та складних біометричних систем доступу. Це забезпечує миттєве сповіщення про інциденти та надає можливість віддаленого перегляду відеоматеріалів у реальному часі. Окрім того, технології 5G стають основою для систем управління відходами та «розумного» ландшафтного дизайну, де автоматизований полив та оптимізовані графіки вивозу сміття допомагають підтримувати привабливість об'єктів при мінімальних витратах ресурсів.

Для орендарів та потенційних покупців 5G створює якісно новий рівень сервісу. Технології доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності дозволяють проводити імерсивні віртуальні тури об'єктами з будь-якої точки світу, що стає

потужним інструментом маркетингу та продажів. Усередині будівель мешканці отримують доступ до високошвидкісного інтернету, безключового доступу та розумних побутових приладів. Важливим аспектом є також турбота про здоров'я: сенсори в реальному часі контролюють якість повітря, температуру та вологість, створюючи максимально комфортне середовище для життя та продуктивної дистанційної роботи.

На рівні стратегічного розвитку та екологічної відповідальності, приватні мережі 5G сприяють інтеграції об'єктів нерухомості в інфраструктуру «розумних міст». Це включає розумні паркувальні рішення, які спрямовують водіїв до вільних місць, та інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії для сталого енергоменеджменту.

Використання інформаційного моделювання будівель (BIM) у поєднанні з 5G-зв'язком забезпечує ефективну співпрацю на етапі будівництва, мінімізуючи затримки. Зрештою, наявність детальної аналітики на базі штучного інтелекту дозволяє власникам нерухомості приймати зважені рішення, оперативно реагувати на надзвичайні ситуації та постійно покращувати комунікацію з орендарями.

Приватні мережі 5G у фінансових послугах. Впровадження приватних мереж 5G у фінансовому секторі стає каталізатором для докорінної зміни операційної ефективності та якості обслуговування. Завдяки надшвидкому з'єднанню мобільний банкінг виходить на новий рівень: клієнти отримують миттєве оновлення транзакцій та безперебійні платежі.

Усередині самих установ концепція «розумних відділень» (Smart Branches) дозволяє інтегрувати цифрові кіоски, автоматизовані зони самообслуговування та покращені банкомати. Це доповнюється технологіями доповненої та віртуальної реальності (AR/VR), які трансформують клієнтську взаємодію через імерсивні презентації продуктів та віртуальні консультації. Ключовим аспектом 5G для фінансів є обробка даних у реальному часі та автоматизація. Мінімальна затримка сигналу є критично важливою для високочастотного трейдингу

(Automated Trading), де швидкість виконання операцій вимірюється мілісекундами.

Використання штучного інтелекту та машинного навчання на базі 5G дозволяє миттєво аналізувати ринкові тренди, виявляти шахрайство та оптимізувати інвестиційні стратегії. Крім того, мережа забезпечує високу продуктивність блокчейн-платформ та смарт-контрактів, гарантуючи прозорість і автоматичне виконання зобов'язань без ризиків затримок.

Питання безпеки та комплаєнсу отримують нові інструменти завдяки надійності приватних мереж. Просунуті протоколи шифрування та біометричні системи контролю доступу мінімізують ризики кібератак. Висока пропускна здатність дозволяє використовувати камери спостереження надвисокої чіткості з аналітикою в реальному часі. Окрім захисту транзакцій, 5G допомагає фінансовим установам дотримуватися регуляторних вимог (Regulatory Compliance) через автоматизований моніторинг і звітність, а також забезпечує безперервність бізнесу та швидке відновлення даних у разі надзвичайних ситуацій.

Нарешті, 5G суттєво покращує внутрішнє управління та робоче середовище. Технологія підтримує стабільну дистанційну роботу фахівців, надаючи їм безпечний доступ до банківських систем з будь-якої локації. Інтеграція IoT-пристроїв дозволяє автоматизувати управління будівлями – від контролю енергоспоживання до моніторингу якості повітря та температури, що безпосередньо впливає на добробут працівників.

У підсумку, персоналізація маркетингу та ефективне управління даними клієнтів дозволяють банкам пропонувати саме ті продукти, які відповідають індивідуальним потребам кожного користувача.

Приватні мережі 5G у побуті. Створення «розумного» дому нового покоління Впровадження приватних мереж 5G у житловому секторі кардинально змінює уявлення про комфорт, безпеку та якість життя. Завдяки інтелектуальній автоматизації, 5G об'єднує всі домашні пристрої – від освітлення та клімат-контролю до побутової техніки – у єдину екосистему з безшовним керуванням.

Розумні прилади, як-от холодильники, печі та пральні машини, тепер можуть працювати автономно, оптимізуючи енергоспоживання на основі аналізу даних. Використання голосових асистентів та централізованих хабів управління робить взаємодію з домом максимально простою, дозволяючи керувати всіма процесами дистанційно.

Особливу увагу приділено безпеці та моніторингу середовища. Висока пропускна здатність 5G підтримує роботу камер спостереження надвисокої чіткості та розумних замків із функцією безключового доступу, що забезпечує миттєве сповіщення про будь-які інциденти. Окрім захисту від сторонніх, мережа піклується про здоров'я родини: спеціальні сенсори в реальному часі відстежують якість повітря, температуру та вологість.

Для людей, які потребують медичного нагляду, 5G забезпечує стабільну роботу натільних пристроїв, що моніторять серцевий ритм, фази сну та рівень активності, дозволяючи системі оперативно реагувати у разі потреби. Сфера розваг, навчання та дистанційної роботи також отримує новий імпульс. Надвисока швидкість і низька затримка сигналу дозволяють безперешкодно стрімити контент у високій якості, грати в хмарні ігри та використовувати технології VR і AR для імерсивних розваг.

Для професіоналів та студентів 5G створює повноцінний «домашній офіс», гарантуючи надійний зв'язок для відеоконференцій та швидкий доступ до хмарних ресурсів, що забезпечує ідеальний баланс між продуктивністю та особистим життям. На рівні екологічності та сталого споживання, приватна мережа допомагає ефективно керувати ресурсами. Розумні термостати вивчають звички мешканців, підтримуючи ідеальну температуру при мінімальних витратах енергії, а системи розумного саду оптимізують полив залежно від вологості ґрунту. Навіть управління відходами стає інтелектуальним завдяки моніторингу рівня заповнення баків.

Крім того, дім стає безпечнішим завдяки системам раннього попередження про стихійні лиха, такі як пожежі чи підтоплення, забезпечуючи мешканцям спокій та оперативну координацію у критичних ситуаціях.

Приватні мережі 5G у медицині. Майбутнє цифрової охорони здоров'я Впровадження приватних мереж 5G у медичних закладах докорінно змінює підходи до лікування та взаємодії з пацієнтами.

Завдяки надвисокій швидкості та стабільності зв'язку, телемедицина стає повноцінною заміною очних візитів, забезпечуючи якісні відеоконсультації та дистанційну діагностику навіть у віддалених регіонах. Це доповнюється системами безперервного моніторингу пацієнтів, де настільні пристрої та сенсори передають життєво важливі показники в реальному часі, дозволяючи лікарям оперативно втручатися при найменших відхиленнях.

Важливою частиною цього процесу є миттєва передача «важких» файлів медичної візуалізації (МРТ, КТ, рентген), що дозволяє фахівцям з різних куточків світу спільно аналізувати дані та встановлювати точні діагнози без затримок. Одним із найбільш технологічних аспектів 5G є розвиток високотехнологічної хірургії та навчання. Низька затримка сигналу робить можливим проведення роботизованих операцій з надзвичайною точністю, а в перспективі – виконання дистанційних хірургічних втручань, коли лікар перебуває за сотні кілометрів від операційної.

Паралельно з цим, технології доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності трансформують підготовку медичних кадрів через імерсивні симуляції та допомагають пацієнтам у реабілітації та управлінні болем. Весь цей комплекс технологій працює у зв'язці з предиктивною аналітикою: штучний інтелект обробляє масиви даних, прогножуючи результати лікування та виявляючи потенційні ризики ще до того, як вони стануть критичними. Концепція «Розумного госпіталю» (Smart Hospital) охоплює також операційну ефективність та безпеку.

5G об'єднує в єдину мережу медичне обладнання, системи автоматизованої видачі ліків та управління активами. Інтелектуальне керування будівлею (освітлення, клімат-контроль, безпека) дозволяє суттєво знизити витрати, а електронні медичні карти (EHR) гарантують швидкий і захищений доступ до історії хвороби пацієнта для координації допомоги між різними

відділеннями. Навіть логістичні процеси, такі як управління фармацевтичними запасами та раціональне поводження з медичними відходами, стають автоматизованими завдяки аналізу даних у реальному часі. Особлива роль 5G відведена екстреній допомозі та превентивній медицині. «Розумні швидкі» (Smart Ambulances) стають повноцінними діагностичними центрами на колесах, де медики можуть отримувати підтримку від лікарів госпіталю під час транспортування пацієнта.

Мобільні додатки та натільні пристрої стимулюють залученість пацієнтів до контролю за власним здоров'ям, надаючи персоналізовані поради щодо фітнесу та харчування. У науковій сфері 5G прискорює клінічні дослідження завдяки дистанційному збору точних даних від учасників, що дозволяє швидше розробляти нові методи лікування та забезпечувати якісну підтримку ментального здоров'я через віртуальну терапію.

Приватні мережі 5G у промисловості. Впровадження приватних мереж 5G у промисловому секторі стає фундаментом для цифрової трансформації заводів та фабрик. Завдяки інтеграції промислового інтернету речей (IoT), сотні датчиків та пристроїв об'єднуються в єдину мережу для моніторингу виробничих ліній у реальному часі. Це дозволяє впроваджувати стратегії предиктивного обслуговування, де система самостійно прогнозує знос обладнання, запобігаючи аварійним зупинкам і зменшуючи витрати на ремонт. Ключовою перевагою тут є наднизька затримка сигналу, яка критично важлива для роботи робототехніки та автоматизованих систем зварювання, складання та пакування, де кожна мілісекунда впливає на точність і стабільність процесу.

Особливе місце в сучасній екосистемі займають технології віртуалізації та взаємодії. Використання цифрових двійників (Digital Twins) дозволяє створювати точні віртуальні копії фізичних процесів для їх моделювання та аналізу без зупинки реального виробництва. Робочі місця доповнюються коботами (спільними роботами), які безпечно працюють пліч-о-пліч із людьми, а технології AR та VR стають незамінними для імерсивного навчання персоналу та дистанційного технічного обслуговування. Завдяки високошвидкісним

камерам і сенсорам, контроль якості стає повністю автоматизованим: система в реальному часі виявляє дефекти, мінімізуючи відсоток браку та відходів.

Операційна гнучкість та управління ресурсами також переходять на новий рівень. 5G дозволяє створювати гнучкі виробничі системи, які здатні миттєво переналаштовуватися під випуск нової продукції. Це охоплює весь ланцюг – від інтелектуального управління складом, де запаси відстежуються автоматично, до оптимізації логістики сировини.

Паралельно з цим, «розумне» управління фабрикою (Smart Factory Management) забезпечує контроль за енергоспоживанням, освітленням та системами HVAC, що не тільки знижує витрати, а й сприяє екологічній сталості через інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Нарешті, 5G суттєво підвищує рівень безпеки та захищеності об'єктів. Натільні пристрої та датчики на одязі працівників моніторять стан їхнього здоров'я та місцезнаходження, запобігаючи нещасним випадкам у небезпечних зонах. Системи відеоспостереження високої чіткості з інтелектуальною аналітикою забезпечують цілодобовий захист периметра та миттєве реагування на будь-які загрози.

У поєднанні з адитивним виробництвом (3D-друк) та просунутим керуванням процесами, приватні мережі 5G створюють середовище, де висока продуктивність поєднується з безпекою та здатністю до швидкої адаптації в умовах мінливого ринку.

Приватні мережі 5G в автомобільній галузі. Від розумного виробництва до автономного водіння. Впровадження приватних мереж 5G в автомобільному секторі стає фундаментом для створення інтелектуальної транспортної екосистеми.

Ключовим напрямком є розвиток підключених автомобілів (Connected Vehicles) та технології V2X (зв'язок автомобіля з усім оточенням). Це дозволяє транспортним засобам у реальному часі обмінюватися даними з дорожньою інфраструктурою та іншими авто (V2V), координуючи швидкість і положення на дорозі. Такий підхід не лише мінімізує ризик аварій, а й оптимізує трафік, що є критично важливим для розгортання повноцінного автономного водіння.

Завдяки мінімальній затримці сигналу, самокеровані авто можуть миттєво обробляти дані, що забезпечує безпрецедентний рівень безпеки та надійності. Паралельно з дорожніми технологіями, 5G докорінно змінює досвід користувача та сервісне обслуговування. Виробники отримують можливість проводити дистанційну діагностику та оновлювати програмне забезпечення автомобіля «по повітрю» (OTA), що гарантує актуальність систем безпеки без відвідування сервісного центру. Внутрішні системи розваг (Infotainment) забезпечують пасажирів надшвидким інтернетом для стрімінгу та імерсивного контенту, а водії можуть персоналізувати налаштування авто через мобільні додатки.

Для бізнесу 5G відкриває нові можливості в управлінні автопарками, дозволяючи логістичним компаніям відстежувати транспорт у реальному часі та впроваджувати стратегії предиктивного обслуговування для зменшення витрат на ремонт.

Значна трансформація відбувається і на рівні виробничих процесів та ланцюгів постачання. На автомобільних заводах 5G підтримує роботу високоточної робототехніки для збирання та фарбування, де синхронізація процесів відбувається в реальному часі.

Використання цифрових двійників (Digital Twins) дозволяє моделювати як окремі деталі, так і цілі лінії збірки, а технології AR/VR допомагають інженерам у проектуванні прототипів та навчанні персоналу. Весь ланцюг постачання стає прозорим завдяки тотальному відстеженню компонентів, що скорочує час виконання замовлень та підвищує загальну ефективність логістики. На рівні міської інфраструктури та екології, приватні мережі 5G сприяють розвитку «розумного» керування трафіком. Інтелектуальні системи регулювання світлофорів на основі живих даних зменшують затори, а розумні паркувальні рішення допомагають водіям швидко знаходити вільні місця, знижуючи рівень викидів у містах. Крім того, автомобільні підприємства впроваджують системи розумного енергоменеджменту та управління відходами, інтегруючи відновлювані джерела енергії у виробництво.

У підсумку, 5G створює надійну інфраструктуру, де передові системи допомоги водієві (ADAS) та інноваційне виробництво працюють як єдиний злагоджений механізм.

3.7. Висновки до розділу 3

Сьогодні промисловість та підприємства більше ніж будь-коли потребують приватних мереж, де різні пристрої, такі як роботи, дрони, датчики, а також термінали користувачів, що потребують різних можливостей зв'язку, можуть бути безперебійно підключені. Більшість випадків використання, що включають такі пристрої, мають високі вимоги до продуктивності щодо доступності, надійності, затримки та безпеки, що призвело до необхідності інтеграції технології 5G у приватні мережі.

Для прискорення розгортання та експлуатації приватних мереж 5G було запропоновано та визначено декілька технологій що відрізняються рівнем безпеки, швидкістю розгортання та своєю вартістю. У цьому розділі мною було представлено та порівняно всі з цих типів технологій. Та завдяки аналізу експериментальних досліджень можна зробити висновок що для промислового застосування приватні 5G мережі є більш ефективними ніж Wi-Fi, а з точки зору архітектури саме автономна 5G приватна мережа є найбільш завадостійкою та надійною.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

Охорона праці є фундаментальним аспектом діяльності будь-якого підприємства, оскільки її головна мета – збереження життя та здоров'я працівників як найвищої цінності.

Створення безпечних умов на робочих місцях не лише мінімізує ризики виробничого травматизму та виникнення професійних захворювань, а й формує психологічний комфорт у колективі. Коли фахівець відчуває себе захищеним, його лояльність до організації зростає, що безпосередньо впливає на стабільність кадрового складу та зменшення плинності кадрів.

Вплив електричного струму на організм людини. Це є одним із найнебезпечніших виробничих факторів, оскільки людське тіло є провідником, а дія струму часто призводить до миттєвих і незворотних наслідків. В контексті охорони праці електробезпека посідає особливе місце, оскільки ураження може бути як зовнішнім (опіки, металізація шкіри), так і внутрішнім, що вражає центральну нервову, серцево-судинну та дихальну системи.

Основними видами впливу електричного струму на організм є:

- Термічна дія: проявляється в опіках окремих ділянок тіла, а також нагріванні кровоносних судин, нервів та внутрішніх органів, що призводить до серйозних функціональних порушень.

- Електролітична дія: виражається в розкладанні крові та інших органічних рідин, що викликає суттєві зміни їхнього фізико-хімічного складу.

- Біологічна дія: специфічний процес, при якому електричний струм подразнює та збуджує живі тканини організму, що супроводжується мимовільним судомним скороченням м'язів, включаючи серце та легені.

Наслідки ураження залежать від багатьох факторів, серед яких ключовими є сила струму, його частота, тривалість впливу та шлях проходження через тіло

(так звана «петля струму»). Найнебезпечнішим вважається шлях «рука – ноги» або «рука – рука», оскільки в зону ураження потрапляють серце та головний мозок. При силі струму понад 100 мА виникає фібриляція серця, що за відсутності негайної допомоги призводить до смерті.

З точки зору охорони праці, захист персоналу базується на жорсткому дотриманні правил експлуатації електроустановок. Це передбачає використання засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, взуття), заземлення та занулення обладнання, а також встановлення систем автоматичного відключення живлення. Постійний інструктаж та навчання працівників методам надання першої допомоги при ураженні струмом є критично важливими елементами безпеки на будь-якому підприємстві.

Санітарно-захисна зона. Є обов'язковим елементом інфраструктури будь-якого промислового об'єкта, що виступає просторовим бар'єром між територією підприємства та житловою забудовою. Основне призначення цієї зони – мінімізація негативного впливу шкідливих виробничих факторів, таких як шум, вібрація, електромагнітні випромінювання та викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Створення санітарно-захисної зони дозволяє забезпечити нормативні вимоги щодо якості навколишнього середовища в місцях проживання людей.

Розмір санітарно-захисної зони встановлюється залежно від класу шкідливості підприємства та специфіки його технологічних процесів. Наприклад, для об'єктів зв'язку, де використовуються потужні передавачі, зона розраховується на основі рівнів електромагнітного поля. Територія санітарно-захисної зони має бути належним чином упорядкована та озеленена; використання стійких до забруднення дерев та чагарників створює природний фільтр, який додатково затримує пил та знижує рівень промислового шуму.

Згідно з нормами охорони праці та екологічної безпеки, у межах санітарно-захисної зони суворо заборонено розміщувати житлові будинки, дитячі заклади, школи, лікарні та зони відпочинку. Ефективна організація СЗЗ не лише захищає населення, а й забезпечує безперебійну роботу самого підприємства, створюючи умови для локалізації технічного впливу всередині визначеного периметра. Це є

критично важливим для промислових об'єктів та логістичних хабів, де інтенсивність операцій вимагає чіткого розмежування промислової та селітебної територій.

4.2. Забезпечення надійності приватної мережі 5G в умовах надзвичайних ситуацій

У сучасних умовах охорона праці на підприємствах із розгорнутими приватними мережами 5G виходить за межі стандартних інструкцій і трансформується у комплексну систему забезпечення живучості персоналу та інфраструктури. Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС) воєнного стану розглядається як система заходів для захисту людей та матеріальних цінностей від наслідків воєнних дій і техногенних аварій.

Надійність зв'язку як фактор безпеки персоналу. Ефективна організація захисту в умовах НС гарантує не лише фізичне виживання співробітників, а й безперебійну роботу критичних комунікацій. Для підтримки безпеки праці в умовах воєнного часу архітектура приватної мережі повинна зберігати працездатність навіть при частковому руйнуванні інфраструктури або під впливом комбінованих завад. Це досягається через:

- Використання Network Slicing: виділення окремих віртуальних каналів для трафіку служб безпеки, що гарантує їх пріоритетність та захист від перевантажень під час пікових навантажень у моменти НС.

- Інтеграцію IoT-датчиків: впровадження систем раннього виявлення загрози (наприклад, пожежі, витоку хімікатів або наближення небезпеки), що дозволяє автоматично активувати протоколи безпеки та евакуації ще до масштабування катастрофи.

Захист від вражаючих факторів та підготовка персоналу. Охорона праці в умовах воєнного стану вимагає особливої уваги до електробезпеки та захисту від технічних ризиків. З огляду на специфіку 5G-обладнання, необхідно забезпечити:

- Стійкість до перенапруг: захист від електромагнітного імпульсу та стрибків напруги при пошкодженні енергосистем.

- Безпеку обслуговування: мінімізацію часу перебування персоналу на відкритих майданчиках для ремонту антенних систем за рахунок засобів дистанційної діагностики та резервування модулів.

Головним пріоритетом охорони праці залишається превентивна підготовка: проведення регулярних тренувань, перевірка працездатності систем оповіщення та належний стан захисних споруд для укриття працівників. Координація між рятувальними службами та адміністрацією підприємства через надійні канали зв'язку 5G є вирішальною для мінімізації часу реагування на інциденти.

Таким чином, сучасна концепція охорони праці поєднує високу кваліфікацію персоналу з передовими технологіями 5G, що забезпечує стабільність управління безпекою та захист людського капіталу в екстремальних умовах воєнного часу.

4.3. Висновок до четвертого розділу

Отже, впровадження ефективних стандартів захисту праці гарантує, що системи комунікації працюватимуть без збоїв, а працівники залишатимуться в безпеці навіть під тиском комбінованих негативних факторів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було проаналізовано та представлено розвиток стільникового зв'язку від першого покоління до п'ятого. Можна вважати що даний поділ є умовним так як стільниковий зв'язок завжди розвивається і підвищення ефективності, якості мережі розділяється поколінням. Сьогодні в Україні представлені чи не всі покоління мобільних мереж, і їх розподіл зумовлений лише якістю покриття. На даний момент актуальним є 4G LTE зв'язок хоча в залежності від покриття користувачі можуть користуватись як 3G так і 2G мережами.

Було розглянуто та проаналізовано 5G мережі, а саме приватні специфікації що застосовуються великими підприємствами які потребують вищу пропускну здатність, гнучкість та високий рівень безпеки, що публічні мережі не можуть забезпечити.

Для розгортання приватних мереж, які частково або повністю ізольовані від публічних мереж, необхідні технології, які дозволяють приватним та публічним мережам спільно використовувати деякі свої мережі. Доступ до неліцензованого або спільного спектру, який не зайнятий операторами публічних мереж, може бути одним із ключових факторів для розгортання приватної мережі без залежності від публічної мережі. Використовуючи дослідження в даній галузі та практичний досвід інтеграції приватних мереж було виділено основні їх архітектури та проведено порівняння з точки зору ключових характеристик для кінцевого користувача. Завдяки цьому можна зробити висновок що саме автономні приватні мережі 5G є найбільш передовим рішенням для задоволення потреб користувачів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Що таке Private LTE та у чому його переваги? | Kyivstar Business Hub. Kyivstar Business Hub – корпоративний блог для бізнесу. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-private-lte-ta-u-chomu-jogo-perevagy> (дата звернення: 01.12.2025).
- 2 RAN Sharing – Telecompedia. Telecompedia. URL: <https://telecompedia.net/ran-sharing/> (дата звернення: 18.11.2025).
- 3 Приватна мережа 5G стане стандартною мережею для 90% підприємств на провідних ринках приватної мережі 5G. SHOP-GSM.UA. URL: <https://shorturl.at/xenDJ> (дата звернення 18.11.2025).
- 4 Private 5G Networks: Everything you need to know – firecell.io. firecell.io. URL: <https://firecell.io/learn/private-5g-networks-everything-you-need-to-know/> (дата звернення: 18.11.2025).
- 5 Стручок В. С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр». <https://elartu.tntu.edu.ua/>. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196> (дата звернення: 18.11.2025).
- 6 Стручок В. С. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник. <https://elartu.tntu.edu.ua/>. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424> (дата звернення: 18.11.2025).
- 7 5G для бізнесу: ключові переваги та можливості для цифрової трансформації | Vodafone Business Hub. Vodafone Ukraine. URL: <https://business.vodafone.ua/uk/5g> (дата звернення: 12.11.2025).
- 8 Приватні мережі 5G (P5G) як основа Індустрії 4.0 та автоматизації виробництва | TechToday. TechToday. URL: <https://techtoday.in.ua/news/shho-take-pryvatni-merezhi-5g-ta-chomu-vony-vazhlyvi-dlya-industriyi-4-0-165241.html> (дата звернення: 23.11.2025).
- 9 Роль Private 5G у розвитку смарт-заводів та критичної інфраструктури | Ericsson Research. Ericsson. URL: <https://www.ericsson.com/en/5g/private-networks> (дата звернення: 21.11.2025).

10 Чому Private 5G стає стандартом для великих промислових підприємств: порівняння з Wi-Fi | Nokia Enterprise. Nokia. URL: <https://www.nokia.com/networks/solutions/private-wireless/> (дата звернення: 15.11.2025).

11 Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу / Л.Є. Дедів, А.С. Сверстюк, І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський, В.Г. Дозорський, Є.Б. Яворська. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

12 Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах / І.Ю. Дедів, А.С. Сверстюк, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, М.О. Хвостівський. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

13 Методичні рекомендації з оформлення кваліфікаційних робіт бакалавра за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» уклад.: Дунець В.Л., Хвостівський М.О. Дедів І.Ю. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021 р. – 72с.

14 Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І. М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

15 Khvostivska L.V., Osukhivska H.M., Khvostivskyi M.O., Dediv S.Y. Development of methods and algorithms for a stochastic biomedical signal period calculation in medical computer diagnostic systems. Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84. doi: 10.20535/RADAP.2019.79.78-84.

16 Dozorska O., Yavorska E., Dozorskyi V., Pankiv I., Dediv L. Dediv I. The Method of Indirect Restoration of Human Communicative Function. Proc. of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD

Systems (CADSM), CADSM'2019, (pp. 19–22). Polyana-Svalyava (Zakarpattia), UKRAINE 978-1-7281-0053-1/19.

17 Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.56-64.

18 Khvostivska L., Khvostivsky M., Dunets V., Dediv I.. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil 22- 24 November 2022. Vol 3309, P. 314-318. ISSN 1613-0073.

19 Гевко О.В., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Дозорська О.Ф. Структурний синтез вібромасажної апаратури. Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

20 Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073.

21 Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I., Yatskiv V., Palaniza Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.173-180. ISSN 1613-0073.

22 Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, 2023. pp. 48–57.

23 Основи технології радіоелектронних апаратів : навчальний посібник / Р. А. Ткачук, В. Г. Дозорський, Л. Є. Дедів, І. Ю. Дедів. - Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. - 336 с.

24 Паляниця Ю.Б., Марценюк А.С., Дунець В.Л., Бучинський В.М., Паламар М.І. Дрон з блоком надвисоких частот для виявлення та знешкодження вибухових пристроїв та мін. Матеріали III Міжнародної наукової конференції молодих учених та студентів «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 20-21.04.2023 р. Тернопіль: ТНТУ, 2023. С. 158-159. ISBN 978-617-7875-32-0.

25 Дунець В.Л., Хвостівська Л.В., Паляниця Ю.Б. Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення оцінювання завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією. Збірник наукових праць Вісник НУВГП, серія технічні науки, випуск 4 (104), 2023. - С. 95-107. ISSN: 2306-5478.

26 Velychko, D., Osukhivska, H., Palaniza, Y., Lutsyk, N., Sobaszek, Ł. (2024). Artificial Intelligence Based Emergency Identification Computer System. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(2), pp. 296–304. ISSN: 2299-8624.

27 Гевко І.Б., Дунець В.Л., Паляниця Ю.Б., Марценюк А.С., Химич Г.П. Дрон з імпульсним квантовим генератором для знешкодження об'єктів ураження. Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 18-19.04.2024 р. Тернопіль: ТНТУ, 2024.

28 Palianytsia Y., I. Lytvynenko, A. Menoub, H. Shymchuk, A Dubchak. Development of an algorithm for identification of damage types on the surface of sheet metal. *Proceedings of the The 2nd International Workshop on “Computer Information Technologies in Industry 4.0” (CITI 2024)*. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 12-14, 2024. P.84-96. ISSN 1613-0073.

29 Palaniza, Y., Martseniuk, A. and Yaskiv, V. Active Phased Array Antenna With Parallel Feeder Excitation At 3.7 Ghz. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 22(2), 2024, pp.127-133. ISSN 1336-1376. DOI: 10.15598/aeee.v22i2.5290.

30 Khymych, H., Dunets, V., Duda, S., Palaniza, Y., Kornieiev, K. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. *Radioelectronics and Communications Systems*, 66(11), 2023, pp. 609–615. ISSN 0735-2727. DOI: 10.3103/S0735272722080039.

31 Lyashuk, Oleg, Mykola Stashkiv, Yurii Palianytsia, Roman Khoroshun and Dmytro Mironov. Fourier Model Fitting for Vibration Analysis of Car Wheel Suspension Enhanced Damping System. *Proceedings of the 4rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, 23-25 October 2024, Ternopil, Ukraine. ITTAP-2024, 2024. ISSN 1613-0073.

32 Паляниця Ю.Б., Сверстюк А.С., Шадріна Г.М. Математичне та комп'ютерне моделювання фонокардіосигналів для удосконалення кардіодіагностичних систем / Ю.Б. Паляниця, А.С. Сверстюк, Г.М. Шадріна – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2020. – 106 с. ISBN 5-211-05310-9.

33 Dozorskyi V., Dediv L., Kovalyk S., Dozorska O., Dediv I. (2024) Design of the endoskeleton of a biocontrolled hand prosthesis. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 115, no 3, pp. 100-111.

ДОДАТКИ

Додаток А

Теза конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

**АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ
СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів
11-12 грудня 2025 року**



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

10.	Ю. П. Волинець БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ		239
11.	Р.І. Гануля, Т.Є. Хованець, І.Р. Козбур, Ю.О. Тимошенко АВТОМАТИЗАЦІЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА ПК ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМ TINYTASK ТА AUTONOTKEY		241
12.	А.В. Головка, проф., д.е.н. Матійчук Л.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА В УМОВАХ ВІЙНИ		243
13.	К.Г. Голубко, Я.В. Литвиненко РОЗРОБКА ДЕСКТОПНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДЕТЕКЦІЇ МІМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ		244
14.	О. Ю. Горішний, В.Д. Тимошук ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЛОЩИНИ ДАНИХ ВІРТУАЛЬНОГО КОМУТАТОРА OPEN VSWITCH		246
15.	В.А. Готович, В.А. Курян ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ РУХІВ ЛЮДИНИ ЗА КООРДИНАТАМИ MEDIAPIPE POSE		247
16.	А.І. Дацко ТИПИ ТЕСТУВАННЯ ЗНАННЯ КОДУ		250
17.	І.Ю. Дедів, О.П. Казьмірук ПРИВАТНІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ 5G ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ		252
18.	Н.Демчан, Р. Жаровський МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНО АПАРАТНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЗА ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН З ВРАХУВАННЯМ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЇ		254
19.	В.Л. Дерягін, М.В. Дрогобицький, Н.С. Луцик ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАФІКУ МІЖ МІКРОСЕРВІСАМИ В ISTIO SERVICE MESH		255
20.	Л. П. Дмитроца, О. І. Шубалий ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТРЕНДІВ АНАЛІТИКИ BIG DATA		257
21.	М.В. Дрогобицький, А.І. Фіялка, Н.С. Луцик КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖ MICROGRID		259
22.	В. Л. Дунець, А. В. Хиль ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ІНЕРЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ КАЛМАНА		261
23.	В. Л. Дунець, Н. А. Гульовський ЦИФРОВА РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ		263
24.	П. Загалюк РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА У ВІЙНІ		264
25.	О.М. Задворний; І.В. Бойко ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕТЕКЦІЇ ЕПІЛЕПТИЧНИХ НАПАДІВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ ТОПОЛОГІЧНО-СПЕКТРАЛЬНИХ ОЗНАК		266
26.	Р.Р.Золотий, М.С. Дзюмак, Д.В. Сас, І.Я. Харів ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ		268

УДК 004.72

І.Ю. Дедів, к.т.н.; О.П. Казьмірук

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ПРИВАТНІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ 5G ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ

I.Dediv Ph.D, O. Kazmiruk

PRIVATE NETWORKS ARCHITECTURE BASED ON 5G COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Стрімкий розвиток технологій стільникового зв'язку, зокрема, перехід від 4G до стандарту 5G знаменує собою значний стрибок вперед у світі телекомунікацій. Якщо мережі 4G забезпечують надійний зв'язок і сприяли розвитку мобільного інтернету, то мережі 5G мають значно більші перспективи, оскільки, розроблені для забезпечення вищої швидкості передачі даних, зменшення затримок і більшої пропускної здатності. Відповідно, такий спектр характеристик забезпечує високу надійність, безпеку та продуктивність, що зумовлює перспективу використання такої технології в приватних мережах.

Приватна мережа 5G - розгортання мережевої інфраструктури 5G, яка призначена для обслуговування певної організації чи місця, а не є частиною загальнодоступної чи комерційної стільникової мережі. Приватні мережі використовують ту саму технологію 5G, що використовується в громадських стільникових мережах, але вони розгортаються незалежно, щоб забезпечити надійний і високопродуктивний зв'язок в окремих місцях. До переваг приватного 5G можна віднести покращений контроль та підвищену безпеку, надійність і низьку затримку, гнучкість налаштування та адаптивність. Використання приватних мереж 5G особливо цінне в таких галузях, як виробництво, логістика, охорона здоров'я, видобуток корисних копалин і розумні міста, де надійне та високопродуктивне з'єднання має важливе значення.[1]

На відміну від публічної мобільної мережі, що розгортається операторами, приватна мережа передбачає передачу права власності на розгортання та експлуатацію кінцевому підприємству. Така мережа може функціонувати як на ліцензованих, так і на неліцензованих частотних діапазонах, незалежно від публічної інфраструктури.

Типи розгортання приватних 5G мереж поділяються на дві основні категорії залежно від ступеня залежності від публічної мережі:[2]

- незалежна (автономна) мережа (Standalone): повністю ізольовані приватні мережі, що використовують власну мережу радіодоступу (RAN) та опорну мережу (Core Network);

- залежна (інтегрована) мережа: приватні мережі, розгорнуті спільно з публічною мережею.

Також, існують такі варіанти побудови приватних 5G мереж:

- ізольована локальна мережа 5G, побудована на підприємстві (локальна частота 5G, повністю закрита, без сумісного використання);

- ізольована локальна мережа 5G, побудована оператором стільникового зв'язку (ліцензована частота, повністю приватна, без сумісного використання);

- сумісне використання RAN між приватною мережею і загальнодоступною мережею;

- RAN и Control Plane Sharing між приватною мережею і загальнодоступною мережею;

- RAN і Core Sharing (End-to-End Network Slicing) між приватною і загальнодоступною мережею;

- N3 LBO (Local Breakout);

- F1 LBO (Local Breakout).

Серед ключових переваг приватної 5G мережі можна виділити:[3]

- повна відокремленість автономної мережі від публічного трафіку гарантує безпеку та запобігає витоку внутрішніх корпоративних даних;

- завдяки розміщенню всіх мережевих функцій та Edge Computing на об'єкті, затримка між пристроєм та сервером додатків є мінімальною, що дозволяє надавати критично важливі послуги;

- конфігурації мережі можуть бути детально налаштовані відповідно до специфічних вимог корпоративних додатків, на відміну від типових параметрів публічної мережі;

- автономний характер приватної мережі гарантує її незалежну роботу навіть у разі будь-яких збоїв чи зниження продуктивності в загальнодоступній 5G мережі оператора.[4]

Застосування стандарту 5G для побудови приватних мереж відповідає високим стандартам технологічності та надійності. Тому, незважаючи на високі фінансові та технічні вимоги до її розгортання та підтримки, вона забезпечує максимальний контроль, безпеку та якість обслуговування, що є критично важливими чинниками для сучасних галузей промисловості.

Література

1. Що таке Private LTE та у чому його переваги? | Kyivstar Business Hub. Kyivstar Business Hub – корпоративний блог для бізнесу. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-private-lte-ta-u-chomu-jogo-perevagy> (дата звернення: 01.12.2025).

2. RAN Sharing - Telecompedia. *Telecompedia*. URL: <https://telecompedia.net/ran-sharing/> (дата звернення: 18.11.2025).

3. Приватна мережа 5G стане стандартною мережею для 90% підприємств на провідних ринках приватної мережі 5G. *SHOP-GSM.UA*. URL: <https://shop-gsm.ua/blog/chastnaya-set-5g-stanet-standartnoj-setyu-dlya-90-predpriyatij-na-veduschih-rynках-chastnoj-seti-5g/?srsltid=AfmBOorKJ9q1NJ6yZlspyuU1TcPcZyGsype042TV4m2HRvEqy-CzeJEL> (дата звернення 18.11.2025).

4. Private 5G Networks: Everything you need to know - firecell.io. *firecell.io*. URL: <https://firecell.io/learn/private-5g-networks-everything-you-need-to-know/> (дата звернення: 18.11.2025).