Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Організація мережі стільникового зв'язку за стандартом 5G міста Черкаси

(тема)

Виконав:
здобувач *3* року навчання,
групи *ТРІМІзу-23-1*

Володимир АРУТЮНОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність *172 Електронні комунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма
«Інформаційно-мережна інженерія»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент *Юрій КОЛТУН*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ *Микола МОСКАЛЕЦЬ*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент / *Володимир АРУТЮНОВ* /

Керівник / *Юрій КОЛТУН* /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Спеціальність *172 «Електронні комунікації та радіотехніка»*
(код і повна назва)

Тип програми *освітньо-професійна*
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма *«Інформаційно-мережна інженерія»*
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«*18*» *травня* 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві *Арутюнову Володимиру Олександровичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Організація мережі стільникового зв'язку за стандартом 5G міста Черкаси*

затверджена наказом університету від «*18*» *травня* 2026 р. № 74 *Стз*

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії *22 червня 2026 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Тип мережі – стільникова. Технологія мережної платформи – LTE. Стандарт – 5G.*

Розглянути особливості побудови меріж стільникового звязку. Зробити аналіз особливостей організації та принципів функціонування мережі 5G на базі технології LTE. Визначити та обґрунтувати типову топологічну структуру мережі 5G на базі технології LTE. Запропонувати методику та підходи щодо розрахунку основних параметрів БС стільникової мережі.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ
1. Загальні принципи та особливості побудови мережі стільникового зв'язку 5G.
2. Аналіз особливостей організації та принцип функціонування мереж 5G.
3. Методика планування типової мережі стільникового зв'язку 5G.
4. Розрахунки основних параметрів БС стільникової мережі.
Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) *Слайди у форматі Power Point (назва актуальність теми, мета та завдання проєктування, головні стандартизуючі організації, цільові показники якості мережі 5G, архітектура опорної мережі 5G Core, технологія Massive MIMO та Beamforming, узагальнена структура мережі LTE, архітектура скрізьного каналу, частотне планування мережі 5G в Україні, модернізація обладнання БС та транспортної мережі, моделі для побудови чарунок платформи 5G Tube Star,Pole Star і Rural Star, типовий підхід до розрахунку основних параметрів стільникової мережі, висновки)*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	*Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.*	18.05 – 19.05.26	*виконано*
2	*Підбір літератури за темою роботи.*	20.05 – 24.05.26	*виконано*
3	*Виконання розділу 1*	25.05 – 31.05.26	*виконано*
4	*Виконання розділу 2*	01.06 – 07.06.26	*виконано*
5	*Виконання розділу 3*	08.06 – 14.06.26	*виконано*
6	*Виконання розділу 4*	15.06 – 21.06.26	*виконано*
7	*Оформлення пояснювальної записки*	22.06 – 25.06.26	*виконано*
8	*Оформлення презентаційного матеріалу,*		
	підготовка до захисту у ЕК	26.06 – 28.06.26	*виконано*

Дата видачі завдання *18 травня 2026 р.*

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ *доц. Колтун Ю.М)*
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 22 рис., 3 табл., 15 джерел, 1 додатки.

СТІЛЬНИКОВА МЕРЕЖА ЗВ'ЯЗКУ, ПЛАФОРМА 5G, ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ, EDGE, MIMO, WIMAX, ТЕХНОЛОГІЇ РАДІО ДОСТУПУ, OFDM, ТЕХНОЛОГІЇ LTE, МАКСИМАЛЬНО ДОСТУПНІ ВТРАТИ, БЛОКОМ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНІСТЮ, БАЗОВАЯ СТАНЦІЯ

Об'єкти дослідження – технологія LTE, плаформа 5G, стільникова мережа мобільного зв'язку.

Мета роботи – аналіз загальних технологічних принципів і особливостей організації мережі стільникового зв’язку платформи 5G на базі технології LTE.

Розглянуті загальні принципи і особливості побудови мережі стільникового зв'язку 5G. Проведено аналіз особливостей організації та принципів функціонування мереж 5G. Запропонована та обґрунтована методика планування топологічної структури типової мережі стільникового зв’язку на базі технології LTE. Надана загальна методика проведення типового розрахунку основних параметрів БС стільникової мережі.

THE ABSTRACT

Explanatory note 84 pages, 22 fig., 3 tab., 15 sources, 1 app.

CELLULAR COMMUNICATION NETWORK, 5G PLATFORM, WIRELESS COMMUNICATION NETWORK CONSTRUCTION TECHNOLOGY, EDGE, MIMO, WIMAX, RADIO ACCESS TECHNOLOGIES, OFDM, LTE TECHNOLOGIES, MAXIMUM AVAILABLE LOSS, MOBILITY CONTROL UNIT, BASE STATION

Research objects – LTE technology, 5G platform, cellular mobile communication network.

The purpose of the work is to analyze the general technological principles and features of the organization of the 5G platform cellular communication network based on LTE technology.

The general principles and features of building a 5G cellular network are considered. The features of the organization and principles of functioning of 5G networks are analyzed. A methodology for planning the topological structure of a typical cellular network based on LTE technology is proposed and substantiated. A general methodology for conducting a typical calculation of the main parameters of a cellular network BS is provided.

ЗМІСТ

С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 8
ВСТУП 12
1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВЯЗКУ 5G 14
1.1 Розвиток технологій мобільного зв'язку від 3G до 5G 14
1.2 Основні стандартизуючі організації п'ятого покоління 16
1.3 Принцип роботи 5G 17
1.4 Параметри мереж 5G 23
1.5 Частоти використовувані для нового стандарту 25
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЙ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ 5G 26
2.1 Технології, які використовуються в 5G 26
2.2 Архітектура опорної мережі 5G 31
2.3 Харктеристика проєктованного регіону 34
3 МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ТИПОВОЇ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G 39
3.1 Планування мереж 5G в сучасних умовах 39
3.2 Частоти , стеки протоколів, канали та послуги, реалізовані на різних рівнях використовувані для 5G в Україні 45
3.3 Модернізація обладнання для базової станції 57
3.4 Готові моделі сот 59
4 РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БС СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ 62
4.1 Типовий розрахунок максимально допустимих втрат (МДВ) 62
4.2 Розрахунок зони покриття та кількості БС по моделі COST231 67
4.3 Розрахунок швидкості передачі даних 5G NR 68
ВИСНОВКИ 71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 74
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ 76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3G (3rd Generation) – «третє покоління технології мобільного зв'язку» – набір послуг, який включає високошвидкісний мобільний доступ до мережі Інтернет та технологію радіозв'язку;

4G (4th Generation) – четверте покоління мобільного радіозв'язку, наступник 3G та 2G;

5G (5th Generation) – п'яте покоління мобільних мереж або п'яте покоління бездротових систем;

3GPP (3rd Generation Partnership Project) – партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній, головною метою створення якої є розробка і затвердження стандартів для мережевих технологій третього покоління (3G), стандартизація архітектури мереж та сервісів;

5GPPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) – це спільна масштабна ініціатива між Європейською комісією та Європейською ІСТ-галузою, для розробки архітектури, технологій та стандартів для розгортання мереж зв'язку нового покоління;

AM (Acknowledge Mode) – передача даних на RLC-підрівні з підтвердження;

BCCH (Broadcast Control Channel) – мовленнєвий керуючий канал;

CCCH (Common Control Channel) – загальний керуючий канал;

CDMA (Code-Division Multiple Access – «множинний доступ з поділом каналів за кодом») – одна з можливих технологій мультиплексування, тобто одночасної передачі даних у спільному діапазоні (так званому каналі) радіочастот;

COTS (Commercial Off-The-Shelf) – стандартное комерційне обладнання або програмне забезпечення, яке виробляється серійно;

DCCH (Dedicated Control Channel) – виділений керуючий канал;

DTCH (Dedicated Traffic Chanel) – виділений трафіковий канал;

EDGE (EGPRS) (Enhanced Data rates for GSM Evolution) – цифрова технологія бездротової передачі даних для мобільного зв'язку ;

EPC (Evolved Packet Core) – базову (пакетну) (під)мережу;

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів. Незалежна, некомерційна організація зі

стандартизації в телекомунікаційній промисловості (виробники устаткування і оператори мереж) в Європі;

E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) – (під)мережу радіодоступу;

FOFDM (Flash Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – фільтроване мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів;

GSM (Global System for Mobile Communications, раніше фр. Groupe Special Mobile, GSM) - глобальна система мобільного зв'язку;

GW (Gateway) – мережевий шлюз;

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access – високошвидкісний пакетний доступ у напрямку «вниз») – доступ високошвидкісного приймання пакетних даних стандарту мобільного зв'язку 3-го покоління;

HSPA (High Speed Packet Access) – протокол високошвидкісного пакетного доступу мобільного зв'язку 3-го покоління;

ID (Infrastructure Domain) – домен мережевої інфраструктури;

IETF (Internet Engineering Task Force) – відкрите міжнародне співтовариство проєктувальників, учених, мережевих операторів і провайдерів, створене IAB в 1986 році, яке займається розвитком протоколів і архітектури Інтернету;

IMTS (Improved Mobile Telephone Service) – покращений наступник MTS;

ITU (MCE) (International Telecommunication Union) – Міжнародний союз електрозв'язку. Міжнародна організація, що визначає стандарти в галузі телекомунікацій та радіо;

LMA (Local Mobility Anchor) – локальне місце розташування;

LTE (Long Term Evolution) – технологія побудови мереж бездротового зв'язку;

MAC (Medium Access Control) – (під)рівень управління доступом до середовища;

MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) – ідентифікація послуг мультимедійного мовлення;

MCCH (Multicast Control Channel) – груповий керуючий канал;

M2M (Machine-to-Machine) – машино-машинна взаємодія, загальна назва технології, яка дозволяє просто, надійно та вигідно забезпечити передачу даних між різними пристроями;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами;

MME (Mobility Management Entity) – це головний керуючий вузол (контролер);

MTCH (Multicast Traffic Chanel) – груповий трафіковий канал;

MTS (Mobile Telephone Service) – один з найбільш ранніх стандартів мобільного зв'язку;

NAS (Non Access Stratum) – зовнішність шару радіодоступу;

NGMN (Next Generation Mobile Networks) – мобільні мережі наступного покоління;

NFV / SDN (Network Function Virtualization) – віртуалізація функцій мережі. є концепцією мережевої архітектури, яка використовує технології віртуалізації інформаційних технологій для віртуалізації цілих класів функцій мережевих вузлів у складові блоки, які можуть з'єднуватись або об'єднуватись у послідовність, створюючи послуги зв'язку;

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексування з ортогональним частотним поділомом каналів;

P-GW (Packet Data Network Gateway) – шлюз пакетної мережі;

PC (Polar Code) – полярний код;

PCCH (Paging Control Channel) – викличний керуючий канал;

PCH (Paging Channel) – транспортний викличний канал;

PDCP (Packet Data Convergence Protocol) – (під)рівень протоколу конвергенції (злиття) пакетних даних;

PWS (Public Warning System) – системи тривожного оповіщення;

RAT (Radio Access Technology) – технології радіо доступу;

RLC (Radio Link Control) – (під)рівень управління радіоканалом;

RNL (Radio Network Layer) – рівень радіомережі;

RRC (Radio Resource Control) – (під)рівень управління радіоресурсами;

S-GW (Serving Gateway) – обслуговуючий шлюз;

SCMA (Sparse Code Multiple Access) – багатостанційний доступ на основі розріджених кодів;

SDU (Service Data Unit) – мультиплексування пакетів послуг;

SDN (Software Defined Networking) – програмно–визначаюча мережа;

SRS (Sounding Reference Signal) – технологія спеціального опорного сигналу, який мобільний пристрій передає базовій станції;

TDMA (Time Division Multiple Access – «множинний доступ з поділом каналів за часом») – часовий поділ одного фізичного каналу зв'язку на декілька;

TNL (Transport Network Layer) – рівень транспортної мережі;

UM (Unacknowledge Mode) – передача даних на RLC-підрівні без підтвердження;

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) – універсальна мобільна телекомунікаційна система, це стандарт мобільного зв'язку третього покоління (3G);

UED (User Equipment Domain) – домен обладнання користувача;

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – Стандарт IEEE 802.16, це стандарт бездротового зв'язку, що забезпечує широкосмуговий зв'язок на значні відстані зі швидкістю, порівняною з кабельними з'єднаннями;

АТС – автоматична телефонна станція;

БКМ – блоком керування мобільністю;

БС – базова станція;

ЕІВП – еквівалентна ізотропна випромінювальна потужністю;

КТ – терміналами користувача;

МДВ – максимально допустимі втрати;

ОШ – обслуговуючий шлюз;

ПШ –пакетний шлюз.

ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасних технологій фіксованого та мобільного зв'язку є прямим наслідком глобальної цифровізації та зростання ролі мережі Інтернет в усіх сферах життєдіяльності суспільства. Сьогодні всесвітня мережа виступає ключовою платформою для дистанційної роботи, навчання, електронного урядування та ведення бізнесу.

Проте в Україні спостерігається суттєвий територіальний дисбаланс у доступі до цифрових послуг. Якщо міське населення має широкий вибір високошвидкісних дротових і бездротових технологій, то сільська місцевість через значну площу країни та низьку інвестиційну привабливість для операторів залишається обмеженою у якісному зв'язку. Подолання цього цифрового розриву є стратегічно важливим завданням для держави.

Для подолання цифрового розриву в Україні, з огляду на велику територію. Особливо для сільській місцевості існує кілька технологічних підходів, кожен з яких має суттєві обмеження.

Супутниковий зв'язок – ривалий час вважався неефективним через високу вартість обладнання та велику затримку сигналу (Ping). Попри появу сучасних низькоорбітальних систем (наприклад, Starlink), цей варіант досі залишається фінансово обтяжливим для масового споживача.

Дротові лінії зв'язку (xDSL, FTTH/PON) – сторично залежали від наявності цифрових АТС та телефонних ліній. Сьогодні провайдери використовують оптоволоконні технології (зокрема PON), проте прокладання кабелів на великі відстані до малонаселених пунктів потребує значних капітальних інвестицій.

Мобільний зв'язок (3G/4G/5G – розвиток стандартів від застарілих EDGE/GSM до сучасних UMTS/HSPA (3G) та LTE (4G) відкрив нові можливості, але їх впровадження у селах стримується двома факторами.

Пріоритетність ринку: оператори фокусуються на густонаселених містах для швидшого повернення інвестицій.

Фізика поширення хвиль: високі частоти (від 1800 до 2100 МГц і вище) мають малий радіус дії. Покриття великих площ вимагає будівництва надмірної кількості базових станцій, що є економічно недоцільним для бізнесу.

У сучасних реаліях України цю проблему частково вирішили у 2020–2021 роках завдяки впровадженню LTE-900 (4G у діапазоні 900 МГц). Нижча частота дозволила базовим станціям передавати сигнал на значно більшу відстань, що зробило покриття сіл економічно вигідним для операторів (Київстар, Vodafone, Lifecell).

Одним із найбільш перспективних напрямків забезпечення сільської місцевості високошвидкісним інтернетом є розгортання мереж четвертого (4th Generation, 4G) та п'ятого (5th Generation, 5G) поколінь. Базовим технологічним стандартом для вирішення цього завдання виступає технологія бездротового доступу (Long Term Evolution, LTE), розроблена міжнародним консорціумом (3rd Generation Partnership Project, 3GPP).

Ключова відмінність LTE від попередніх стандартів полягає в повній побудові мережі на базі IP-технологій (концепція All-IP Network). Радіоінтерфейс LTE забезпечує високі технічні характеристики: пікову швидкість передачі даних понад 300 Мбіт/с, затримку пакетів (Ping) менше 5 мс, а також значно вищу спектральну ефективність порівняно з технологіями третього покоління (3G). Це створює надійний фундамент для подальшого переходу до архітектури 5G.

Мета роботи: Проектування та обґрунтування оптимальної архітектури мережі стільникового зв'язку стандарту 5G (на базі технології LTE) для міста Черкаси, а також розробка методики розрахунку радіопокриття для забезпечення високошвидкісного та надійного зв'язку в умовах міської забудови.

Актуальність: Черкаси – великий промисловий та культурний центр із високою щільністю населення та зростаючою потребою у швидкісному інтернеті. Впровадження 5G на базі існуючих мереж LTE (технологія NSA) дозволяє операторам мінімізувати капітальні витрати, швидко розгорнути мережу та забезпечити абонентів гігабітними швидкостями, низькою затримкою (URLLC) та підтримкою масового інтернету.

1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВЯЗКУ 5G

1.1 Розвиток технологій мобільного зв'язку від 3G до 5G

Всі мережі першого стандарту мобільного телефонії 1G були аналоговими і дозволяли передавати лише звуковий сигнал. Стандарт 2G, розроблений в 1992 використовував цифрову передачу даних. Стала можливою передача тексту. Повноцінну інтернет сторінку 2G не «тягнув», тому доводилося користуватися «полегшеними» wap-сайтами. Покоління систем мобільного зв'язку перераховані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Покоління систем мобільного зв'язку

Покоління	Назва стандарту
0G	PTT, MTS, IMTS, AMTS, Mobitex, Autotel/PALM, ARP
1G	NMT, AMPS, Hicap
2G	GSM, iDEN, D-AMPS, IS-95, PDC, CSD, GPRS, HSCSD, WiDEN
2.75G	EDGE/EGPRS, CDMA2000 (1xRTT)
3G	UMTS (W-CDM A, FOMA), CDMA2 00 0, TD- SCDMA, WiMAX
3.5G	UMTS (HSPA, HSDPA, HSUPA), CDMA2000 (EV-DO Rev.A)
3.75G	UMTS (HSPA+), CDMA2000 (EV-DO Rev.B/3xRTT)
4G	WiMAX, LTE
5G	WiMAX, LTE, CDMA

Еволюція мобільного зв'язку супроводжується кардинальними змінами в екосистемі клієнтського обладнання. Поява сучасних гаджетів – смартфонів, планшетів, пристроїв доповненої реальності (AR) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) – суттєво розширила функціонал бездротових технологій. Мобільні мережі давно трансформувалися з інструменту голосової комунікації на глобальні платформи високошвидкісного обміну даними, що спровокувало стрімке зростання мережевого трафіку в усьому світі. Зміна поколінь зв'язку забезпечує впровадження новітніх технологічних рішень для подолання поточних інфраструктурних викликів. Синергія поточних та перспективних стандартів не

лише підвищить якість наявних сервісів, а й стане каталізатором для створення принципово нових користувацьких послуг.

Технологічну основу систем другого покоління (2th Generation, 2G) склав множинний доступ із часовим розподілом каналів (Time Division Multiple Access, TDMA). Проте вже у 1992–1993 роках у США було розроблено альтернативний стандарт IS-95 (у діапазоні 800 МГц), який базувався на принципі множинного доступу з кодовим розподілом каналів (Code-Division Multiple Access, CDMA). Практична експлуатація цього стандарту розпочалася у 1995–1996 роках, здобувши найбільше поширення в Гонконзі, Південній Кореї та США, де згодом також було впроваджено його модифікацію в діапазоні 1900 МГц [2, 3].

Початком епохи мобільного широкосмугового доступу став 2000 рік, коли з'явився стандарт третього покоління (3G) – Універсальна мобільна телекомунікаційна система (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS), що забезпечувала базову швидкість передачі даних до 384 кбіт/с. Подальша еволюція цього покоління призвела до розгортання технологій високошвидкісного пакетного доступу:

HSDPA (3.5G): Розглядається експертами як перехідний етап до четвертого покоління. Попри теоретичний максимум швидкості у 14,4 Мбіт/с, реальні показники в діючих мережах становили близько 7,2–8 Мбіт/с.

HSPA+: Наступне оновлення стандарту, яке дозволило підвищити швидкість низхідного каналу (Downlink) до пікових 42 Мбіт/с.

Наступним етапом розвитку стали мережі четвертого покоління (4G), які повністю замінили інфраструктуру 3G. Першу у світі комерційну мережу LTE було запущено оператором TeliaSonera спільно з Ericsson у Стокгольмі та Осло. Заявлені розрахункові значення максимальної швидкості надаваного трафіку досягали 382 Мбіт/с у низхідному каналі (до абонента) та 86 Мбіт/с у висхідному (від абонента). Головною перевагою 4G є використання оптимізованої системи пакетної комунікації, що забезпечує користувачам високотехнологічний та стабільний широкосмуговий доступ навіть під час руху [6, 11].

Перспективним вектором розвитку телекомунікацій є п'яте покоління (5G), покликане вирішити інфраструктурні проблеми та обмеження ємності мереж 4G. Перші наукові дослідження в цьому напрямку розпочалися ще у 2008 році. У 2012 році у Великій Британії було створено профільний дослідницький центр 5G з орієнтиром на поетапну заміну стандарту LTE протягом наступного десятиліття. Технологічний прорив відбувся у травні 2013 року, коли компанія Samsung

Electronics анонсувала створення першої апаратної бази для систем 5G, а наприкінці 2016 року компанія Qualcomm презентувала перший комерційний мобільний модем із підтримкою цього стандарту.

1.2 Основні стандартизуючі організації п'ятого покоління

Процес повної стандартизації технологій п'ятого покоління тривав до 2021 року. На початкових етапах розвитку концепція 5G об'єднувала переважно фрагментовані рішення, які розгорталися в різних країнах у межах локальних тестових зон, що не дозволяло повною мірою реалізувати специфікації глобального стандарту IMT-2020.

Задля забезпечення синхронізації та узгодженості міжнародних зусиль було залучено профільні інституції, ключовою з яких став консорціум 3GPP, що об'єднує сім регіональних організацій зі стандартизації. Стратегічною метою 3GPP є розробка специфікацій, верифікація проєктів та затвердження єдиних телекомунікаційних стандартів.

Еволюція нормативної бази 5G відбувалася за такими етапами. Специфікація Release 15 (середина 2017 року) – задекларувала базову архітектуру мережі. Перший практичний етап розробки технічних умов у межах цього релізу завершився з річним запізненням лише у другій половині 2018 року. Специфікація Release 16 (другий етап) – спочатку планувався до впровадження на грудень 2019 року, проте через технічні узгодження терміни фіналізації архітектури автономного (SA) та неавтономного (NSA) режимів 5G було перенесено на третій квартал 2020 року. Ці кроки заклали основу для завершення глобальної стандартизації у 2021 році [4].

Окрім проектування загальної архітектури, консорціум 3GPP відповідає за розробку специфікацій радіоінтерфейсу 5G NR (New Radio), адаптованого під нові частотні діапазони. Найбільш активно у цьому процесі бере участь Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (European Telecommunications Standards Institute, ETSI), який є повноправним членом 3GPP.

Важливу роль у формуванні мережевої інфраструктури відіграє Інженерна група з розвитку Інтернету (Internet Engineering Task Force, IETF). Вона розробляє рішення для модернізації IP-протоколів з метою підтримки технології віртуалізації мережевих функцій (Network Functions Virtualization, NFV). Зокрема,

розроблена IETF технологія побудови ланцюжків сервісних функцій (Service Function Chaining, SFC) дозволяє об'єднувати віртуалізовані компоненти архітектури 5G (базові станції, сервісні шлюзи тощо) в єдині маршрути. Це забезпечує можливість динамічного розгортання та інтеграції функцій віртуальної мережі (Virtual Network Functions, VNF).

Координацію телекомунікаційних стандартів на глобальному рівні здійснює Міжнародний союз електрозв'язку (International Telecommunication Union, ITU) – спеціалізована установа ООН. ITU відповідає за розподіл і спільне використання високочастотного спектра, необхідного для функціонування 5G. Водночас європейська ініціатива 5G-PPP сформувала цільові критерії для мереж нового покоління, серед яких:

- збільшення ємності мережі у 1000 разів;
- зниження енергоспоживання абонентських терміналів на 90%;
- максимальне скорочення термінів впровадження нових сервісів;
-забезпечення повного безшовного покриття та мінімального рівня затримок (Latency).

Уніфікацією рішень займається Альянс мобільних мереж наступного покоління (Next Generation Mobile Networks, NGMN), який об'єднує найбільших операторів США (зокрема AT&T, U.S. Cellular та Verizon). Вагомий внесок у цей процес роблять також регіональні об'єднання, такі як 5G Americas та Small Cell Forum. Варто зазначити, що провідні телекомунікаційні гіганти часто випереджають офіційні інституції, розгортаючи власні технологічні рішення, які згодом лягають в основу офіційних стандартів ETSI та ITU [14, 15].

1.3 Принцип роботи 5G

Телекомунікаційні мережі 5G проектуються як гетерогенні структури. Їхня архітектура базується на ієрархічній моделі стільників різного радіуса дії (макро-, мікро-, піко- та фемтостільники), які інтегрують різнорідні технології радіодоступу. Така конфігурація дозволяє абонентським терміналам реалізовувати концепцію агрегації каналів, тобто одночасно використовувати кілька різних радіотехнологій для передачі та прийому інформаційних потоків.

Мережева архітектура 5G функціонує на базі концепції хмарних обчислень (Cloud Computing,CC) і структурно поділяється на три ключові площини (підсистеми):

Access Plane (площина доступу) – реалізує гнучке поєднання розподілених та централізованих топологій радіодоступу;

Control Plane (площина управління) – відповідає за виконання глобальних функцій адміністрування, сигналізації та оркестрації мережевих ресурсів;

Forwarding Plane (площина передачі даних) – забезпечує безпосереднє транспортування користувацького трафіку із застосуванням алгоритмів динамічного балансування навантаження.

Важливим складником системи є радіоінтерфейс, під яким розуміють сукупність протоколів та процедур, що регламентують порядок встановлення з'єднань і безпосередню організацію зв'язку по радіоканалу між базовою та мобільною станціями. У стандарті 5G «Нове радіо» (5G New Radio, 5G NR) досягнуто значного зростання спектральної ефективності (орієнтовно втричі порівняно з технологією LTE). Завдяки впровадженню передових методів модуляції та багатоантенних систем (Massive MIMO), цей показник у пікових режимах сягає 60 біт/с на 1 Гц, що гарантує надвисоку пропускну здатність каналів зв'язку [5].

Функціонування радіоінтерфейсу 5G базується на кількох фундаментальних технологічних рішеннях:

- багатостанційний доступ на основі розріджених кодів, який оптимізує використання частотного ресурсу(Sparse Code Multiple Access, SCMA);

- фільтроване мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів, що мінімізує міжканальні завади (Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing, F-OFDM);

- полярні коди (Polar Codes), високоефективні алгоритми завадостійкого кодування для каналів керування.

Архітектурна модель попередніх поколінь зв'язку створювалася переважно для передачі голосового трафіку та обслуговування традиційного мобільного широкосмугового доступу (Mobile Broadband, MBB). Така топологія не має достатнього рівня гнучкості для підтримання різнорідних сервісів 5G. Як наслідок, проектування мереж нового покоління вимагає врахування таких концептуальних аспектів. Розбудова складних високошвидкісних гетерогенних мереж, які інтегрують різноманітні стандарти, типи мережевих вузлів та сценарії

надання послуг. Забезпечення надійної координації мультисервісних технологій для одночасного обслуговування різних класів трафіку. Впровадження гнучкої архітектури мережевих функцій на основі технологій віртуалізації (SDN/NFV). Максимальне скорочення термінів розгортання та конфігурування мережевої інфраструктури. Паралельно із розвитком систем 5G було інтегровано низку інноваційних рішень. Серед них варто виділити системи надбагатоантенного приймання та передавання даних (Massive MIMO), освоєння високочастотного міліметрового діапазону (mmWave), а також нативну (вбудовану) підтримку мультитехнологічності. На сьогодні масове впровадження систем зв'язку 5G виступає драйвером цифрової трансформації та дозволяє багатьом країнам здійснити технологічний прорив у більшості галузей економіки [9].

Представлена на рисунку 1.1 схема ілюструє комплексну топологію побудови мережевої інфраструктури 5G, адаптовану для географічних умов України. Архітектура має чітко виражений гетерогенний характер та ієрархічно розділена на три територіальні рівні адміністрування:

- рівень міста / муніципального утворення (із затримкою сигналу 5–10 мс);
- рівень області (із затримкою сигналу 50 –75 мс);
- глобальний рівень суб'єктів України (із затримкою сигналу 100 –300 мс).

Загальну концептуальну схему побудови мережі 5G ілюструє рисунок 1.1:

1) Клієнтський сегмент (User Equipment, UE).

У лівій частині схеми відображено кінцеві пристрої користувачів (UE), диференційовані за типами сервісів у межах концепції Інтернету речей (IoT) та широкосмугового доступу:

- міжмашинна взаємодія для безпілотного або підключеного транспорту (Vehicle-to-Everything, V2X);
- приладдя масового інтернету для датчиків та сенсорів (Massive Internet of Things, MIoT);
- покращений мобільний широкосмуговий доступ для передачі значних обсягів медіатрафіку (Enhanced Mobile Broadband, eMBB);
- наднадійний зв'язок із низькою затримкою для критично важливих систем (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC).

2) Мережа радіодоступу (Next-Generation Radio Access Network, NG-RAN). Абонентські термінали взаємодіють із базовими станціями нового покоління – gNB. На локальному міському рівні розгортається локальна спільна мережа

зв'язку (СПД), що дозволяє інтегрувати функції обробки трафіку близько до кінцевого користувача (концепція Edge Computing).

3) Ядро мережі 5G (5G Core Network, 5GC) та функції управління.

Віртуалізована архітектура ядра мережі базується на сервісному підході (SBA), де на кожному рівні функціонують ключові програмні модулі. Зокрема, функція управління доступом та мобільністю (AMF) координує підключення користувачів, тоді як функція управління сесіями (SMF) відповідає за створення та підтримку користувацьких з'єднань. Безпосередню маршрутизацію та пересилання пакетів даних виконує функція площини користувача (UPF), розподіл якої між локальним, відомчим та центральним рівнями на схемі дозволяє суттєво оптимізувати маршрути трафіку. Ці процеси підтримуються комплексом централізованих модулів, серед яких NSSF відповідає за вибір слайсів, AUSF та UDM забезпечують автентифікацію та верифікацію даних абонентів, а NRF та PCF функціонують як репозиторій мережевих функцій і засіб керування політиками безпеки.

4) Мережевий слайсинг (Network Slicing).

Головною особливістю схеми є поділ єдиної фізичної інфраструктури на логічні ізольовані канали (складанні рівні), позначені різними кольорами:

Мережевий рівень URLLC (червоний колір) – замикається переважно на локальних мережах та локальних центрах обробки даних (ЦОД) для забезпечення мінімального піку затримок (5–10 мс);

Мережевий рівень eMBB (зелений колір) – маршрутизується через внутрішні мережі оператора до глобального Інтернету, хмарних сервісів та OTT-платформ;

Мережевий рівень MIoT (синій колір) – координує збір телеметрії із виходом на спеціалізовані сервіси MCPTT (Mission Critical Push-to-Talk) та платформи промислового інтернет-приладдя.

Для підвищення надійності системи на загальнодержавному рівні реалізовано географічне резервування: архітектура включає Основний Центр обробки даних та дублюючий резервний ЦОД, що гарантує безперебійне функціонування мережі 5G у разі критичних збоїв інфраструктури [5].

П’яте покоління мобільного зв’язку (5G) функціонує на базі новітніх телекомунікаційних стандартів, які є еволюційним продовженням технології LTE.

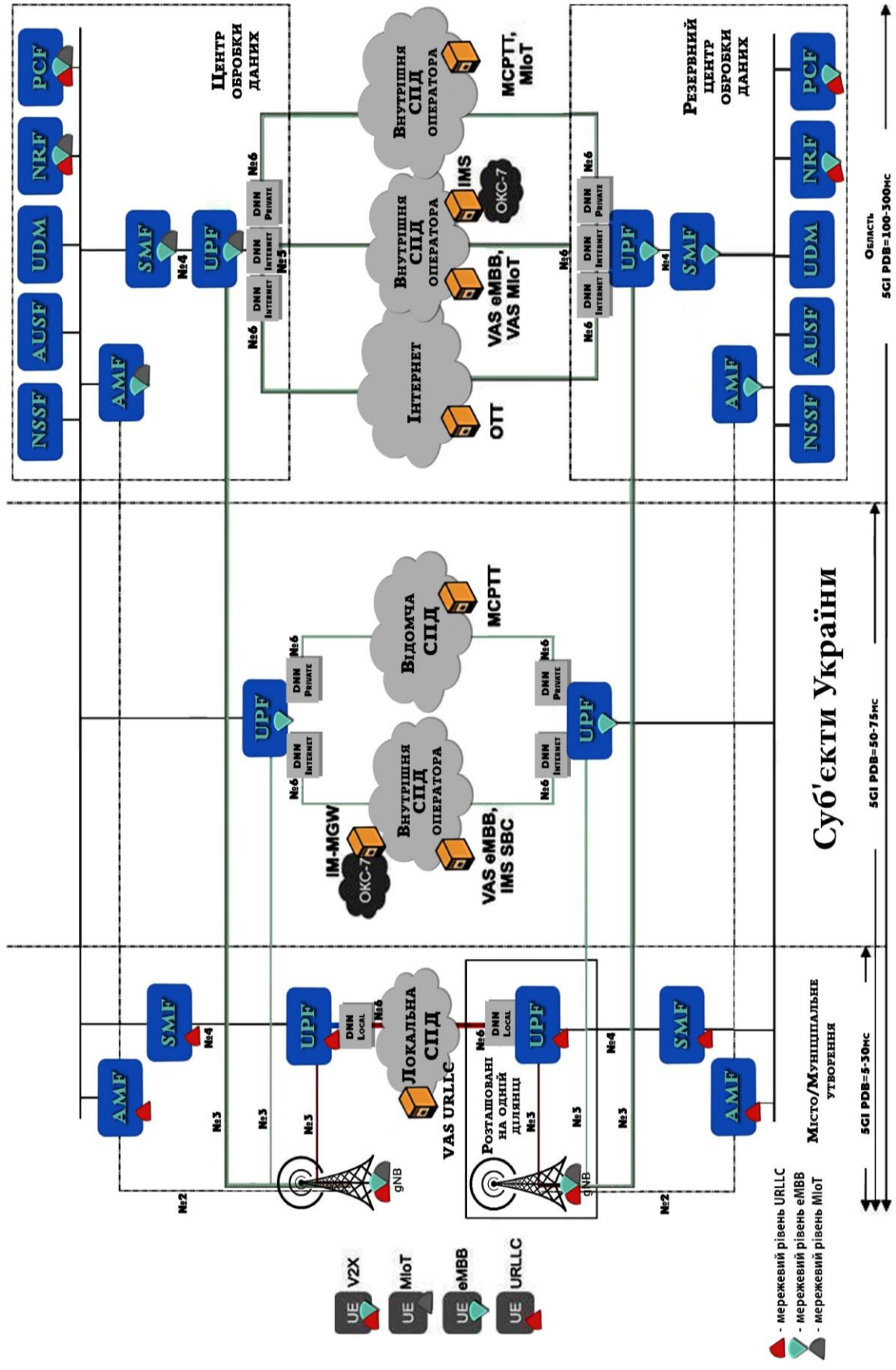


Рисунок 1.1 – Схема побудови мережі 5G

Кардинальне збільшення швидкості передачі даних та пропускної здатності мережі досягається насамперед завдяки переходу у вищі частотні діапазони, які раніше не задіювалися у мобільних мережах попередніх генерацій (зокрема, у міліметровий спектр mmWave).

Для порівняння, робочі частоти побутових мереж Wi-Fi становлять 2,4 або 5 ГГц, а більшість діючих мереж LTE функціонують у діапазонах до 2,6 ГГц. Натомість технологія 5G передбачає освоєння міліметрового спектра (mmWave), що вимірюється десятками гігагерц. Це забезпечує значне зростання швидкості інформаційного обміну та дозволяє розвантажити мережеву інфраструктуру. Водночас фізика поширення міліметрових хвиль зумовлює їхнє стрімке загасання при проходженні через перешкоди, що вимагає кардинальної зміни архітектури мережі. Замість традиційного розгортання поодиноких великогабаритних базових станцій із великим радіусом дії, виникає потреба у щільному встановленні компактних малопотужних приймально-передавальних модулів (Small Cells).

Специфікації 5G передбачають роботу у трьох основних частотних діапазонах. Низькочастотний спектр (Sub-1 GHz) охоплює частоти нижче 1 ГГц. Його головною перевагою є максимальний радіус покриття та висока проникна здатність радіохвиль. Проте суттєвим недоліком є обмежена смуга пропускання, через що пікова швидкість передачі даних не перевищує 100 Мбіт/с.

Середньочастотний спектр (Mid-Band/C-Band) забезпечує оптимальний баланс між площею покриття, затримкою сигналу та пропускною здатністю з очікуваною піковою швидкістю до 1 Гбіт/с. Проте він має гірші показники проникнення всередину будівель порівняно з низькими частотами. Для компенсації цього недоліку оператори впроваджують технологію надбагатоантенних систем (Massive MIMO), яка об'єднує велику кількість антенних елементів в одному масиві. Це дозволяє реалізувати метод динамічного формування променів (Beamforming), за якого замість широкого мовлення створюються вузькоспрямовані сфокусовані сигнали для кожного окремого абонента з безперервним трекінгом його просторового положення.

Високочастотний спектр (High-Band/mmWave), цей діапазон асоціюється з максимальним потенціалом 5G, забезпечуючи пікову швидкість до 10 Гбіт/с та наднизький рівень затримок. Ключовим недоліком високочастотного спектра залишається мінімальний радіус дії базових станцій та нездатність сигналу долати навіть незначні фізичні перешкоди, зокрема стіни споруд [9].

1.4 Параметри мереж 5G

Відповідно до специфікацій 3GPP, мережі 5G (IMT-2020) забезпечують пікову швидкість завантаження 20 Гбіт/с та вивантаження 10 Гбіт/с, при цьому затримки для URLLC знижено до 0,5 мс. Технологія підтримує щільність IoT-пристроїв до 1 млн/км², автономність сенсорів до 10 років та стабільний зв'язок при швидкості руху до 500 км/год. [4, 15]

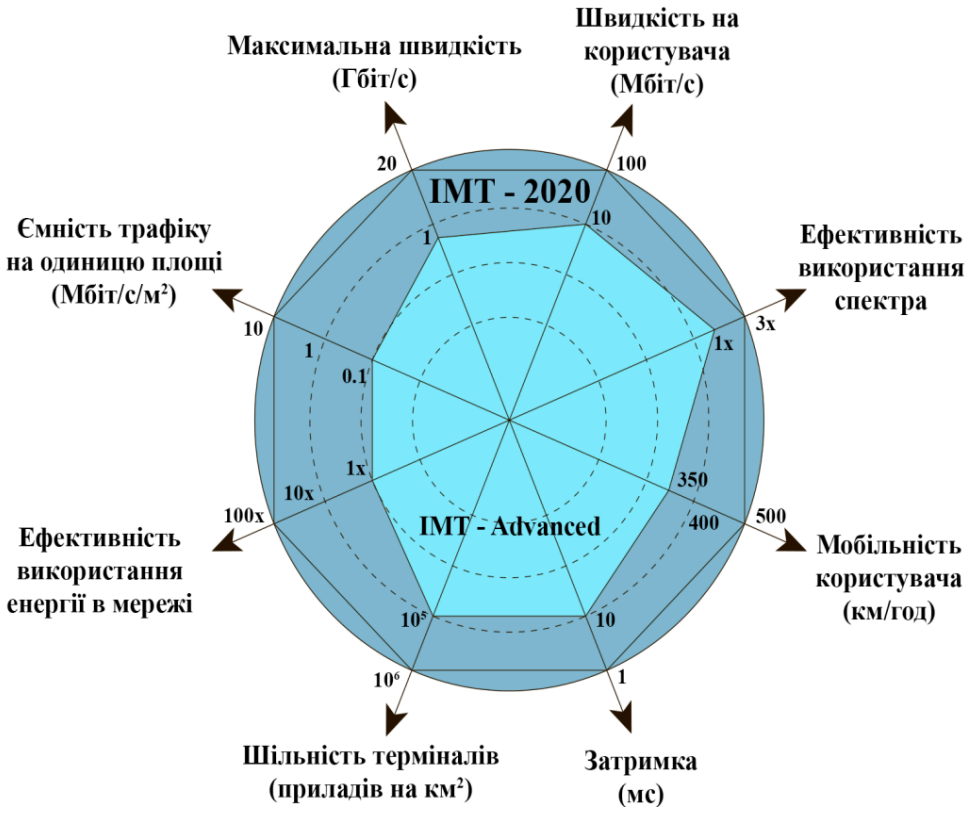


Рисунок 1.2 – Практичні переваги 5G

Представлена на рисунку 1.2 радарна діаграма (павутинна карта) наочно ілюструє якісний та кількісний стрибок технічних характеристик при переході від стандарту IMT-Advanced (4G) до новітнього стандарту IMT-2020 (5G). Порівняльний аналіз проводиться за вісьмома ключовими векторами (індикаторами ефективності KPI), визначеними ITU.

Внутрішній світло-блакитний багатокутник відображає граничні можливості технологій четвертого покоління, тоді як зовнішня темно-синя область демонструє цільові вимоги до архітектури 5G:

- максимальна швидкість (Гбіт/с). Пікова пропускна здатність мережі

зростає у 20 разів – від 1 Гбіт/с у системах 4G до 20 Гбіт/с у мережах 5G, що забезпечується освоєнням нових широкосмугових частотних діапазонів;

- швидкість на користувача (Мбіт/с). Гарантована реальна швидкість передачі даних для кінцевого абонента в умовах стабільного покриття збільшується вдесятеро, досягаючи значень 100 Мбіт/с порівняно з 10 Мбіт/с для попереднього покоління;

- ефективність використання спектра. Цей показник відображає кількість переданих бітів на секунду на один герц частотної смуги. Завдяки впровадженню складніших схем модуляції та технології Massive MIMO, ефективність у мережах 5G зростає у 3 рази відносно базового рівня 4G;

- мобільність користувача (км/год). Забезпечується стабільність радіозв'язку та безперервність хендоверу при високих швидкостях пересування абонента. Стандарт 5G розрахований на підтримку пристроїв, що рухаються зі швидкістю до 500 км/год (наприклад, у швидкісних поїздах), тоді як ліміт 4G становив 350 км/год;

- затримка (мс). Час кругової затримки пакетів у підсистемі радіодоступу (RTT) зменшується критично – в 10 разів. Якщо в мережах IMT-Advanced цей показник становив близько 10 мс, то в архітектурі IMT-2020 він скорочується до 1 мс (а для сервісів URLLC – до 0,5 мс);

- щільність терміналів (приладів на $км^2$). Показує здатність мережі обслуговувати масові підключення без втрати якості. У межах концепції масового інтернет-приладдя (MIoT) щільність зростає на один порядок – від 10^5 пристроїв до 10^6 гаджетів на один квадратний кілометр;

- ефективність використання енергії в мережі. Відображає відношення обсягу переданих даних до спожитої інфраструктурою енергії. Енергетична ефективність мережевого обладнання та абонентських терміналів у стандарті 5G оптимізована у 100 разів порівняно з технологіями 4G;

- ємність трафіку на одиницю площі Мбіт/с/$м^2$. Загальний обсяг даних, який архітектура здатна пропустити через одиницю простору. Цей індикатор демонструє стократне зростання – від 0,1 Мбіт/с/ $м^2$ у системах 4G до 10 Мбіт/с/ $м^2$ у стільниках п'ятого покоління завдяки використанню міліметрових хвиль та ультращільних мереж (Small Cells).

Таким чином, наведена діаграма комплексно доводить, що стандарт IMT-2020 не просто еволюційно нарощує швидкість, а є принципово новою

мультисервісною платформою, оптимізованою під завдання промислової автоматизації, робототехніки та глобального Інтернету приладдя [4].

1.5 Частоти використовувані для нового стандарту

Використання 5G передбачається в різних спектрах частоти. Але в спектрі Sub-6, є труднощі з доступними вільними частотами. Завдяки використанню нізких частот в мережах 5G, можна досягти більш велику площу мережі, так само використання низької частоти не вимагає великих інвестицій. Крім того вони забезпечують добре проникнення радіохвиль всередину приміщення, що є дуже важливим фактором для сценарію з використання мережі Інтернет. Частоти 700 МГц є важливими для системи зв'язку M2M, розумного міста, розумного будинку. Діапазони 3,4 – 3,8 ГГц може бути використаний для особливо надійного з'єднання таких об'єктів, як самокеровані машини, роботи, промислова автоматизація. Очікувано, що в стандарті 5G операторами будуть виділяти безперервні смуги частот 300 – 400 МГц. Високочастотний спектр необхідний для мереж 5G, для досягнення швидкостей передачі даних до 20 Гбіт / с, особливо для надання послуг 3D-відео в форматі UHD, AR/VR, хмарних сервісів для роботи, тактильного Інтернету і т.д. для цієї мети розглядається можливість використання диапозонов 24,25 – 27,5 ГГц і 37 – 43,5 ГГц. Специфікації, розроблені 3GPP визначили нові смуги частот для 5G і поділили їх на два блоки: FR1 (частота до 6 ГГц) і FR2 (частота вище 6 ГГц). Використання більш високої частоти допоможе вирішити проблему, викликану перешкодами в мережі, яких у високому діапазоні набагато менше. Так при використання високої частоти збільшується і ширина радіоканалу, а отже, і збільшиться і швидкість передачі даних. Так передбачається використовувати для блоку FR1 ширину радіоканалу до 100 МГц, а для блоку FR2 – від 50 до 400 МГц. Одже наприклад, в мережах LTE допускається ширина канали тільки 1.4, 3, 5, 10, 15 і 20 МГц [2, 4, 9].

2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЙ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ 5G

2.1 Технології, які використовуються в 5G

Для задоволення постійно зростаючих потреб в бездротового зв'язку було розроблено стандарт 5G під загальною назвою 5G NR. Розробка 5G NR проходила практично з нуля з урахуванням вимог мереж 5G і з використанням кращих технологій. Тому в 5G NR використовується новітня технологія модуляції, формування хвиль і технології радіодоступу (Radio Access Technology, RAT), яка, крім іншого, забезпечує високу швидкість передачі даних і продовжує термін служби батареї для користувача пристроїв 5G. На рисунку 2.1 представлені перехрестні частотні канали з ортогональними несучими [4].



Рисунок 2.1 – Перехрестні частотні канали з ортогональними несучими

Ключовим технологічним базисом радіоінтерфейсу 5G NR – є оптимізована технологія мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів OFDM, яка раніше пройшла успішну апробацію в мережах 4G/LTE-Advanced. Концепція OFDM поєднує в собі процеси модуляції та мультиплексування. На відміну від класичного мультиплексування, що передбачає об'єднання повністю незалежних сигналів з різних джерел, в архітектурі OFDM це завдання

реалізується щодо окремих інформаційних потоків, які є субкомпонентами єдиного базового сигналу.

Фундаментальна відмінність методу OFDM від традиційного розділення радіосигналу по кількох паралельних частотних каналах полягає в забезпеченні ортогональності підносних частот у груповому спектрі сигналу. Фізичний зміст ортогональності базується на інтеграції у структуру кожної підносної спеціального маркера, що визначає унікальний набір синусоїдальних коливань сигналу із фазовим зсувом на 90 градусів (ортогональні функції). Це дозволяє демультиплексору на стороні приймача коректно розділяти інформаційні потоки підносних на основі аналізу цих маркерів навіть за умов часткового взаємного перекриття їхніх частотних спектрів, що суттєво підвищує спектральну ефективність.

У звичайних багатоканальних системах виділення несних частот у загальному спектрі обмежене технологічними можливостями сучасних смугових фільтрів. Це вимагає значного захисного частотного рознесення несних, що суттєво лімітує їхню кількість у заданій смузі частот. Натомість у технології OFDM селекція підносних частот у груповому спектрі під час демультиплексування реалізується за допомогою ортогональних перетворень. Такий підхід дозволяє сусіднім підносним частково перекриватися у частотній області, завдяки чому значно зростає щільність їхнього розподілу та підвищується загальна спектральна ефективність.

Для оптимізації енергоспоживання інфраструктури та збільшення радіуса дії базових станцій впроваджено технологію динамічного формування діаграми спрямованості (Beamforming). Її сутність полягає в адаптивному фокусуванні радіопроменя у напрямку конкретного абонентського термінала. Мережевий вузол фіксує просторово-часові параметри надходження сигналу (враховуючи як прямий промінь, так і багатопроменеві відбиття від навколишніх об'єктів) і за допомогою алгоритмів тріангуляції обчислює просторові координати користувача для побудови оптимальної траєкторії сигналу. Проте безперервний моніторинг стану приймача зумовлює певні відмінності в алгоритмах обробки для фіксованого та мобільного сценаріїв експлуатації, що відображається у специфіці побудови відповідних профілів трафіка. Концептуальний принцип формування адаптивних променів у системах Massive MIMO проілюстровано нижче на рисунку 2.2 [9, 10].

Метод просторового кодування сигналів (Multiple Input Multiple Output, MIMO), який традиційно використовується для збільшення пропускної здатності каналів у мережах Wi-Fi та 4G/LTE, зазнав суттєвої модернізації в архітектурі 5G. Особливого розвитку набув розрахований на багатьох користувачів режим функціонування – MU-MIMO (Multi-User MIMO). Сучасні базові станції нового покоління (gNB) оснащуються фазованими антенними решітками, які складаються з масивної матриці мініатюрних випромінювальних елементів. Така конструкція дозволяє динамічно адаптувати амплітудно-фазовий розподіл поля і фокусувати енергію радіосигналу безпосередньо у напрямку конкретного абонентського термінала. У результаті досягається максимальне підвищення рівня корисного сигналу для цільового користувача при одночасній мінімізації взаємних завад (інтерференції) для інших активних пристроїв у стільнику.



Рисунок 2.2 – Формування променів Beamforming

Технологія формування просторових променів за допомогою антенних комплексів MIMO успішно застосовується в телекомунікаційній індустрії протягом тривалого часу, зокрема у формі активних антенних систем (Active Antenna System, AAS). Впровадження інтегрованих модулів AAS MIMO на базових станціях дозволяє розділити загальну зону покриття на окремі сектори (локальні стільники). Це забезпечує підвищення ефективності використання радіочастотного спектра та збільшення кількості паралельних каналів передачі даних. Проте в умовах прогресуючого перевантаження сучасних телекомунікаційних мереж виникає гостра потреба в переході до алгоритмів динамічного цифрового формування променів (Digital Beamforming), що гарантує гнучкіший та адаптивніший розподіл мережевих ресурсів. Наочне порівняння різних методів формування діаграми спрямованості залежно від архітектури та типу застосовуваних антенних систем представлено нижче на рисунку 2.3 [4, 10].

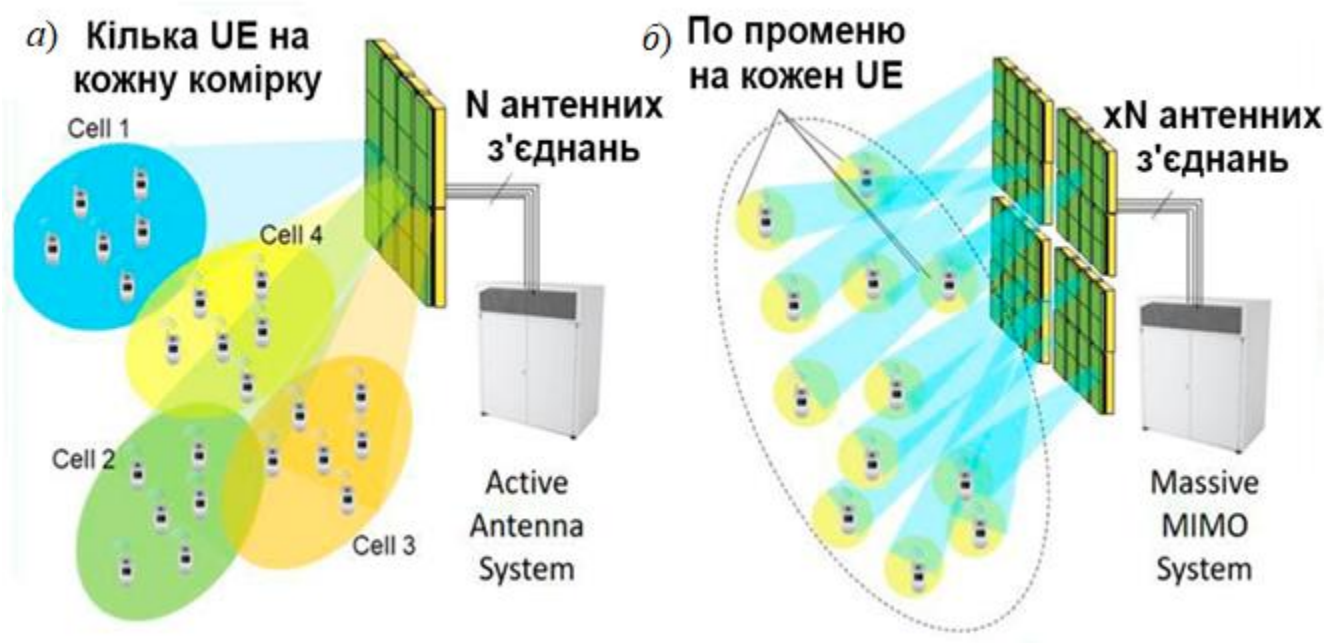


Рисунок 2.3 – 2D MIMO антена (*а*) і Massive MIMO антена (*б*)

Застосування антенних комплексів MIMO у міліметровому діапазоні частот FR2 (Frequency Range 2) набуває особливої актуальності через високу природну спрямованість радіохвиль цього спектра. Це дозволяє суттєво нарощувати кількість дискретних компонентів у межах однієї конструкції. Масив із таких елементів (що налічує 256 або більше одиниць) об'єднується в єдину надбагатоантенну систему Massive MIMO. Завдяки прецизійному адаптивному керуванню фазовими та амплітудними характеристиками сигналів, такий комплекс здатний динамічно формувати велику кількість вузькоспрямованих високоінтенсивних променів, орієнтованих безпосередньо на конкретні абонентські пристрої.

Для подолання проблеми дефіциту та низької ефективності утилізації наявного частотного ресурсу розроблено концепцію спільного використання спектра (Spectrum Sharing). Вона дозволяє динамічно перерозподіляти радіочастоти між різними стандартами зв'язку у режимі реального часу. Крім того, інтеграція великої кількості нових частотних діапазонів в архітектуру 5G NR зумовила потребу в забезпеченні безшовного інтерфейсу взаємодії. Рішенням став уніфікований міжчастотний дизайн (Unified Design Across Frequencies, UDAF), який гарантує стабільне перемикання каналів і безперервність з'єднання під час міжчастотних хендоверів між сусідніми базовими станціями [4, 9].

Ущільнення мережевого покриття у сучасних телекомунікаціях зумовлює необхідність експоненціального збільшення кількості базових станцій. Ефективним інструментом для розв'язання цієї проблеми є впровадження архітектури малих стільників (Small Cells), що є економічно вигідним та низькоенергетичним рішенням з простими алгоритмами монтажу та обслуговування. Завдяки компактним габаритам, приймально-передавальні модулі можна інтегрувати на об'єктах міської інфраструктури, зокрема на опорах вуличного освітлення або фасадах будівель. Мережа 5G забезпечує адаптивну координацію та динамічне перерозподілу навантаження між цими вузлами. У синергії з технологією формування променів (Beamforming), малі стільники гарантують високу гнучкість покриття за мінімального рівня часових затримок.

Інфраструктурний комплекс малих стільників поєднує різнорівневі компоненти – макробазові станції, метростільники (метросоти), розподілені антенні системи (Distributed Antenna Systems, DAS) зовнішнього та внутрішнього розташування, які функціонують як єдине ціле в межах гетерогенної мережі (HetNet). Зважаючи на роботу 5G у високочастотних діапазонах, де радіохвилі не здатні долати архітектурні перешкоди (стіни споруд), а радіус дії окремого стільника обмежений 500 метрами, використання Small Cells набуває критично важливого значення.

Протягом тривалої експлуатації через лавиноподібне зростання запитів до інфраструктури малих стільників у мережах 5G можуть виникати проблеми міжканальної інтерференції та завад. Для вирішення цього завдання та забезпечення якісного покриття всередині багатоповерхових споруд застосовують розподілені антенні системи (DAS). Компактні внутрішні антени, інтегровані з радіоблоками, монтуються безпосередньо у приміщеннях, гарантуючи високі показники відношення сигнал/шум. Важливою перевагою такого підходу є те, що уніфікована інфраструктура базової станції та систем DAS може використовуватися кількома операторами мобільного зв’язку одночасно на засадах технологічного шерингу.

Ефективним доповненням до технології формування променя є використання зондувальних опорних сигналів (Sounding Reference Signal, SRS), які мобільний термінал передає базовій станції. На основі аналізу цих спеціалізованих пакетів даних базова станція отримує точні відомості про поточний стан та якість радіоканалу. Більшість абонентських пристроїв штатно підтримують передачу SRS лише через одну основну антену, що обмежує

можливості базової станції оцінкою параметрів тільки для цього тракту. Проте інтеграція технології вибору передавальної антени (Antenna Switching) дозволяє послідовно зібрати інформацію про характеристики радіоканалу для всіх антенних елементів пристрою [4, 9, 10].

Завдяки цьому базова станція отримує можливість орієнтувати просторовий промінь у напрямку користувацького устаткування (UE) за оптимальною просторовою траєкторією. Практичним результатом такої оптимізації є суттєве зростання швидкості передачі даних, яке в зонах середнього та граничного радіуса дії базової станції може досягати додаткових 40%.

Іншим фундаментальним архітектурним рішенням у мережах 5G є концепція логічного сегментування або мережевого слайсингу (Network Slicing). Цей підхід дозволяє операторам розділити єдину фізичну інфраструктуру на ізольовані віртуальні шари (слайси). Сегментування необхідне для адаптації параметрів мережі 5G під специфічні KPI різних сценаріїв застосування (eMBB, URLLC, mMTC). Проте повноцінна практична реалізація слайсингу стає можливою лише за умови переходу до автономної архітектури ядра мережі нового покоління (5G Core Standalone, 5GC).

2.2 Архітектура опорної мережі 5G

Ключовою особливістю архітектури 5G є відхід від традиційної концепції побудови мережі, що базувалася на жорстко інтегрованих апаратних рішеннях. Через це в науковій та інженерній практиці стандарт 5G часто позиціонують не просто як мережу, а як мультисервісну програмну платформу. На відміну від технологій попередніх поколінь (1G–4G), які розгорталися на спеціалізованому обладнанні, інфраструктура 5G реалізується за допомогою програмних рішень. Базовими стовпами цієї архітектури виступають програмно-конфігуровані мережі (Software Defined Networking, SDN) та технологія віртуалізації мережевих функцій (Network Functions Virtualization, NFV).

Всі ключові вузли та сервіси 5G функціонують у вигляді віртуальних мережевих функцій (Virtual Network Functions, VNF), які виконуються всередині середовища NFV. Сутнісна різниця між цими взаємопов'язаними концепціями полягає в тому, що NFV описує базову технологію віртуалізації, тоді як VNF є безпосереднім програмним модулем (конкретною функцією ядра чи радіодоступу).

Своєю чергою, інфраструктура NFV розгортається на базі фізичних центрів обробки даних (ЦОД), що використовують стандартне обчислювальне обладнання комерційного типу (Commercial Off-The-Shelf, COTS), мінімізуючи капітальні витрати операторів.

Апаратна основа концепції COTS охоплює лише три типи уніфікованих і відносно недорогих пристроїв: стандартні сервери, мережеві комутатори та системи зберігання даних (СХД). Завдяки цьому пропрієтарне обладнання традиційних мереж мобільного зв'язку замінюється віртуалізованими програмними об'єктами, які функціонують у середовищі центрів обробки даних на базі класичних серверних платформ і віртуальних машин. Окрім віртуалізації на рівні гіпервізоров, в архітектурі 5G активно застосовуються технології контейнеризації (Containers) та мікросервісна програмна архітектура, що забезпечує високу гнучкість при розгортанні мережевих функцій.

Паралельно відбувається еволюція топології радіодоступу: класична розподілена архітектура (D-RAN), характерна для мереж 4G, поступово трансформується в централізовану модель C-RAN (Centralized RAN). У рамках стандарту 5G ключові функції радіоінтерфейсу переносяться у хмарне середовище (Cloud RAN) на базі віртуальних обчислювальних потужностей. При цьому критично важливе значення для мінімізації затримок мають технології периферійних обчислень (Edge Cloud, EC і Mobile Edge Computing, MEC), а також концепція туманних обчислень (Fog Computing, FC).

Особливе місце в програмно-конфігурованій інфраструктурі SDN/NFV посідає технологія логічного сегментування мережі, або мережевого слайсингу (Network Slicing). Вона дозволяє на базі єдиного фізичного інфраструктурного ресурсу створювати ізольовані логічні шари (слайси) для різних класів послуг 5G, де кожен сегмент гнучко адаптується під конкретні технології радіодоступу (RAT) та вимоги до середовища передачі даних. Прикладами таких різнорідних сервісів є:

- передача відеопотоків надвисокої чіткості (UHD);

- повнофункціональні голосові послуги нового покоління (5G Voice);

-масовий інтернет речей (mMTC), що об'єднує мільйони автономних датчиків і сенсорів.

Усі ці сервіси функціонують у межах спільної фізичної інфраструктури центральних і периферійних хмарних ЦОД, а також у середовищі туманних обчислень (Fog Computing), необхідних для обслуговування систем Massive IoT та

промислового Інтернету речей (IIoT). Такий підхід забезпечує можливість повторного використання наявної апаратно-програмної інфраструктури, гнучкого перерозподілу її ресурсів і, як наслідок, мінімізації капітальних (CAPEX) та експлуатаційних (OPEX) витрат оператора. [5, 9]

Фундаментальна архітектура мереж п'ятого покоління базується на таких ключових принципах:

1) Декуплінг площин UP та CP – чітке розділення мережевих вузлів на елементи обробки користувацького трафіку (User Plane) та модулі сигналізації й управління (Control Plane), що кардинально підвищує гнучкість масштабування та оперативність розгортання систем;

2) Сервіс-орієнтоване сегментування – диференціація мережевих ресурсів на основі специфіки послуг, що надаються конкретним групам кінцевих користувачів;Програмна віртуалізація: реалізація всіх базових мережевих елементів у вигляді віртуальних функцій (VNF) у середовищі NFV;

3) Гібридний хмарний доступ – підтримання одночасної взаємодії з централізованими та локальними сервісами, що дозволяє суміщати концепції класичних хмарних обчислень (Cloud Computing) та периферійних обчислень (Edge Computing);

4) Уніфікація безпеки – застосування єдиних алгоритмів і процедур автентифікації користувачів незалежно від типу технології доступу до мережі;Архітектура Stateless: підтримка функціонування мережевих модулів без збереження поточного стану з'єднання, за якої обчислювальний ресурс повністю відокремлений від репозиторію збереження даних;

5) Гнучкість роумінгових сценаріїв: реалізація механізмів роумінгу як з обов'язковою маршрутизацією трафіку через домашній сегмент (Home Routed), так і за схемою локального виходу в інтернет (Local Breakout) безпосередньо у гостьовій мережі (VPLMN).

Загальну структурно-функціональну модель архітектури мережі 5G представлено нижче на рисунку 2.4.

2.3 Харктеристика проєктованного регіону

Черкаси є адміністративним центром Черкаської області та району, осередком однойменної міської громади, а також ключовим промисловим вузлом Центрального економічного району України.

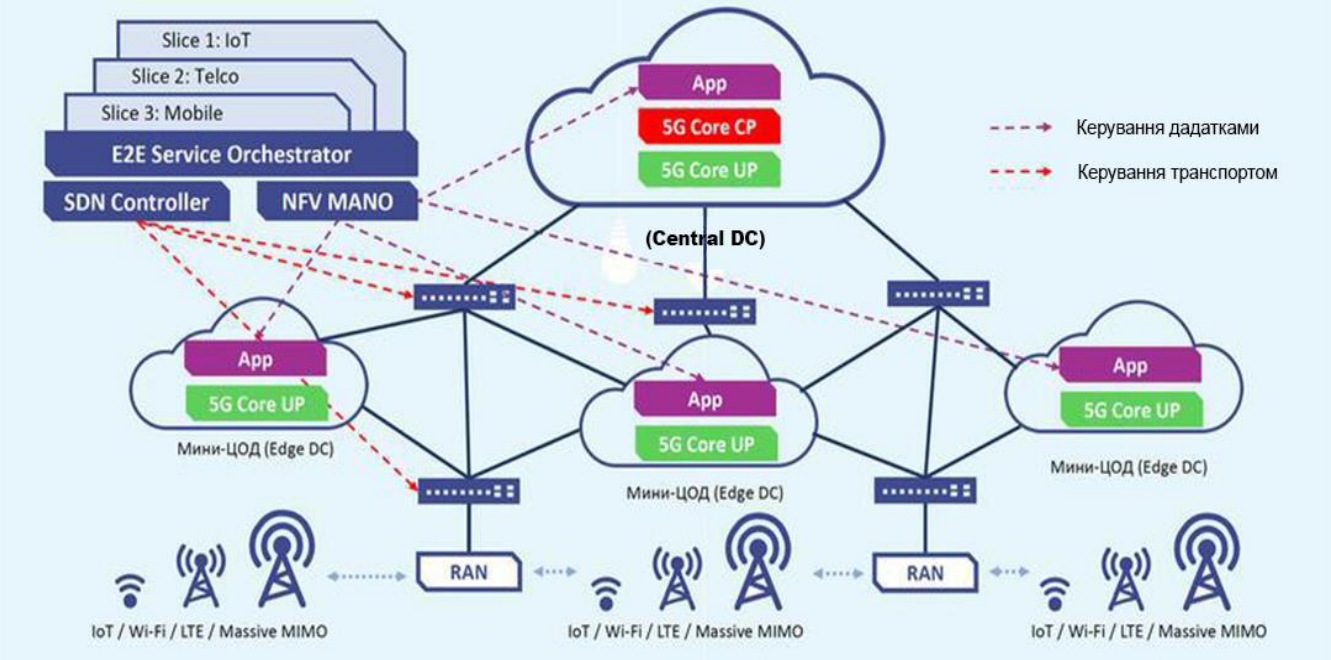


Рисунок 2.4 – Загальна архітектура мережі 5G

Місто, перші згадки про яке датуються XIII століттям, відіграло фундаментальну роль у державотворенні: воно виступало одним із центрів зародження українського козацтва, а його жителі брали активну участь у подіях Хмельниччини та Коліївщини. Новий етап розвитку Черкас розпочався після набуття статусу обласного центру, що перетворило його на потужний індустріальний, культурний та освітній осередок регіону.

Черкаси мають загальну площу 69 км² і розташовані на правому березі Кременчуцького водосховища у середній течії Дніпра, причому місто має витягнуту форму завдовжки 17 км та завширшки до 8 км і адміністративно поділяється на Придніпровський та Соснівський райони разом із селищем Оршанець [1].

Демографічна ситуація в місті Черкаси характеризується стійкою тенденцією до депопуляції, що чітко простежується з 2014 року. Якщо під час Всеукраїнського перепису 2001 року чисельність населення становила 295,4 тисячі громадян, а у 2005 році – 293 271 особу (із розподілом 141 737 мешканців у Придніпровському та 151 534 у Соснівському районах), то на початку 2022 року цей показник скоротився до 269 836 осіб, що на 2815 осіб менше за попередній річний період. Статус великого густонаселеного ділового та економічного центру зумовив високий рівень розвитку місцевих засобів масової інформації,

представлених насамперед друкованими періодичними виданнями та розгалуженою мережею FM-радіостанцій, які переважно здійснюють ретрансляцію загальнонаціональних мовників.

На сучасному етапі Черкаська область функціонує як індустріально-аграрний регіон із домінуючою роллю обробної промисловості, яка за класифікатором видів економічної діяльності забезпечує 86,9% загального виробництва, тоді як на видобувну галузь припадає 2,2%, а на сектор генерації та розподілу електроенергії, газу й води – 10,9%. У структурі промислового комплексу найбільшу питому вагу мають харчова індустрія разом із переробкою сільськогосподарської сировини (39,9%), а також хімічна та нафтохімічна галузі (29,6%), тоді як частка машинобудування становить 2,5%, а легкої промисловості – 1,5%. Перспективна стратегія розвитку економіки регіону орієнтована на глибоку реструктуризацію та технологічне переозброєння наявних потужностей підприємств, що виключає необхідність освоєння додаткових територіальних ресурсів. [1, 16, 17]

Промисловий потенціал Черкаської області забезпечується функціонуванням близько 400 великих і середніх підприємств, загальна чисельність персоналу на яких перевищує 50,0 тисяч працівників. У загальнодержавному масштабі регіон утримує лідируючі позиції за обсягами виробництва мінеральних добрив, автомобільних транспортних засобів (автобусів), фармацевтичних препаратів та текстильної продукції (тканин).

Аналіз динаміки індустріального виробництва за звітний період засвідчив позитивне зростання показників порівняно з попередніми аналогічними етапами. Зокрема, найвища інтенсивність розвитку зафіксована у добувній промисловості та розробленні кар’єрів, де обсяги збільшилися на 26,0%. Крім того, приріст демонструють підприємства машинобудівного сектора (на 10,3%), металургійного виробництва та виготовлення металевих виробів (на 1,9%), деревообробної, паперової та поліграфічної галузей (на 1,7%), а також фармацевтичного сегмента (на 0,8%). Загальний обсяг реалізованої промислової продукції, робіт та послуг підприємствами Черкащини склав 83,8 млрд грн, що відповідає 2,6% від загальноукраїнського індустріального обороту і закріплює за регіоном 10 місце в загальнодержавному рейтингу областей. Порівняльний індекс промислового виробництва графічно відображено нижче на рисунку 2.5.

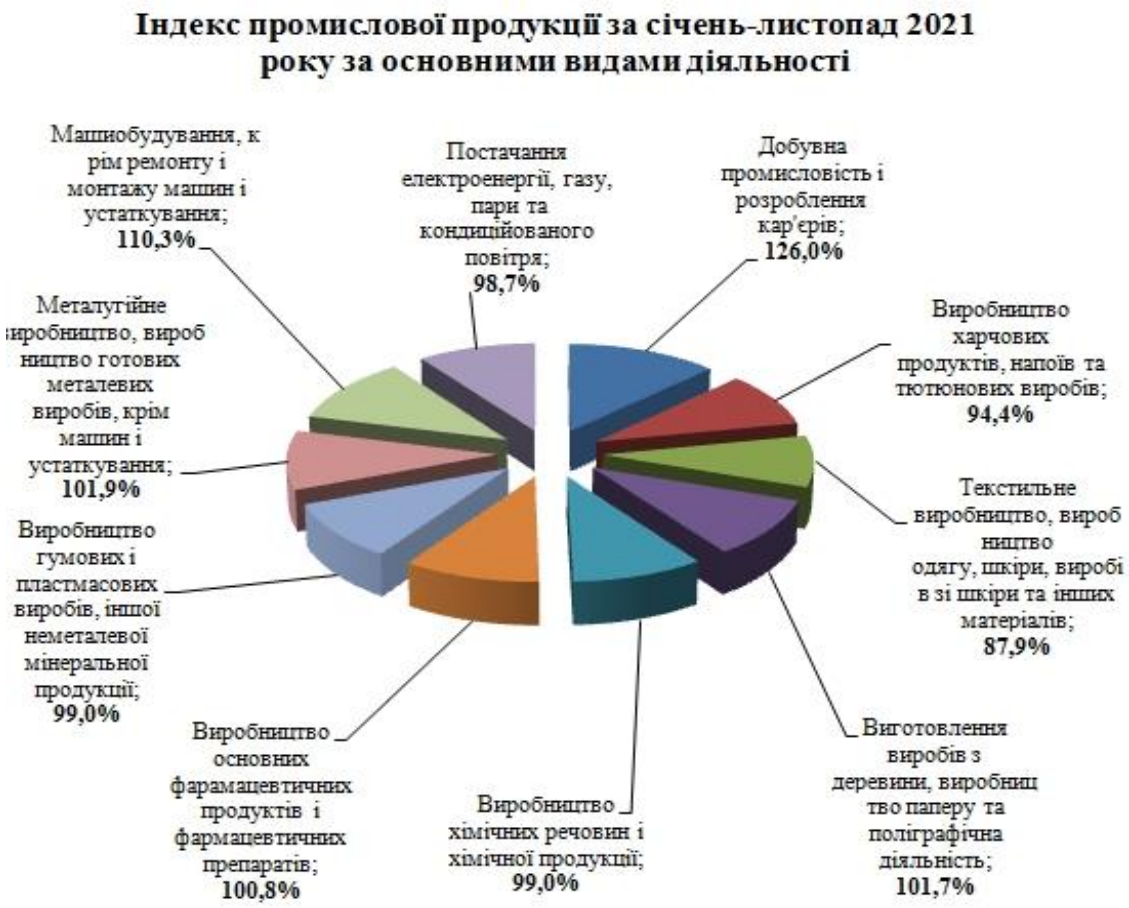


Рисунок 2.5 – Індекс промислової продукції

У січні-листопаді 2021 року в переробній промисловості реалізовано 83,5 % від загального обсягу реалізованої промислової продукції по області.

З поміж видів діяльності переробної промисловості найбільш значимими за обсягами є: виробництво харчових продуктів та напоїв, підприємствами якого реалізовано 54,8 % продукції області; постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря – 14,6 %; виробництво хімічних речовин і хімічної продукції – 5,8 %; виробництво основних фармацевтичних продуктів і фармацевтичних препаратів – 6,1% [16, 17].

Серед промислових підприємств області найбільшу частку в обсягах реалізації промислової продукції мають: ПрАТ «Азот», ТОВ «Юрія-ФАРМ», ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат», ТОВ «ММ Пекеджінг Україна», ПАТ «Черкаський автобус», ТОВ «Укравіт сайенс парк», ТОВ «Ергопак».

Збереження, модернізація та подальше нарощування індустріального потенціалу регіону виступають стратегічними пріоритетами діяльності обласної

державної адміністрації. Структурний розподіл окремих галузей у загальнообласних обсягах реалізованої продукції графічно відображено нижче на рисунку 2.6.

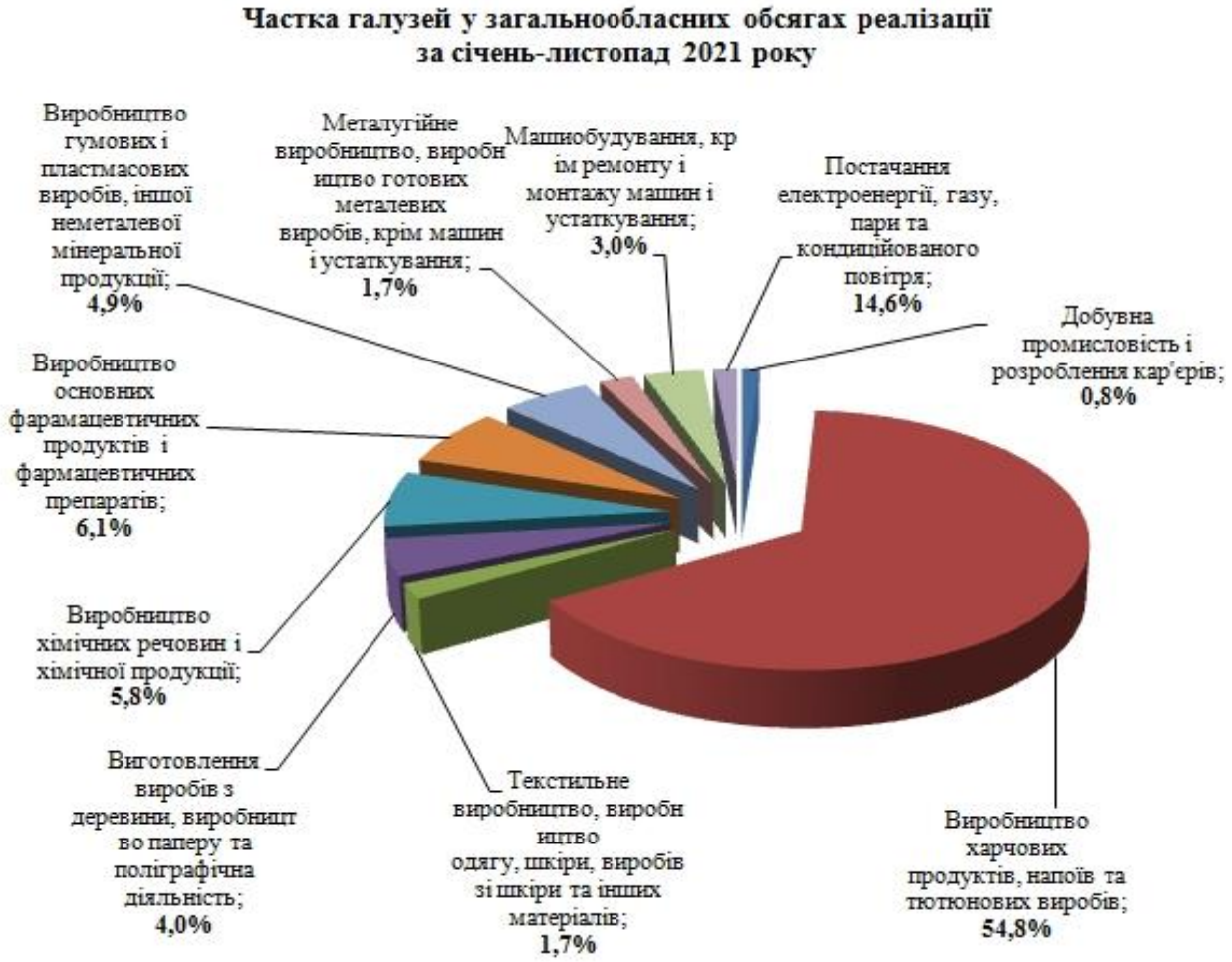


Рисунок 2.6 – Частка галузей у загальнообласних обсягах реалізації

Важливим чинником функціонування промисловості є стан паливно-енергетичного комплексу. Ретроспективний аналіз свідчить, що фактична генерація електроенергії у Черкаській області (на прикладі базового періоду) складала 2,1 млрд кВт·год при загальному внутрішньому споживанні на рівні 3,1 млрд кВт·год. У структурі регіональної генерації найбільша питома вага припадає на Канівську ГЕС, яка забезпечує 55,7% виробництва, тоді як другим за потужністю суб'єктом є Черкаська ТЕЦ із часткою 40,2%. Наведені показники підтверджують, що Черкаська область належить до категорії енергодефіцитних регіонів України, що потребує імпорту потужностей із суміжних енергосистем.

У межах методологічного обґрунтування роботи варто зазначити, що через тривалі бойові дії на території України офіційна профільна статистика за період 2022–2026 років відсутня у відкритому доступі. З огляду на це, під час моделювання та розрахунків були застосовані верифіковані вихідні дані за 2020–2021 роки.

Для точного просторового проектування телекомунікаційних мереж визначено географічні та лінійні параметри об'єкта. Протяжність адміністративних кордонів міста Черкаси у меридіональному напрямку (з півночі на південь) становить 13 км 229 м, а у широтному (із заходу на схід) — 14 км 808 м. Математична локалізація об'єкта проектування визначається такими географічними координатами: 49°25′52″ північної широти та 32°2′57″ східної довготи.

3 МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ТИПОВОЇ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

3.1 Планування мереж 5G в сучасних умовах

Процес проектування телекомунікаційних мереж п'ятого покоління має принципові відмінності від методологій, що застосовувалися для стандартів попередніх генерацій, що зумовлено кардинальною трансформацією архітектури та обладнання. Сучасна організація інфраструктури 5G орієнтована на пріоритетне використання гнучких програмних комплексів замість вузькоспеціалізованих апаратних засобів, внаслідок чого обробка інформаційних потоків у центрах обробки даних повністю переходить у віртуалізоване середовище.

На ранніх стадіях розгортання мереж наступного покоління базовим критерієм проектування є досягнення максимальної зони покриття при обов'язковому забезпеченні нормативної ємності мережі. Проте виконання цих вимог часто має взаємозаперечний (компромісний) характер через фізичні особливості поширення радіохвиль. Зокрема, в умовах щільної міської забудови радіус дії окремого стільника суттєво обмежується, але за рахунок високої щільності базових станцій вдається підтримувати значну пропускну здатність каналів. Натомість у приміських та сільських зонах спостерігається зворотна тенденція: одна базова станція забезпечує покриття великих територій, проте сумарна пропускна здатність і швидкість передачі даних для кінцевих абонентів є значно нижчими. З огляду на це, сучасне радіопланування мереж 5G базується на інтеграції кількох альтернативних інженерних підходів.

У сучасній практиці радіопланування виділяють п'ять базових концептуальних підходів до розгортання мереж п'ятого покоління:

1) Автономне проектування («з нуля»): передбачає будівництво повністю незалежної інфраструктури (Standalone, SA) на нових територіях без прив'язки до діючих мереж попередніх поколінь. В умовах України з її значною площею та капіталомісткістю такий підхід визнано економічно недоцільним на початкових етапах.

2) Поетапна модернізація на базі інфраструктури 4G/LTE: базується на неавтономній архітектурі (Non-Standalone, NSA) з максимальним інтегруванням

чинних мереж четвертого покоління. Першочерговий акцент робиться на локальному нарощуванні ємності шляхом встановлення базових станцій gNB у зонах із надвисокою концентрацією трафіку (Hotspots), тоді як завдання суцільного покриття вирішується поступово. Даний сценарій мінімізує початкові капіталовкладення, що є оптимальним для вітчизняного телекомунікаційного ринку.

3) Рефармінг та модернізація інфраструктури 3G: передбачає повне технологічне заміщення застарілих систем 3G/HSPA на обладнання стандарту 5G з одночасним системним оновленням програмного забезпечення та капітальною модернізацією транспортної мережі (Backhaul). Попри високу вартість і потребу в значних разових інвестиціях, цей варіант є перспективним через постійне зниження експлуатаційної цінності мереж третього покоління та загальносвітовий тренд щодо їхнього повного виведення з експлуатації.

4) Створення єдиного національного інфраструктурного оператора: модель передбачає побудову уніфікованої мережі (за автономним або неавтономним принципом), послуги якої чинні комерційні оператори купують на засадах віртуального партнерства (MVNO). Ключовими деструктивними чинниками цього підходу є неготовність нормативно-правової бази, нівелювання ринкових механізмів конкуренції, ризик монопольного завищення тарифів та відсутність у провайдерів внутрішніх стимулів до технологічного розвитку.

5) Спільне будівництво та шеринг мереж (Network Sharing): базується на консолідації зусиль кількох операторів, яким держава видає спільні ліцензії на використання частотного спектра. Даний підхід є найбільш імовірним для практичної реалізації, оскільки дозволяє диверсифікувати фінансові ризики та скоротити капітальні витрати (CAPEX) кожного учасника проекту більш ніж удвічі, що підтверджується успішним міжнародним досвідом. [9, 16]

Процес інженерного проектування телекомунікаційної мережі охоплює кілька послідовних етапів. На підготовчому етапі здійснюється попереднє моделювання та визначається конфігурація необхідних ресурсів майбутньої інфраструктури на основі вихідних даних про цільову ємність, контури зон покриття базових станцій та специфіку території. Наступний, номінальний етап передбачає деталізоване планування із застосуванням спеціалізованих розрахункових методів. Він включає калібрування моделі поширення радіохвиль, визначення критичних параметрів запланованого ресурсу, формування детального плану радіомережі з урахуванням знайдених граничних значень, а також

поглиблений аналіз профілів трафіка та верифікацію швидкостей передачі даних. Завершальним етапом є дефініція ключових показників ефективності (KPI) та системних параметрів планування. Тут за допомогою лічильників базових станцій регламентуються цільові метрики з урахуванням архітектурних особливостей обладнання конкретного вендора, здійснюється моніторинг KPI у контрольних точках та проводиться комплексна оптимізація параметрів радіоінтерфейсу як до, так і після комерційного запуску мережі в експлуатацію.

Архітектурна модель мереж LTE оптимізована для забезпечення ефективної обробки пакетного трафіку з підтримкою безшовної (Seamless) мобільності, мінімального рівня затримок пересилання пакетів та високих стандартів якості обслуговування (QoS). Мобільність користувачів реалізується у формі дискретної мобільності (роумінгу) та безперервної мобільності (хендовера). Оскільки мережі LTE мають підтримувати процедури інтеграції та хендовера з усіма наявними стандартами зв'язку, для абонентських терміналів формується безперервне покриття широкосмугового доступу. Повністю пакетна технологія передачі дозволяє надавати весь спектр мультимедійних послуг, включно з інтеграцією користувацького голосового трафіку (VoLTE). На відміну від мереж попередніх поколінь із високим ступенем ієрархічності та різнотипності вузлів, архітектура LTE характеризується «плоскою» топологією. Практично вся мережева взаємодія та обмін сигнальним трафіком відбуваються між двома ключовими компонентами: базовою станцією нового типу (Evolved Node B, eNodeB) та блоком управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME). Останній виконує функції головного керуючого контролера і для оптимізації маршрутів передачі даних часто інтегрується з системними шлюзами S-GW/P-GW у єдині комбіновані вузли.

Зазначимо, що контролер радіомережі, який відігравав вельми значну роль у мережах попередніх поколінь, усунутий від керування потоком даних (фактично його навіть немає у структурних схемах), а його традиційні функції – керування радіоресурсами, стиснення заголовків, шифрування, надійна доставка пакетів та ін. передані безпосередньо БС.

Блок управління мобільністю (MME) оперує виключно службовою інформацією (трафіком сигналізації), завдяки чому через нього не проходять користувацькі IP-пакети. Перевага такого відокремлення сигналізаційного модуля полягає в можливості незалежного масштабування пропускної здатності як для службових даних, так і для користувацького трафіку. До базового функціоналу

MME належить адміністрування абонентських терміналів (UE), які перебувають у режимі очікування (Idle Mode), зокрема координація процедур пейджингу (переспрямування викликів), авторизація, автентифікація, контроль роумінгу й хендовера, а також ініціалізація сигнальних і користувацьких каналів.

Серед елементів шлюзової інфраструктури ядра мережі чітко диференційовано два вузли: обслуговуючий шлюз (Serving Gateway, S-GW) та шлюз пакетної мережі (Packet Data Network Gateway, P-GW). Модуль S-GW здійснює комутацію та пересилання пакетів даних, що маршрутизуються до відповідних базових станцій eNodeB та обслуговуваних ними абонентських пристроїв, виконуючи роль локального анкера мобільності. Своєю чергою, P-GW забезпечує безпосередній інтерфейс взаємодії між внутрішньою інфраструктурою радіодоступу та зовнішніми пакетними мережами (наприклад, Інтернетом). На цей шлюз покладено функції IP-маршрутизації, динамічного розподілу IP-адрес, фільтрації пакетів та реалізації політик тарифікації й якості обслуговування (QoS).

В основу проектування архітектури LTE, за аналогією з системами третього покоління, покладено принцип чіткого розмежування фізичної реалізації мережевих блоків та формування функціональних зв'язків між ними. Концептуально фізична реалізація описується через категорії областей (Domains), тоді як логічні зв'язки розглядаються в межах функціональних шарів (Strata). На фізичному рівні архітектура первинно поділяється на область користувацького обладнання (User Equipment Domain, UED) та область мережевої інфраструктури (Infrastructure Domain, ID). Останній інфраструктурний комплекс структурно розгалужується на підсистему радіодоступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) та ядро базової пакетної мережі (Evolved Packet Core, EPC).

Користувацьке обладнання (User Equipment, UE) являє собою сукупність абонентських терміналів із різними рівнями функціональних можливостей, які застосовуються для доступу до широкого спектра послуг мережі LTE. При цьому в ролі користувацького пристрою може виступати як безпосередній абонент, який споживає, наприклад, послуги голосового зв'язку, так і автономний міжмашинний модуль (M2M/IoT), призначений для автоматичного приймання та передавання даних спеціалізованих мережевих чи прикладних за стосунків [5, 9].

Наведена нижче на рисунку 3.1 узагальнена структура мережі LTE наочно демонструє розподіл функціональних зв'язків на два ключові рівні (шари) сигналізації:

- шар радіодоступу (Access Stratum, AS), регламентує протоколи взаємодії безпосередньо через радіоканал між абонентським терміналом та базовою станцією eNodeB;

- шар поза радіодоступом (Non-Access Stratum, NAS), забезпечує обмін сигнальними повідомленнями вищого рівня між терміналом користувача та ядром мережі (MME), минаючи базову станцію.

Відображені на архітектурній схемі (рисунок 3.1) овали зі стрілками позначають стандартизовані інтерфейси та точки доступу до відповідних мережевих послуг (Service Access Points, SAP).

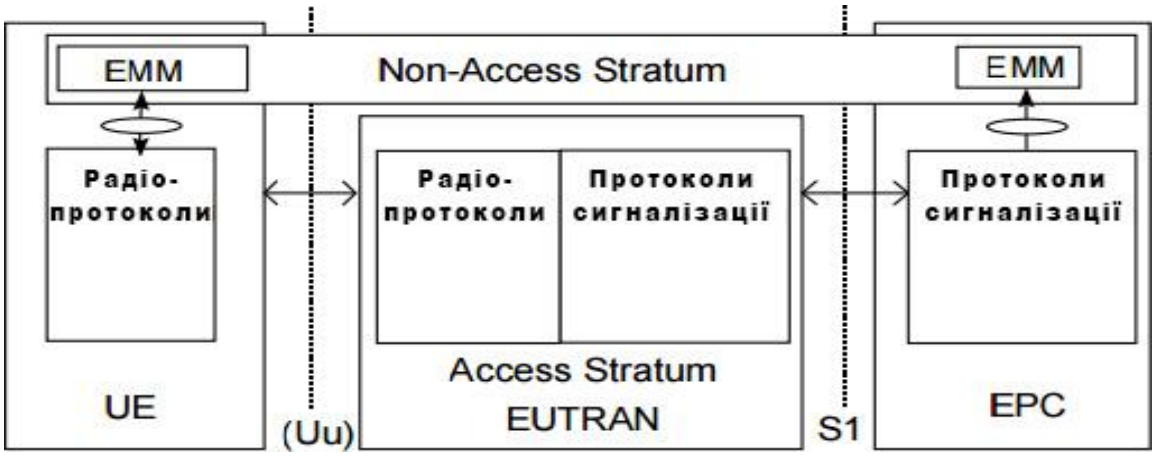


Рисунок 3.1 – Структура мережі LTE

Стик між областю користувацького обладнання (UE) та підсистемою радіодоступу E-UTRAN реалізується за допомогою радіоінтерфейсу Uu. Своєю чергою, взаємодія між мережею радіодоступу та ядром базової пакетної мережі EPC забезпечується через інтерфейс S1. Стек протоколів та алгоритми функціонування інтерфейсів Uu та S1 чітко розмежовані на дві функціональні площини: площину користувача (UP) та площину управління (CP). Поза шаром радіодоступу (на рівні NAS) адміністрування мережевих процесів здійснюється за допомогою механізмів управління мобільністю у базовій мережі (EPS Mobility Management, EMM).

У площині користувача інтегровано протоколи, відповідальні за безпосереднє транспортування клієнтського трафіку через радіоканал. До площини управління належать протоколи, які забезпечують процедури встановлення, підтримки та розірвання з'єднань між абонентським терміналом та елементами інфраструктури. Також у межах площини CP функціонують

протоколи, призначені для транспарентного (прозорого) пересилання службових повідомлень вищих рівнів, необхідних для авторизації та надання телекомунікаційних послуг.

Архітектурне середовище мережі радіодоступу логічно розділене на два функціональні рівні: рівень радіомережі (Radio Network Layer, RNL) та рівень транспортної мережі (Transport Network Layer, TNL). Пряма взаємодія та обмін даними між сусідніми базовими станціями eNodeB в межах підсистеми радіодоступу реалізується на основі інтерфейсу X2, концептуальну схему якого наведено на рисунку 3.2. Крім того, транзитне сполучення між базовими станціями та ядром EPC здійснюється через блоки сигнальної взаємодії з модулем управління мобільністю (інтерфейс S1-MME) або через канали комутації користувацького трафіку з обслуговуючим шлюзом S-GW (інтерфейс S1-U). Така топологія дозволяє стверджувати, що інтерфейс S1 підтримує повнозв'язну архітектуру (концепція Many-to-Many) між ансамблем базових станцій eNodeB та пулом вузлів управління й комутації ядра мережі (MME / S-GW).

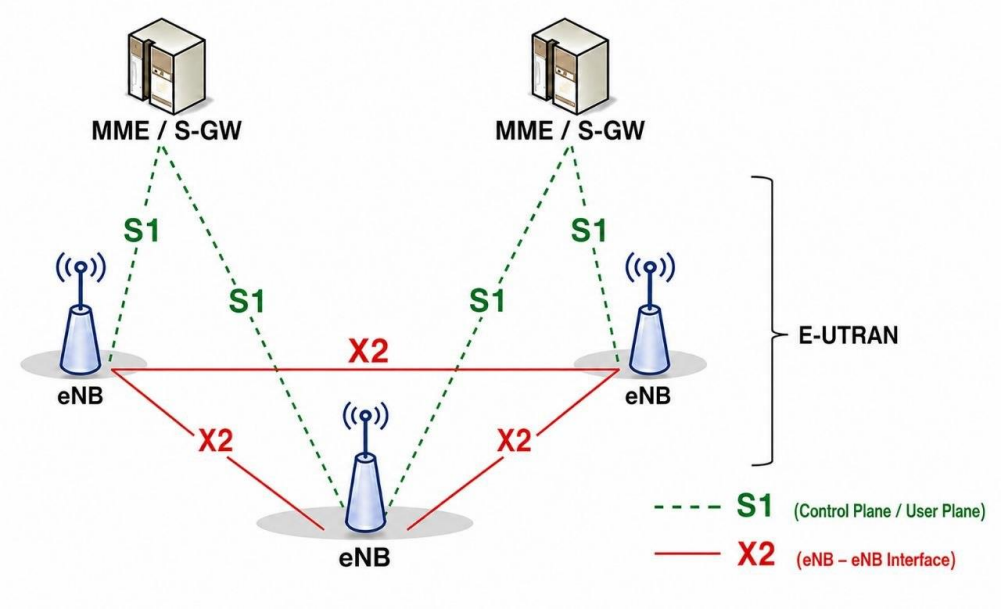


Рисунок 3.2 – З'єднання функціональних вузлів мережі радіодоступа

Для детального аналізу архітектури радіодоступу визначено функціональні профілі базових елементів. На базову станцію eNodeB покладено завдання з управління ресурсами радіовиклику, що включає диспетчеризацію частотних каналів у висхідному та низхідному напрямках, а також стиснення заголовків IP-пакетів і шифрування користувацького трафіку. Крім того, базова станція

здійснює первинний вибір контролера MME при авторизації нових абонентів, забезпечує маршрутизацію пакетів даних до обслуговуючого шлюзу в площині користувача, транслює отриману від ядра пейджингову інформацію та екстрені повідомлення системи тривожного оповіщення PWS, паралельно виконуючи вимірювання стану каналів для контролю мобільності.Водночас блок управління мобільністю MME реалізує глобальні функції координації, відповідаючи за захищене адміністрування сигнального трафіку та передачу інформації між різними мережами радіодоступу під час міжсистемної міграції абонентів. Цей керуючий вузол координує роботу базових станцій при обробці викликів до терміналів у стані очікування, динамічно веде списки зон відстеження користувачів, здійснює селекцію шлюзів S-GW та P-GW, а також вибирає суміжні модулі MME під час виконання процедур хендовера. Завершальними елементами функціонала ядра є забезпечення роумінгу, автентифікація абонентів, управління виділеними радіоканалами зв'язку та транзит службових повідомлень цивільної безпеки PWS [9].

Для забезпечення цілісності інформаційних потоків у ядрі мережі чітко розмежовано функції шлюзових вузлів. Обслуговуючий шлюз S-GW виступає локальним анкером мобільності (LMA) під час хендовера, здійснює буферизацію пакетів низхідного каналу для пристроїв у режимі очікування з ініціалізацією запиту послуги, а також виконує безпосередню маршрутизацію трафіку та маркування пакетів транспортного рівня. Додатково на цей вузол покладено завдання з формування облікових записів абонентів із врахуванням індексів QCI для тарифікації та підтримка механізмів законного перехоплення інформації. Водночас шлюз пакетної мережі P-GW фокусується на взаємодії із зовнішніми джерелами даних, реалізуючи алгоритми фільтрації пакетів, динамічного виділення IP-адрес абонентському обладнанню та маркування транспортного рівня в низхідному напрямку. Завершальними елементами функціонала пакетного шлюзу є селекція і диференційована тарифікація послуг, а також санкціонований моніторинг даних на системному рівні.

3.2 Частотні профілі, стеки протоколів радіоінтерфейсу та ієрархія каналів зв'язку в Україні

На відміну від систем попередніх поколінь (3G/4G), які орієнтувалися переважно на обслуговування індивідуальних споживачів приватного сектору,

стандарт п'ятого покоління (5G) закладає мультисервісну платформу. Вона спрямована на забезпечення таких критично важливих параметрів, як надвища пропускна здатність, експоненціальне зростання щільності підключень на одиницю площі та ультранизький рівень латентності (затримок). Практична реалізація зазначених специфікацій потребує залучення нових високочастотних діапазонів. Для початкового етапу розгортання мереж п'ятого покоління базовими є сантиметровий спектр у межах 3,6–3,7 ГГц (діапазон FR1) та міліметрові хвилі в радіусі 27,5–28,3 ГГц (діапазон FR2). Впровадження цих частот у цивільний сектор України стикається з інфраструктурними труднощами, зумовленими необхідністю проведення конверсії радіочастотного ресурсу, що наразі перебуває у спеціальному користуванні силових відомств та військових структур.

Додатковим інженерним викликом є специфіка поширення радіохвиль у цих смугах. Для формування безперервного територіального покриття, еквівалентного рівню покриття мереж 3G/4G, виникає потреба в щільному ущільненні інфраструктури радіодоступу — розгортанні у 3–5 разів більшої кількості базових станцій (переважно класу Small Cells). Це, своєю чергою, потребує масштабної модернізації транспортної мережі (Backhaul) та капітального розширення потужностей центрів обробки даних (ЦОД), навантаження на обчислювальні вузли яких зросте на порядки.

Заріна Кажмаганбетова, менеджер групи IT-консультування в KPMG Україні і Центральній Азії, оцінює, що вартість первинного запуску 5G в Черкасах складе приблизно 1,3 мільярдів грн. Таким чином, в разі побудови мережі для кожного оператора окремо, загальна вартість покриття Черкаси може бути приблизно оцінена в діапазоні від 1 до 1,5 мільярдів грн.

Наведена на рисунку 3.3 структура ілюструє ієрархічний стек протоколів радіоінтерфейсу, розмежований за функціональними площинами й розділений на такі базові рівні та підрівні:

- фізичний рівень (PHY): забезпечує безпосереднє кодування, модуляцію та передачу радіосигналів у середовищі поширення;

- підрівень управління доступом до середовища (MAC): відповідає за відображення логічних каналів на транспортні, диспетчеризацію та корекцію помилок (HARQ);

- підрівень управління радіоканалом (RLC): здійснює сегментацію, повторне збирання пакетів та контроль доставки даних (ARQ);

- підрівень протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP): реалізує алгоритми стиснення заголовків (ROHC), шифрування та захисту цілісності трафіку;

- підрівень управління радіоресурсами (RRC): координує сигнальну взаємодію площини управління;

- підрівень протоколів поза шаром доступу (NAS): виконує функції високорівневого сигнального обміну з ядром мережі [6, 11, 12]

Згідно з архітектурною схемою (рисунок 3.3), протокольні модулі підрівнів MAC та RLC у площині користувача (UP) виконують ідентичні функції з відповідними модулями площини управління (CP). Натомість функціонал підрівня RRC повністю обмежений площиною управління, де на нього покладено завдання з трансляції системної інформації (System Information Broadcast), ініціалізації процедур пошуку абонента (пейджингу), конфігурування радіоканалів і з'єднань на нижчих рівнях, координації мобільності, а також збору й адміністрування телеметричних звітів про результати вимірювання параметрів користувацького обладнання (UE).

До площини управління також віднесено протокол NAS, який функціонує поза шаром доступу та локалізований безпосередньо між блоком управління мобільністю (MME/AMF) і абонентським терміналом. Головним призначенням протоколу NAS є вирішення сигнальних завдань вищого рівня (автентифікація, реєстрація, управління сесіями), які безпосередньо не пов'язані з процесами радіодоступу.

На нижньому, фізичному рівні архітектури, який у міжнародній класифікації також визначається як Рівень 1 (Layer 1, L1), реалізовано базові сервіси з пересилання інформаційних потоків на вищі рівні ієрархії. Функціонування цього рівня безпосередньо пов'язане із забезпеченням такого комплексу інженерних завдань:

- завадостійкість та верифікація: виявлення помилок у транспортних каналах із передачею відповідних сповіщень на вищі рівні, завадостійке кодування і декодування даних, а також обробка гібридних запитів автоматичного повторного пересилання пакетів за протоколом HARQ;

- модуляція та енергетичне балансування: безпосередня модуляція та демодуляція фізичних каналів, а також енергетичне вирівнювання і балансування потужності фізичних каналів із застосуванням вагових коефіцієнтів;

- синхронізація та телеметрія: точна частотна та часова синхронізація сигналів у мережі, безперервне вимірювання радіочастотних характеристик каналу та трансляція телеметричних звітів на вищі рівні стека;

- просторова та антенно-частотна обробка: паралельна антенна обробка даних за методами MIMO, просторово-рознесене передавання та прийом сигналів, адаптивне формування діаграми спрямованості (Beamforming), а також фінальна аналогова радіочастотна обробка сигналів.

Функціональні точки доступу до сервісів (Service Advisory/Access Points, SAP) між фізичним рівнем та підрівнем MAC забезпечуються через механізми транспортних каналів, тоді як взаємодія між підрівнями MAC та RLC регламентується архітектурою логічних каналів.

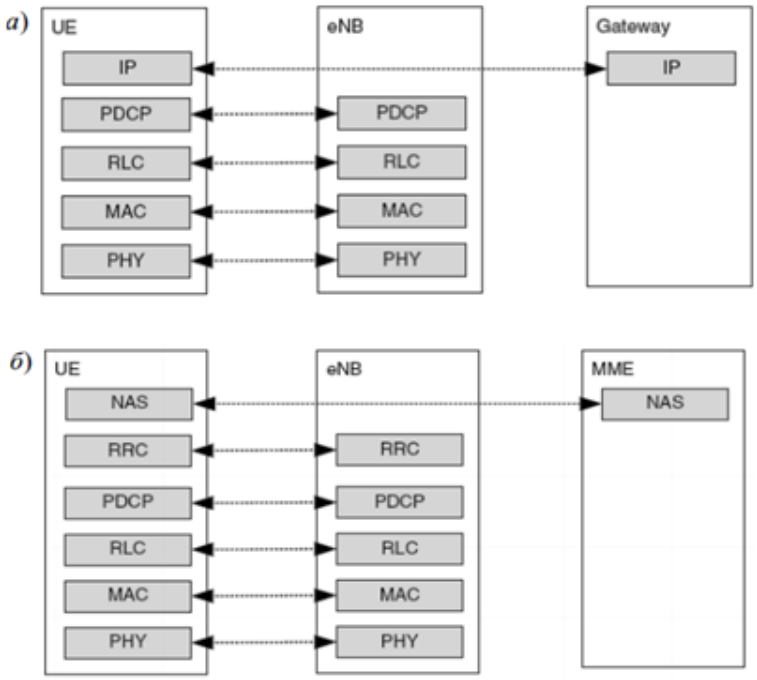


Рисунок 3.3 – Стек протоколів у користувацькій площині (а) і в площині керування (б)

Канальний рівень радіоінтерфейсу (Layer 2) забезпечує логічну обробку потоків даних у висхідному та низхідному каналах зв'язку (рисунок 3.4). Головна архітектурна відмінність між цими напрямками полягає в тому, що підрівень MAC в Downlink здійснює спільне керування пріоритетами багатьох абонентських пристроїв, тоді як в Uplink оптимізуються параметри лише для одного конкретного термінала. До основних функцій підрівня MAC належить

мультиплексування сервісних блоків даних SDU логічних каналів у транспортні блоки та їхнє зворотне демультиплексування, диспетчеризація звітів про стан буферів, а також виправлення помилок за допомогою запитів повторної передачі HARQ. Крім того, на цьому рівні реалізується пріоритезація між логічними каналами, ідентифікація трафіку мультимедійного мовлення MBMS, автоматичний вибір транспортного формату під поточні умови радіоканалу та динамічне вирівнювання вмісту пакетів для точної відповідності структурі кадрів.

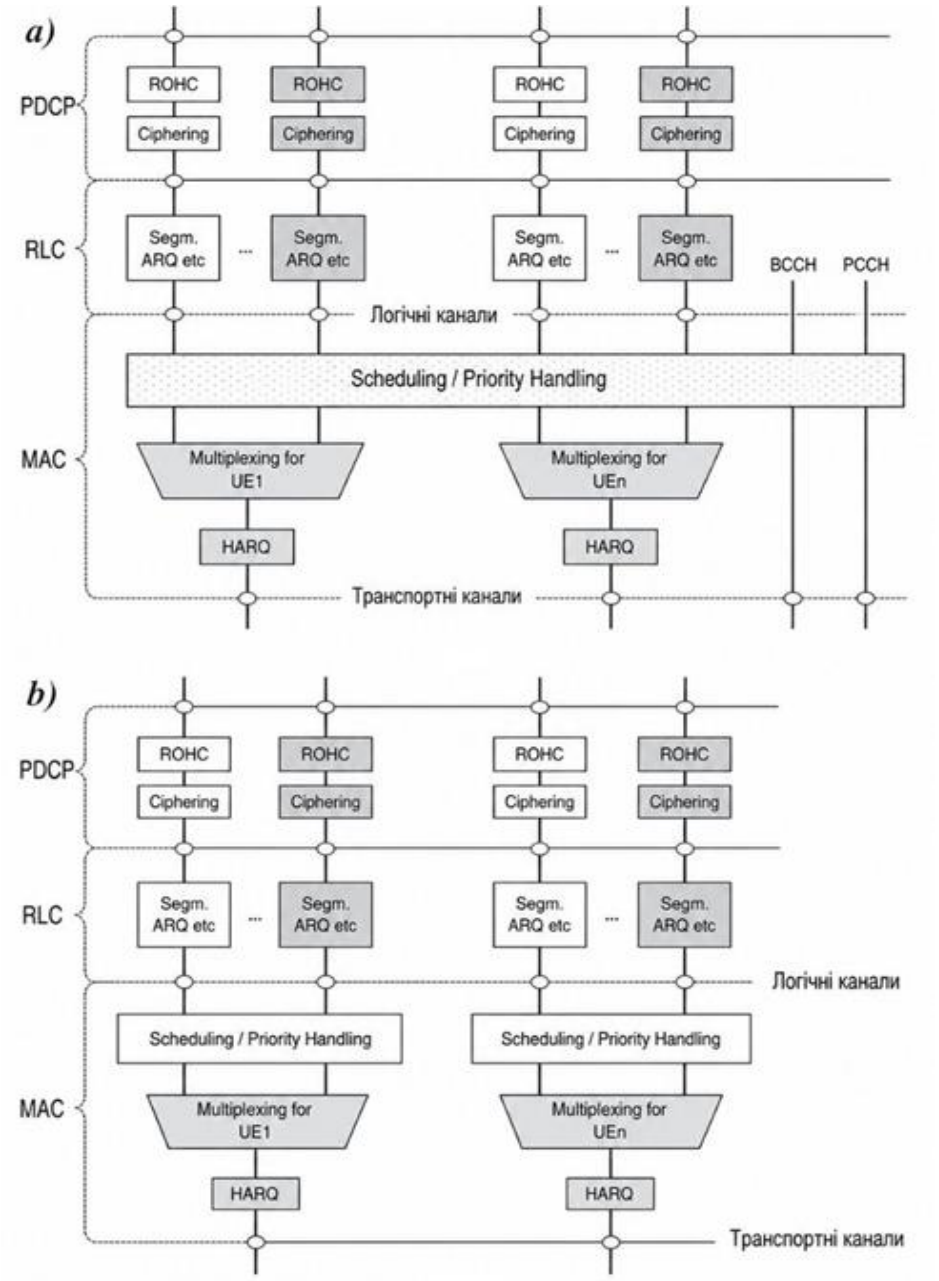


Рисунок 3.4 – Структура канального рівня в низхідному (*а*) і висхідному (*б*) напрямках

Інформаційний обмін на підрівні управління радіоканалом (RLC) реалізується у двох базових режимах, якими є передача із підтвердженням доставки (AM) та без підтвердження (UM). Режим UM допускає фіксацію певної втрати пакетів даних у радіоканалі, що є цілком прийнятним для потокових мультимедійних сервісів, натомість у режимі AM задіяно протокол автоматичного повторного запиту (ARQ), який повністю гарантує стовідсоткову доставку втрачених інформаційних фрагментів. Загалом на підрівень RLC покладено виконання таких інженерних функцій, як транспортування пакетів даних на вищі рівні стека, корекція помилок за допомогою запитів ARQ, а також повторна сегментація даних, що застосовується винятково в режимі AM. Одночасно цей підрівень забезпечує конкатенацію, сегментацію та зворотне повторне збирання сервісних блоків даних (SDU), здійснює динамічну зміну порядку проходження та відновлення послідовності пакетів, а також відповідає за детекцію помилок, відкидання спотворених копій і процедури повторного встановлення RLC-з'єднання.

Вищий за ієрархією підрівня RLC протокол конвергенції пакетних даних (PDCP) орієнтований на всебічну оптимізацію трафіку та забезпечення безпеки інформаційного обміну. У межах цього підрівня виконується стиснення та відновлення заголовків IP-пакетів за алгоритмом ROHC для мінімізації надлишковості в радіоканалі, а також здійснюється криптографічне шифрування, дешифрування та захист цілісності користувацького й сигнального трафіку. Протокол PDCP також гарантує послідовну доставку пакетів вищого рівня з виявленням дублікатів SDU, отриманих із нижчих рівнів у режимі AM, забезпечує повторне передавання пакетів даних, що не були підтверджені під час виконання процедур хендовера, і реалізує ефективну фільтрацію та відкидання спотворених пакетів у висхідному каналі (Uplink) разом із транзитом керуючої інформації площини управління.

На верхньому рівні радіоінтерфейсу площини управління функціонує протокол RRC, базовий спектр послуг якого охоплює розповсюдження та трансляцію системної інформації, що стосується як безпосередньо шару доступу (AS), так і сигналізації поза шаром доступу (NAS). Цей рівень координує процедури пошуку абонента (пейджингу), ініціює виклики, а також керує процесами встановлення, конфігурування, регулювання та розірвання наскрізних радіоканалів (Radio Bearers) та безпосередніх RRC-з'єднань між абонентським пристроєм (UE) та мережевою інфраструктурою. Окрім цього, до обов'язків RRC

належить управління криптографічними ключами, активація механізмів безпеки на радіоінтерфейсі, контроль параметрів мобільності та хендоверу, адміністрування сервісів мультимедійного мовлення (MBMS) та забезпечення заданих параметрів якості обслуговування (QoS). Фінальними завданнями цього протоколу є збір, обробка та формування звітів на основі телеметричних вимірювань характеристик сигналу терміналом, а також забезпечення прямого прозорого транзиту повідомлень рівня NAS між ядром мережі та кінцевим користувачем.

Аналіз архітектури транспортних каналів ядра мережі передбачає детальне вивчення стека протоколів, що функціонують у межах різних мережевих інтерфейсів. Наведена нижче на рисунку 3.5 схема демонструє суміжну протокольну структуру інтерфейсів S1 та X2. Зокрема, у площині користувача (User Plane) інтерфейс S1-U, визначений між базовою станцією (eNodeB) та обслуговуючим шлюзом (S-GW), базується на використанні протоколу тунелювання пакетів GTP-U (GPRS Tunneling Protocol User Plane). Даний протокол функціонує поверх транспортного рівня IP і забезпечує безпосередню, проте негарантовану доставку користувацьких даних. Завдяки лаконічній та оптимізованій структурі, цей IP-протокол дозволяє оперативно розгортати та підтримувати кілька паралельних ізольованих тунелів між кожною парою кінцевих мережевих вузлів.

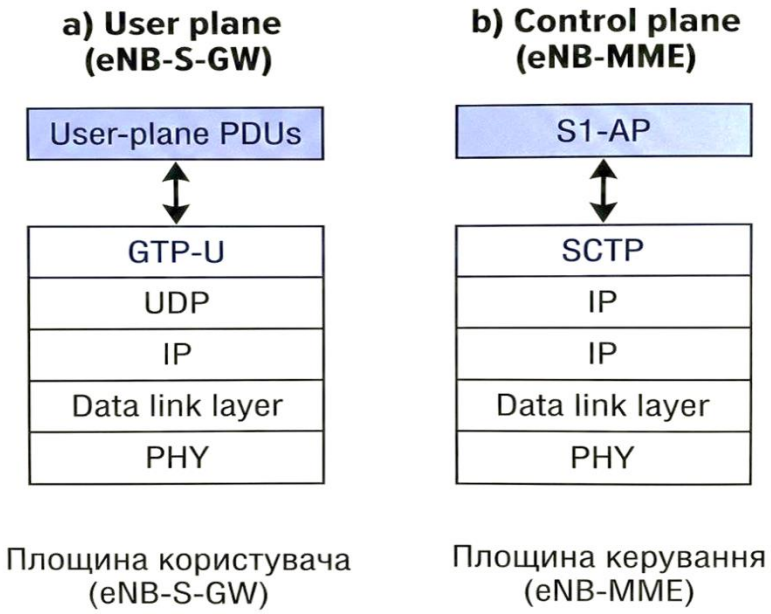


Рисунок 3.5 – Стек протоколу S1 у користувацькій площині (*а*) і площині управління (*б*)

Як уже було сказано, у площині управління між БС і БКМ визначено інтерфейс S1-MM, що використовує на транспортному рівні TCP-подібний протокол SCTP для передачі потоку службової інформації.

На рівні додатків використовуються протоколи S1-AP і X2-AP, дивись рисунок 3.6. Більшість користувацьких додатків описуються набором показників якості обслуговування QoS. У будь-якій пакетній мережі мають бути закладені механізми, що забезпечують передавання пакетних даних користувачів із різним пріоритетом.

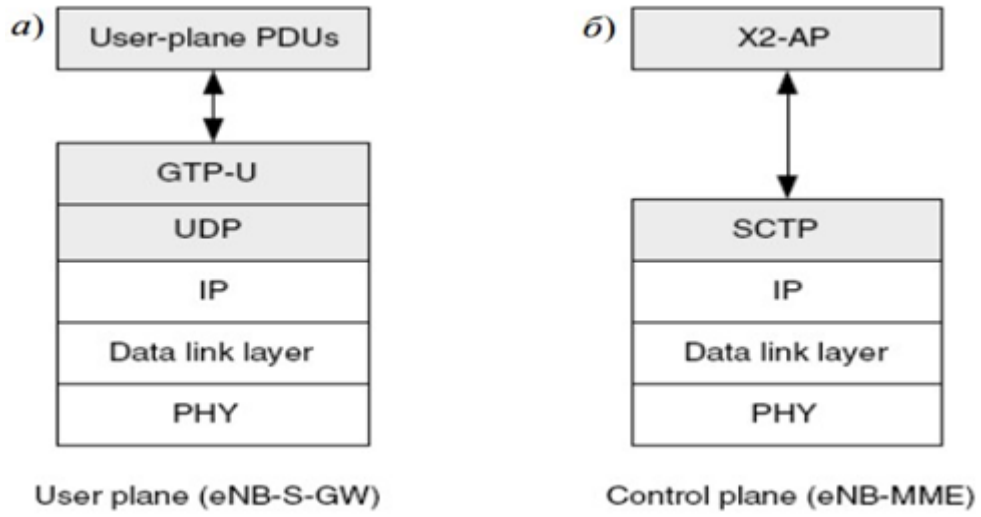


Рисунок 3.6 – Стек протоколу X2 у користувацькій площині (а) і площині керування (б)

У мережах LTE, за аналогією з архітектурою UMTS, між двома кінцевими точками з'єднання – безпосередньо між двома абонентами або між користувацьким терміналом та зовнішнім інтернет-сервером — впроваджується концепція наскрізного каналу (End-to-End Bearer). Відповідно до цієї моделі, наскрізна лінія зв'язку декомпонується на окремі сегменти, що функціонують на різних рівнях та в різних мережевих вузлах, зокрема: радіоканал (Radio Bearer) у підсистемі радіодоступу та зовнішній канал (External Bearer) на межі з транзитними мережами.

Зокрема, базовим елементом архітектури є логічний канал, що транслює визначений набір параметрів якості обслуговування та встановлюється між користувацьким обладнанням (UE) і шлюзом пакетної мережі (P-GW), як проілюстровано на рисунку 3.7. У технічних специфікаціях 3GPP такий тракт

визначається як EPS-канал (Evolved Packet System,EPS), еволюціонована пакетна система. Кожен окремий голосовий IP-потік зв'язується з індивідуальним EPS-контекстом, який транспортується на базі IP-протоколу за технологією VoIP, що дозволяє мережі динамічно призначати різні пріоритети для різних категорій абонентів або сервісів. Коли вхідний IP-пакет надходить із зовнішнього середовища (глобальної мережі Інтернет), шлюз P-GW класифікує його за критеріями якості обслуговування (QoS) на основі попередньо встановлених профілів, відображає у відповідний EPS-канал і спрямовує через обслуговуючий шлюз (S-GW) до радіоканалу між базовою станцією (eNodeB) та кінцевим пристроєм (UE). Таким чином, у структурі радіодоступу забезпечується взаємно-однозначна відповідність між EPS-каналом базової мережі та радіоканалом в ефірному інтерфейсі.

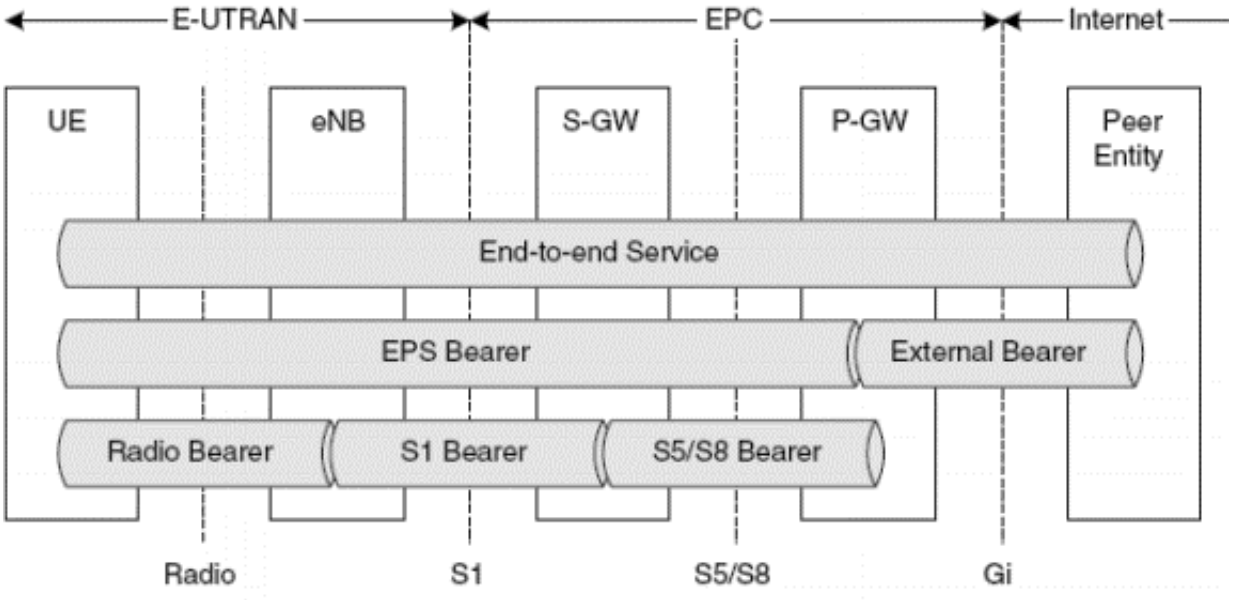


Рисунок 3.7 – Архітектура скрізьного каналу

Розглянемо сукупності каналів, що забезпечують «вертикальну» (між різними рівнями) і «горизонтальну» (між різними вузлами) передачу інформації.

На рисунку 3.8 показано відображення фізичних, транспортних і логічних каналів у низхідному напрямку.

Логічні канали визначаються типом інформації, яка в них міститься, і підрозділяються на два класи: керуючі, що переносять службову інформацію, і трафікові, в яких міститься корисна користувацькаінформація. У низхідному напрямку визначено п'ять керуючих логічних каналів:

- викличний керуючий канал (Paging Control Channel, PCCH), призначений для пошуку абонента (термінала) в мережі за допомогою передавання викличної інформації;

- мовленнєвий керуючий канал (Broadcast Control Channel, BCCH), який використовується для передачі в мережі службової інформації;

- загальний керуючий канал (Common Control Channel, CCCH), під час використання якого забезпечується зв'язок між мережею і КТ, що не мають з'єднання на RRC-підрівні (RRC-з'єднання);

- виділений керуючий канал (Dedicated Control Channel, DCCH), також призначений для забезпечення зв'язку між мережею і КТ, але таким, що має RRC-з'єднання;

- груповий керуючий канал (Multicast Control Channel, MCCH), за допомогою якого забезпечується спільна (для кількох користувачів) передача мультимедійних послуг.

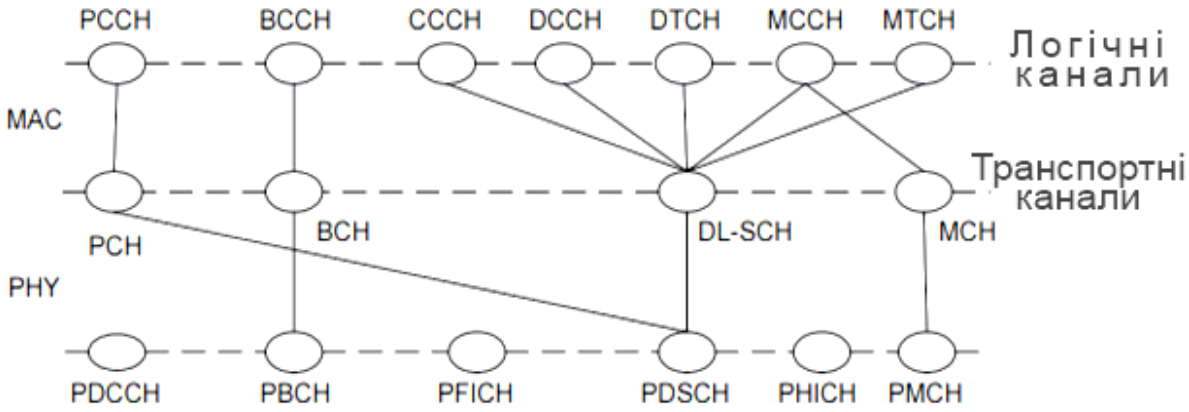


Рисунок 3.8 – Відображення фізичних, транспортних і логічних каналів у низхідному напрямку

Поряд з керуючими, визначено два трафікових логічних канали:

- виділений трафіковий канал (Dedicated Traffic Chanel, DTCH), що встановлюється між двома абонентами для передавання інформації користувача;

- груповий трафіковий канал (Multicast Traffic Chanel. MTCH), що встановлюється для передачі послуг мультимедійного мовлення.

Передавання призначеної для користувача або службової інформації з вищого на нижчий рівень описується в термінах відображення каналів: логічних – на транспортні, транспортних – на фізичні.

Логічний канал PCCH у низхідному напрямку відображається на транспортний викличний канал (Paging Channel, PCH), що підтримує переривчастий (для економії енергії) прийом пакетів даних.

Логічний канал BCCH відображається або на транспортний мовний канал (Broadcast Channel, BCH), або транспортний низхідний спільний канал (Downlink Shared Channel, DL-SCH).

Канал BCH характеризується фіксованою конфігурацією транспортного блоку, і саме на нього налаштовується КТ після синхронізації в стільнику. У каналі DL-SCH підтримуються адаптивні методи модуляції та кодування, управління потужністю, гібридні автоматичні запити на повторення, багатоантенні технології тощо.

Логічні канали MCCH і MTCH відображаються або в транспортний груповий канал (Multicast Channel, MCH), або в транспортний низхідний спільний канал DL-SCH. Канал MCH підтримує групову передачу мультимедійних послуг від декількох сот.

Логічні канали CCCH, DCCH і DTCH відображаються в транспортний канал DL-SCH [10].

Отже, чотири транспортні канали відображають сім логічних каналів. Далі, при переході на фізичний рівень, на шести фізичних каналів відбувається відображення транспортних каналів. Транспортний канал BCH відображається у фізичний мовленнєвий канал (Physical Broadcast Channel, PBCH), який передається в часовому інтервалі тривалістю 40 мс, що називається кадром.

Транспортні канали PCH і DL-SCH відображаються у фізичний низхідний спільний канал (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH).

Транспортний канал MCH відображається у фізичний канал групового мовлення (Physical Multicast Channel, PMCH).

Три фізичні канали, що залишилися: фізичний керуючий канал індикатора формату (Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH), фізичний низхідний керуючий канал (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) і фізичний канал індикатора гібридного запиту на повторення (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel, PHICH) є автономними, тобто на них транспортні канали не відображаються. Канали PDCCH і PCFICH використовуються для інформування ПТ про виділення ресурсів для транспортних каналів PCH і DL-SCH, а також параметрів модуляції та кодування. Канал PHICH, як випливає з його назви, використовується для передавання запитів на повторне передавання [11].

Розглянемо взаємне відображення логічних, транспортних і фізичних каналів у висхідному напрямі (рисунок 3.9), коли мають місце три логічні канали, з яких два керівні та один трафіковий, два транспортні канали і три фізичні.

Усі три логічні канали відображаються в один транспортний висхідний спільний канал (Uplink Shared Channel, UL-SCH), що підтримує адаптивні методи модуляції та кодування, управління потужністю, гібридні автоматичні запити на повторення, напівстатичний/динамічний розподіл ресурсів. Інший транспортний канал висхідного напрямку – канал випадкового доступу (Random Access Channel, RACH) – використовується для передачі певної інформації (запиту на надання виділеного каналу) від КТ з можливістю виникнення колізій, коли подібний запит надходить від інших КТ.

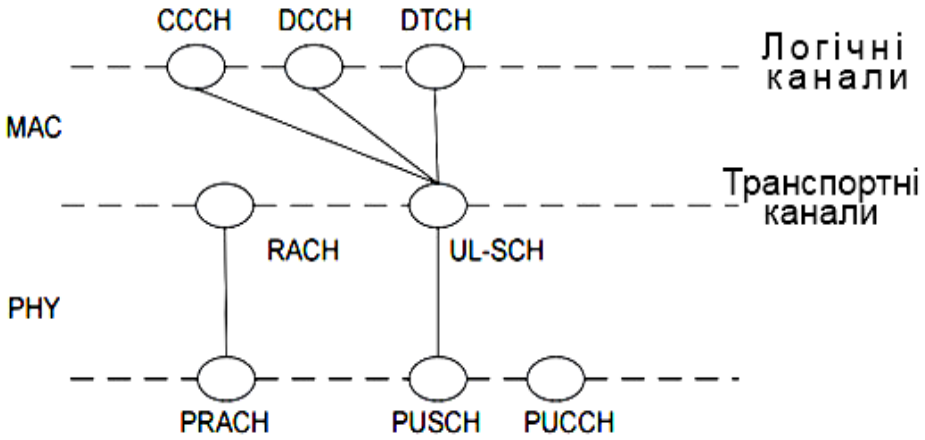


Рисунок 3.9 – Відображення фізичних, транспортних і логічних каналів у висхідному напрямку

Транспортний канал RACH відображається на фізичний канал випадкового доступу (Physical Random Access Channel, PRACH), який переносить відповідну преамбулу випадкового доступу.

Транспортний канал UL-SCH відображається на фізичний висхідний спільний канал (Physical Uplink Shared Channel, PU-SCH). Фізичний висхідний керуючий канал (Physical Uplink Control Channel, PU-CCH), що залишився, є автономним – на нього не відображаються транспортні канали. Він використовується для передавання звітів про індикацію якості низхідного каналу, запитів на порядок проходження пакетів даних тощо.

3.3 Модернізація обладнання для базової станції

Традиційні методи розширення ємності мережі шляхом додавання нових антенних модулів призводять до надмірного навантаження на щогли зв'язку та дефіциту місця для розгортання технологій Massive MIMO. Huawei пропонує використовувати універсальні пасивні антени, що підтримують спектр Sub-3 GHz та високочастотні діапазони 4T4R, дозволяючи спростити структуру сайту та зарезервувати місце для 5G. Для модернізації, як показано на рисунку 3.10, операторам достатньо розмістити активні модулі 5G у зарезервованих зонах.

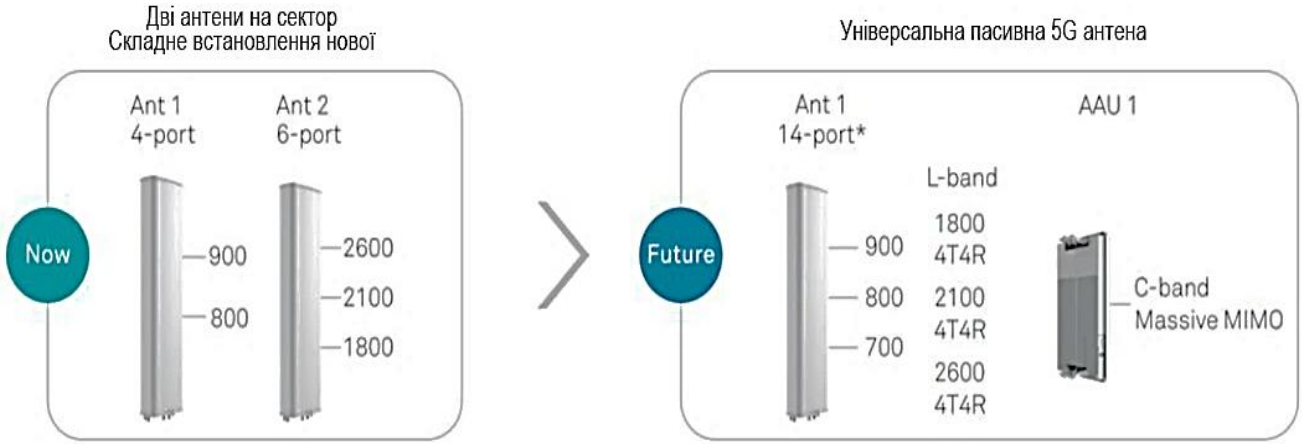


Рисунок 3.10 – Модернізація антени

Інтеграція передових радіотехнологій, таких як багатоантенні конфігурації 4T4R, 8T8R та надбагатоантенні системи Massive MIMO, забезпечує високу готовність наявного обладнання 4G/LTE до планової еволюції в напрямку стандартів п'ятого покоління. Завдяки оптимізації архітектурних рішень, адаптація поточних майданчиків (сайтів) до вимог сумісності з 5G NR реалізується за допомогою мінімальної кількості додаткових етапів. Такий плавний еволюційний перехід характеризується низькою матеріаломісткістю, суттєвим зниженням капітальних інвестицій та оптимізацією операційних витрат (OPEX) на обслуговування технологічних майданчиків.

Технічним базисом для реалізації цієї стратегії є впровадження новітніх багатомодових базових станцій (наприклад, серій Huawei BTS5900/DBS5900), які на апаратному рівні підтримують стандарти 5G NR, конфігурації 4T4R та технологію Massive MIMO. Під час безпосереднього розгортання мережі 5G

операторам зв'язку достатньо інтегрувати нові плати обробки сигналів 5G NR у системний модуль (процесорний блок) та здійснити модернізацію загального програмного забезпечення. Це дозволяє практично реалізувати концепцію уніфікованого апаратного оновлення за принципом «one plug-in, all 5G». Послідовність процесів модернізації апаратного комплексу сайту та відповідного оновлення програмного забезпечення графічно представлено на рисунку 3.11.

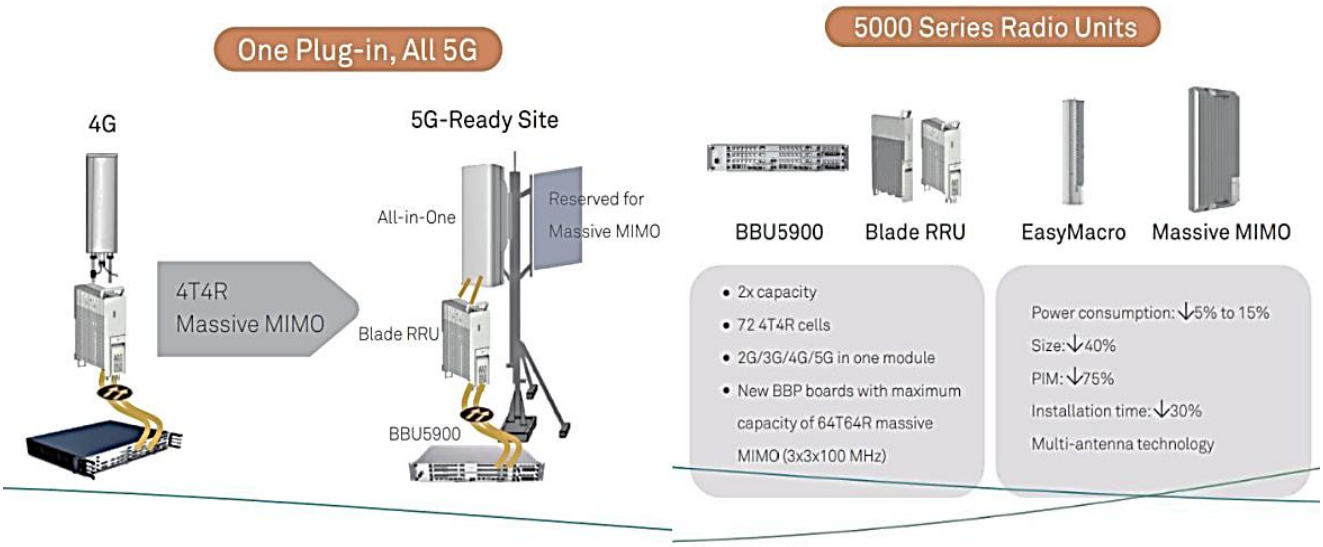


Рисунок 3.11 – Модернізація сайту і необхідне обладнання

Сучасні радіочастотні модулі серії 5000 оснащені інноваційною радіоплатформою та підтримують передові багатоантенні архітектури, які забезпечують високу пропускну здатність каналів при зниженому рівні енерговитрат. У лінійці цього обладнання низькочастотний модуль орієнтований на спектр Sub-1 GHz у межах 700–900 МГц і штатно використовує конфігурацію 2T4R, тоді як середньочастотний блок працює у діапазоні від 1 до 3 ГГц на базі конфігурації 4T4R, реалізованої за допомогою багатоканальних модулів або компактних виносних радіоблоків RRU. Конструктивні особливості нової серії 5000 забезпечують високу адаптивність апаратної бази, дозволяючи виконувати монтаж і технічну інтеграцію трансиверів на опорах зв'язку без інженерних чи монтажних ускладнень, що мінімізує терміни введення нових стільників 5G NR в експлуатацію [8, 12, 13].

3.4 Готові моделі для побудови чарунків платформи 5G

Стрімка еволюція послуг мобільного широкосмугового зв'язку та безперервне масштабування мережевої інфраструктури зумовлюють необхідність залучення додаткових частотних діапазонів і збільшення щільності стільників для забезпечення повсюдного покриття й обслуговування інтенсивного трафіку. Проте традиційний інженерний підхід, який базується на розгортанні нових макробазових станцій, стикається із суттєвими організаційними та фінансовими труднощами, зокрема тривалими процедурами юридичного погодження майданчиків та високим рівнем операційних витрат (OPEX). Це значно сповільнює темпи розгортання мережі, внаслідок чого оператори не в змозі оперативно задовольняти зростаючий попит на цифрові сервіси. Зокрема, процес виділення та придбання технологічної ділянки у певних районах триває від двох до шести місяців, а безпосереднє капітальне будівництво сайту займає близько року. При цьому сумарні витрати на монтажні роботи, енергопостачання та оренду майданчика досягають 55% від загальної вартості володіння інфраструктурою (TCO).

Для нівелювання цих деструктивних чинників та забезпечення рентабельного розгортання мереж у різних інфраструктурних сценаріях було розроблено концептуальні рішення лінійки TubeStar, PoleStar та RuralStar. Дані інноваційні топологічні моделі стільників дозволяють операторам суттєво спростити процеси відчуження земельних ділянок, мінімізувати капітальні витрати на капітальне будівництво й подальшу оренду, а також ефективно вирішити проблему автономного енергопостачання вузлів зв'язку. Практичне впровадження цих рішень гарантує формування стабільного базового покриття та створює надійний інструмент для локального масштабування ємності мережі й обслуговування зростаючої кількості абонентів.

Для оптимізації процесів радіопланування в різних географічних та урбаністичних умовах застосовують спеціалізовані архітектурні класи базових станцій, які дозволяють диверсифікувати інфраструктурне навантаження:

Модель TubeStar – є ультракомпактним моноблочним рішенням, в якому весь комплекс приймально-передавального обладнання, систем системного живлення та антенних масивів інтегровано безпосередньо всередину єдиної вертикальної металевої щогли-колони. Ця конструкція повністю замінює громіздкі традиційні щогли та наземні апаратні контейнери. Інженерне рішення

дозволяє поєднати тримальну опору із системною шафою, діаметр основи якої становить лише 800 мм. Шафа високої місткості здатна підтримувати одночасне функціонування від п'яти до семи частотних смуг. Завдяки такій оптимізації необхідна площа землевідведення мінімізується з 30–100 м² до 2 м², термін юридичного узгодження ділянки скорочується з шести до двох місяців, а показник сукупної вартості володіння (TCO) за 5-річний період зменшується на 30%. Додатково в архітектурі щогли зарезервовано інтерфейсні порти для еволюційного переходу до технологій Massive MIMO та розширення конфігурацій до рівня 8T8R.

Модель PoleStar – орієнтована на розгортання радіоінтерфейсу на базі наявної міської інфраструктури, зокрема на опорах вуличного освітлення, лініях електропередач або світлофорних об'єктах. Даний підхід є ідеальним для щільної міської забудови (наприклад, центральних районів міста Черкаси), оскільки повністю виключає потребу у виділенні додаткової земельної площі на рівні ґрунту. Впровадження PoleStar забезпечує ефективне розвантаження макромережі за рахунок локального розподілу інтенсивного трафіку, покращує глибину проникнення радіохвиль всередину будівель, ліквідує зони радіотіні та збільшує ємність у «гарячих точках» (Hotspots) при зниженні показника TCO на 40%.

Модель RuralStar – розроблена як низькобюджетна енергоефективна базова станція для малонаселених пунктів та віддаленої сільської місцевості. Завдяки мінімальному рівню енергоспоживання, живлення вузла може здійснюватися автономно від сонячних фотоелектричних панелей. Замість високовартісного оптоволоконного кабелю для організації транспортного каналу (Backhaul) використовується бездротова ретрансляція у вільному від навантаження LTE-спектрі. Застосування технології передачі сигналів поза прямою видимістю (NLOS) дозволяє замінити класичні капітальні вежі легкими опорними стовпами, гарантуючи широке й точне покриття віддалених сіл. Застосування RuralStar забезпечує зниження капітальних та операційних витрат на 30%, завдяки чому термін окупності інвестицій (ROI) для населеного пункту з чисельністю близько 2000 мешканців не перевищує трьох років [5, 9].

Порівняльні архітектурні та топологічні характеристики стільників на базі готових рішень лінійки TubeStar, PoleStar та RuralStar наочно проілюстровано нижче на рисунку 3.12.

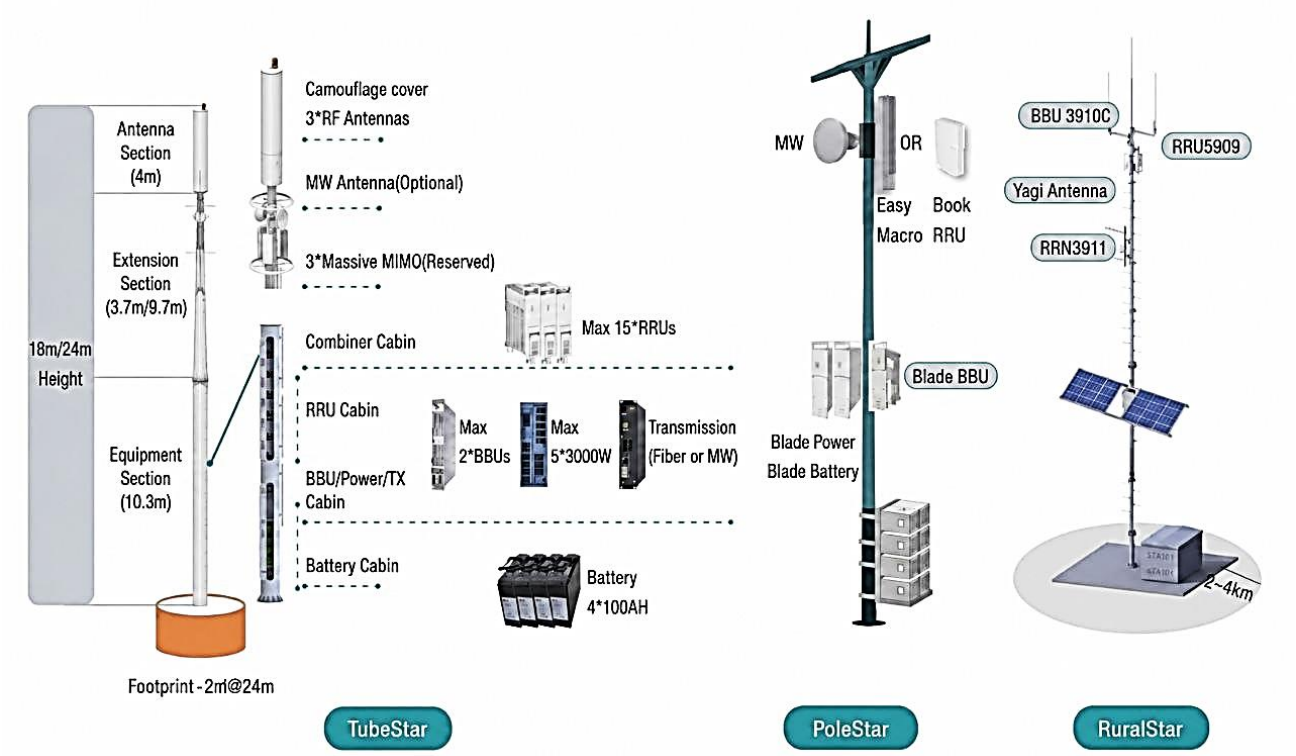


Рисунок 3.12 – Моделі для побудови чарунок платформи 5G Tube Star, Pole Star і Rural Star

4 РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БС СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Типовий розрахунок максимально допустимих втрат

Процес проектування бездротової мережі розпочинається з визначення енергетичного бюджету, а саме розрахунку максимально допустимих втрат (МДВ) на трасі поширення. МДВ обчислюється як різниця між еквівалентною ізотропно-випромінюваною потужністю (ЕІВП) передавача та чутливістю приймача з урахуванням усіх системних втрат, що необхідно для оптимальної демодуляції сигналу. Принцип розрахунку енергетичного бюджету радіолінії представлено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Принцип розрахунку енергетичного бюджету

Давайте візьмемо БС, яка оснащена приймачем, вихідна потужність передавача складає 100 Вт (50 дБм) . Радіочастотний блок встановлюється в безпосередній близькості від антени. Розрахуємо енергетичний бюджет для користувача на краю осередку, тобто приймає сигнали від BS з низьким відношенням сигнал/шум (SNR) і в цьому відношенні передає сигнали в UE в режимі рознесеною передачі. Як користувальницького пристрою вважаємо модем CPE з потужністю передавача 23 дБм [11].

Розрахунок максимально допустимих втрат здійснюється за формулою:

$$L_{MAPL} = P_{EIRP} - S_{RX} + G_{RXA} - L_{RXF} - M_{BUILD} - M_{INT} - M_{SHADE} + G_{HO}, \quad (4.1)$$

де:

P_{EIRP} – ЕІВП передавача, дБм;

S_{RX} – чутливість приймача, дБм;

G_{RXA}– коефіцієнт посилення антени приймача, дБм ;

L_{RXF} – втрати в фидерном тракті приймача, дБ;

M_{BUILD} – резерв на проникнення сигналу в приміщення, дБ;

M_{INT} – резерв на внутрішньосистемні перешкоди, дБ;

M_{SHADE} – резерв на затінення, дБ;

G_{HO} – виграш від хендовера, дБ.

Резерв на проникнення сігналав приміщення M_{BUILD}:

- 22 дБ в умовах щільної міської забудови;
- 17 дБ в умовах средньої міської забудови;
- 12 дБ в умовах рідкої забудови (в передмісті);
- 8 дБ в сільській місцевості (на відкритій місцевості в автомобілі).

M_{SHADE} – резерв на затінення, дБ приймаємо рівним 8,7 дБ (для необхідної ймовірності покриття рівній 95% і середньоквадратичного відхилення втратою на затінення 8дБ)

Розмір резерву, для внутрішньосистемних перешкоди M_{INT} характеризує збільшення потужності шуму на вході приймача [9,11].

Розрахунок передбачає, що запас для внутрішньосистемних перешкод в системі дорівнює:

$$M_{INT} = -10^{*}Lg(1-\eta), \tag{4.2}$$

де:

η – відносна завантаження стільники по висхідній або низхідній лінії.

$$M_{INT} = -10^{*}Lg(1-0{,}84) = 7.96 \text{ дБ}.$$

$$M_{INT} = -10^{*}Lg(1-0{,}65) = 4.56 \text{ дБ}.$$

Енергетичний запас на внутрішньосистемні завади (інтерференцію) перебуває у прямій залежності від рівня поточного навантаження на стільник. Зі зростанням планового навантаження виникає потреба у збільшенні цього запасу

під час проведення розрахунків. У критичному випадку, коли завантаження мережевого ресурсу досягає 100%, рівень інтерференційних завад асимптотично прямує до нескінченності, що призводить до деградації радіуса покриття стільника до нульового значення (ефект дихання стільника).

У процесі радіопланування розраховуються два значення максимально допустимих втрат сигналу – для висхідного (Uplink, UL) та низхідного (Downlink, DL) каналів зв'язку. Для подальшого обчислення граничного радіуса дії базової станції gNB вибирається мінімальне з цих двох значень, яке визначає системне обмеження радіолінії. Практика інженерного проектування показує, що обмежувальним фактором для максимального радіуса покриття бездротової мережі майже завжди виступає саме висхідний канал Uplink, що зумовлено лімітом потужності абонентських терміналів. Характер залежності енергетичного запасу на внутрішньосистемні завади від коефіцієнта завантаження стільника графічно відображено нижче на рисунку 4.2.

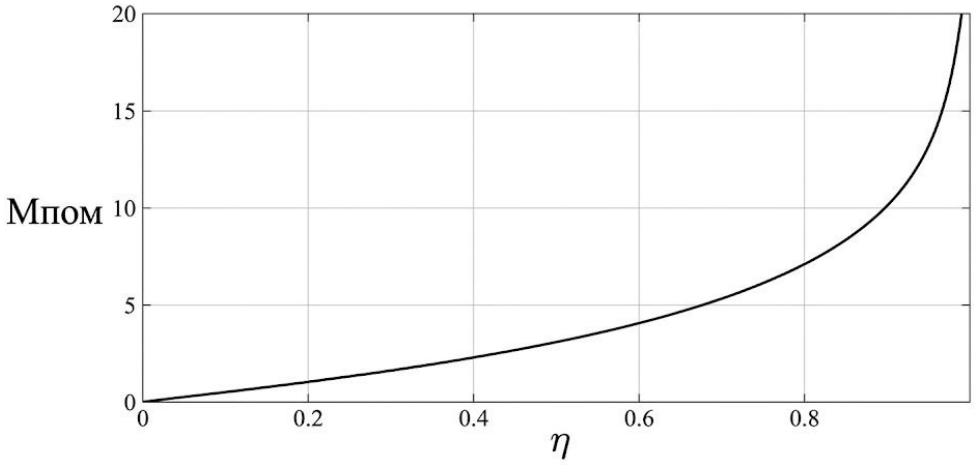


Рисунок 4.2 – Залежність запасу на внутрішньосистемні перешкоди від завантаження соти

Знаходимо шумову смугу приймача за формулою:

$$B = N_{RB} \times \Delta f_k \times 10^3, \quad (4.3)$$

де:

N_{RB} – число виділених ресурсних блоків(смуга 10 МГц, N_{RB} = 273 та смуга 5 МГц, N_{RB}= 133);

Δf_{k} – рознесення піднесучої (радіоканал в мережах 5G визначається як ресурсний блок РБ).

$$B = 273 \times 30 \times 10^3 = 8{,}19 \times 10^6 \text{ Гц} = 8{,}19 \text{ МГц},$$

$$B = 133 \times 30 \times 10^3 = 3{,}99 \times 10^6 \text{ Гц} = 3{,}99 \text{ МГц}.$$

Таблиця 4.1 – Максимальна смуга частот в залежності від розносу між піднесучими

SCS	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	90	100
(кГц)	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц
N_{RB}												
15	25	52	79	106	133	160	216	270	-	-	-	-
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273
60	-	11	18	24	31	38	51	65	79	107	121	135

Знаходимо P_{N} (потужність теплового шуму приймача, дБм) :

$$P_N = 10^* Lg\,(100 \cdot K \cdot T \cdot B), \tag{4.4}$$

де:

k = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (постійна Больцмана);

Т = 293 К (абсолютна температура).

$$P_N = 10^* Lg\,(100 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 8{,}19 \cdot 10^6) = -114.79 \text{ дБм},$$

$$P_N = 10^* Lg\,(100 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 3{,}99 \cdot 10^6) = -117.92 \text{ дБм}.$$

Чутливість приймача S_{RX} визначається за формулою:

$$S_{RX} = P_N + M_{SNR} + L_N, \tag{4.5}$$

де:

M_{SNR} – необхідне відношення сигнал / шум приймача, дБ;

L_N – коефіцієнт шуму приймача, дБ.

$$S_{RX} = -114.79 + 7 + 7 = -100.79 \text{ дБм},$$

$$S_{RX} = -117.92 + 2 + 11.5 = -104.42 \text{ дБм}.$$

Далі знаходимо ефективну изотропно випромінюється потужність PTX, дБм:

$$P_{EIRP} = P_{TX} + G_{TX} - G_{TXA} - L_{TXF}, \quad (4.6)$$

де:

P_{TX} – вихідна потужність передавача, дБм;

G_{TX}– виграш від складання потужності пров едатчіков, дБ;

G_{TXA} – коефіцієнт посилення антени передавача, дБи;

L_{TXF} – втрати в фидерном тракті передавача, дБ.

$$P_{EIRP} = 50 + 3 + 18 - 0.4 = 70{,}6 \text{ дБ},$$

$$P_{EIRP} = 23 + 0 + 0 - 0 = 23.0 \text{ дБм}.$$

Розраховуємо максимально допустимі втрати для лінії DL і UL:

$$L_{MAPL} = 70.6 + 100.79 + 0 - 0 - 22 - 7.96 - 8.7 + 0 = 132.73 \text{ дБ},$$

$$L_{MAPL} = 23 + 104.42 + 18 - 0.4 - 22 - 4.56 - 8.7 + 0 = 109.76 \text{ дБ}.$$

З двох значень МДВ, отриманих для ліній DL і UL вибираючи мінімальне, щоб вести насттупні розрахунки дальності зв'язку і радіусу стільника. Обмежує лінією по дальності зв'язку, як правило, є лінія вверх.

Таблиця 4.2 – Таблиця даних

Позначення	Параметр	TDD 100 МГц	
Лінія		DL	UL
Схема модуляції та кодування		64QAM ½	32QAM ½
TX	Вихідна потужність передавача, дБм	50	23
TX.DIV	Перевага від складання потужнстей передавачів, дБ	3	0
TX.A	Коєфіцієнт пудсилення передаючої антенни, дБи	18	0
TX.F	Втрати в фідерному тракті передавача, дБ	0,4	0
EI.RP	ЕІВП передавача, дБм	70,6	23
RB	Число виділенних ресурсних блоків	273	133
Δk	Ширина РБ, кГц	30	
N	Потужність теплового шуму приймача, дБм	-114,79	-117,92
Ns	Коефіцієнт шуму приймача, дБ	7	2
SNR	Необхідне співвідношення сигнал/шум, дБ	7	11,5
RX	Чутливість приймача, дБм	-100,79	-104,42
RX.A	Коєфіцієнт пудсилення приймальної антенни, дБи	0	18
RX.F	Втрати в фідерному тракті приймача, дБ	0	0,4
	Відносна завантаженність стільника	84%	65%
INT	Резерв внутрішні системні завади, дБ	7,96	4,56
BUILD	Резерв на проникнення сигналу до приміщення/автомобілю, дБ	2/2	
SHADE	Резерв на затінення,дБ	8.7	
MAPL	МДВ на лінії,.дБ	132,73	109,76

4.2 Розрахунок зони покриття та кількості БС по моделі COST231

Нам відомі допустимі втрати, з них ми можемо знайти якою буде радіус покриття нашої стільники. Візьмемо висоту підйому антени абонентських станцій 1.5 м, а висоту базової станції 30м в міській зоні відповідно [7, 8, 9].

З формули допустимих втрат виведемо формулу для визначення радіусу стільників:

$$L = 45{,}5 - 13{,}82 \cdot \lg(H_{\text{БС}}) + 35{,}4 \cdot \lg(\text{F}) + (1{,}1 \times \lg(\text{F}) - 0{,}7) \cdot H_{\text{МС}} + (44{,}9 - 6{,}55 \times \lg(H_{\text{БС}})) \cdot \lg(\text{R}). \quad (4.7)$$

Радіус стільників знаходиться за формулою:

$$R = 10\frac{L - 45.5 + 13{,}82\lg H_{\text{БС}} - 35.4\lg F + (1.1\lg\text{F} - 0.7)H_{\text{МС}}}{(44.9 - 6.55H_{\text{БС}})}. \quad (4.8)$$

Розраховуємо зону покриття стільників:

$$R = 10\frac{109.76 - 45.5 + 13{,}82\lg 30 - 35.4\lg 1710 + (1.1\lg 1710 - 0.7)1.5}{(44.9 - 6.55\lg 30)} = 374 \text{ м}.$$

Відповідно до радіусу 374 м , площа покриття однієї базової станції буде складати:

$$A = \pi r^2 ,$$

$$\text{A} = 3.14 \times 374^2 = 439210{,}64 = 0.439\text{км}^2.$$

Тож кількість базових станцій буде складати:

$$N = 69 \text{ км}^2 \div 0.439\text{км}^2 = 158 \text{ шт}.$$

4.3 Розрахунок швидкості передачі даних 5G NR

Розрахуємо швидкість передачі даних 5G NR відповідно до 3GPP TS 38.306, 38.101-1,2 документами. Розрахуємо швидкість передачі для лінії UL, за формулою:

$$R_{5GNR} = 10 - 6 \cdot \sum(V_{\text{шарів}} \cdot Q_m \cdot f \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j)\mu} \cdot 12}{T_S^{\mu}} \cdot (1 - OH)_{j=1}^{j}, \quad (4.9)$$

де:

j – кількість агрегованих компонентних несучих в смузі або комбінації смуг;

Q_m – порядок модуляції;

$V_{\text{шарів}}$ – кількість шарів;

f – коефіцієнт масштабування;

μ – нумерологія 5G NR

OH – накладні витрати;

Ts (мкс) = середня тривалість символу OFDM в підкадрів.

Таблиця 4.3 – Вхідні дані

Параметри	Вхідні дані
J	1
$V_{слоев}$	4
F	1
μ	1
OH	0.08
Ts	$3.57 \cdot 10^{-5}$
N_{PRB}	133
Q_m	6(QAM 32)
R_{max}	948/1024

Розрахуємо середню тривалість символу OFDM (T_S^{μ}) в підкадрів для платформи 5G за формлою [4, 12, 14]:

$$T_S^{\mu} = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^{\mu}}, \quad (4.10)$$

$$T_S^{\mu} = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^{1}} = 3{,}57 \cdot 10^{-5}$$

Накладні витрати (OH) набувають таких значень:

[0,14] → Діапазон частот FR1 для DL;

[0,18] → Діапазон частот FR2 для DL;

[0,08] → Діапазон частот FR1 для UL;

[0,10] → Діапазон частот FR2 для UL.

$$R_{5GNR} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^{j} (4 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 1 \cdot \left(\frac{948}{1024}\right) \cdot \frac{133 \cdot 12}{3{,}57 \cdot 10^{-5}} \cdot (1 - 0.08)) = 913.49 \text{ Мбіт / с.}$$

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі досліджено та проаналізовано фундаментальні технологічні принципи проектування й організації стільникової мережі зв’язку п'ятого покоління (5G) на базі архітектури LTE для умов міста Черкаси.

Перший розділ роботи присвячений комплексному аналізу загальних принципів та архітектурних особливостей побудови мережевої інфраструктури 5G у межах еволюційного розвитку технологій мобільного зв'язку від 3G до 5G. У роботі показано, що системи першої генерації (1G) базувалися на аналогових методах передачі і забезпечували винятково голосову комунікацію. Наступний стандарт 2G, впроваджений у 1992 році, ознаменував перехід до цифрових технологій інформаційного обміну. Початком епохи мобільного широкосмугового доступу став 2000 рік із появою стандарту третього покоління (3G) – Універсальної мобільної телекомунікаційної системи (UMTS), що забезпечувала базову швидкість передачі даних до 384 кбіт/с. Технологічним стрибком став перехід до широкосмугових мереж четвертого покоління (4G/LTE), які повністю замінили інфраструктуру 3G. Перша у світі комерційна мережа LTE (Стокгольм та Осло) продемонструвала розрахункові пікові швидкості на рівні 382 Мбіт/с у низхідному каналі (Downlink) та 86 Мбіт/с у висхідному каналі (Uplink). Сучасні мережі стільникового зв’язку 5G розглядаються як наступний еволюційний етап розвитку телекомунікаційної індустрії.

У розділі також визначено роль провідних міжнародних консорціумів у процесі стандартизації рішень п'ятого покоління, серед яких ключовими є три структури:

ETSI – повноправний член консорціуму 3GPP, що виступає головним драйвером розробки специфікацій 5G;

IETF – відповідає за модернізацію IP-протоколів для підтримки концепції віртуалізації мережевих функцій (NFV);

ITU – спеціалізована установа ООН, яка здійснює глобальну стандартизацію телекомунікаційних технологій та координує розподіл радіочастотного спектра.

Доведено, що впровадження стандарту 5G на базі технологій LTE є неминучим рішенням. Мережі зв'язку 5G побудовані як гетерогенні на основі архітектуры, яка включає ієрархічну структуру сотів різного розміру, що

використовують різнорідні технології радіодоступу. У таких системах абонентські термінали під час передачі даних мережній інфраструктурі мають можливість використовувати кілька радіотехнологій одночасно. Більш детальний опис загальних принципів реалізації та параметрів мереж 5G дозволив охарактеризувати такі показники, як: пікова швидкість, ефективність використання спектру, обсяг інформації на одиницю частотного діапазону, мобільність користувача, затримка мережі, щільність терміналів та енергоефективність системи 5G. Також надана стисла характеристика різним варіантам реалізації систем в залежності від обраного частотного діапазону [4,5].

Другий розділ роботи присвячений аналізу особливостей реалізації та принципів функціонування мереж 5G. У ході дослідження детально розглянуто ключові технологічні рішення, такі як Massive MIMO та гнучка структура кадрів, що дозволяють суттєво підвищити пропускну здатність радіоінтерфейсу. Проаналізовано архітектуру опорної мережі 5G Core, яка базується на сервісно-орієнтованій моделі (SBA) та принципах віртуалізації мережевих функцій (NFV). Це забезпечує можливість створення ізольованих мережевих слайсів під різні типи послуг. Крім того, наведено комплексну економіко-географічну та демографічну характеристику проєктуємого регіону – міста Черкаси, що стало підґрунтям для подальшого планування структури мережі стільникового зв'язку [8,9].

У третьому розділі сформовано методику планування типової мережі стільникового зв'язку 5G в сучасних умовах. Визначено особливості використання частотних діапазонів, стеків протоколів та каналів передачі даних, які є актуальними для впровадження стандарту 5G в Україні з урахуванням нормативно-правової бази національного регулятора НКЕК та Міністерства цифрової трансформації. Обґрунтовано технічні рішення щодо модернізації існуючого обладнання базових станцій LTE та інтеграції мультисервісних платформ доступу типу Alcatel 1692 Metro Span Edge для розширення можливостей транспортної мережі (Backhaul). На основі отриманих даних сформовано оптимальні готові моделі сот для міської забудови [10].

Четвертий розділ містить розрахункову частину кваліфікаційної роботи. Проведено типовий розрахунок бюджету лінії зв'язку та визначено максимально допустимі втрати (МДВ) радіосигналу для напрямків Uplink та Downlink з урахуванням обмежень через запас на тепловий шум та інтерференцію (TIR). На основі моделі поширення радіохвиль COST231 розраховано радіус покриття

однієї базової станції та визначено необхідну загальну кількість БС для забезпечення суцільного покриття міста Черкаси. Також виконано розрахунок реальної швидкості передачі даних 5G New Radio (NR) залежно від ширини частотного каналу, порядку модуляції та конфігурації антенних систем MIMO[11,12].

Отримані результати підтверджують технічну доцільність та високу якість розгортання мережі 5G на базі існуючої інфраструктури LTE в умовах міста Черкаси. Модернізація транспортної мережі та впровадження гнучких архітектурних рішень дозволять успішно інтегрувати нове обладнання з мінімальними капітальними витратами. Застосування передових технологій радіодоступу Massive MIMO гарантує стабільне покриття та високу швидкість передачі даних навіть у районах із щільною міською забудовою. Розглянута модель мережі повністю задовольняє сучасні потреби регіону та закладає надійну технічну основу для подальшої цифровізації міської інфраструктури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Комплексна програма створення Єдиної Національної системи з'язку України (ЄНСЗ) служби і мережі зв'язку загального користування. – Київ: ДКЗУ, 1998. – 128 с.

2. Sauter M. From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband: textbook / M. Sauter. – Chichester: John Wiley & Sons, 2021. – 624 p.

3. Rodriguez J. Fundamentals of 5G Mobile Networks: textbook / J. Rodriguez. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 316 p.

4. Holma H. 5G Technology: 3GPP New Radio: textbook / H. Holma, A. Toskala, T. Nakamura. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. – 536 p.

5. Penttinen J. T. J. 5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications: textbook / J. T. J. Penttinen. – Chichester: John Wiley & Sons, 2019. – 328 p.

6. Гельгор А. Л. Технология LTE mobile передачи данных: учеб. пособие / А. Л. Гельгор, Е. А. Попов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.

7. Вишневский В. М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G: научное издание / В. М. Вишневский, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.

8. Ємельянов В. В. Системи стільникового рухомого радіозв’язку: навч. посібник / В. В. Ємельянов, І. В. Свид. – Харків: СМІТ, 2010. – 283 с.

9. Mishra A. R. 5G Cellular Network Planning and Optimization: textbook / A. R. Mishra. – Gistrup: River Publishers, 2024. – 412 p.

10. Громаков Ю. А. Структура TDMA-кадров и формирование сигналов в стандарте GSM / Ю. А. Громаков // Электросвязь. – 1993. – № 10. – С. 7–9.

11. Dahlman E. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: textbook / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Oxford: Academic Press, 2013. – 544 p.

12. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications: textbook / C. Cox. – Chichester: John Wiley & Sons, 2014. – 488 p.

13. Корнєєв Ю. В. Принципи побудови систем і мереж рухомого зв'язку: навч. посібник / Ю. В. Корнєєв, Е. О. Сукачов, М. О. Чумак. – Одеса: УДАЗ ім. О. С. Попова, 1997. – 68 с.

14. 3GPP. The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [Електронний ресурс] // Офіційний сайт консорціума. – Дата звернення 21.05.2026 – Режим доступу: 3gpp.org.

15. ITU. International Telecommunication Union (ITU) [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Міжнародного союзу електрозв'язку – Дата звернення 21.05.2026 – Режим доступу: itu.int.

16. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку (НКЕК) [Електронний ресурс] // Офіційний сайт регулятора. – Дата звернення 01.06.2026 – Режим доступу: https://nkek.gov.ua.

17. Міністерство цифрової трансформації України [Електронний ресурс] // Офіційний веб-портал. – Дата звернення 08.06.2026 – Режим доступу: https://thedigital.gov.ua.

18. Alcatel 1692 Metro Span Edge [Електронний ресурс] // Сайт компании ООО «Нстор» NStor. – Дата доступу 12.06.2026 – Режим доступу: nstor.ru.