

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерних наук

Соловська І.М., Розенвассер Д.М.

МОБІЛЬНІ КОМУНІКАЦІЇ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів

галузі знань – 12 Інформаційні технології, спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», 122 «Комп'ютерні науки», 123 «Комп'ютерна інженерія», 125 «Кібербезпека та захист інформації»,
галузі знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації, спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»,
галузі знань 01 – Освіта/Педагогіка, спеціальність 014 «Середня освіта. Інформатика»

Одеса – 2025 рік

Рекомендовано Вченою радою Міжнародного гуманітарного університету
(Протокол № 5 від 20.01.2025 р.)

Соловська І.М., Розенвассер Д.М.

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Мобільні комунікації» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення», 122 «Комп'ютерні науки», 123 «Комп'ютерна інженерія», 125 «Кібербезпека та захист інформації», 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», 014 «Середня освіта. Інформатика» денної та заочної форми навчання [Електронне видання] / Соловська І.М., Розенвассер Д.М. Кафедра комп'ютерних наук Міжнародного гуманітарного університету. Одеса. 2025. – 50 с.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
Кількість кредитів – 6, загальна кількість годин – 180	Галузь – 12 Інформаційні технології Спеціальність – 121 Інженерія програмного забезпечення	Денна форма	Заочна форма
		вибіркова	
		Рік підготовки:	
		3	
		Семестр:	
Мова навчання – українська	Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)	6	
		Лекційні заняття:	
		40	12
		Практичні заняття:	
		38	12
		Лабораторні роботи	
		0	0
		Самостійна робота	
		102	156
		Вид контролю:	
		залік	

Дисципліна «Мобільні комунікації» формує у здобувачів необхідний обсяг теоретичних і практичних знань про сучасні стандарти та технології систем мобільного зв'язку, принципи побудови та процедури функціонування систем та мереж мобільного зв'язку, алгоритми адміністрування та конфігурації обладнання та надання послуг.

Вивчення дисципліни забезпечує володіння знаннями щодо принципів побудови технологій та стандартів мереж мобільного зв'язку етапів розвитку 2.5G-5G, базові процедури, які виконуються в мережах мобільного зв'язку, включно з алгоритмами встановлення з'єднань та надання послуг із забезпеченням гарантованої якості обслуговування. Знання, отриманні при вивченні дисципліни «Мобільні комунікації» дозволять бакалаврам виконувати аналіз та синтез архітектури мереж мобільного зв'язку етапів розвитку 2.5G-5G, застосовуючи необхідні процедури взаємодії, включно з автентифікацією,

авторизацією та білінгом в інформаційних технологіях, зокрема при розробці мобільних додатків, виконувати процедури адміністрування та конфігурації користувачів та обладнання мереж мобільного зв'язку.

МЕТА ДИСЦИПЛІНИ. Метою дисципліни є формування у здобувачів знань про архітектуру та принципи функціонування сучасних мобільних мереж передачі даних, особливості використання технологій мобільного зв'язку у програмних системах, а також набуття практичних навичок аналізу та використання мобільних мережевих технологій під час розробки програмних сервісів і застосунків.

ПЕРЕКВІЗИТИ. Передумовами для вивчення дисципліни є знання та вміння, отримані здобувачами під час вивчення навчальних дисциплін «Операційні системи», «Теорія інформації та кодування», «Моделювання систем», «Вебтехнології та вебдизайн», «Комп'ютерні мережі».

ПОСТРЕКВІЗИТИ. Знання, уміння та навички, набуті під час вивчення дисципліни, можуть бути використані під час подальшого вивчення дисципліни «Програмування інфокомунікаційних сервісів і систем», а також під час виконання кваліфікаційної роботи.

2. ОЧІКУВАНІ КОМПЕТЕНТНОСТІ, ЯКІ ПЛАНУЄТЬСЯ СФОРМУВАТИ ТА ДОСЯГНЕННЯ ПРОГРАМНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У процесі реалізації програми дисципліни «Мобільні комунікації» формуються наступні компетентності із передбачених освітньо-професійною програмою «Інженерія програмного забезпечення» зі спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Інтегральна компетентність

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані завдання або практичні проблеми інженерії програмного забезпечення, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, із застосуванням теорій та методів інформаційних технологій

Спеціальні (фахові, предметні) компетентності

K18. Здатність аналізувати, вибирати і застосовувати методи і засоби для забезпечення інформаційної безпеки (в тому числі кібербезпеки).

K20. Здатність застосовувати фундаментальні і міждисциплінарні знання для розв'язання завдань інженерії програмного забезпечення.

K23. Здатність реалізовувати фази та ітерації життєвого циклу програмних систем та інформаційних технологій на основі відповідних моделей і підходів розробки програмного забезпечення.

K27. Здатність розробляти програмні модулі, додатки та скрипти для інтеграції, моніторингу та управління інфокомунікаційними системами, сервісами та пристроями з використанням програмних інтерфейсів і сучасних мов програмування.

Програмні результати навчання

ПР01. Аналізувати, цілеспрямовано шукати і вибирати необхідні для вирішення професійних завдань інформаційно-довідникові ресурси і знання з урахуванням сучасних досягнень науки і техніки.

ПР18. Знати та вміти застосовувати інформаційні технології обробки, зберігання та передачі даних.

ПР21. Знати, аналізувати, вибирати та застосовувати засоби забезпечення інформаційної безпеки і цілісності даних відповідно до прикладних завдань та створюваних програмних систем.

ПР25. Вміти розробляти програмні модулі, додатки та скрипти для інтеграції, моніторингу та управління інфокомунікаційними системами, сервісами та пристроями з використанням програмних інтерфейсів і сучасних мов програмування.

Заплановані результати навчання за навчальною дисципліною

Знання:

- принципи побудови та функціонування сучасних систем мобільного зв'язку і передачі даних;
- архітектуру та основні технології мобільних мереж різних поколінь (2G–5G);

- протоколи та механізми передачі даних у мобільних телекомунікаційних системах;
- принципи організації радіоінтерфейсу та взаємодії елементів інфраструктури мобільних мереж;
- механізми встановлення з'єднання, автентифікації та забезпечення безпеки у мобільних мережах;
- можливості використання мобільних мереж для реалізації сучасних програмних сервісів і застосунків.

Уміння:

- аналізувати структуру та принципи функціонування мобільних мереж різних поколінь;
- використовувати мережеві протоколи та сервіси мобільних мереж під час створення програмних систем;
- оцінювати можливості мобільних мереж для передачі даних і реалізації прикладних сервісів;
- застосовувати інструменти аналізу та моделювання роботи мобільних мереж;
- враховувати особливості функціонування мобільних мереж під час розробки програмних застосунків.

Навички:

- аналізу архітектури та принципів роботи сучасних мобільних телекомунікаційних систем;
- використання мобільних мережевих сервісів під час розробки програмних застосунків;
- роботи з програмними засобами аналізу та моделювання мобільних мереж;
- інтеграції програмних систем із сервісами мобільних комунікацій;
- оцінювання ефективності використання мобільних мереж у програмних і інформаційних системах.

3. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1. Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку

Існуюча архітектура системи мобільного зв'язку стандарту GSM/GPRS/EDGE. Радіоінтерфейс GSM. Тьохривнева мережна архітектура

системи мобільного зв'язку під керуванням Mobile Softswitch: Transport layer, Control layer, Application layer згідно 3GPP. Загальна характеристика функціональних рівнів та їх апаратно-програмна реалізація (Circuit core – MGW, MSS/VLR, MSS та Packet core – SGSN/GGSN, Service & Subscriber), принципи взаємодії.

Бази даних HLR/AUC/VLR, принципи побудови, структура та склад даних. Процедури автентифікації, ідентифікації обладнання та шифрування в мережі мобільного зв'язку. Типові алгоритми процедур встановлення з'єднань в системах мобільного зв'язку. Ієрархічна структура мереж GSM (International, National та рівень PLMN). Мережна ідентифікація. Поняття та коди Service Area - International GSM SA, National GSM SA (MCC, CC), PLMN SA (MNC, NDC, NCC). Поняття та коди Local Area (LAC, LAI), Cell (CI, CGI). Плани нумерації, формати кодів ідентифікації Local Area, та National&PLMN. Абонентська ідентифікація (IMSI, MSISDN, IMEI) згідно рек. ITU-T E.212, E.164.

Тема 2. Мережі мобільного зв'язку 3G/UMTS

Системи мобільного зв'язку третього покоління 3G/UMTS. Радіоінтерфейс UMTS (частотний діапазон, WCDMA). Номенклатура послуг 3G. Узагальнена архітектура мережі радіодоступу UTRAN/WCDMA, RNC, Node B, UE.

Базові принципи встановлення з'єднань та обслуговування абонентів в мережі UMTS. Взаємодія мережі Wi-Fi та UMTS в процедурах передавання даних.

Тема 2. Ієрархічна структура мереж мобільного зв'язку

Системи мобільного зв'язку четвертого покоління 4G/LTE. Радіоінтерфейс LTE (частотний діапазон, LTE). Номенклатура та характеристики послуг 4G. Функціональна архітектура мережі LTE (EPC, S-GW, SAE, MME, UPE) згідно Rel.8-10. Інтерфейси та протоколи взаємодії.

Віртуалізація мережних функцій LTE на базі технології NFV та програмно-конфігурованої мережі SDN.

Номенклатура послуг 5G (послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB, масивного машинного зв'язку mMTC, послуги медицини mHealth, надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC). Технологія NR (Rel. 14). Архітектура мережі 5G/NR. Реалізація радіоінтерфейсу та побудова Mesh-мережі. Міжмашинна взаємодія M2M та взаємодія пристроїв D2D в мережі IoT. Принципи реалізації Network Slicing в мережі IoT.

Мережа IoT Інтернет речей та IoE. Архітектура та принципи побудови мережі IoT. Порівняння технологій реалізації (LoRa, Cat-1, eMTC, NB-IoT).

Тема 3. Мережі мобільного зв'язку третього та четвертого покоління

Мережі мобільного зв'язку третього покоління (3G) UMTS та четвертого покоління 4G/LTE (LTE-A, LTE-Pro). Номенклатура перспективних послуг 3G. Узагальнена архітектура мережі UTRAN (WCDMA): RNC, Node B, UE. Перспективні мережі мобільного зв'язку четвертого покоління. Технологія LTE. Номенклатура та характеристики послуг LTE. Розвиток мереж LTE на базі віртуальних мобільних мереж MVNO. Проєктування та керування інформаційно-комунікаційними системами, розробка та супровід програмного забезпечення

Тема 4. Проєктування та експлуатація мереж мобільного зв'язку.

Основна послідовність проєктування. Вихідні дані, огляд структури існуючої мережі. Особливості вибору обладнання. Визначення конфігурації мережі, аналіз розподілу навантаження, визначення пропускної спроможності об'єктів мережі.

4. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	Денна форма					Заочна форма				
	Усього	у тому числі				Усього	у тому числі			
		Лекц.	Прак.	Лаб.	Сам. роб.		Лекц.	Прак.	Лаб.	Сам. роб.
Тема 1. Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку України. Основні принципи побудови та функціонування Contact-center оператора. Надання екстрених, сервісних та інформаційних послуг. Реалізація	45	10	10	0	30	45	2	2	0	41

VoIVR. Надання послуг у мережі мобільного зв'язку. Основи білінгу та адміністрування послуг.										
Тема 2. Ієрархічна структура мереж мобільного зв'язку Визначення місцезнаходження користувача: особливості та алгоритми. Принципи автентифікації, авторизації та ідентифікації. Ідентифікація в мережі LTE. Ідентифікатори абонентів UE ID (IMSI, GUTI, S-TMSI, IP-address / PDN address, C-RNTI, eNodeB UE S1AP ID, MME UE S1AP ID, Old UE X2AP ID, UE X2AP ID). Ідентифікатори мобільного обладнання ME ID (IMEI). Ідентифікатори мережного обладнання NE ID (GUMMEI, MMEI, Global eNodeB ID, eNodeB ID, ECGI, ECI, P-GW ID). Ідентифікатори місцезнаходження	45	10	10	0	25	45	4	4	0	37

Location ID (TAI, TAC).										
Тема 3. Мережі мобільного зв'язку третього та четвертого покоління Мережі мобільного зв'язку третього покоління (3G) UMTS та четвертого покоління 4G/LTE (LTE-A, LTE-Pro). Мобільна комерція (M-commerce). Принципи побудови та основні концепції. Огляд технологій мобільних платежів. Технологія NFC та принципи функціонування мобільних платіжних систем..	45	10	10	0	25	45	4	4	0	37
Тема 4. Перспективні мережі 5G Технологія NR. Номенклатура послуг 5G (мобільний широкосмуговий доступ eMBB, масивний машинний зв'язок mMTC, наднадійні з'єднання з малою затримкою URLLC, сервіси медицини mHealth). Реалізація радіоінтерфейсу та побудова Mesh-мереж.	45	10	8	0	27	45	2	2	0	41

Прикладні сервіси Smart Parking, Tracking, Smart Street Lamps. Технології віртуальної реальності (VR), доповненої реальності (AR) та тактильного інтернету (TSN)..										
Усього годин	180	40	38	0	102	180	12	12	0	156
ПІДСУМКОВИЙ КОНТРОЛЬ – ЗАЛІК										

5. ПИТАННЯ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна форма	заочна форма
1	Сучасний стан технологічного розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні (оператори, технології, абонентська база, ARPU).	2	
2	Вивчення 3-х рівневої мережної архітектури мобільного зв'язку під керуванням <i>Mobile Softswitch</i> .	2	2
3	Обладнання мереж мобільного зв'язку. Технічні характеристики.	2	
4	Бази даних HLR/AUC/VLR, принципи побудови, структура та склад даних.	2	
5	Вивчення процедур автентифікації, ідентифікації обладнання та шифрування.	2	
6	Мережна ідентифікація. Поняття та коди. Плани нумерації, формати кодів ідентифікації.	2	2
7	Процеси встановлення з'єднання, вихідного <i>Outgoing call</i> та вхідного <i>Incoming call</i> .	2	
8	Мережі мобільного зв'язку третього покоління 3G/UMTS. Склад обладнання, протоколи взаємодії.	2	2
9	Базові принципи встановлення з'єднань та обслуговування абонентів в мережі UMTS.	2	
10	Взаємодія мережі Wi-Fi та UMTS в процедурах передавання даних.	2	2
11	Функціональна архітектура мережі <i>LTE (EPC, S-GW, SAE, MME, UPE)</i> згідно <i>Rel.8-10</i> . Інтерфейси та протоколи взаємодії.	2	2
12	Віртуалізація мережних функцій <i>LTE</i> на базі технології <i>NFV</i> та	2	

	програмно-конфігурованої мережі <i>SDN</i> .		
13	Реалізація програмно-конфігурованої мережі <i>SDN</i> в мережі мобільного зв'язку.	2	2
14	Архітектура мережі 5G/NR на мережних функціях віртуалізації VNF.	2	2
15	Реалізація Network Slicing в мережі 5G/NR.	2	
16	Реалізація C-RAN та D-RAN на базі gNB.	2	
17	Інтернет речей. Мережа IoT.	2	
18	Порівняння технологій реалізації (LoRa, Cat-1, eMTC, NB-IoT).	2	
19	Міжмашинна взаємодія M2M та D2D пристроїв Інтернету речей IoT.	2	
	Всього	38	12

6. САМОСТІЙНА РОБОТА

До самостійної роботи студентів щодо вивчення дисципліни «Мобільні комунікації» включаються:

1. Знайомство з науковою та навчальною літературою відповідно зазначених у програмі тем.
2. Опрацювання лекційного матеріалу.
3. Підготовка до практичних занять.
4. Консультації з викладачем протягом семестру.
5. Самостійне опрацювання окремих питань навчальної дисципліни.
6. Підготовка до підсумкового контролю.

Тематика та питання до самостійної підготовки та індивідуальних завдань

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна форма	заочна форма
1	Тема 1. Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку України. Основні принципи побудови та функціонування Contact-center оператора. Надання екстрених, сервісних та інформаційних послуг. Реалізація VoIVR. Надання послуг у мережі мобільного зв'язку. Основи білінгу та адміністрування послуг.	30	41

2	Тема 2. Ієрархічна структура мереж мобільного зв'язку Визначення місцезнаходження користувача: особливості та алгоритми. Принципи автентифікації, авторизації та ідентифікації. Ідентифікація в мережі LTE. Ідентифікатори абонентів UE ID (IMSI, GUTI, S-TMSI, IP-address / PDN address, C-RNTI, eNodeB UE S1AP ID, MME UE S1AP ID, Old UE X2AP ID, UE X2AP ID). Ідентифікатори мобільного обладнання ME ID (IMEI). Ідентифікатори мережного обладнання NE ID (GUMMEI, MMEI, Global eNodeB ID, eNodeB ID, ECGI, ECI, P-GW ID). Ідентифікатори місцезнаходження Location ID (TAI, TAC).	25	37
3	Тема 3. Мережі мобільного зв'язку третього та четвертого покоління Мережі мобільного зв'язку третього покоління (3G) UMTS та четвертого покоління 4G/LTE (LTE-A, LTE-Pro). Мобільна комерція (M-commerce). Принципи побудови та основні концепції. Огляд технологій мобільних платежів. Технологія NFC та принципи функціонування мобільних платіжних систем..	25	37
4	Тема 4. Перспективні мережі 5G Технологія NR. Номенклатура послуг 5G (мобільний широкосмуговий доступ eMBB, масивний машинний зв'язок mMTC, наднадійні з'єднання з малою затримкою URLLC, сервіси медицини mHealth). Реалізація радіоінтерфейсу та побудова Mesh-мереж. Прикладні сервіси Smart Parking, Tracking, Smart Street Lamps. Технології віртуальної реальності (VR), доповненої реальності (AR) та тактильного інтернету (TSN).	27	41
	Усього годин	102	156

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Тема 1. Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку України.

Мережі мобільного зв'язку України представлені трьома основними операторами: Київстар, Vodafone Україна та lifecell. Ці оператори забезпечують близько 99% ринку мобільного зв'язку за кількістю активних SIM-карт. За статистикою, кількість активних мобільних підключень перевищує кількість

населення і становить понад 55 млн абонентів, що пов'язано з використанням кількох SIM-карт однією людиною.

Основною особливістю функціонування мереж мобільного зв'язку України після початку повномасштабної війни телекомунікаційна інфраструктура України зазнала значних пошкоджень. Проте мобільні оператори швидко адаптувалися до нових умов.

Одним із важливих рішень стало впровадження національного роумінгу, який дозволяє абонентам підключатися до мережі будь-якого оператора у разі відсутності сигналу власного оператора.

Сучасні мобільні мережі України використовують наступні технології:

1) Базова мережа 2.75G на основі GSM/GPRS (General Packet Radio Service)/EDGE (Enhanced Data GSM Environment), середній час затримки становить біля 200 мс;

2) накладена мережа 3G стандарту UMTS (Universal Mobile Telephone Service) на основі технології W-CDMA. Мережа радіодоступу UTRAN на базі базових станцій NodeB, середній час затримки становить близько 40-60 мс;

3) накладена мережа 4G на основі технології LTE Advanced Pro (Long Term Evolution) (Rel. 14).

Серед основних тенденцій розвитку мереж мобільного зв'язку слід відзначити, обладнання технології 3G поступово вимикається, а її частоти використовуються для покращення 4G-мереж.

П'яте покоління мобільного зв'язку забезпечує надвисокі швидкості передачі даних і мінімальні затримки сигналу. Однак через технічні та безпекові причини повноцінний запуск 5G в Україні очікується не раніше 2027-2028 років.

Згідно даних Ericson Mobility Report 2025 (рис. 1) кількість користувачів мережі 5G до 2031 року буде становити більш ніж 6,4 мільярда, на кінець 2025 року буде становити 2,5 мільярда. Кількість користувачів LTE (Rel. 10-14) в світі становить близько 4,5 мільярдів користувачів станом на 2025 рік, кожен другий абонент мобільного зв'язку в світі використовує LTE.

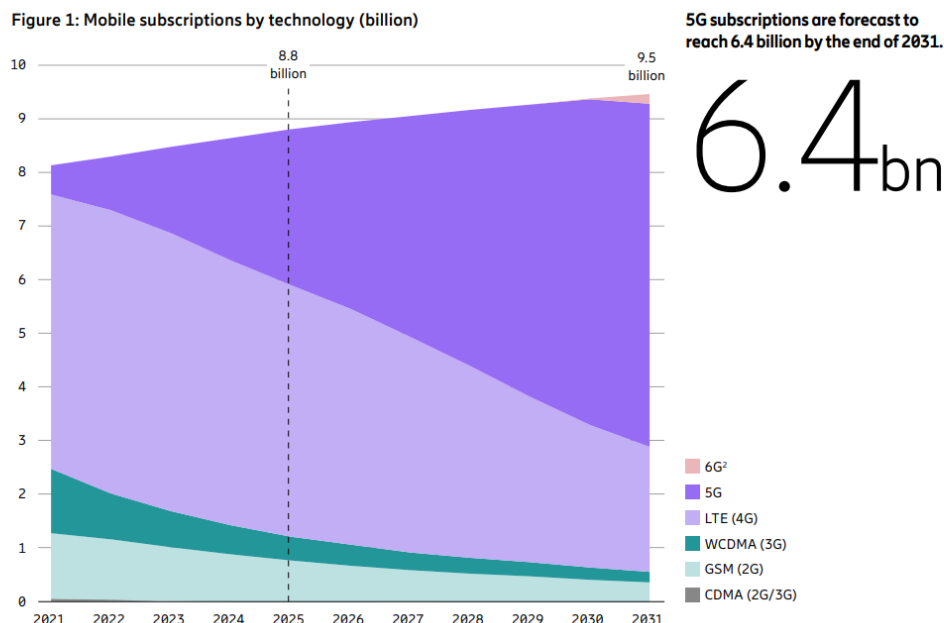


Рисунок 1 – Технологічний розвиток мереж мобільного зв'язку згідно Ericson Mobility Report станом на 2025 рік

На протязі 2027-2028 років в Україні планується впровадити технології 5G на основі технологій LTE-NB та NR (New Radio) з такими характеристиками:

- швидкість передачі даних від 1 Гбіт / с для підтримки відео ультрависокої роздільної здатності та додатків віртуальної реальності та 10 Гбіт / с для підтримки мобільних хмарних сервісів;

- час затримки менше 1 мс та час перемикавання до 10 мс між різними технологіями;

- енергоспоживання: споживання енергії на 1 біт інформації слід зменшити в 1000 разів, щоб збільшити час роботи акумулятора підключеного пристрою.

На сьогоднішній день мобільні додатки IoT реалізуються на різних технологічних підключеннях. В останні роки підтримку великих об'ємів пристроїв дозволили технології Massive IoT NB-IoT та Cat-M1, розгорнуті на базі мереж LTE. Мобільне використання пристроїв IoT мають різні вимоги до підключення.

Датчик тепла в підвалі потребує глибокого покриття та низької пропускної здатності, тоді як підключений робот на виробничій лінії може вимагати наднизької затримки, високої надійності та високої пропускної здатності. Massive IoT. Цей сегмент насамперед включає недорогі пристрої з тривалим ресурсом акумулятора та відносно низькою пропускну здатністю.

Підтримка їх уже надається в сьогоднішніх мережах LTE за допомогою NB-IoT та Cat-M. Пристрої Massive IoT включають утиліти з інтелектуальним вимірюванням, охорону здоров'я у вигляді медичних арабських виробів та

транспорт з датчиками відстеження. В кінці 2025 року очікується, що NB-IoT та Cat-M становитимуть близько 45 відсотків IoT.

В цілому, станом на 2025 рік мобільний зв'язок України активно розвивається та відіграє важливу роль у функціонуванні цифрового суспільства. Основною технологією залишається 4G, яка забезпечує швидкісний мобільний інтернет для більшості населення. Попри складні умови воєнного часу, оператори продовжують модернізувати інфраструктуру, розширювати покриття та готуватися до впровадження технології 5G. У майбутньому розвиток мобільних мереж сприятиме подальшій цифровій трансформації економіки та підвищенню якості телекомунікаційних послуг.

Тема 2. Ієрархічна структура мереж мобільного зв'язку.

Сучасні мережі мобільного зв'язку України у своїй основі мають архітектуру, збудовану на базі мережі 2,5G/GSM/GPRS/EDGE [1-3]. Мережа мобільного зв'язку лише на рівні доступу забезпечує підключення мобільних станцій MS, призначених для організації доступу абонентів до базових станцій за інтерфейсом Um.

Кожна MS містить картку модуля ідентифікації абонента SIM (Subscriber Identity Module, SIM), захищена від несанкціонованого використання та містить міжнародний ідентифікатор мобільного абонента IMSI, секретний ключ аутентифікації та іншу інформацію.

Рівень доступу (рис. 2) побудовано на базі обладнання базових станцій BTS (Base Transceiver Station) та контролера базових станцій BSC (Base Station Controller) виконує функції керування розподілом радіоканалів, контролює з'єднання, регулює їх черговість, забезпечує режим роботи з стрибаючою частотою, модуляцію та демодуляцію сигналів, кодування та декодування, дзвінка, визначає черговість передачі повідомлень персонального дзвінка.

Базові станції BTS керують радіоканалом та дозволяють забезпечити взаємодію з мобільними станціями MS за інтерфейсом Abis over IP. Кожен осередок мережі покривається однією BTS, що забезпечує організацію радіоканалів. Контролер BSC управляє базовими станціями та взаємодіє з центром комутації MSC. Контролер BSC виконує функції: управління радіоресурсами кількох BTS, призначення радіоканалів, встановлення потужностей прийому та передачі, перемикання каналів handover [1-3].

Рівень управління побудовано за принципом концепції розподіленої архітектури. Концепція розподіленої архітектури заснована на принципах

фізичного та логічного поділу рівнів управління викликами та комутацією на функціональні пристрої MSC-server (Mobile Softswitch) та медіашлюзи MGW (Media Gateway Wireless) згідно з 3GPP TS 23.002 .

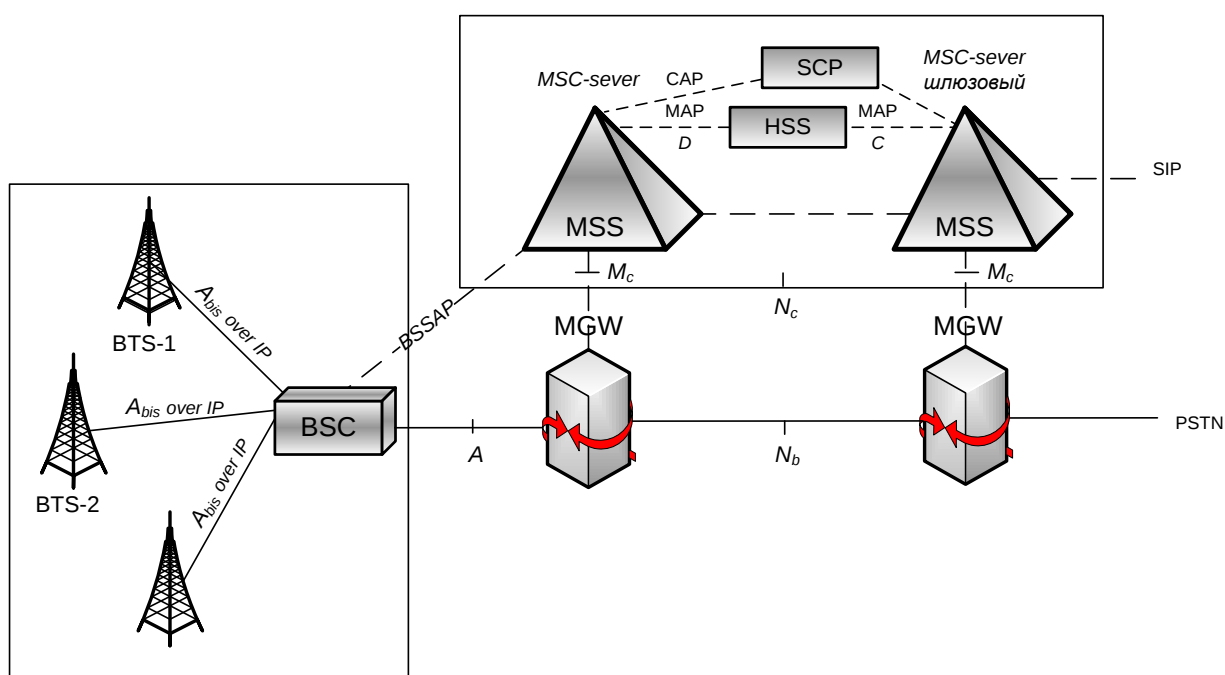


Рисунок 2 – Рівень доступу мережі мобільного зв'язку

MSC-server (Mobile Softswitch) - відповідає за керування викликами з комутацією каналів, керування мобільністю та керування медіашлюзами MGW. У MSC-server інтегрований VLR, HLR, EIR, AUC та функції SSF.

Медіашлюз MGW - це комутаційний вузол, який виконує функції входить транскодування, ехопридушення та обслуговування викликів. Він реалізує функції ATM/AAL2-пакетного комутатора та сигнального шлюзу для передачі сигнального трафіку пакетною мережею. Медіашлюз MGW взаємодіє з контролером базових станцій BSC за стандартним інтерфейсом A.

Центр комутації MSC (Mobile Switching Centre) апаратно-програмно реалізований на базі ЦСК, виконує функції повнодоступної комутації напрямків усіх об'єктів, що належать до підсистеми комутації та підсистеми базових станцій заданої зони обслуговування MSC. Забезпечує взаємодію у зовнішніх напрямках з PSTN та іншими PLMN.

Функції MSC: комутація, маршрутизація та керування викликами, реєстрація, ідентифікація, оновлення інформації про місцезнаходження мобільних абонентів, формування даних тарифікації для центру взаєморозрахунків (білінг-центр), підготовка статистичних даних, необхідні для контролю роботи та

оптимізації мережі, підтримує також процедури безпеки, що застосовуються для керування доступом до радіо.

Приклад мережі мобільного зв'язку, побудованої на базі медіашлюзів MGW показано на рис. 3 [23-25].

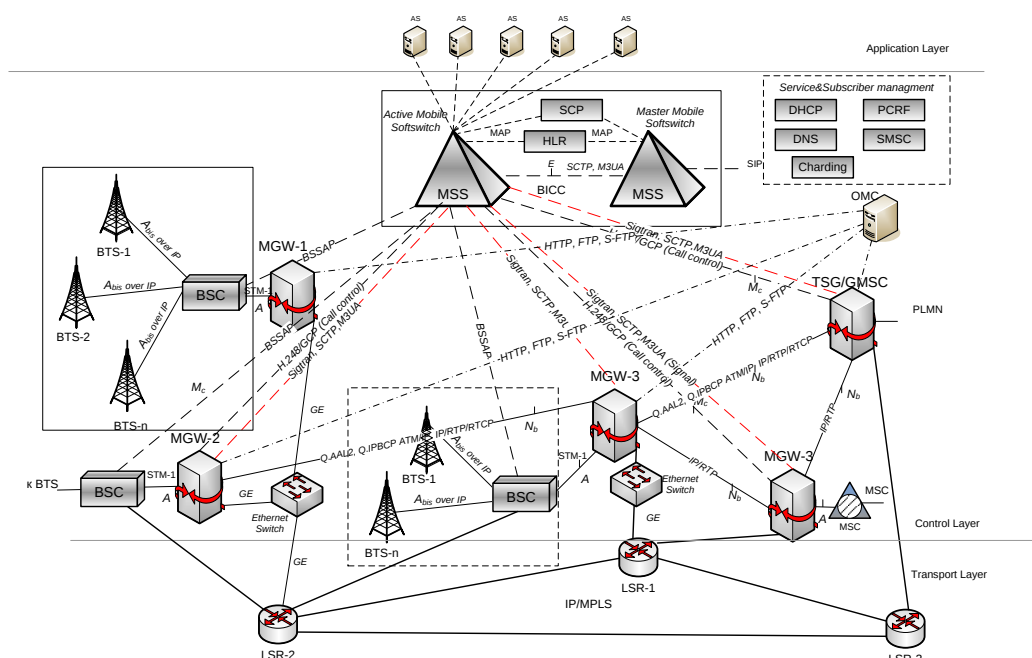


Рисунок 3 – Мережа мобільного зв'язку, побудована на базі медіашлюзів MGW

Мережа GSM складається з географічних областей. Ці області включають осередки, зони розташування LA, зони обслуговування MSC/VLR та мобільну наземну мережу загального користування PLMN (Public Land Mobile Network) [23-25].

Стільник (Cell) - область радіоохоплення одного приймача однієї базової станції BTS. Мережа GSM визначає кожну соту за допомогою коду глобального ідентифікатора стільника CGI (Cell Global Identity), номера, що призначається кожній соті.

Зона розташування LA (Location Area) – це група сот, яка обслуговується одним або більше контролерами базових станцій BSC (Base Station Controller) і лише єдиним центром комутації мобільного зв'язку MSC (Mobile Switching Center). Кожна зона розташування LA має ідентифікатор зони знаходження абонента LAI (Location Area Identity), якому присвоєно код зони розташування LAC (Location Area Code).

Зона обслуговування MSC/VLR є частиною мережі GSM, яка обслуговується одним MSC і зареєстрована в VLR даного MSC.

Мобільна наземна мережа загального користування PLMN (Public Land Mobile Network) – це сукупність зон обслуговування MSC/VLR, що належать одному оператору.

Кожна мобільна наземна мережа PLMN характеризується:

- MNC (Mobile Network Code) – код мережі мобільного зв'язку, що ідентифікує країну у глобальній мережі GSM,
- NCC (Network Color Code) - код зонованої мережі в межах однієї PLMN,
- NDC (Network Destination Code) – код ідентифікації мережі в країні, зона нумерації оператора.

Національна мережа загального користування National GSM Service Area поєднує мобільні наземні мережі загального користування PLMN однієї країни. Вона характеризується:

- MCC (Mobile Country Code) - код країни Україна глобальної мережі GSM,
- CC (Country Code) - код країни.

Розглянемо ідентифікатори місцезнаходження.

LAI (Location Area Identity) – ідентифікатор локальної зони розташування мобільної станції в мережі PLMN (згідно з річкою E.212). Він використовується для інформування MSC про локальну зону LA, в якій знаходиться мобільна станція MS та обов'язки розташування мобільної станції. Максимальна кількість знаків – 16. Використовується LAI у VLR, BSC та MS.

<i>16 знаки</i>		
MCC	MNC	LAC
<i>3 знаки</i>	<i>2 знаки</i>	<i>5 знаки</i>
255	01	X1...X5

MCC (Mobile Country Code) – код країни Україна глобальної мережі GSM,
MNC (Mobile Network Code) – код мережі мобільного зв'язку, що ідентифікує країну у глобальній мережі GSM,

LAC (Location Area Code) – код зони розташування, максимальна довжина якого становить 16 біт, що дозволяє визначити 65536 різних LA всередині однієї PLMN.

CGI (Cell Global Identity) – глобальний ідентифікатор стільники використовується для ідентифікації індивідуальної стільники всередині локальної зони розташування LA.

MCC	MNC	LAC	CI
<i>3 знаки</i>	<i>2 знаки</i>	<i>5 знаків</i>	<i>5 знаків</i>
255	01	X1...X5	X1...X5
LAI			

Ця ідентифікація виконується шляхом додавання параметра CI (Cell Identity) до LAI компонентів, який має 16 біт. Використовується CGI BTS.

Ідентифікатори абонентів.

IMSI (International Mobile Subscriber Identity) – міжнародний ідентифікатор мобільного абонента – це унікальний міжнародний код абонента мережі PLMN мережі GSM. Ідентифікатор IMSI є унікальним для кожного оператора, він необхідний для сигналізації та ідентифікації абонента в мережі (згідно з рек. E.212).

Використовується IMSI зберігається на SIM-карті HLR і обслуговуючому VLR.

<i>15 знаки</i>		
MCC	MNC	MSIN
<i>3 знаки</i>	<i>2 знаки</i>	<i>10 знаків</i>
255	01-MTC	X1...X10

MCC (Mobile Country Code) – код країни Україна глобальної мережі GSM,
MNC (Mobile Network Code) – код мережі мобільного зв'язку, що ідентифікує країну у глобальній мережі GSM,

MSIN (Mobile Station Identification Number) - ідентифікаційний номер мобільної станції (HLR).

Наприклад, IMSI 255013230380558

TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity) – тимчасовий IMSI, присвоюється мобільній станції MS під час її реєстрації. Він використовується для того, щоб захистити мобільного абонента від прослуховування та несанкціонованого доступу до радіочастотного тракту.

TMSI використовується тільки для локального абонування (тільки в одній зоні MSC/VLR) і змінюється при зміні розташування Location Update. Структура TMSI визначається кожним оператором і перевищує 8 цифр. Оскільки TMSI має вдвічі менший розмір, ніж IMSI, пейджинг одному кадру виконується для двох абонентів, що також скорочує навантаження процесор.

MSISDN (Mobile Station ISDN number) – номер ISDN мобільної станції, визначає абонентський номер у плані нумерації PLMN (згідно з річкою E.164).

Використовується MSISDN у HLR та MS.

<i>12 знаків</i>		
CC	NDC	SN
<i>3 знаків</i>	<i>2 знаків</i>	<i>7 знаків</i>
380	50	X1...X7

CC (Country Code) – код країни, що вказує на країну PLMN, де зареєстрована мобільна станція,

NDC (Network Destination Code) – код ідентифікації мережі в країні, зона нумерації оператора,

SN (Subscriber Number) – номер мобільної станції.

Кожна мережа мобільного зв'язку має кілька NDC, номер MSISDN може мати змінну довжину до 15 знаків +(380) не включається.

IMEI (International Mobile Equipment Identity) – міжнародний ідентифікатор обладнання мобільної станції, ідентифікатор використовується у процедурах безпеки зв'язку для ідентифікації неавторизованого доступу.

Використовується IMEI AUC.

<i>15 знаків</i>			
TAC	FAC	SNR	SPA
<i>6 знаків</i>	<i>2 знаки</i>	<i>6 знаків</i>	<i>1 знак</i>

TAC (Type Approval Code) - код затвердженого типового зразка,

FAC (Final Assembly Code) – код виробу, присвоює виробник, 10,70 – Фінляндія, 80 – Китай, 19,40 – Великобританія, 30 – Корея, 67 – США.

SNR (Serial Number) – індивідуальний серійний номер, що ідентифікує повністю все обладнання з урахуванням кодів TAC та FAC,

SPA (SPAre) – вільні цифри, які зарезервовані для майбутнього використання. Коли цей ідентифікатор передається в MS, значення коду має бути завжди 0.

MSRN (Mobile Station Roaming Number) – тимчасовий номер мобільної станції в роумінгу (згідно з річкою E.164).

Використовується MSRN у VLR.

<i>12 знаків</i>		
CC	NDC	SN*
<i>3 знаки</i>	<i>2 знаки</i>	<i>7 знаків</i>

380**50****X1...X7**

CC (Country Code) - код країни, що вказує на країну PLMN, де зареєстрована мобільна станція,

NDC (Network Destination Code) – код ідентифікації мережі в країні, зона нумерації оператора,

SN* (Subscriber Number) – адреса обслуговуючого MSC/VLR.

ICCID - міжнародний ідентифікатор SIM-картки, ідентифікація SIM-картки, тобто. фізичний номер картки (типу серійного заводського номера) який містить 19 цифр (відповідно до ITU-T E.118).

ICCID = 89-380-01-390105066507

89 - пластикова карта для телекомунікацій, 380 - Україна (ITU-T E.164), 01 - мережа оператора, 39 – регіон.

Тема 3. Мережі мобільного зв'язку третього та четвертого покоління

Основними етапами розвитку мереж LTE-Advanced (Release 10-12), LTE-Advanced Pro (Release 13-14) для операторів - це забезпечення високої пропускної спроможності і зниження витрат на доставку контенту до абонента [21-22].

Зокрема, застосування технології LTE-Advanced Pro дозволить істотно підвищити пропускну спроможність мережі до 1 Гбіт/с в конфігурації антен MIMO (Multiple Input Multiple Output) 4x4/8x8 до абонента і є основним напрямком розвитку мереж мобільного оператора [3-6].

Технології LTE Advanced і LTE Advanced Pro дозволять збільшити швидкості в мережах 4G до декількох Гбіт/с, перш за все за рахунок агрегації несучих, технічні характеристики основних релізів технології LTE наведені в табл. 1 [22].

Таблиця 1 – Технічні характеристики основних релізів технології LTE [22]

Реліз технології	LTE (4G) Rel. 8-9	LTE-Advanced (4G) Rel. 10-12	LTE-Advanced Pro (4.5G), Rel. 13-14
Принцип розподілу каналів	FDD, TDD, OFDMA	FDD, TDD, OFDMA	FDD, TDD, OFDMA
Швидкість даних, Мбіт/с	150	300	1000
Ширина смуги частот, МГц	20 та 40	100, 160	640
Час затримки, мс	50	20	10
Вид модуляції	16 QAM	16 або 64 QAM	64 або 256 QAM
Тип MIMO антен	MIMO 4x4	MIMO 4x4, 8x8	MIMO 8x8
Кількість агрегуючих несучих	-	5	32
Категорія мобільної станції	cat. 3,4	cat. 6,9, 10	cat. 11,12,16,18

Технологія LTE Advanced Pro, яка привносить стандартизовані технології LPWA (Low Power Wide Area) та LTE Cat-M1 для адаптації мережі Інтернету речей IoT (Internet of Things).

Асоціація GSA (Global mobile Suppliers Association) представила черговий звіт щодо розвитку світового ринку 4G/LTE-Advanced, згідно якого 865 операторів в світі розвивають мережі LTE-Advanced, прогнозом GSA в 2025 році очікується біля 1000 запускених комерційних мереж стандарту LTE-Advanced.

Також активно розвиваються технології Інтернету речей IoT, а кількість підключень IoT буде рости до 5 млрд. підключень.

Згідно Ericson Mobility Report, в 2025 році майже 52% підключень IoT будуть використовувати технологію NB-IoT та Cat-M LTE [1]. Впровадження технології LTE-Advanced (Release 10-12) та LTE-Advanced Pro (Release 13-14) дозволить забезпечити [3-6]:

1. Високу швидкість передачі даних для LTE-Advanced в висхідному напрямку до 300 Мбіт/с, LTE-Advanced Pro до 1 Гбіт/с, а в низьхідному напрямку – до 500 Мбіт/с.

2. Смуга частот для LTE-Advanced становить до 100 МГц, а для LTE-Advanced Pro до 640 МГц.

3. Використання агрегації до 5 несучих в LTE-Advanced, та до 32 несучих в LTE-Advanced Pro.

4. Підтримка для LTE-Advanced модуляції QPSK, 16 QAM та 64 QAM, для LTE-Advanced Pro модуляції 64 QAM у низьхідному напрямку та 256QAM у висхідному.

5. Використання в радіоінтерфейсі LTE-Advanced MIMO-антен конфігурації 4x4 в висхідному напрямку та 8x8 в низхідному, а в радіоінтерфейсі LTE-Advanced Pro антен MIMO конфігурації 8x8.

6. Спектральна ефективність LTE-Advanced становить в низьхідному напрямку (в конфігурації антен 8x8) на рівні 30 біт/Гц, а в висхідному напрямку (в конфігурації антен 4x4) на рівні 15 біт/Гц.

7. Підтримка категорії смартфонів UE (User Equipment) категорії 6,9, 10 для LTE-Advanced та UE cat. 11,12,16,18 для LTE-Advanced Pro.

8. Час затримки для мережі LTE-Advanced становить біля 10 мс, а для технології LTE-Advanced Pro – 2 мс.

Таким чином можна зробити висновок про те, що технології LTE-Advanced та LTE-Advanced Pro мають розвиток в світі та впровадження в Україні завдяки

вдосконаленим характеристикам мережі, такими як надання значної пропускної спроможності, забезпеченню мінімального часу затримки даних та інші, а також використовуючи технології LTE-Advanced та LTE-Advanced Pro для мереж мобільного зв'язку операторів з'являються нові технології Інтернет речей IoT, які істотно розвивають номенклатуру надаваних високошвидкісних послуг.

Архітектура мережі LTE-Advanced показана на рис. 4. Базова станція e-NodeB виконує розподіл пакетного навантаження та мобільність абонента. Мережа E-UTRAN має можливості з'єднання між базовими станціями за допомогою використання інтерфейсу X2 [6].

Для обслуговування пакетних потоків даних в мережі E-UTRAN використано пакетна мережа EPS, яка надає обслуговування та комутацію з інтелектуальними можливостями. Мережа LTE-Advanced зображена на рис. 4 [21-22].

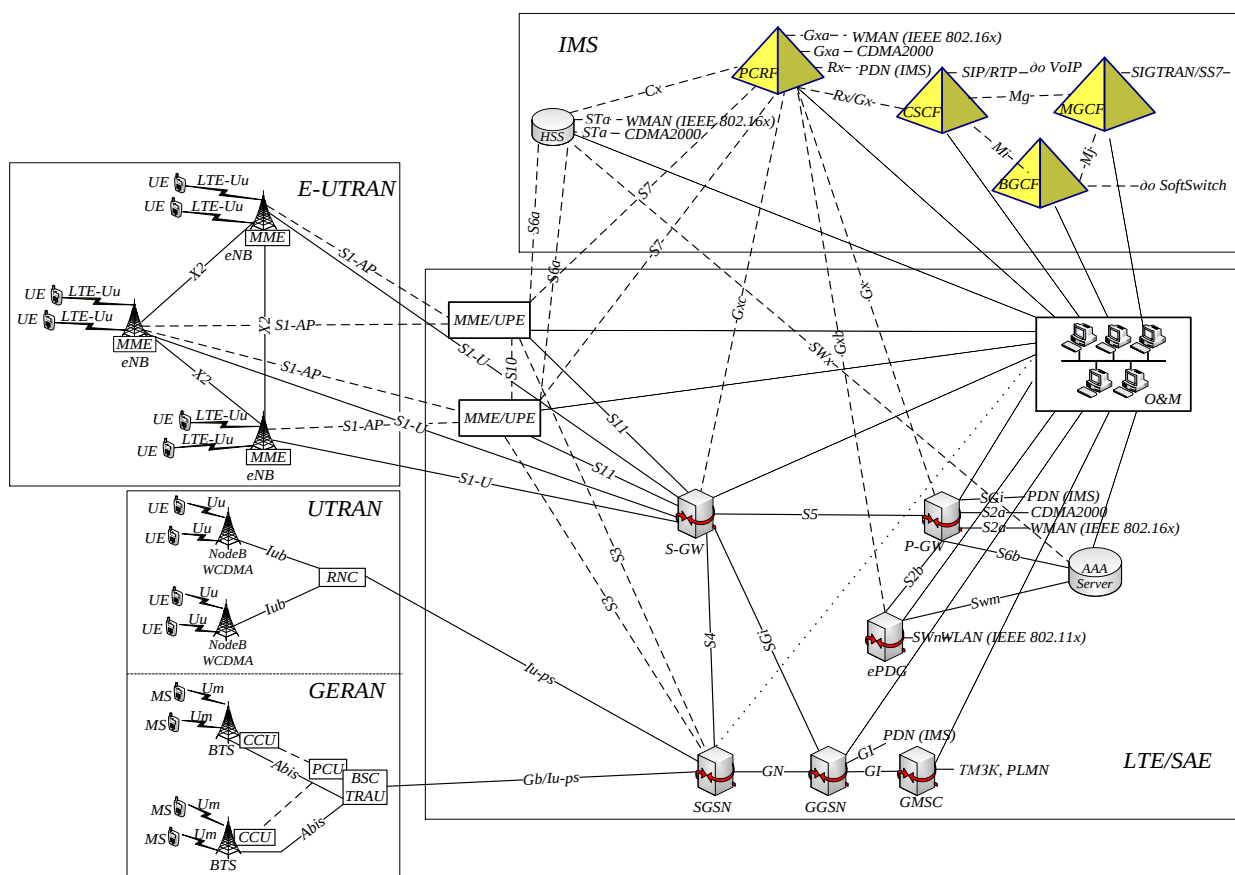


Рисунок 4 – Мережа LTE-Advanced

Технологія LTE-Advanced базується на трьох основних технологіях, котрі стосуються радіоінтерфейсу: мультиплексування за допомогою ортогональних

несучих OFDM та багатоантенних систем MIMO, і еволюційної системної архітектури EPS.

Основною технологією антенних систем радіоінтерфейсу є технологія MIMO-антен, яка дозволяє передавати дані за допомогою N антен і забезпечувати їх приймання M антенами. У технології LTE-Advanced передбачено два методи багатоантенної передачі: рознесена transmit diversity і багатопоточна (з попереднім кодуванням, частковим випадком якого є формування вузького радіохвилі [21]).

При багатопоточній передачі для одночасного пересилання декількох потоків даних по тому самому радіоканалу використовують декілька передавальних і прийомних антен, що значно підвищує максимальну швидкість передачі даних.

Технічні характеристики мережі LTE-Advanced забезпечені двома документами 3GPP:

- TR 36.101 для обладнання користувача,
- TR 36.104 для обладнання базової станції e-NodeB [22].

Впровадження технології LTE-Advanced завжди виконується методом накладання на існуючу мережу мобільного оператора GSM/GPRS/EDGE/UMTS. Мережа GSM/GPRS/EDGE/UMTS включає в себе наступні об'єкти.

Існуючі базові станції BTS (Base Transceiver Station) мережі GSM/GPRS/EDGE виконують з'єднання між пристроєм користувача UE за допомогою інтерфейсу Um, для передавання даних базова станція використовує кодеки CCU для можливої передачі інформації у вигляді пакетів по технології FR (Frame Relay). [20].

Контролери базових станцій BSC (Base Station Controller) мережі GSM/GPRS/EDGE використовують контролер пакетів PCU (Packet Control Unit), який концентрує пакетні дані, що надходять від усіх BTS/CCU. Взаємодія між базовими станціями BTS та контролером BSC використовує – Abis, саме цей інтерфейс надає можливість передачі інформації користувача та сигнальної інформації взаємодії [20].

Центр комутації MSC (Mobile Switching Center), який включає в себе базу візитних абонентів VLR (Visitor Location Register).

MSC забезпечує встановлення з'єднань і надання різних видів послуг. З'єднання між MSC/VLR та BSC відбувається за допомогою інтерфейсу A [20].

Шлюзовий центр комутації GMSC (Gateway MSC) забезпечує взаємодію із зовнішніми мережами PLMN. GMSC є шлюзовим до з'єднання з іншими мережами PSTN (Public Switched Telephone Network). Інтерфейс з'єднання GMSC з MSC/VLR – E [20-21].

Сервісний вузол підтримки пакетної служби GPRS (Serving GPRS Support Node, SGSN) - це пакетний комутатор технології ATM, що виконує перетворення кадрів з GSM-формату у TCP/IP. Взаємодія між сервісними вузлами SGSN та контролером BSC виконується за допомогою інтерфейсу G_b [20].

Регістр ідентифікації обладнання EIR (Equipment Identification Register). Взаємодія з вузлом SGSN відбувається за допомогою інтерфейсу G_f, який дозволяє перевіряти легітимність використання мобільного термінала абонента по його IMEI-коду за запитами до баз даних EIR.

Сервер абонентів власної мережі HSS (Home Subscriber Server) підключається до пакетної опорної мережі через інтерфейс, який базується на протоколі Diameter, що дозволяє створити уніфікований зв'язок шляхом взаємодії з SGSN інтерфейсом G_r та модулем мобільності MME та S-GW –інтерфейсом S_{6a} [4].

Мережа E-UTRAN побудована на базових станціях e-NodeB, кожна базова станція з'єднується з обладнанням користувача за допомогою інтерфейсу Uu-LTE, між собою e-NodeB взаємодіють інтерфейсом X2, а для фізичної взаємодії з обладнанням мережі EPC використовується інтерфейс S1 [3].

Базові станції e-NodeB виконують наступні функції:

- надання радіоканалу та їхній динамічний розподіл Scheduling;
- обробку ІТ-заголовків та шифрування даних;
- функції маршрутизації, управління мобільністю та диспетчеризацію пакетів.

Модуль мобільності MME забезпечує функції сигналізації й безпеки, підтримку мобільності та вибору мережі PDN. Він відповідає хендовер та вибір шлюзу SGSN до мереж 2G/3G та мереж доступу. В функції MME входить підтримка роумінгу, автентифікації та керування функціями. Взаємодія з іншими модулями MME виконується за допомогою інтерфейсу S10, а зі сервісним шлюзом S-GW за допомогою інтерфейсу S11.

Шлюз обслуговування трафіку S-GW надає обробку та маршрутизацію пакетних даних в мережі E-UTRAN, він забезпечує керування мобільністю, хендовер між e-NodeB та взаємодію з іншими мережами.

До функцій S-GW відноситься:

- місцезнаходження користувача при хендовері;
- ініціалізація процедури запиту послуги та буферизація пакетів;
- маршрутизація даних;
- управління політикою, тарифікацією та білінгом PCRF.

Шлюз пакетного обслуговування P-GW забезпечує функції обслуговування пакетних даних.

До функцій P-GW відносяться функції [22]:

- фільтрації пакетів;
- розподілення IP-адрес для користувачів;
- маркування пакетів та тарифікації послуг.

Сервер домашніх абонентів HSS виконує функції бази даних для зберігання:

– абонентських ідентифікаторів обладнання IMEI (International Mobile Equipment Identity), мобільного ідентифікатора абонента IMSI (International Mobile Subscriber Identity), абонентського номера мобільного абонента MSISDN (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number); даних безпеки: аутентифікації та авторизації; місцезнаходження абонента; профіль абонента.

Підтримка характеристик якості трафіку в мережі мобільного оператора на базі технології LTE-Advanced є достатньо важливою з точки надання високошвидкісних послуг, послуг реального часу та відео-послуг.

В мережі LTE-Advanced забезпечення якості обслуговування QoS зумовлено необхідністю підтримки різних характеристик якості для надання різних послуг та функціонування додатків [22].

Потоки EPS-трафіку (Evolved Packet Service) забезпечують обслуговування різних послуг, до яких віднесені послуги [13]: відеостриминг в реальному часі, потокове відео з буферизацією, мова та відео в реальному часі, інтерактивні ігри та додатки, ігри в реальному часі, послуги на базі TCP/IP та має різні вимоги до характеристик якості QoS, які наведені в табл. 2.

Обслуговування потоків EPS-трафіку в мережі LTE-Advanced згідно технічного звіту TR 23.401, виконується за допомогою спеціально забезпеченого каналу, який надається за замовчуванням без гарантованої швидкості Non-GBR та спеціально забезпеченого каналу з гарантованою швидкістю GBR [20-23].

З'єднання в мережі LTE-Advanced показано на рис. 5. Технічний звіт 3GPP TR23.401 [4] надає наступні характеристики QoS для заданих класів обслуговування QoS, кожному з яких відповідає свій ідентифікатор класу

обслуговування QCI (QoS Class Identifier), що наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення характеристик QoS мережі LTE-Advanced згідно TR23.401 [7]

Клас якості QCI	Потік	Пріоритет обслуговування	Затримка, мс	Ймовірність втрат	Вид послуги
1	GBR	2	100	10^{-2}	ІР-виклики в реальному часі
2		4	150	10^{-3}	Відеовиклики в реальному часі
3		3	50		Ігри в реальному часі
4		5	300	10^{-6}	Потокове відео з буферизацією
5	Non-GBR	1	100		IMS-сигналізація
6		6	300		Відео з буферизацією, послуги на базі TCP/IP
7		7	100	10^{-3}	Мова, відео, інтерактивні ігри
8		8	300	10^{-6}	Відео з буферизацією, послуги на базі TCP/IP
9		9	300		

Взаємодія в мережі LTE-Advanced із забезпеченням якості обслуговування QoS згідно 3GPP TR23.401 показано на рис. 5.

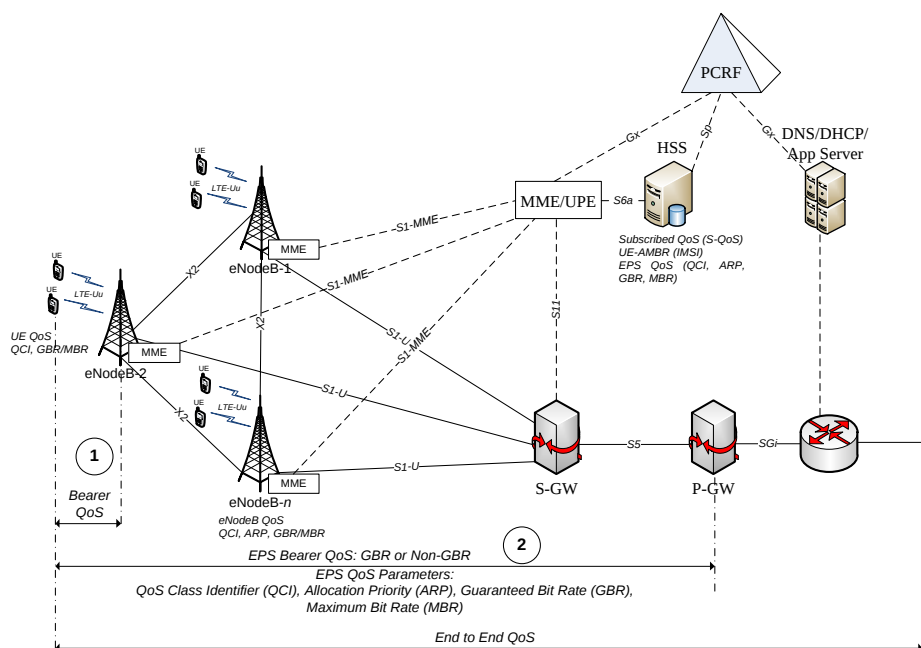


Рисунок 5 – Взаємодія в мережі LTE-Advanced із забезпеченням якості обслуговування QoS

Тема 4. Перспективні мережі 5G. Архітектура мережі мобільного зв'язку на базі 5G/NR

Особливість архітектури мережі 5G полягає в тому, будується на базі виключно програмних рішень, зокрема, програмно-конфігуруємих мереж SDN (Software Defined Network), а також з використанням функцій віртуалізації мережі NFV (Network Function Virtualization). Архітектура мережі мобільного зв'язку на базі 5G/NR показана на рис. 6 [7-9].

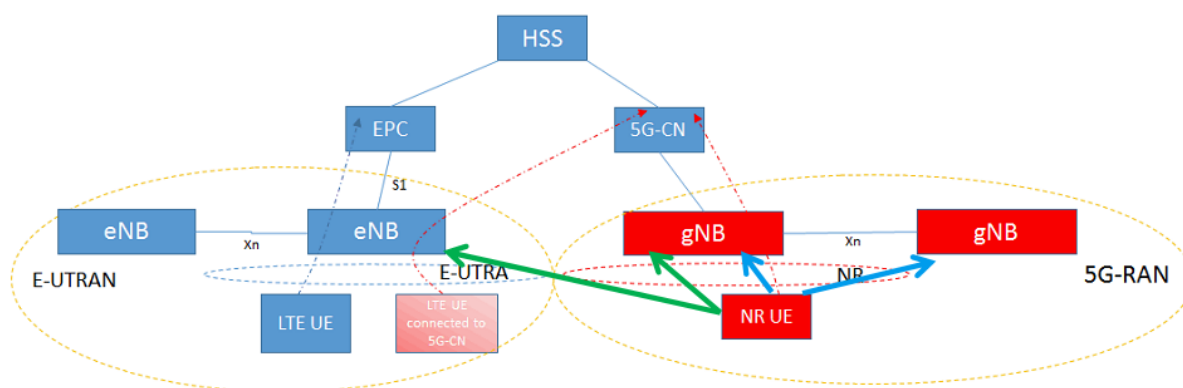


Рисунок 6 – Узагальнена архітектура мережі 5G/NR

Архітектура мережі 5G базується виключно на реалізованих мережних функціях віртуалізації VNF (Virtual Network Function), які забезпечують віртуалізацію більшості процесів в мережі, забезпечуючи програму реалізації на основному фізичному обладнанні більшості функцій NFV на базі обладнання дата-центрів обробки даних ЦОД, використовуючи обладнання COTS (Commercial Off The Shelf). Обладнання COTS включає лише три види стандартних об'єктів – серверів, комутаторів і системи зберігання даних [7-9].

Архітектура розподіленої мережі радіодоступу мережі 5G на базі технології NR - D-RAN (Distributed RAN) базується на мережі радіодоступу C-RAN (Centralized RAN), яка є основою мережі четвертого покоління 4G.

Функції опорної мережі 5G на базі технології NR реалізовано в центральній хмарі мережі радіодоступу - Central Cloud (Cloud RAN), яка ґрунтується на множині віртуальних машин VM (Virtual Machine). В якості хмарних технологій мережа 5G використовує хмари Edge Cloud на базі технології мобільних хмар - MEC (Mobile Edge Cloud) [7-9].

Віртуалізація мережі на базі мережних функції NFV для програмно-конфігурованої мережі SDN дозволяє забезпечити логічну мережну нарізку Network Slicing.

Технологія Network Slicing дозволяє на базі єдиних мережних ресурсів виконувати логічний поділ мереж для різних типів послуг 5G, яким потрібні різні технології радіодоступу RAT (Radio Access Technology), з різними характеристиками середовищ передачі даних. Це, наприклад, послуги [7]: послуги відео UHD, голосові послуги реального часу (5G Voice), послуги Інтернет речей Massive IoT, і послуги Інтернет речей для відповідальних додатків [7].

Архітектура базових станцій gNB мережі мобільного зв'язку 5G/NR, пропонована 3GPP, є подальшим розвитком ідеології розподілених базових станцій і Cloud BBU.

Базова станція gNB включає центральний модуль gNB-CU (gNB Central Unit) і один або кілька розподілених модулів gNB-DUs (gNB Distributed Unit). Рекомендація TR 38.801 V14.0.0 визначає всім можливих опцій поділу функцій між CU та DU. При цьому опція 8 відповідає класичній (існуючій) схемі побудови розподіленої базової станції.

Рекомендація 3GPP TS 38.401 V15.0.0 визначає архітектуру побудови базової станції gNB, засновану на другій опції поділу функцій.

У цьому випадку модуль контролю радіоресурсів RRC та інтерфейс PDCP реалізуються в центральному модулі gNB-CU, а рівень RLC, MAC та фізичний рівень – у розподіленому gNB-DU. Взаємодія між модулем gNB-CU та модулем gNB-DU здійснюватиметься за інтерфейсом F1. Приклад реалізації показано на рис. 6 [7].

3GPP визначає такі інтерфейси gNB (рис. 6) [7-9]:

- N2 – інтерфейс рівня управління між gNB та модулем управління доступом та мобільністю ядра мережі AMF, є розвитком інтерфейсу S1-C мереж 4G-LTE.
- N3 – інтерфейс рівня трафіку користувача між gNB і модулем передачі трафіку користувача ядра мережі UPF, є розвитком інтерфейсу S1-U мереж 4G-LTE.
- Xn – інтерфейс між базовими станціями gNB.
- X2 – інтерфейс між gNB та eNB мережі LTE.

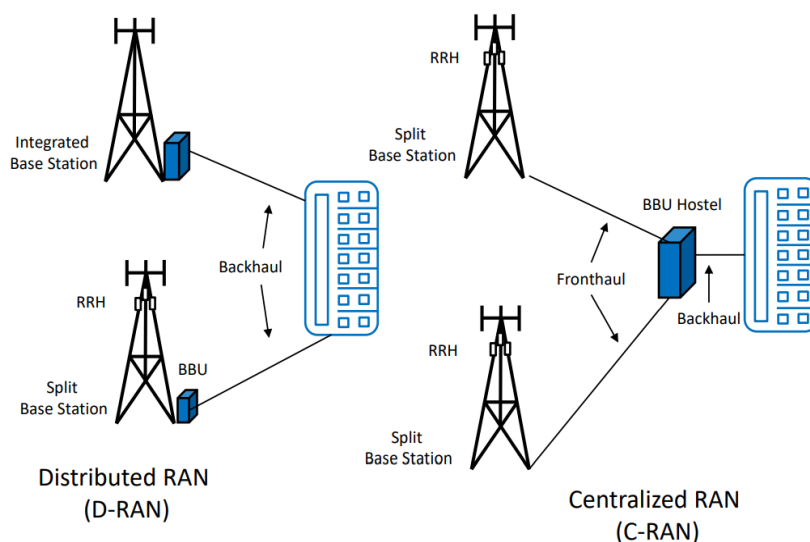


Рисунок 6 – Реалізація C-RAN та D-RAN

Найбільш затребувана операторами зв'язку стратегія розгортання 5G полягатиме у тривалому спільному існуванні мереж четвертого покоління на базі технологій LTE-Advanced і LTE-Advanced Pro при максимальному перевикористанні інфраструктури, вузлів та мережевих елементів. З метою реалізації цієї стратегії 3GPP запропонував кілька можливих сценаріїв впровадження мереж 5G/NR, які розподілені на дві групи [7-9]:

- Standalone (SA) – що передбачають використання лише однієї технології радіодоступу LTE-Advanced і LTE-Advanced Pro або NR – New Radio;
- Non-Standalone (NSA) – використання LTE-Advanced і LTE-Advanced Pro і NR, що спрощує розгортання мереж 5G на початковому етапі.

Сценарій Non-Standalone впровадження мережі 5G передбачає розвинення базових станцій e-NodeB існуючої мережі 4G технології LTE до рівня LTE-Advanced для можливостей взаємодії з gNB мережі 5G/NR відповідно до Rel. 15.

Для реалізації сценарію Non-Standalone, важливим є реалізація можливостей подвійного підключення Dual Connectivity у відповідності до Rel. 12, коли пристрій користувача UE в стані RRC_CONNECTED має змогу одночасної взаємодії з двома базовими станціями Master e-NodeB та Secondary e-NodeB.

В цьому випадку, на відмінність від агрегації частот, відбувається підключення до двох різних базових станцій e-NodeB, пов'язаних за допомогою X2 інтерфейсу, які знаходяться на різних сайтах. При цьому можливі дві схеми реалізації:

- split bearer – у цій схемі на PDCP рівні потік даних (user plane) віртуального каналу розщеплюється на два підпотіку в напрямку Master e-NodeB та Secondary e-NodeB відповідно;

– switch bearer – в цій схемі потік даних User plane може бути виконана комутація в напрямку Master e-NodeB, або в напрямку Secondary e-NodeB (без агрегації).

Розглянемо сценарій (Option 4), який передбачає використання ядра мережі 5G (NGCN). При цьому пристрій користувача UE має подвійне підключення до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced.

Реалізація сценарію подвійного підключення (option 4) до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced [10] показана на рис. 7.

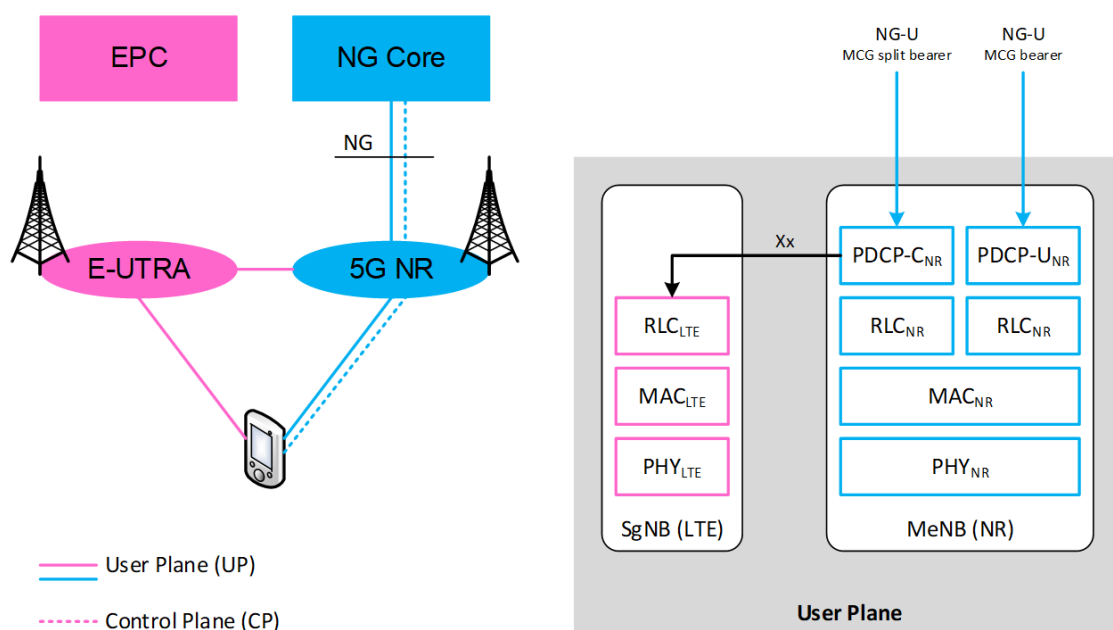


Рисунок 7 – Подвійне підключення (option 4) до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced

Сигнальний трафік (Control Plane – CP) в такій мережі обробляється виключно на gNB, а точкою розщеплення трафіку користувача (User Plane - UP split bearer) є базова станція gNb. Користувальницький трафік передається за двома маршрутами: NGCN-gNB-UE і NGCN-gNB- e-NodeB - UE. Інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane та LTE-Advanced User Plane.

Розглянемо сценарій (option 4a), який передбачає використання ядра мережі 5G (NGCN). Термінал користувача UE має подвійне підключення до мережі радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced.

Сигнальний трафік (Control Plane – CP) обробляється виключно на базовій станції gNB. Точкою розщеплення користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є NGCN.

Користувальницький трафік передається двома маршрутами: NGCN-gNb-UE і NGCN- eNb- UE. Інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку лише Control Plane [7].

Реалізація сценарію (option 4a) подвійного підключення до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced показана на рис. 8.

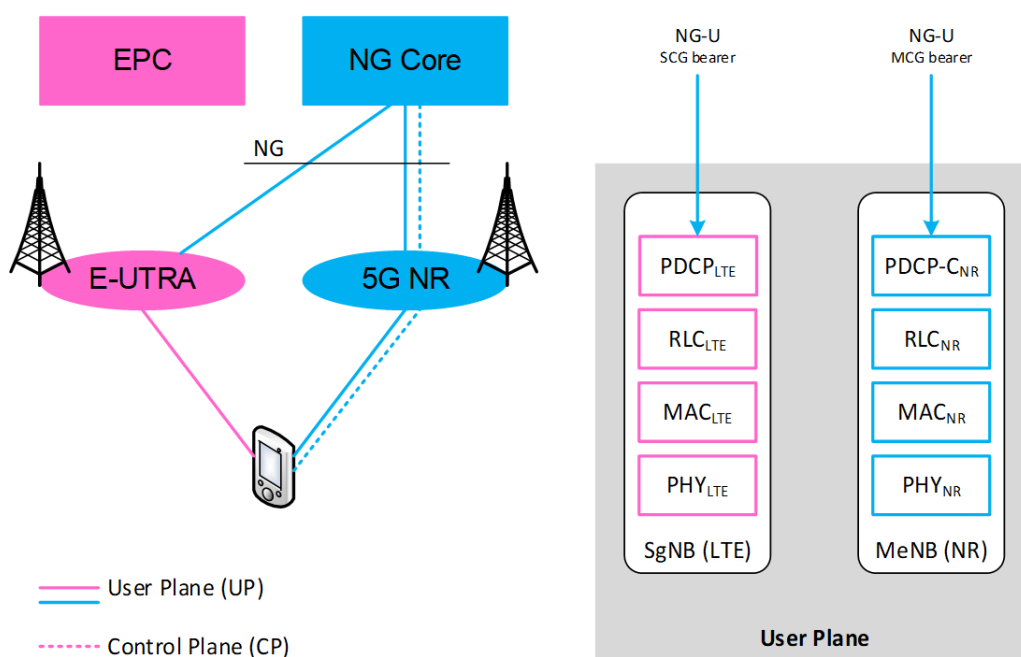


Рисунок 8 – Подвійне підключення (option 4a) до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced

Функції 5G реалізуються як віртуальних мережесих функцій VNF (Virtual Network Function) методом «ланцюжків сервісів» Service Chaining, кожна з яких є кілька VNF збудованих у певному порядку і виконують єдиний алгоритм. Кожна VNF, своєю чергою, може бути частиною алгоритму вищого рівня.

Віртуалізація – це можливість створення множини віртуальних ресурсів на базі одного фізичного ресурсу. Фізичні ресурси за допомогою програмного забезпечення розподіляються таким чином, щоб розгорнути низку незалежних віртуальних машин VM (Virtual Machine) [11].

Під віртуалізацією розуміють процес створення гнучкої заміни фізичних ресурсів з тими самими функціями та зовнішніми інтерфейсами шляхом створення віртуальної реалізації.

Віртуальні системи найчастіше здійснюються за допомогою гіпервізорів. Гіпервізор – це програмне забезпечення, що дозволяє віртуалізувати системні ресурси (рис. 9). Гіпервізор забезпечує одночасне і паралельне використання низки віртуальних машин.

Гіпервізор забезпечує ізоляцію операційних систем, що виконуються на віртуальних машинах, шляхом розділення фізичних та логічних пристроїв між декількома віртуальними машинами [7].

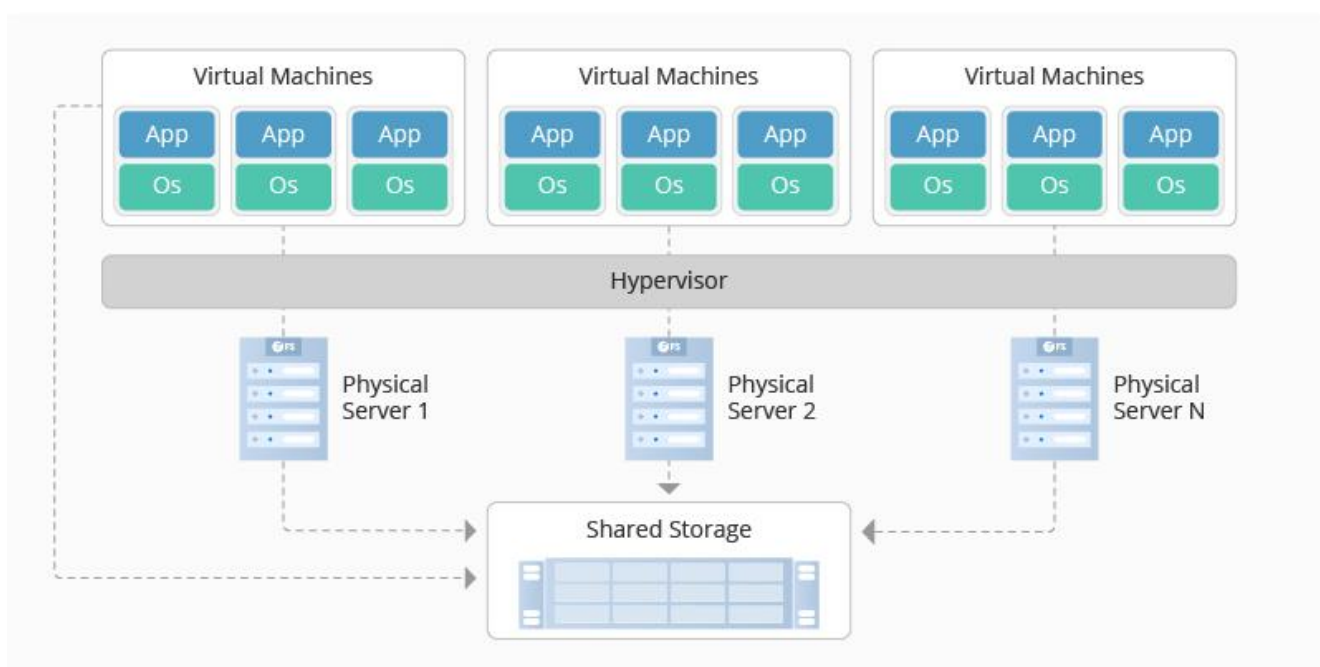


Рисунок 9 – Віртуалізація

Віртуалізація відноситься до поділу ресурсів фізичної системи (такої як процесів, пам'ять, мережа та диск) на кілька віртуальних ресурсів. Ключові хмарні технології дозволяють об'єднувати різні типи ресурсів у пули.

Віртуалізація функцій мережі NFV (Network function virtualization) є концепцією мережевої архітектури, яка використовує технології віртуалізації для віртуалізації класів функцій мережних.

Це дозволяє створити для кожної функції мережі, функції віртуалізованої мережі, або VNF, на додаток до стандартних серверів, комутаторів та пристроїв зберігання даних [7-9].

Віртуальні мережні функції VNF можуть розгортатися як віртуальні машини VM (Virtual Machines) або контейнери (Containers).

Така віртуальна інфраструктура усуває потребу у спеціалізованому обладнанні, оскільки віртуальні машини можна розгортати на стандартних серверах у дата-центрах різного масштабу та рівня. Подібний підхід дає такі переваги [7]:

- загальне зниження енергоспоживання та необхідного охолодження;
- зниження необхідного простору в дата-центрі при заміщенні фізичного обладнання на VNF;
- зниження як операційних, і капітальних витрат у довгостроковій перспективі і за великих обсягах віртуалізації.

Архітектура мережі 5G/NR (згідно Rel. 15) базується на програмно-конфігурованій мережі радіодоступу SDR (Software Defined Radio) та опорній мережі SDN (Software Defined Networking) і використовує процедури віртуалізації мережних функцій NFV (Network function virtualization), а для підтримки характеристик QoE різних груп послуг, використовує технологію Network Slicing (рис. 10) [22].

Network slicing – це технологія, яка дозволяє на основі фізичної інфраструктури мережі створювати віртуальні площини мобільної мережі 5G, слайси (slices). Кожен слайс є окремою логічною мережею, яка може бути спеціально налаштований та оптимізований під вимоги конкретних додатків та послуг [11].

Наприклад, номенклатура послуг мережі 5G/NR визначається Рекомендацією 3GPP TR 38.913, виділяючи послуги eMBB, mMTC та послуги URLLC, кожна група цих має вимоги до якості обслуговування та реалізації послуг. Використання Network slicing дозволяє створити логічну мережу для надання затребуваних послуг (рис. 10) [22].

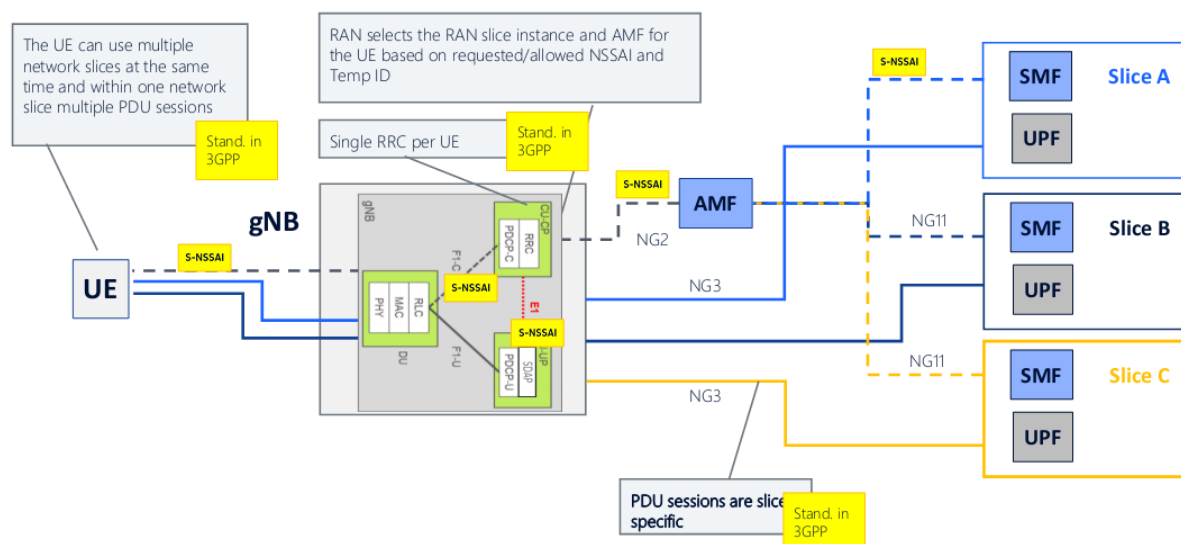


Рисунок 10 – Віртуалізація Network Slicing [11]

В даному випадку, віртуалізація на базі Network Slicing дозволяє виконувати створення топологічної конфігурації мережі 5G/NR для різних умов надання послуг. Забезпечення характеристик якості обслуговування QoS при наданні послуг 5G/NR (eMBB, eMTC та URLLC) фокусує увагу на впливі характеристик якості обслуговування трафіку на надання послуг. При цьому при реалізації Network Slicing є можливість забезпечення характеристик QoE, таких як: затримка, пропускна спроможність та ймовірності втрат пакетів [22].

Основною особливістю реалізації концепції якості обслуговування QoS в мережі 5G є використання потокового підходу QoS Flow, при якому пакети класифікуються і маркуються з використанням ідентифікатора потоку QFI в мережі радіодоступу RAN на односпрямовані радіоканали DRB, на відміну від мережі 4G/LTE, де концепція якості заснована на несучих [22].

В мережі 4G/LTE ідентифікатор EPC-каналу EBI використовується для того, щоб відрізнити рівень QoS. В мережі 5G підтримуються наступні типи потоків QoS [22]:

- потік GBR QoS, який вимагає гарантованої швидкості передавання,
- потік QoS без GBR, який не вимагає гарантованої швидкості передавання,
- потік GBR, критичний до затримки, Reflective QoS.

Потоки QoS 5G відображаються в RAN на DRB (односпрямовані радіоканали) на відміну від 4G LTE, де зіставлення один до одного між EPC і односпрямованим радіоканалами.

До характеристик якості QoS віднесено [22]:

- тип ресурсу (GBR, затримка критичного GBR або Non-GBR);
- рівень пріоритету; значення затримки пакетів (включно з бюджетом затримки пакетів базової мережі);
- ймовірність помилок пакетів;
- вікно усереднення (тільки для типів ресурсів GBR і GBR);
- максимальний обсяг пакета даних (тільки для критичного до затримки типу ресурсу GBR).

ПИТАННЯ ДО ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ

1. Сучасний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку України. Технічні характеристики, технології та стандарти, номенклатура послуг.
2. Трьохрівнева архітектура MM3 під керуванням Mobile Softswitch: Transport layer, Control layer, Application layer.
3. Характеристики транспортного рівню та рівню доступу, призначення та характеристики підсистеми мобільних станцій MSS та підсистеми базових станцій BSS.
4. Характеристики рівня керування: підсистема комутації SSS та технічної експлуатації та обслуговування NMC/OSS.
5. Характеристики рівню додатків: підсистема послуг AS.
6. Призначення та функції мобільної станції MS (Eq + SIM), основні стани MS (Idle, Active, Detach, Implicit Detach) дані SIM-карти, функції обладнання підсистеми BSS (BTS, BSC), інтерфейси та протоколи взаємодії.
7. Загальна характеристика функціональних рівнів та їх апаратно-програмна реалізація. Рівень керування, функції обладнання підсистеми комутації (Circuit core – MGW, MSC/VLR, MSW та Packet core – SGSN/GGSN).
8. Призначення та функції реєстрів HLR, VLR, AUC, EIR.
9. Забезпечення пакетного режиму GRPS (Packet core). Узагальнена архітектура накладеної мережі GRPS, вузли SGSN та GGSN взаємодія і інтерфейси.
10. Рівень додатків: підсистема послуг AS (SMSC, DNS/DHCP, Charging, PCRF).
11. Функції технічної експлуатації та обслуговування NMC/OSS.
12. Ідентифікація в мережі мобільного зв'язку на рівнях: International, National та рівень PLMN. Коди країни (MCC, CC), мережі оператора PLMN (MNC, NDC, NCC).
13. Поняття та коди місцезнаходження Local Area (LAC, LAI), Cell (CI, CGI).
14. Ідентифікація абонентів MM3 (IMSI, TMSI, MSISDN, IMEI), плани нумерації згідно рек. ITU-T E.212, E.164.
15. Процедури встановлення з'єднань в мережі мобільного зв'язку. Основні сценарії обслуговування викликів (MS в стані IDLE, IMSI Attached, оновлення місцеположення, Network Roaming, Handover).
16. Процес встановлення з'єднання, вихідного Outgoing call та вхідного Incoming call.
17. Процедури автентифікації, ідентифікації обладнання та шифрування в

мережі мобільного зв'язку.

18. Мережі мобільного зв'язку третього покоління 3G/UMTS. Особливості реалізації радіо інтерфейсу UMTS, номенклатура послуг 3G.

19. Узагальнена архітектура мережі 3G/UMTS, мережа радіодоступу UTRAN/WCDMA на базі Node B та RNC, особливості UE (U-SIM).

20. Мобільна комерція (M-comm). Технологія NFC та загальні принципи функціонування мобільних платіжних систем.

21. Мережа мобільного зв'язку четвертого покоління 4G/LTE. Особливості реалізації радіо інтерфейсу LTE, номенклатура послуг 4G.

22. Функціональна архітектура мережі LTE (E-UTRAN на базі eNodeB, Core Network - EPC, S-GW, MME, UPE). Інтерфейси Rel.8,9 та 10.

23. Ідентифікація в мережі LTE. Ідентифікатори абонентів UE ID (IMSI, GUTI, S-TMSI, IP-address/PDN address, C-RNTI, eNodeB UE S1AP ID, MME UE S1AP ID, Old UE X2AP ID, UE X2AP ID). Ідентифікатори мобільного обладнання ME ID (IMSI). Ідентифікатори мережного обладнання NE ID (GUMMEI, MMEI, Global eNodeB ID, eNodeB ID, ECGI, ECI, P-GW ID). Ідентифікатори місцезнаходження Location ID (TAI, TAC).

24. Перспективні мережі 5G. Технологія NR (Rel. 14).

25. Архітектура мережі 5G/NR на мережних функціях віртуалізації VNF.

26. Реалізація Network Slicing в мережі 5G/NR.

27. Технології та номенклатура послуг п'ятого покоління (послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB, масивного машинного зв'язку mMTC, надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC).

28. Реалізація послуг Smart Parking, Tracking, Smart Street Lamps.

29. Міжмашинна взаємодія M2M Інтернету речей IoT. Особливості реалізації для MM3.

30. Технології та номенклатура послуг перспективних мереж мобільного зв'язку. Технології віртуальної реальності та тактильних відчуттів TSN.

8. ОЦІНЮВАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ТА ФАХОВОЇ ПЕРДВИЩОЇ ОСВІТИ ЗА НАВЧАЛЬНУ ДИСЦИПЛІНУ У МІЖНАРОДНОМУ ГУМАНІТАРНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

*(поточний контроль, підсумковий контроль, загальний результат
оцінювання)*

ЗАЛІК

Види роботи	Планові терміни виконання	Форми контролю та звітності	Максималь- ний відсоток оцінювання
Систематичність і активність роботи на практичних заняттях			
1.1. Підготовка до практичних занять	Відповідно до робочої програми та розкладу занять	Перевірка обсягу та якості засвоєного матеріалу під час практичних занять	60
Виконання завдань для самостійного опрацювання			
1.2. Індивідуальне тестування	Відповідно до робочої програми та розкладу занять	Перевірка результатів індивідуального тестування, перевірка конспектів лекцій, перевірка рефератів	20
Виконання індивідуальних завдань (дослідна робота здобувача)			
1.3. Інші види індивідуальних завдань, в т.ч. підготовка наукових публікацій, участь у роботі круглих столів, конференцій тощо.	Відповідно до робочої програми та розкладу занять	Обговорення результатів проведеної роботи під час аудиторних занять, наукових конференцій та круглих столів.	20
Разом балів за поточний контроль			100
Загальний результат оцінювання			100

Поточний контроль знань здобувачів освіти при формі контролю залік (максимум 100 балів) оцінюється за шкалою («2», «3», «4», «5»), з обов'язковим переведенням балів за кожний вид роботи таким чином:

– за підготовку до аудиторних занять (максимум 60 балів) здобувачу освіти необхідно мати не менше $1/2$ оцінок від загальної кількості практичних (лабораторних) занять, для переведу балів за підготовку до аудиторних занять середньоарифметична оцінка множиться на коефіцієнт 12;

– за виконання завдань для самостійного опрацювання (тестування, завдання, підготовка реферату (есе) за заданою тематикою) (максимум 20 балів) здобувачу освіти необхідно мати не менше $1/2$ оцінок від загальної кількості програмного матеріалу, що виноситься на самостійне вивчення, для переведу зазначених балів середньоарифметична оцінка множиться на коефіцієнт 4;

– за інші види індивідуальних завдань, в т.ч. підготовку наукових публікацій, участь у роботі круглих столів, конференцій тощо (максимум 20 балів) здобувачу освіти необхідно мати не менше $1/2$ оцінок від загальної кількості інших видів індивідуальних завдань, для переведу балів за підготовку до аудиторних занять середньоарифметична оцінка множиться на коефіцієнт 4.

Критерії оцінювання поточного контролю

– «2» – виставляється за неправильну відповідь (письмову роботу), яка не відповідає змісту теми та свідчить про нерозуміння її основних положень;

– «3» – виставляється за відповідь (письмову роботу), яка відповідає змісту теми, але є неповною і неточною у визначенні понять, свідчить про неповне розуміння основних положень навчального матеріалу, свідчить про те, що знання здобувача мають фрагментарний, поверховий характер;

– «4» – оцінюється правильна і обґрунтована відповідь (письмова робота), з якої видно, що здобувач знає й розуміє теоретичний матеріал в обсязі навчальної теми, володіє необхідними навичками, не допускає суттєвих помилок.

– «5» – оцінюється повна, правильна, ґрунтовна відповідь (письмова робота) на запитання теми, що передбачає логічність і послідовність викладу матеріалу, володіння термінологією, демонструє вміння повно й глибоко використовувати теоретичні знання у практичній площині.

9. ОЦІНЮВАННЯ ЗАГАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗНАНЬ ЗДОБУВАЧІВ

Загальні результати знань здобувачів по даній дисципліні оцінюються наступним чином:

– **«Відмінно»/«зараховано» (А)** – від 90 до 100 балів. Здобувач виявляє особливі творчі здібності, вміє самостійно знаходити та опрацьовувати необхідну інформацію, демонструє знання матеріалу, проводить узагальнення і висновки. Був присутній на лекціях та семінарських заняттях, під час яких давав вичерпні, обґрунтовані, теоретично і практично правильні відповіді, має конспект з виконаними завданнями до самостійної роботи, презентував реферат за заданою тематикою, проявляє активність і творчість у науково-дослідній роботі;

– **«Добре»/«зараховано» (В)** – від 82 до 89 балів. Здобувач володіє знаннями матеріалу, але допускає незначні помилки у формуванні термінів, категорій, проте за допомогою викладача швидко орієнтується і знаходить правильні відповіді. Був присутній на лекціях та семінарських заняттях, має конспект з виконаними завданнями до самостійної роботи, презентував реферат за заданою тематикою, проявляє активність і творчість у науково-дослідній роботі;

– **«Добре»/«зараховано» (С)** – від 74 до 81 балів. Здобувач відтворює значну частину теоретичного матеріалу, виявляє знання і розуміння основних положень, з допомогою викладача може аналізувати навчальний матеріал, але дає недостатньо обґрунтовані, невичерпні відповіді, допускає помилки. При цьому враховується наявність конспекту з виконаними завданнями до самостійної роботи, реферату та активність у науково-дослідній роботі;

– **«Задовільно»/«зараховано» (D)** – від 64 до 73 балів. Здобувач був присутній не на всіх лекціях та семінарських заняттях, володіє навчальним матеріалом на середньому рівні, допускає помилки, серед яких є значна кількість суттєвих. При цьому враховується наявність конспекту з виконаними завданнями до самостійної роботи та рефератів;

– **«Задовільно»/«зараховано» (E)** – від 60 до 63 балів. Здобувач був присутній не на всіх лекціях та семінарських заняттях, володіє навчальним матеріалом на рівні, вищому за початковий, значну частину його відтворює на репродуктивному рівні, на всі запитання дає необґрунтовані, невичерпні відповіді, допускає помилки, має неповний конспект з завданнями до самостійної роботи.

– **«Незадовільно з можливістю повторного складання»/«не зараховано» (FX)** – від 35 до 59 балів. Здобувач володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу.

– **«Незадовільно з обов’язковим повторним вивченням дисципліни»/«не зараховано» (F)** – від 1 до 34 балів. Здобувач не володіє навчальним матеріалом.

**ТАБЛИЦЯ ВІДПОВІДНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ЗА
РІЗНИМИ ШКАЛАМИ**

100-бальна шкала	Шкала за ECTS	Національна шкала	
		Екзамен	Залік
90-100	A	Відмінно	Зараховано
82-89	B	Добре	Зараховано
74-81	C		
64-73	D	Задовільно	Зараховано
60-63	E		
35-59	FX	Незадовільно	Не зараховано
1-34	F		

10. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Соловська І.М., Розенвассер Д.М. Мобільні комунікації: конспект лекцій для здобувачів, які навчаються за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти в галузі знань – 12 Інформаційні технології, спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», 122 «Комп'ютерні науки», 123 «Комп'ютерна інженерія», 125 «Кібербезпека та захист інформації», галузі знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації, спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», 01 – Освіта/Педагогіка, спеціальність 014 «Середня освіта. Інформатика» [Електронне видання] / Соловська І.М., Розенвассер Д.М. Кафедра комп'ютерних наук Міжнародного гуманітарного університету. Одеса, 2025. – 50 с.

2. Соловська І.М., Розенвассер Д.М. Навчально-методичні рекомендації до практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Мобільні комунікації» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення», 122 «Комп'ютерні науки», 123 «Комп'ютерна інженерія», 125 «Кібербезпека та захист інформації», 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», 014 «Середня освіта. Інформатика» денної та заочної форми навчання [Електронне видання] / Соловська І.М., Розенвассер Д.М. Кафедра комп'ютерних наук Міжнародного гуманітарного університету. Одеса. 2025. – 25 с.

3. Системи мобільного зв'язку. Застосування засобів мобільного зв'язку [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» спец. 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; Головін Ю.О. та інші. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 187 с.

4. Nikhil Kumar Marriwala, Vinod Kumar Shukla, Shruti Jain, Dinesh Kumar, Sunil Dhingra Mobile Radio Communications and 5G Networks Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Singapore, 2025.

5. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd edition. – Wiley, 2019.
<https://www.amazon.com/LTE-UMTS-Evolution-Theory-Practice/dp/0470660252>

6. Taid, R. (2021). Mobile Communications Systems Development: A Practical Introduction to System Understanding, Implementation and Deployment. Wiley.

7. Jyrki T. J. Penttinen 5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications, Wiley, 2019.
8. Saad Asif 5G Mobile Communications, CRC Press, 2018.
9. Anwer Al-Dulaimi 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management, WILEY, 2018.
10. Cornelia Kappler UMTS Networks and Beyond. [John Wiley & Sons Limited](#), 2019.
11. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2nd Edition, 2018. <https://www.amazon.com/4G-LTE-LTE-Advanced-Mobile-Broadband/dp/0124199852>

Допоміжна

12. Strelkovskaya I.V. LTE/MVNO networks structure optimization based on tensor decomposition / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Information and telecommunication sciences. – July-December 2014. – V. 5, № 2(9). – P. 14-20.
13. Стрелковська І.В., Соловська І.М., Кордон Д.В. Визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2021. – № 1 (01) – С. 35-51.
14. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Makoganiuk A. Forecasting 5G network multimedia traffic characteristics. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2020). February 25 – 29, 2020. Slavske. P. 982-987. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235585>
15. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J., Makoganiuk A. Software implementation research of self-similar traffic characteristics of mobile communication networks. In: Klymash M., Beshley M., Luntovskyy A. (eds) Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 831. Springer, Cham, 2021, pp. 288-304. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_17, ISBN 978-3-030-92433-1
16. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J. Spline-extrapolation of video traffic of IoT-devices based on various cubic splines. Problems of Infocommunications Science and Technology (PICS&T 2020). October 6-9, 2020. Kharkiv. P. 243-248. <https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9467937>
17. Strelkovskaya I., Solovskaya I., Strelkovska J. Comparison of methods for determining user coordinates in a Wi-Fi/Indoor network In: Information and Communication Technologies and Sustainable Development Advanced Approaches and Innovations in Up-to-Date Networks and Systems. Lecture Notes in Networks and

Systems, Springer, 2023. Cham. vol 809. Springer, Cham. pp 244–254.

18. Стрелковська І.В. Прогнозування мультимедійного трафіку пристроїв Інтернет речей IoT/5G / І.В. Стрелковська, І.М. Соловська // Міжнародна науково-практична конференція «Європейський вибір України, розвиток науки та національна безпека в реаліях масштабної військової агресії та глобальних викликів XXI століття» (до 25-річчя Національного університету «Одеська юридична академія» та 175-річчя Одеської школи права): матеріали конф., Одеса, 17 червня 2022 р.: тези доп. – Одеса: НУ ОЮА, 2022. – С. 731-736. <http://dspace.onua.edu.ua/handle/11300/19774?locale-attribute=uk>

19. Halonen T., Romero J., Melero J. GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTSю -2nd Edition. – John Wiley & Sons, 2017.

Рекомендації, нормативно-правові документи

20. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 10.1.0 Release 10), 2015.

21. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2017.

22. LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 12.6.0 Release 12).

23. 3GPP TS 23.251 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network Sharing; Architecture and functional description.

24. 3GPP TS 36.101 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.

25. 3GPP TS 23.401 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access.

Інформаційні ресурси

26. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського Київ: НБУВ, 2013-2023. URL: www.nbuv.gov.ua
27. <http://3gpp.org>
28. <https://www.ericsson.com/>

ЗМІСТ

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	3
2. ОЧІКУВАНІ КОМПЕТЕНТНОСТІ, ЯКІ ПЛАНУЄТЬСЯ СФОРМУВАТИ, ТА ДОСЯГНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ	4
3. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	6
4. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	7
5. ПИТАННЯ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ	10
6. КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ.....	13
7. ПИТАННЯ ДО ЕКЗАМЕНУ.....	39
8. ОЦІНЮВАННЯ ПОТОЧНОЇ, САМОСТІЙНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧІВ	41
9. ОЦІНЮВАННЯ ЗАГАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗНАНЬ ЗДОБУВАЧІВ ..	44
10. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	46
ЗМІСТ.....	49

**Соловська Ірина Миколаївна
Розенвассер Денис Михайлович**

МОБІЛЬНІ КОМУНІКАЦІЇ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів

галузі знань – 12 Інформаційні технології, спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», 122 «Комп'ютерні науки», 123 «Комп'ютерна інженерія», 125 «Кібербезпека та захист інформації»,
галузі знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації, спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»,
галузі знань 01 – Освіта/Педагогіка, спеціальність 014 «Середня освіта. Інформатика»

Українською мовою