

**МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи  
другого (магістерського) рівня

на тему **АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ  
ВІРТУАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ МЕРЕЖІ 5G/NR**

Виконав: студент 2 курсу, групи КТК-2.1  
спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка

\_\_\_\_\_ Орлов Н.Д. \_\_\_\_\_

Керівник Соловська І.М.

Рецензент Тригор'єва Т.І.

# ДОВІДКА

кафедри КІ та ІТ про виконану магістерську роботу  
студента 2 курсу ФКПІ та КН групи КТК-2.1

Орлова Нікіти Дмитровича

на тему Аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR

Висновок нормоконтролера Пасивною змістом докваліфікаційної роботи виконана з незначними порушеннями ДСТУ. Одержано згідно висновку виконання положень МІУ  
Нормоконтролер к.т.н., доцент [підпис] В.В. Переш  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату Згідно з ершифікацією IP унікальність роботи підтверджено  
Відповідальна особа к.т.н., доцент [підпис] В.В. Переш  
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) магістерської роботи

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Орлова Н.Д. проведена "15" грудня 2023 р.  
(прізвище і.б.)

Висновки Кваліфікаційна робота виконана у повному обсязі. В роботі проведено аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR. Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до виконання кваліфікаційних робіт зі спеціальності 'Інформаційні та радіотехніки та рекомендована до захисту.

Члени комісії

[підпис]  
(підпис)  
[підпис]  
(підпис)

к.т.н., доцент Цімоєв С.П.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
к.т.н., доцент Переш В.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)  
викл. каф. КІ та ІТ Швачь О.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)



# МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій  
Освітній ступінь бакалавр  
Галузь знань 12 Інформаційні технології  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІ та ІТ

к.т.н., доц.

Л.Г. Йона

“ 25 ” 09 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Орлову Нікіті Дмитровичу

1. Тема роботи: Аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR

керівник роботи к.т.н., доцент каф. комп'ютерних наук Соловська І.М.

затверджені наказом закладу вищої освіти від 25 вересня 2023 р. № 1955

2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1) Архітектура мережі 5G/NR, протоколи та інтерфейси згідно 3GPP TR 38.801. 2) Характеристики технологій та номенклатура послуг, які надаються в мережі 5G/NR згідно 3GPP TR 38.913. 3) Специфікації 3GPP та рекомендації Y.1541 та G.1000, щодо регламентації показників якості обслуговування QoS в мережі 5G/NR. 4) Технічні специфікації 3GPP TS 38.300, TS 38401 та щодо впровадження інфраструктури мережі 5G/NR.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки \_\_\_\_\_

Розділ 1: Аналіз технологічного стану розвитку віртуальних середовищ 5G/NR

Розділ 2: Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції дослідження показників функціонування віртуалізованих середовищ 5G/NR.

Розділ 3: Вирішення задачі визначення показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR

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

Слайд 1 – Архітектура мережі 5G/NR

Слайд 2 – Віртуалізація мережі Open RAN 5G/NR та опорної мережі 5G Core Network

Слайд 3 – Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції дослідження показників якості функціонування мережі 5G/NR

Слайд 4 – Визначення значення середнього часу затримки пакетів в мережі в мережі 5G/NR

Слайд 5 – Аналіз отриманих результатів

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023- 29.09.2023	<i>вск</i>
2	Аналіз технологічного розвитку віртуальних середовищ 5G/NR	2.10.2023- 23.10.2023	<i>вск</i>
3	Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції дослідження показників функціонування віртуалізованих середовищ 5G/NR	24.10.2023 – 10.11.2023	<i>вск</i>
4	Вирішення задачі визначення показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR	13.11.2023- 24.11.2024	<i>вск</i>
5	Висновки та рекомендації	27.11.2023- 30.11.2023	<i>вск</i>
6	Перелік посилань	1.12.2023- 5.12.2023	<i>вск</i>
7	Додаток А. Перелік демонстраційного матеріалів	6.12.2023- 10.12.2023	<i>вск</i>

Студент

  
(підпис)

Н.Д. Орлов

Керівник роботи

  
(підпис)

І.М. Соловська



## ВІДГУК КЕРІВНИКА

на кваліфікаційну роботу здобувача другого (магістерського) рівня  
Орлова Нікити Дмитровича  
на тему: «Аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі  
5G/NR»

Розвиток мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G відбувається на базі технології NR, які зможуть забезпечити високу швидкість передавання даних, значно знизити час затримки та збільшити пропускну здатність мережі. Номенклатура послуг мережі 5G, до яких віднесені послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB, масивних машинних комунікацій mMTC та послуги з'єднання з наднизькою затримкою вимагає від оператора збільшення швидкості передачі даних і забезпечення необхідних значень характеристик якості QoS, серед яких найбільш критичними є значення середнього часу затримки.

Для дослідження в роботі обрано вузловий тензорний метод на основі декомпозиції, який дозволяє враховувати як структурні, так і функціональні характеристики об'єктів мережі. При рішенні поставленого завдання визначені показники функціонування віртуалізованих середовищ 5G/NR, а саме, середній час затримки пакетів та довжину пакетної черги. Отримані результати дозволили надати рекомендації щодо визначення оптимальної конфігурації з'єднання базових станцій gNB в мережі RAN.

Під час написання магістерської роботи здобувач Орлова Н.Д. відповідально і дисципліновано ставився до поставлених завдань, проявив працьовитість і цілеспрямованість при вивченні можливостей застосування математичного апарату тензорного аналізу, який є основним методом дослідження в його роботі.

Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт другого (магістерського) рівня та заслуговує оцінки «добре».

Здобувач Орлов Н.Д. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з телекомунікацій та радіотехніки за заявленою спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Керівник,  
к.т.н., доцент  
кафедри комп'ютерних наук

І.М. Соловська



## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу здобувача другого (магістерського) рівня  
Орлова Нікіти Дмитровича  
на тему: «Аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ  
мережі 5G/NR»

Магістерська робота здобувача Орлова Н.Д. присвячена дослідженню показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR.

Актуальність теми безсумнівна, адже сьогодні основним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку є перехід до мереж 5G/NR для забезпечення високошвидкісного радіодоступу та сучасної номенклатури послуг з гарантованою якістю обслуговування.

Магістерська робота виконана у повному обсязі у відповідності з завданням.

У роботі проведено дослідження показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR. Проаналізовано архітектуру мережі та основні процедури віртуалізації для забезпечення нормативних значень показників якості мережі 5G/NR. В ході розв'язання задачі були отримані значення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу Open RAN. На конкретному прикладі мобільної мережі 5G/NR продемонстровано розв'язання задачі визначення наступних показників.

Текстова частина магістерської роботи викладена науковим лаконічним стилем, послідовно, чітко, технічно грамотно.

До недоліків магістерської роботи варто віднести:

1. Доцільно розглянути більш детально побудову опорної мережі 5G/NR.
2. При дослідженні показників функціонування доцільно було б розглянути показники функціонування мережі за умови іншого поділу на Network Slicing.

Вказані недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

У цілому, кваліфікаційна робота здобувача Орлова Н.Д. відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт здобувачів другого (магістерського) рівня та заслуговує оцінки «добре».

Здобувач Орлов Н.Д. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з телекомунікацій та радіотехніки за заявленою спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент,  
завідувач кафедри  
інформаційних технологій  
к.т.н., доцент



Т.І. Григор'єва

Имя пользователя:  
Анна Серединко

Дата проверки:  
03.01.2024 13:31:27 EET

Дата отчета:  
03.01.2024 13:33:20 EET

ID проверки:  
1016044105

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:  
100001433

Название файла: МР Орлов Н 28.12.2023

Количество страниц: 54 Количество слов: 10095 Количество символов: 71306 Размер файла: 5.03 MB ID файла: 1015741433

Обнаружены модификации текста (могут влиять на процент совпадений)

**18%**

## Совпадения

Наибольшее совпадение: 11% с источником из Библиотеки (ID файла: 1015741434)

12% Источники из Интернета 825

Страница 56

11.8% Источники из Библиотеки 79

Страница 59

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 28

Подозрительное форматирование 10 страниц



## АНОТАЦІЯ

Текстова частина магістерської роботи: 60 с., 7 рисунки, 5 таблиці, 1 додаток, 16 список використаних джерел.

МЕРЕЖА 5G/NR, НОВА РАДІОТЕХНОЛОГІЯ, ВІРТУАЛІЗОВАНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, eMBB, mMTC, СЕРВІСИ URLLC, ПЕРЕДОВА ТЕХНОЛОГІЯ LTE, ПРОГРАМНО КОНФІГУРУЄМА МЕРЕЖА SDN, ВІДКРИТА РАДІОМЕРЕЖА, МЕРЕЖА 5G CORE, БАЗОВА СТАНЦІЯ gNB, МОДУЛЬ МОБІЛЬНОСТІ AMF, ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ФУНКЦІЙ МЕРЕЖІ NFV, ГІПЕРВІЗОР, МЕТОД ВУЗЛОВОГО ТЕНЗОРА, ДЕКОМПЗИЦІЯ, ІНТЕНСИВНІСТЬ ТРАФІКУ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ, СЕРЕДНІЙ ЧАС ЗАТРИМКИ ПАКЕТА, ДОВЖИНА ЧЕРГИ ПАКЕТА

Об'єкт дослідження - трафік, що обслуговується в мережі 5G/NR.

Мета роботи - аналіз якості обслуговування трафіку в мережі 5G/NR.

Метод дослідження - метод вузлових тензорів на основі декомпозиції.

В магістерській роботі проведено дослідження показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR. Проаналізовано архітектуру мережі та основні процедури віртуалізації для забезпечення нормативних значень показників якості мережі 5G/NR.

Для дослідження обґрунтовано обрано метод вузлових тензорів на основі декомпозиції, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні характеристики, так і функціональні властивості складної мережі 5G/NR. В ході розв'язання задачі були отримані значення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу Open RAN. На конкретному прикладі мобільної мережі 5G/NR продемонстровано розв'язання задачі визначення наступних показників



## ABSTRACT

Text part of the master's work: 60 p., 7 figures, 5 tables, 1 appendix, 16 sources.

5G/NR NETWORK, NEW RADIO TECHNOLOGY, VIRTUALISED ENVIRONMENT, eMBB, mMTC, URLLC SERVICES, LTE-ADVANCED TECHNOLOGY, SDN SOFTWARE CONFIGURABLE NETWORK, OPEN RAN RADIO NETWORK, 5G CORE NETWORK, gNB BASE STATION, AMF MOBILITY MODULE, NFV NETWORK FUNCTIONS VIRTUALISATION, HYPERVISOR, NODAL TENSOR METHOD, DECOMPOSITION, TRAFFIC INTENSITY, QoS INDICATORS, AVERAGE PACKET DELAY TIME, PACKET QUEUE LENGTH

Object of study is traffic served in the 5G/NR network.

Purpose - to analyse the quality of traffic service in the 5G/NR network.

Research method - nodal tensor method based on decomposition.

In the master's thesis, a study of the quality indicators of the functioning of virtualised environments of the 5G/NR network was carried out. The network architecture and basic virtualisation procedures are analysed to ensure the normative values of 5G/NR network quality indicators.

For the study, the nodal tensor method based on decomposition was reasonably chosen, which allows simultaneously studying both the structural characteristics and functional properties of a complex 5G/NR network. In the course of solving the task, the values of the average packet delay time in the Open RAN radio access network were obtained. On a specific example of a 5G/NR mobile network, the solution to the problem of determining the following indicators is demonstrated

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ВІРТУАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ МЕРЕЖІ 5G/NR .....	10
1.1 Аналіз технологічного стану розвитку мереж 5G/NR .....	10
1.2 Послуги мережі 5G/NR.....	14
1.3 Архітектура мережі мобільного зв'язку на базі 5G/NR .....	16
1.4 Сценарії переходу до 5G/NR.....	20
1.5 Створення віртуального середовища на базі Network Slicing .....	24
1.6 Показники якості обслуговування QoS в мережі 5G/NR.....	26
2 ВУЗЛОВИЙ ТЕНЗОРНИЙ МЕТОД НА ОСНОВІ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ 5G/NR .....	28
2.1 Постановка задачі та вибір математичного апарату дослідження .....	28
2.2 Основні принципи побудови тензорної моделі .....	30
2.3 Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції .....	34
3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ МЕРЕЖІ 5G/NR	39
3.1 Вихідні дані для розрахунку показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR .....	39
3.2 Розрахунок показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR .....	43
3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження .....	49
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	52
Додаток А ПЕРЕЛІК ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ .....	54



## ВСТУП

Мережі п'ятого покоління 5G технології NR (New Radio) які зможуть забезпечити високу швидкість передавання даних, значно знизити час затримки та збільшити пропускну здатність мережі. Впровадження мереж 5G/NR ґрунтується на використанні опорної мережі CN (Core Network) технологій LTE Advanced і LTE Advanced Pro. Рекомендацією 3GPP TR 38.913 визначені групи серед яких, послуги широкосмугового доступу eMBB, машинні комунікації mMTC та послуги з наднизькою затримкою URLLC [1-2]. Для надання послуг мережі 5G необхідне значне збільшення швидкості передачі і підтримка певних значень затримки.

Архітектура мережі 5G/NR використовує програмно-конфігуровану мережу радіодоступу SDR (Software Defined Radio) та опорну мережу SDN (Software Defined Networking) з використанням процедури віртуалізації мережних функцій на базі технології Network Slicing, яка дозволяє гнучко створювати топологічні конфігурації мережі для різних умов надання послуг eMBB, mMTC та URLLC. Саме використання віртуалізованих середовищ мереж 5G/NR на базі організованого Network Slicing поділу на слайси для різних груп послуг дозволяють забезпечити обслуговування трафіку з певними вимогами. Така побудова є гнучкою і забезпечує логічне розділення (слайсинг) мережі радіодоступу з ізоляцією шарів та функцій, гарантуючи відсутність взаємних впливів між ними. Network Slicing дозволяє забезпечити мобільність користувачів та виконувати балансування навантаження, а також надасть можливість балансування фізичних ресурсних блоків між кінцевими користувачами.

В цьому змісті й розрахована магістерська робота, яка розглядає аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR задля забезпечення характеристик якості обслуговування трафіку з метою надання номенклатури послуг eMBB, mMTC та URLLC. Використання вузлового тензорного методу на базі декомпозиції дозволить виконати слайсинг мережі та визначити необхідні характеристики, такі як середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги. Отримані результати допоможуть визначити оптимальну конфігурацію з'єднань в мережі 5G/NR.

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ВІРТУАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ МЕРЕЖІ 5G/NR

## 1.1 Аналіз технологічного стану розвитку мереж 5G/NR

Основними тенденціями розвитку мобільного зв'язку згідно Technical Report Ericsson [1] є розвиток мереж п'ятого покоління 5G (Generation), які зможуть забезпечити більш високу швидкість підключення, знизити час затримки та збільшити пропускну здатність мережі. Кількість підключень до 2025 року буде становити понад 2,6 млрд. користувачів.

У 2023 році очікується більш ніж 1,6 млрд. підключень до мережі 5G/NR (New Radio). Оператори мобільного зв'язку у світі розгорнули біля 280 комерційних мереж, з них більш ніж 40 автономних мереж.

За оцінками Technical Report Ericsson [1] найпоширенішими послугами 5G, які запускають постачальники послуг для споживачів, буде розширений мобільний широкопasmовий доступ eMBB (Enhanced mobile broadband) та фіксований бездротовий доступ FWA (Fixed Wireless Access), ігри та деякі сервіси на основі AR (Augmented reality)/VR (Virtual Reality).

Ericson Mobility Report [1] відмічає, що побудова мереж мобільного зв'язку буде ґрунтуватися на технології LTE (LTE-Advanced і LTE-Advanced Pro).

В мережі 5G/NR використовуються діапазони частот нового спектра вище ніж 6 ГГц: сантиметрові (від 6 до 30 ГГц) та міліметрові (понад 30 ГГц).

Також для розгортання мережі 5G можуть бути долучені також діапазони частот нижче 6 ГГц, нижні смуги частот забезпечують покриття мережі, а верхні пропускну здатність. Використання діапазонів частот 5G/NR показані на рис. 1.1 [2].

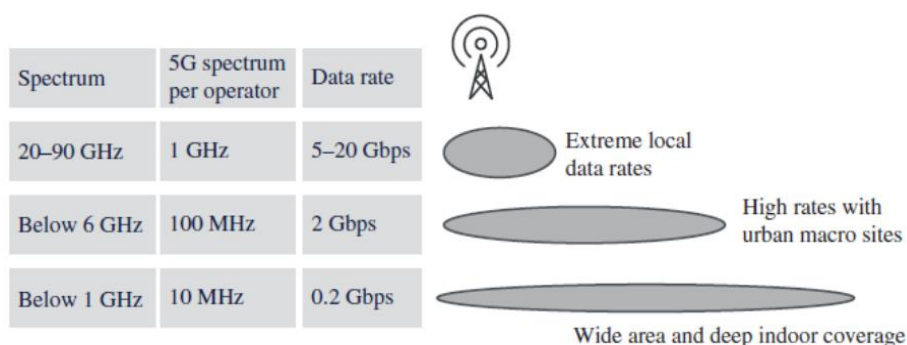




Рисунок 1.1 – Використання спектру 5G/NR [2]

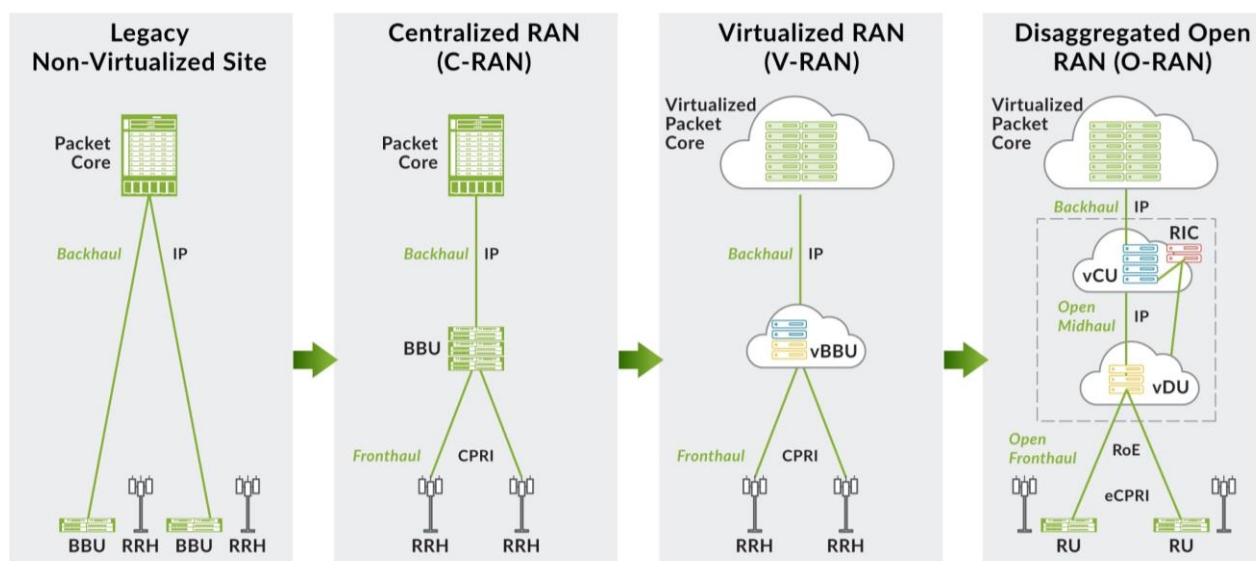
Технічні характеристики мережі 5G/NR наведені в табл. 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики мережі 5G/NR [3]

Діапазон частот	Дуплексний розподіл	Покриття, км	Швидкість передавання даних
1 ГГц	FDD	> 10	0,4 Гбіт/с (20 МГц)
2 ГГц	FDD	≈ 5	0,8 Гбіт/с (20 МГц)
2,5 – 6 ГГц	TDD	1 – 5	6 Гбіт/с (100 МГц)
6 ГГц	TDD	1 – 5	20 Гбіт/с (400 МГц)
mmWave	TDD	< 1	2 Гбіт/с (4x100 МГц)

В якості антенних комплексів мережі 5G/NR використані Massive MIMO антени Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO), які за рахунок багаторазового збільшення пропускної спроможності радіоканалу за допомогою декількох передаючих та приймальних антен конфігурації 8×8, 16×16, 64×64 або 128×128 забезпечить збільшення спектральної ефективності та покриття мережі [3].

Мережа радіодоступу 5G/NR – Open RAN (рис. 1.2), має відкриту архітектуру на базі радіовузлів RRH (Remote Radio Head) та блоків формування модулюючих сигналів BBU (Baseband Unit) тепер дезагреговані на централізовані блоки CU (Centralized Unit), розподілені блоки DU (Distributed Unit) та радіоблоки RU (Remote Unit). Завдяки Open RAN нові дезагреговані функції можуть бути віртуалізованими або контейнеризованими [4].



## Рисунок 1.2 – Мережа радіодоступу Open RAN 5G/NR [4]

Важливою особливістю архітектури побудови мережі радіодоступу 5G/NR – Open RAN є концепція хмарних BBU або Cloud BBU, яка полягала у відмові від локальних BBU, що розміщуються безпосередньо на об'єктах базових станцій gNB та перенесення їхньої функціональності на віртуалізовані ресурси потужних серверів, що розміщуються в центрах обробки даних (ЦОД). Дана концепція за рахунок централізації ресурсів та принципів масштабування дозволяє значно підвищити пропускну спроможність базових станцій gNB [4].

Архітектура C-RAN надає багато переваг, головною з яких є віртуалізація ресурсів. Попередні реалізації вимагали спеціального апаратного забезпечення, у більшості випадків рішення одного постачальника. Завдяки віртуалізації пул модулів базової смуги можна створити за допомогою відкритого обладнання. Стеки програмного забезпечення від різних постачальників можуть бути виконані поверх цього відкритого апаратного забезпечення для забезпечення та надання різних функцій з використанням OpenStack, платформи з відкритим кодом [4].

З точки зору Cloud RAN, кожен модуль базової смуги віртуалізовано у формі віртуалізації мережевих функцій NFV (Network Functions Virtualization). NFV визначає мережеві функції на віртуальному об'єктах або наборі віртуальних об'єктах [4].

Мережеві функції, такі як брандмауери, трансляція мережевих адрес, шлюзи тощо, що працюють на об'єктах, забезпечують функціональність мережі радіодоступу. Віртуалізація забезпечує логічну ізоляцію ресурсів, тоді як базові фізичні ресурси спільно використовуються динамічно та з можливістю масштабування. Модулі базової смуги в Cloud RAN спільно використовують загальний пул ресурсів і, отже, є більш ресурсоефективними.

Додавання або видалення блоку базової смуги стає таким же простим, як увімкнення або вимкнення віртуальної машини. Пристрої базової смуги підключаються до віддалених радіомодулів RRH за допомогою загального радіоінтерфейсу CPRI або відкритої архітектури базових станцій OBSAI. Всі ці дії дозволяють значно збільшити пропускну спроможність радіомережі Open RAN 5G/NR, забезпечити її масштабованість та надійність. Використання віртуалізації в Cloud RAN – Virtualized RAN (V-RAN) на базі віртуалізованих Cloud BBU



забезпечує підтримку нормативних значень характеристик якості обслуговування в мережі 5G/NR – Open RAN [4-10].

## 1.2 Послуги мережі 5G/NR

Номенклатура послуг мережі 5G/NR визначається 3GPP TR 38.913 за наступними групами [2].

Перша група послуг 5G/NR – це послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB, до яких віднесені:

- відеопослуги, потокове відео, послуги доповненої реальності AR (Augmented Reality) та послуги віртуальної реальності VR (Virtual Reality);

- послуги Інтернету речей для розвитку міст (логістика транспорту, людей, міського транспорту включно з послугами відеоспостереження, контролю за рухом людей, робота сенсорів руху, нагляду та інше);

- послуги логістики (доставка товарів та їжі, переміщення товарів з відмітками місцезнаходження); послуги ритейлу (продажі, передавання, доставка, включно з послугами додаткової реальності – емоції та почуття);

- медицина (інтерактивні медичні карти, замовлення та логістика ліків, телемедицина, ресурси лікарів), трансмуральна допомога, mHealth.

- послуги передавання даних, телеметрія, межмашинна взаємодія M2M, взаємодія девайсів D2D, Інтернет речей.

Друга група послуги eMBB потребують максимальної швидкості передачі та ймовірності втрат та помилок пакетів  $P_{PER} = 0,001$ .

Послуги масивного машинного зв'язку mMTC (Massive machine communication type):

- послуги низькошвидкісного доступу до Інтернет,

- послуги вимірювання, телеметрії та моніторингу процесів.

Послуги mMTC – «Розумних будинків», послуг Інтернету речей з високою кількістю датчиків та моніторингом персоналу і обладнання на виробництві [2].

Послуги надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) [2]:

- послуги Інтернет речей, датчиків та сенсорів виробництва, послуги керування та віддаленої хірургії,

- дрони, спостереження, розумні мережі,

- послуги реального часу, екстрених служб, поліції, тактильний інтернет.

Ці послуги вимагають затримки не більш ніж 1 с з ймовірністю втрат пакетів  $10^{-5}$  пакетах згідно ITU-R M.2410.0.

Розглянувши основні послуги мережі 5G/NR слід зазначити, що:

- впровадження послуг мережі 5G/NR потребує зміни побудови мережі;
- потребує значної швидкості передавання даних нормативного значення часу затримки пакетів та ймовірності втрати.

Технічні характеристики та вимоги до реалізації послуг мережі 5G/NR згідно 3GPP TR 38.913 [2] наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики послуг мережі 5G/NR

Характеристика	Технічні вимоги до надання послуг	Послуги
Швидкість передавання даних	DL – 20 Гбіт/с, UL – 10 Гбіт/с	eMBB
Спектральна ефективність	DL – 30 біт/Гц, UL – 15 біт/Гц	eMBB
Час затримки	C-plane – 10 мс, U-plane – 0,5 мс	URLCC
Швидкість на користувача	DL – 100 Мбіт/с, UL – 50 Гбіт/с	eMBB
Пропускна спроможність на стільник	10 Мбіт/с/м <sup>2</sup>	mMTC
Щільність з'єднання	1000000 девайсів/км <sup>2</sup>	mMTC
Мобільність	500 км/ч	eMBB
Час дії батареї	15 років	mMTC

### 1.3 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. 1.3 [10].



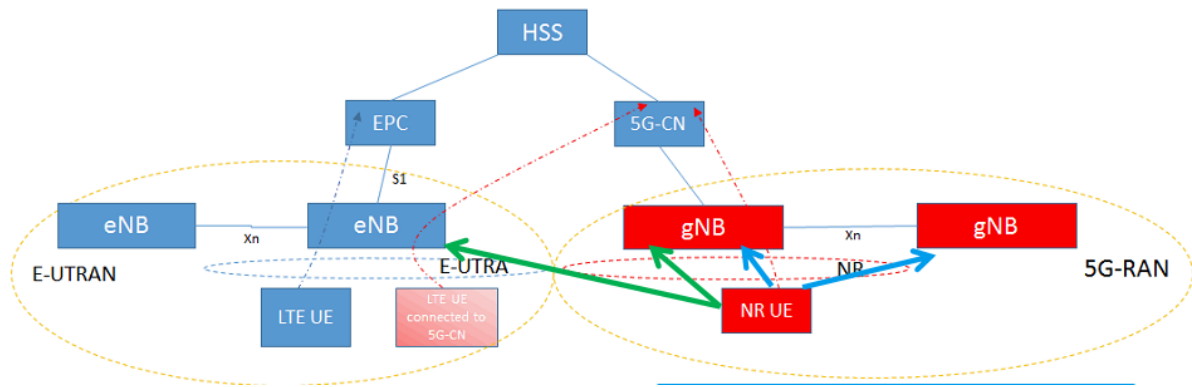


Рисунок 1.3 – Узагальнена архітектура мережі 5G/NR

Архітектура мережі 5G базується виключно на реалізованих мережних функціях віртуалізації VNF (Virtual Network Function), які забезпечують віртуалізацію більшості процесів в мережі, забезпечуючи програму реалізацію 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 [10].

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) [10].

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 [10]:

- послуги відео UHD,
- голосові послуги реального часу (5G Voice),
- послуги Інтернет речей Massive IoT, I
- послуги Інтернет речей для відповідальних додатків [2].

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 (рис. 1.4). При цьому опція 8 відповідає класичній (існуючій) схемі побудови розподіленої базової станції [4-10].

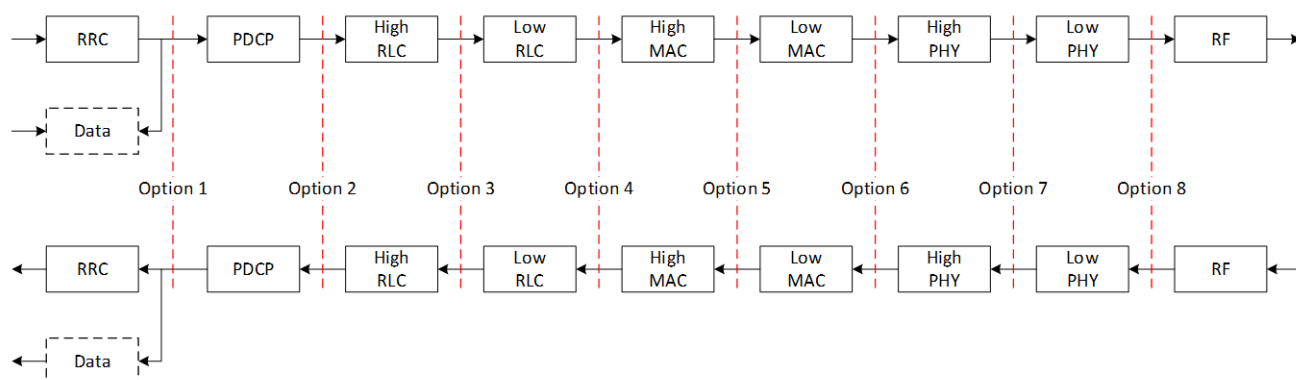


Рисунок 1.4 – Поділ функцій між CU та DU

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. 1.5 [4-10].



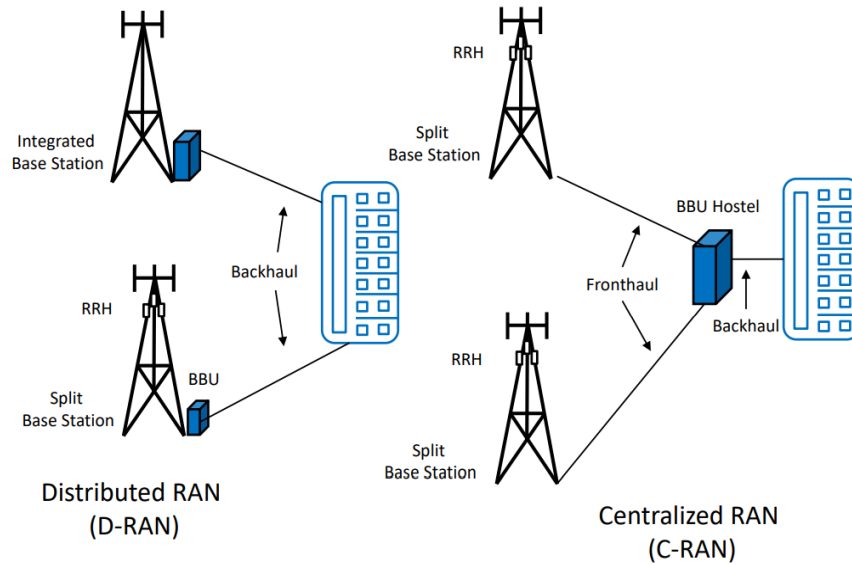
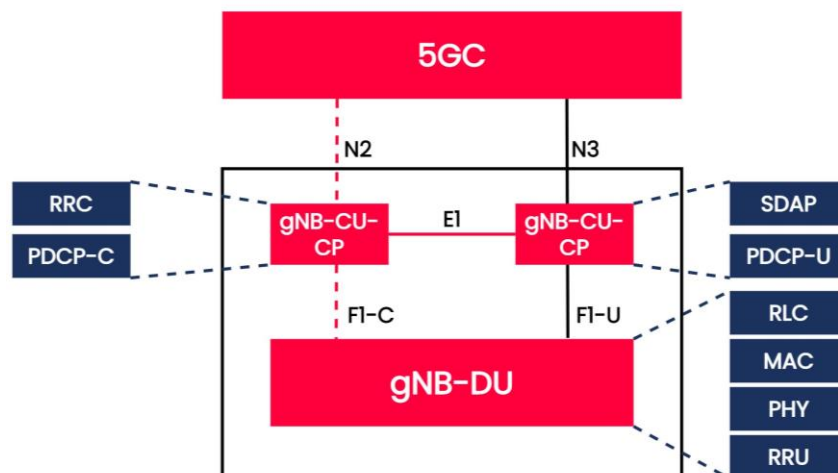


Рисунок 1.5 – Реалізація C-RAN та D-RAN

3GPP визначає такі інтерфейси gNB (рис. 1.6) [4-10]:

- 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.

### gNB logical architecture in 3GPP



## Рисунок 1.6 – Логічна архітектура базової станції gNB (gNodeB)

Логічна архітектура gNB (gNodeB) 5G New Radio (NR) є ключовим елементом мережі 5G, який забезпечує радіодоступ до пристроїв користувачів UE (User Equipment). Базова станція gNB відповідає за передачу та прийом радіосигналів, а також за управління радіоресурсами в мережі 5G.

Логічна архітектура gNB розроблена як гнучка, масштабована та здатна підтримувати широкий спектр сценаріїв розгортання. Логічна архітектура gNB складається з різних функціональних елементів, які працюють разом, щоб забезпечити надання високошвидкісних послуг із низькою затримкою. Ключові елементи логічної архітектури 5G NR gNB включають наступне [4-10]:

- центральний блок CU відповідає за загальний контроль базової станції gNB, він керує та координує радіоресурси, здійснює керування радіоресурсами та контролює мобільність пристроїв у комірці;

- центральний блок CU також поділяється на два підкомпоненти: центральний блок – розподілений CU-CP і центральний блок – централізований CU-UP;

- центральний блок CU-CP обробляє функції площини керування, тоді як CU-UP відповідає за функції площини користувача;

- розподілений блок DU відповідає за нижній рівень обробки радіосигналів, він виконує такі функції, як модуляція, кодування та декодування радіосигналів;

- розподілений блок подібно до CU, DU також поділяється на два підкомпоненти: розподілений блок – централізований DU-CP і розподілений блок – розподілений DU-UP;

- розподілений блок DU-CP обробляє площину керування, тоді як DU-UP відповідає за обробку площини користувача.

Радіоблок (RU) відповідає за радіопередачу та прийом, він включає антени та радіочастотні компоненти. RU спілкується з DU для надсилання та отримання даних і сигналів керування.

Інтерфейс gNB-CU/DU полегшує зв'язок між CU та DU, він стандартизований для забезпечення взаємодії між обладнанням різних постачальників. Інтерфейс визначається функціональними поділами, які визначають, як розподіляються функції площини керування та користувача між CU та DU.

Функціональні розподіли gNB визначають, як функції обробки розподіляються між різними елементами архітектури gNB. Є два основних функціональних поділу:

– CU-DU Split - це розділення визначає поділ між функціями площини керування CU і площини користувача DU. Це забезпечує гнучкість у розгортанні мережі, дозволяючи CU і DU розташовуватися в різних фізичних місцях;

– DU-RU Split - це розділення визначає поділ між нижчим рівнем обробки DU і радіопередачею/прийомом RU. Це дозволяє розмістити DU ближче до антен, полегшуючи використання ресурсів централізованої обробки.

Логічна архітектура 5G NR gNB — це модульна та гнучка система, яка складається з CU, DU, RU та стандартизованих інтерфейсів. Функціональний розподіл між цими елементами забезпечує гнучкість у розгортанні та забезпечує ефективне використання ресурсів у різних мережевих сценаріях.

#### 1.4 Сценарії переходу до 5G/NR

Найбільш затребувана операторами зв'язку стратегія розгортання 5G мабуть 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 [10]:

– 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 [10]:

– split bearer – у цій схемі на PDCP рівні потік даних (user plane) віртуального каналу розщеплюється на два підпотіки 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. 1.7.

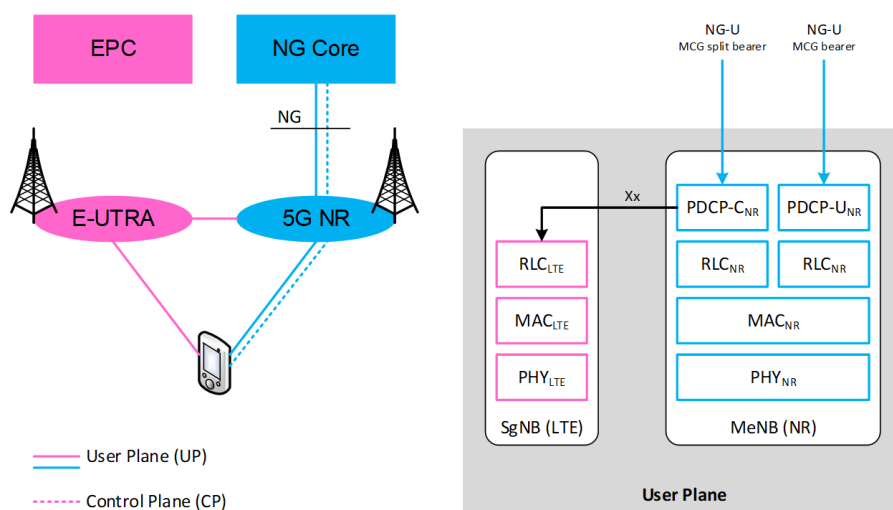


Рисунок 1.7 – Подвійне підключення (option 4) до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced

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 [10].

Реалізація сценарію (option 4a) подвійного підключення до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced показана на рис. 1.8.

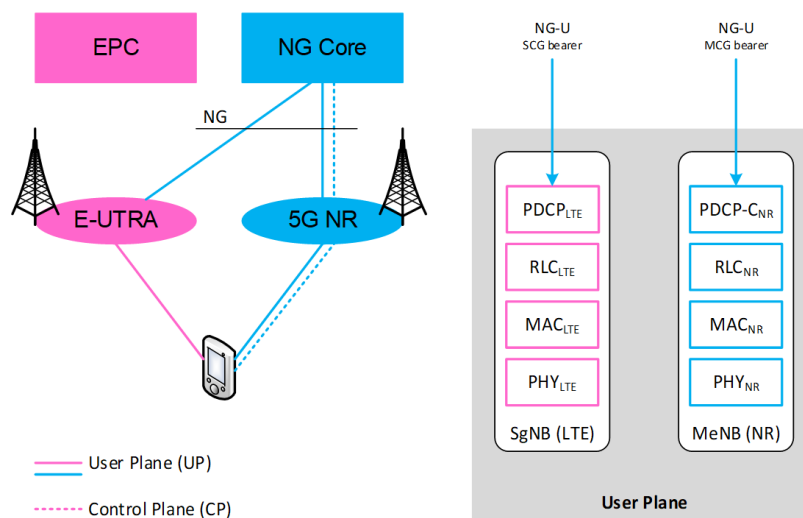


Рисунок 1.8 – Подвійне підключення (option 4a) до двох мереж радіодоступу 5G/NR та E-UTRA/LTE-Advanced

#### 1.4 Віртуалізація V-RAN 5G/NR

Функції 5G реалізуються як віртуальних мережевих 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 [11].

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. 1.9). 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 [11].

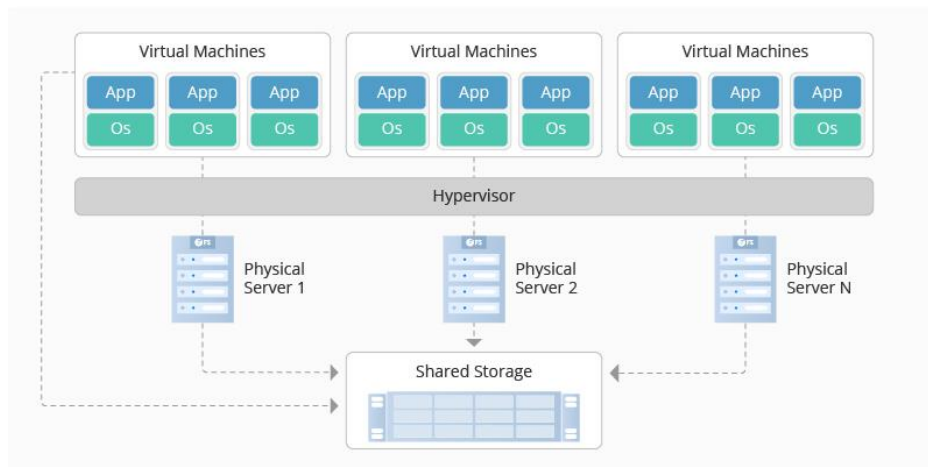


Рисунок 1.9 – Віртуалізація

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 [11].

Віртуальні мережні функції VNF можуть розгортатися як віртуальні машини VM (Virtual Machines) або контейнери (Containers) [11].

Така віртуальна інфраструктура усуває потребу у спеціалізованому обладнанні, оскільки віртуальні машини можна розгорнути на стандартних серверах у дата-центрах різного масштабу та рівня. Подібний підхід дає такі переваги [11]:

- 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.



## 1.5 Створення віртуального середовища на базі Network Slicing

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.1.10) [11].

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. 1.8) [11].

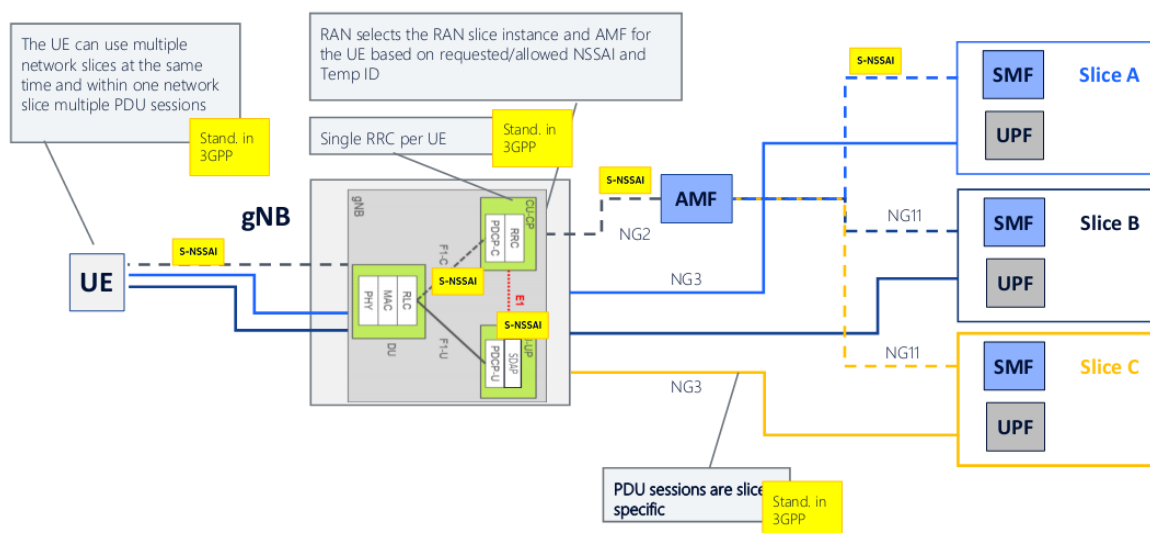


Рисунок 1.10 – Віртуалізація Network Slicing [11]

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, mMTC 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 [11].

Рішення цієї задачі ускладнюється динамічністю мережі 5G/NR та складною архітектурою її побудови. При створенні Network Slicing частина фізичних ресурсів може бути віднесена до декількох підмереж одночасно і не дозволяє отримати значення характеристик QoE. Тому є потреба у розгляданні мережі та її складових у визначеному поділі, щоб отримувати характеристики якості окремо для кожної частини, а потім мати змогу перенести ці рішення на мережу в цілому.

Тому в магістерській роботі планується вирішити задачу аналізу показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR, які розглядаються при виконанні віртуалізації ресурсів мережі при поділі на Network Slicing. До таких показників віднесемо пропускну здатність мережі та її об'єктів, значення середнього часу затримки пакетів та середньої довжини пакетної черги. Отримані результати дозволять надати рекомендації щодо використання мережевих ресурсів мережі при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

## 1.6 Показники якості обслуговування QoS

Основною особливістю реалізації концепції якості обслуговування QoS в мережі 5G є використання потокового підходу QoS Flow, при якому пакети класифікуються і маркуються з використанням ідентифікатору потоку QFI в мережі радіодоступу RAN на односпрямовані радіоканали DRB, на відміну від мережі 4G/LTE, де концепція якості заснована на несучих [12].

В мережі 4G/LTE ідентифікатор EPS-каналу EVI використовується для того, щоб відрізнити рівень QoS. В мережі 5G підтримуються наступні типи потоків QoS [12]:

- 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 EPS і односпрямованим радіоканалами.

До характеристик якості QoS віднесено [12]:

- 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).

В табл. 1.3 наведені характеристики якості QoS для мережі 5G [12].

Таблиця 1.3 – Характеристики якості QoS для мережі 5G

5QI Value	Resource Type	Default Priority Level	Packet Delay Budget	Packet Error Rate	Default Maximum Data Burst Volume	Default Averaging Window	Example Services
1	GBR	20	100 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Conversational Voice
2		40	150 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Conversational Video (Live Streaming)
3		30	50 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Real Time Gaming, V2X messages, Electricity distribution - medium voltage, Process automation - monitoring
4		50	300 ms	$10^{-6}$	N/A	2000 ms	Non-Conversational Video (Buffered Streaming)
65		7	75 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Mission Critical user plane Push To Talk voice (e.g., MCPTT)
66		20	100 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Non-Mission-Critical user plane Push To Talk voice
67		15	100 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Mission Critical Video user plane
75							
71		56	150 ms	$10^{-6}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming
72		56	300 ms	$10^{-4}$			
73		56	300 ms	$10^{-8}$			
74		56	500 ms	$10^{-8}$			
76		56	500 ms	$10^{-4}$			
5	Non-GBR	10	100 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	IMS Signalling
6		60	300 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		70	100 ms	$10^{-3}$	N/A	N/A	Voice, Video (Live Streaming) Interactive Gaming
8		80	300 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
9		90					
69		5	60 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Mission Critical delay sensitive signalling (e.g., MC-PTT signalling)
70		55	200 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Mission Critical Data (e.g. example services are the same as 5QI 6/8/9)
79		65	50 ms	$10^{-2}$	N/A	N/A	V2X messages
80		68	10 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Low Latency eMBB applications Augmented Reality
82		Delay Critical GBR	19	10 ms	$10^{-4}$	255 bytes	2000 ms
83	22		10 ms	$10^{-4}$	1354 bytes	2000 ms	Discrete Automation
84	24		30 ms	$10^{-5}$	1354 bytes	2000 ms	Intelligent transport systems
85	21		5 ms	$10^{-5}$	255 bytes	2000 ms	Electricity Distribution - high voltage



## **2 ВУЗЛОВИЙ ТЕНЗОРНИЙ МЕТОД НА ОСНОВІ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ 5G/NR**

### **2.1 Мета дослідження та постановка завдання**

Вирішення задач з дослідження мереж мобільного зв'язку 5G/NR потребує вибору певного методу дослідження, який би дозволив одночасно досліджувати всі складові мережі та надати можливості отримані рішення перенести на мережу в цілому. Основними факторами складності якої виступає взаємодія мережі радіодоступу Cloud RAN з опорною мережею, побудованою на базі програмно-конфігурованої мережі SDN, з використанням віртуалізації, велика розмірність, динамічний характер функціонування, а також вплив на роботу зовнішніх факторів [13-15].

Складність завдань дослідження мереж 5G/NR, які побудовані на базі віртуалізації Network Slicing, полягає в тому, що її рішення вимагає врахування не тільки структурних особливостей побудови мережі з врахуванням слайсінгу, але й технологічних особливостей їхньої побудови.

На етапі мережного проектування виконується рішення певної послідовності завдань: обґрунтованого вибору архітектури мережі 5G/NR, визначення кількості і функціональних характеристик віртуалізованих засобів мережі і способів мережевої взаємодії. Рішення поставленої задачі знаходження показників якості функціонування мережі мобільного зв'язку 5G/NR засноване на виконанні критерію підтримки гарантованих параметрів якості обслуговування QoS [13-15].

Виділимо ряд завдань, які потребують вирішення на етапі впровадження мереж 5G/NR. По-перше, мережна архітектура віртуалізації Network Slicing припускає можливість логічного з'єднання базових станцій gNB у віртуалізованій мережі радіодоступу V-RAN.

Тому актуально рішення задачі вибору оптимальної конфігурації gNB в мережі радіодоступу з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS.

По-друге, потребує вирішення завдання оцінки характеристик якості складної архітектури і великої розмірності мережі 5G/NR в цілому, а також її слайсів, об'єднаних на різних рівнях архітектури мережі. Таке завдання досить

громіздке й складне, а знаходження рішень в аналітичному вигляді, які враховуватимуть складність топології і функціональних властивостей мережних об'єктів, ще складніше. У зв'язку з цим для вирішення поставленої задачі потрібно вибрати такий математичний апарат, який дозволить отримати необхідні значення не тільки з урахуванням структури мережі 5G/NR та напрямків передачі трафіку, а й буде враховувати функціональні можливості віртуалізованих об'єктів мережі [13-15]. Спроби цілісного уявлення будь-якої системи зазвичай супроводжуються використанням системи математичних моделей, кожна з яких відображає лише окремий аспект мережі. Найчастіше задачі структурного та функціонального синтезу вирішуються незалежно, в кращому випадку, визначаючи один одного вихідні дані та різноманітні обмеження [13-15].

Використання тензорних методів дослідження має низку переваг, серед яких можливість одночасного дослідження як структурних, так і функціональних характеристик мережі. Серед відомих тензорних методів, які використовуються для дослідження мереж мобільного зв'язку можна виділити:

– вузловий тензорний метод, який дозволяє розглядати мережу мобільного зв'язку як сукупність вузлів (базових станцій) та трактів їхньої взаємодії та вирішувати завдання дослідження характеристик якості QoS, завдань маршрутизації та завдань визначення пропускної спроможності мережі за заданих умов;

– контурний тензорний метод, який дозволяє розглядати мережу мобільного зв'язку як сукупність вузлів (базових станцій) та контурів замикання навантаження, утворених за допомогою інтерфейсу X2;

– тензорний метод контурів та вузлових пар, який дозволяє розглядати мережу мобільного зв'язку як сукупність вузлів (базових станцій), трактів їхньої взаємодії та одночасно контурів замикання навантаження, утворених за допомогою інтерфейсу X2.

В межах кожного з вищезазначених методів може бути розглянуто метод декомпозиції, який дозволяє виконати розподіл мережі на підмережі та отримати рішення для мережі в цілому на основі результатів кожної підмережі.

Таким чином використання тензорного аналізу для знаходження характеристик якості трафіку мережі 5G/NR є доцільним та найбільш раціональним.

### 2.3 Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції

Для рішення поставленого завдання дослідження показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR доцільно використання вузлового тензорного методу.

Мережа 5G/NR є складною архітектурою, яка складається з множини об'єктів, пов'язаних між собою функціональною взаємодією. Віртуалізація за допомогою Network Slicing дозволяє в межах однієї мережі та функціональних вузлів створити функціональні реалізації для різних умов надання послуг.

При цьому важливим питанням реалізації Network Slicing є можливість визначення характеристик якості QoQ, таких як: затримка, пропускна спроможність та ймовірності втрат пакетів. Рішення цієї задачі ускладнюється динамічністю мережі та складною архітектурою її побудови [13-15].

В межах Network Slicing при поділі мережі на підмережі є складним саме розподіл мережі, адже частина фізичних ресурсів може відноситися до декількох підмереж одночасно. Це вимагає іншого підходу до отримання рішення. Важливим є при поділі на підмережі, враховувати характеристик QoS не тільки для кожної підмережі, а й для границі кожної підмережі.

Таким рішенням може бути використання вузлового тензорного методу на основі декомпозиції [13].

Розглянемо фрагмент архітектури мережі 5G/NR у виді графу, вершинами якого являються  $n$  вузлів, представлених функціональними об'єктами мережі 5G/NR, а дуги графу моделюють  $m$  трактів взаємодії між об'єктами [15].

Структура мережі визначає простір, розмірність якого відповідає числу гілок мережі [15]. Тензорне моделювання мережі 5G/NR припускає її опис в метричному просторі. Використовуємо формулу Літла [13-15]:

$$h_v^i = l_v^i \cdot \tau_i^v \quad (i = \overline{1, m}), \quad (2.4)$$

де  $h_v^i$  – довжина черги пакетів для передачі  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;

$\tau_i^v$  – середня затримка пакетів в  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;



$l_v^i$  – середня інтенсивність трафіку в  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;

$m$  – загальна кількість backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR.

Структура мережі 5G/NR описується одномірним симпліціальним комплексом (одномірна мережа), яка, в свою чергу, визначає дискретний  $m$ -мірний простір.

При цьому гілки мережі  $v_i, i = \overline{1, m}$  моделюють backhaul-лінки між об'єктами мережі 5G/NR, а вузли мережі  $N_j, j = \overline{1, n}$  функціональні об'єкти мережі 5G/NR.

Використаємо дві системи координат – систему координат гілок мережі та систему координат вузлових пар мережі [13-15].

В ході рішення поставленого завдання необхідно знайти середній час затримки пакетів у backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR  $T_v$  та вузлах  $T_\eta$  мережі 5G/NR.

У вузлових мережах в якості впливаючої перемінної у формулі (2.4) виступає значення середньої інтенсивності навантаження  $l_v^i$ , а в якості величини відклику – середній час затримки  $\tau_i^v$  пакетів. Тоді рівняння (2.4) можна представити в тензорному вигляді [13-15]:

$$H = L \cdot T, \quad (2.5)$$

де  $H$  –коваріантний тензор довжини пакетної черги;

$L$  – двічі контраваріантний тензор інтенсивності трафіку;

$T$  – одновалентний коваріантний тензор затримок пакетів.

Тоді в системі координат гілок мережі 5G/NR рівняння (2.5) буде мати вигляд [13-15]:

$$H_v = L_v \cdot T_v, \quad (2.6)$$

де  $H_v = (h_1^v \quad h_2^v \quad \dots \quad h_\rho^v)^t$  – тензор, що визначає середню довжину пакетної черги в мережі у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR;

$T_v = (\tau_1^v \ \tau_2^v \ \dots \ \tau_\rho^v)^t$  – тензор середніх затримок передачі пакетів у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR;

$L_v = (l_v^{ij})$  – тензор середніх інтенсивностей трафіку у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR;

$n$  – кількість вузлів мережі 5G/NR.

У системі координат вузлових пар мережі 5G/NR рівняння (2.5) має вигляд [13-15]:

$$H_\eta = L_\eta \cdot T_\eta, \quad (2.7)$$

де тензор  $H_\eta = (h_1^\eta \ h_2^\eta \ \dots \ h_\rho^\eta)^t$  визначає середню довжину пакетної черги у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$T_\eta = (\tau_1^\eta \ \tau_2^\eta \ \dots \ \tau_\rho^\eta)^t$  – тензор середніх значень затримок передачі пакетів у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$L_\eta = (l_\eta^{ij})$  – тензор середніх інтенсивностей трафіку у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR.

Тензорний характер геометричних об'єктів  $H$ ,  $T$  і  $L$  по відношенню до введених систем координат підтверджується лінійним характером перетворення їх при зміні систем координат.

Відомі перетворення між заданими системами координат гілок та вузлових пар мережі 5G/NR.

Тензор середню довжину пакетної черги  $H_\eta$  у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR визначається як [13-15]:

$$H_\eta = B_\eta \cdot H_v^+, \quad (2.8)$$

де  $H_\eta$  – тензор, який визначає середню довжину пакетної черги у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$B_\eta$  – базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі;

$H_v^+$  – тензор, що визначає вихідну середню довжину пакетної черги в мережі у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR.

Проекції двічі контрваріантних тензорів в системі координат вузлових пар мережі 5G/NR визначаються за формулою [13-15]:

$$L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t, \quad (2.9)$$

$L_\eta = (l_\eta^{ij})$  – тензор середніх інтенсивностей трафіку у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$B_\eta$  – базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі;

$L_v = (l_v^{ij})$  – тензор середніх інтенсивностей трафіку у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR;

$B_\eta^t$  – транспонована базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі.

Проекції коваріантних тензорів середнього часу затримки пакетів в системі координат базисних вузлових пар мережі 5G/NR [13-15]:

$$T_\eta = [L_\eta]^{-1} H_\eta, \quad (2.10)$$

де  $T_\eta$  – тензор середніх значень затримок передачі пакетів у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$H_\eta$  – тензор, який визначає середню довжину пакетної черги у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$[L_\eta]^{-1}$  – зворотна матриця середніх інтенсивностей трафіку у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR.

Проекції коваріантних тензорів середніх затримок передачі пакетів у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR визначаються виразом [13-15]:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta, \quad (2.11)$$

де  $T_v$  – тензор середніх затримок передачі пакетів у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR;

$B_\eta^t$  – транспонована базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі;

$T_\eta$  – тензор середніх значень затримок передачі пакетів у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR.

Отриманий вираз (2.11) дозволяє вирішити поставлене завдання й знайти мінімальний час доставки пакетів із черги на вихідному вузлі мережі 5G/NR.

Розглянемо застосування викладеного вузлового методу дослідження для вирішення задачі визначення показників якості в мережі 5G/NR.



## **3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ МЕРЕЖІ 5G/NR**

### **3.1 Вихідні дані для розрахунку показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR**

Розвиток мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G на базі технології NR (New Radio) які зможуть забезпечити високу швидкість передавання даних, значно знизити час затримки та збільшити пропускну здатність мережі. Впровадження мереж 5G/NR ґрунтується на використанні опорної мережі CN (Core Network) технологій LTE Advanced і LTE Advanced Pro.

Архітектура мережі 5G/NR використовує програмно-конфігуровану мережу радіодоступу SDR (Software Defined Radio) та опорну мережу SDN (Software Defined Networking) з використанням процедури віртуалізації мережних функцій на базі технології Network Slicing, яка дозволяє гнучко створювати топологічні конфігурації мережі для різних умов надання послуг eMBB, mMTC та URLLC. Саме використання віртуалізованих середовищ мереж 5G/NR на базі організованого Network Slicing поділу на слайси для різних груп послуг дозволяють забезпечити обслуговування трафіку з певними вимогами. Така побудова є гнучкою і забезпечує логічне розділення (слайсинг) мережі радіодоступу з ізоляцією шарів та функцій, гарантуючи відсутність взаємних впливів між ними. Network Slicing дозволяє забезпечити мобільність користувачів та виконувати балансування навантаження, а також надасть можливість балансування фізичних ресурсних блоків між кінцевими користувачами [15].

Розглянемо вирішення задачі конфігурації мережної архітектури віртуалізації Network Slicing, яка припускає можливість логічного з'єднання базових станцій gNB у віртуалізованій мережі радіодоступу V-RAN. Визначимо оптимальну конфігурацію базових станцій gNB в мережі радіодоступу V-RAN з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS. Для цього розглянемо віртуалізовану архітектуру мережі Network Slicing складної архітектури і великої розмірності 5G/NR в цілому, а також її слайсів, об'єднаних на різних рівнях архітектури мережі за допомогою розглянутого в розділі 2 вузлового тензорного методу на основі декомпозиції.



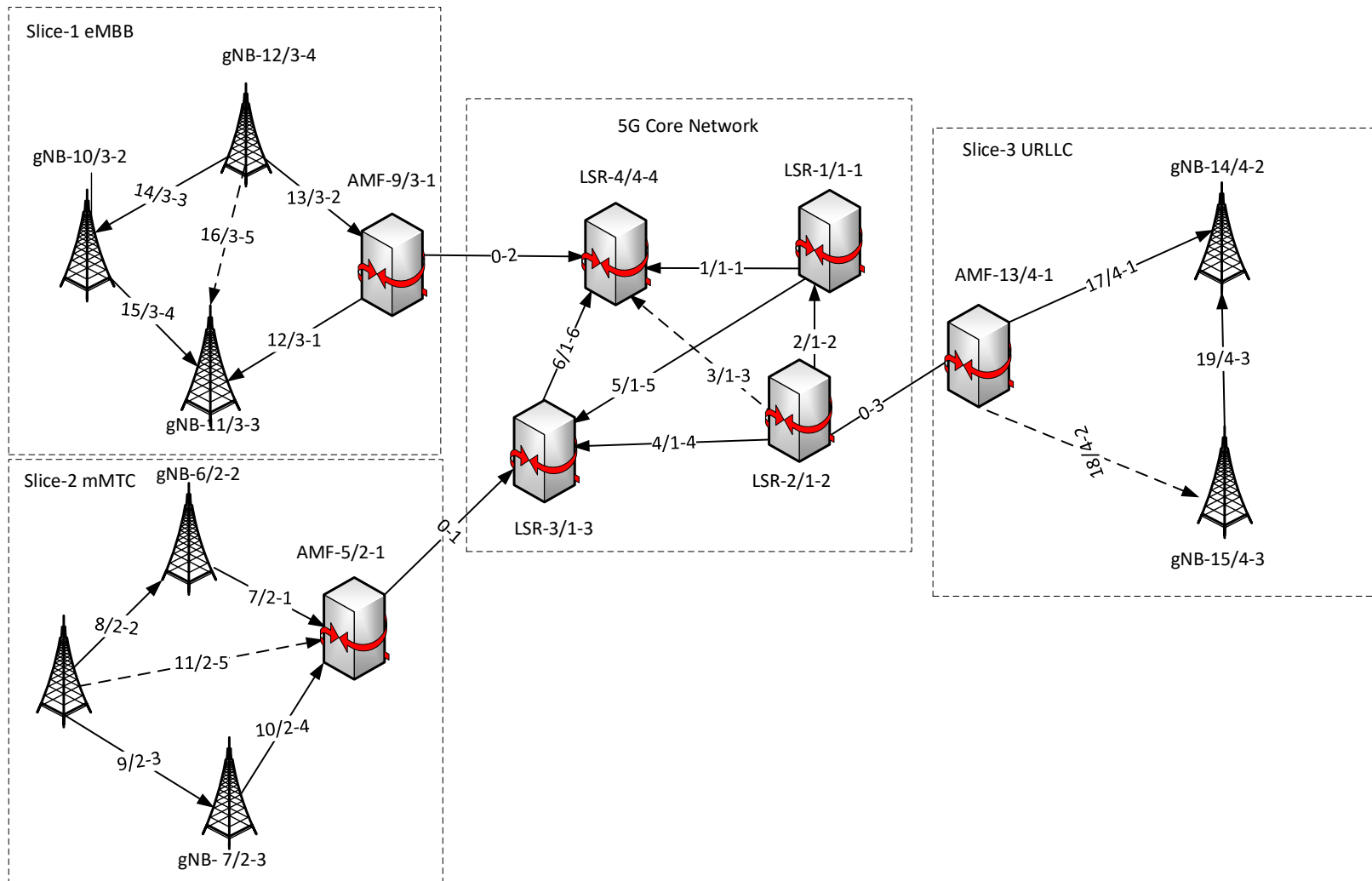


Рисунок 3.1 – Віртуалізоване середовище мережі 5G/NR

– відомі середні інтенсивності трафіку у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR, які представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Середні інтенсивності трафіку у backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR

Інтенсивно сті трафіку	Тракт $v_1$	Тракт $v_2$	Тракт $v_3$	Тракт $v_4$	Тракт $v_5$	Тракт $v_6$	Тракт $v_7$	Тракт $v_8$	Тракт $v_9$
	300	500	0	450	600	400	800	1000	400
$L_v$ , тис. пакетів	Тракт $v_{10}$	Тракт $v_{11}$	Тракт $v_{12}$	Тракт $v_{13}$	Тракт $v_{13}$	Тракт $v_{14}$	Тракт $v_{15}$	Тракт $v_{16}$	Тракт $v_{17}$
	500	0	700	400	300	500	0	700	0

– відома довжина вихідної черги пакетів, яка становить 100 тис. пакетів, що задана тензором  $H_v^+$ :

Для вирішення поставленого завдання визначення показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR необхідно визначити [15]:

- значення середнього часу затримки пакетів в мережі 5G/NR для заданих слайсів eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC),
- значення середнього часу затримки пакетів в Core Network мережі 5G/NR,
- значення часу затримки для базових станцій gNB та функціональних об'єктів мобільності AMF  $T_{\eta_{5G/NR}}^{j5G/NR}$  та backhaul-лінків між об'єктами мережі 5G/NR, що їх з'єднують  $T_{v_{5G/NR}}^{j5G/NR}$ .

### 3.2 Розрахунок показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR

Використовуючи вузловий тензорний метод на основі декомпозиції [13-15], структуру мережі 5G/NR представимо у вигляді графу. При цьому гілки мережі  $v_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  моделюють backhaul-лінки між об'єктами мережі 5G/NR, а функціональні вузли мережі 5G/NR  $N_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  – базові станції gNB, об'єкти мобільності AMF та маршрутизатори LSR. Введемо в розгляд дві координатні системи: систему координат (СК) гілок та СК вузлових пар мережі.

Для визначення показника середнього часу затримки пакетів в мережі 5G/NR використовуємо формулу Літла [13-15]:



$$H_{v\_5G/NR} = L_{v\_5G/NR} \cdot T_{v\_5G/NR}, H_{\eta\_5G/NR} = L_{\eta\_5G/NR} \cdot T_{\eta\_5G/NR}, \quad (3.1)$$

де  $H_{v\_5G/NR}$  і  $H_{\eta\_5G/NR}$  – коваріантні тензори середньої довжини пакетної черги в backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR та буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR відповідно;

$L_{v\_5G/NR}$  і  $L_{\eta\_5G/NR}$  – двічі контраваріантні тензори середньої інтенсивності трафіку в backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR та буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR відповідно;

$T_{v\_5G/NR}$  і  $T_{\eta\_5G/NR}$  – коваріантні тензори середнього часу затримки передачі пакетів в backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR та буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR відповідно.

Формули перетворення між системами координат визначаються згідно [13-15]:

$$\begin{aligned} H_{\eta\_5G/NR} &= B_{\eta\_5G/NR} H_{v\_5G/NR}^+, \\ L_{\eta\_5G/NR} &= B_{\eta\_5G/NR} L_{v\_5G/NR} B_{\eta\_5G/NR}^t, \\ T_{v\_5G/NR} &= B_{\eta\_5G/NR}^t \cdot T_{\eta\_5G/NR}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $H_{v\_5G/NR}^+$  – тензор, що визначає вихідну середню довжину пакетної черги в мережі у системі координат гілок мережі, backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR,

$B_{\eta\_5G/NR}$  – базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі,

$B_{\eta\_5G/NR}$  – транспонована базисна матриця перетворення між заданими системами координат, системою координат гілок та вузлових пар мережі,

$t$  – знак транспонування.

Згідно [13-15] та розглянутого фрагменту мережі 5G/NR (рис. 3.1) і заданих напрямків передачі формуємо базисну матрицю вузлових пар мережі  $B_{\eta\_5G/NR}$ :

$$B_{\eta_{5G/NR}} = \begin{bmatrix} B_{\eta_{\text{Slice}}}^{1,j_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_{\text{Slice}}}^{2,j_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_{\text{Slice}}}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & B_{\eta_{5G \text{ Core}}}^{j_{EPC}} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

де  $B_{\eta_{5G/NR}}^{i,j_i}$  – базисна матриця  $k$ -тих Slice,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k \leq n-1$ ,  $j_i$  – номер функціонального об'єкту  $i$ -того Slice,  $j_1 + j_2 + \dots + j_k + j_{EPC} = n$ ,  $k \leq n-1$ ,

$B_{\eta_{5G \text{ Core}}}^{j_{EPC}}$  – базисна матриця опорної мережі 5G/Core Network

$k$  – кількість Slice.

Визначимо середню довжину пакетної черги  $H_{\eta_{5G/NR}}$  в слайсах мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network, використовуючи вираз (2.8) [13-15]:

$$\begin{bmatrix} H_{\eta_{\text{Slice}}}^{1,j_1} \\ H_{\eta_{\text{Slice}}}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{\eta_{\text{Slice}}}^{k,j_k} \\ H_{\eta_{5G \text{ Core}}}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_{\text{Slice}}}^{1,j_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_{\text{Slice}}}^{2,j_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_{\text{Slice}}}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & B_{\eta_{5G \text{ Core}}}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{v_{\text{Slice}}}^{+,1} \\ H_{v_{\text{Slice}}}^{+,2} \\ \vdots \\ H_{v_{\text{Slice}}}^{+,k} \\ H_{v_{5G \text{ Core}}}^+ \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

де  $H_{\eta_{\text{Slice}}}^{i,j_i}$  та  $H_{\eta_{5G \text{ Core}}}^{j_{5G \text{ Core}}}$  – тензори середньої довжин пакетних черг в  $k$ -тих слайсах мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network відповідно,

$H_{v_{\text{Slice}}}^{+,i}$  та  $H_{v_{5G \text{ Core}}}^+$  – тензори вихідної пакетної черги  $k$ -тих слайсах мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network відповідно,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k \leq n-1$ ,

$k$  – кількість Slice.

Знайдемо середній час затримки передачі пакетів у вузлах слайсів мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network, використовуючи вираз (2.10), з якого отримуємо  $T_{\eta_{5G/NR}}$  [13-15]:

$$\begin{bmatrix} T_{\eta\_Slice}^{1,j_1} \\ T_{\eta\_Slice}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{\eta\_Slice}^{k,j_k} \\ T_{\eta\_5GCore}^{j5GCore} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\eta\_Slice}^{1,j_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & L_{\eta\_Slice}^{2,j_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_{\eta\_Slice}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_{\eta\_5GCore}^{j5GCore} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{\eta\_Slice}^{1,j_1} \\ H_{\eta\_Slice}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{\eta\_Slice}^{k,j_k} \\ H_{\eta\_5GCore}^{j5GCore} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

де  $L_{\eta\_Slice}^{i,j_i}$  і  $L_{\eta\_5GCore}^{j5GCore}$  – тензори середніх інтенсивностей трафіку в мережних вузлах  $k$ -тих слайсів мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network, відповідно,

$T_{\eta\_Slice}^{i,j_i} = (\tau_{\eta\_Slice}^1 \quad \tau_{\eta\_Slice}^2 \quad \dots \quad \tau_{\eta\_Slice}^i)^t$  і  $T_{\eta\_5GCore}^{j5GCore}$  – тензори затримок передачі пакетів в буферних пристроях мережних вузлів  $k$ -тих слайсів мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network, відповідно,  $i = \overline{1,k}$ ,

$k$  – кількість слайсів.

Отримані значення середнього часу затримки  $T_{\eta\_5G/NR}$  передачі пакетів у вузлах мережі 5G/NR та слайсах мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) і опорної мережі 5G/Core Network, згідно (3.5) зведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення середнього часу затримки  $T_{\eta\_5G/NR}$  передачі пакетів у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR

Номер вузла	1	2	3	4	5	6
$T_{\eta\_5G/NR}$ , с	0,249	0,100	0,110	0,150	0,067	0,083
Номер вузла	7	8	9	10	11	
$T_{\eta\_5G/NR}$ , с	0,143	0,141	0,226	0,125	0,268	

Отримані значення середнього часу затримки  $T_{v\_5G/NR}$  передачі пакетів в backhaul-лінках між об'єктами мережі 5G/NR відповідно (2.11) зведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Отримані значення середнього часу затримки  $T_{V\_LTE/MVNO}$  передачі пакетів в трактах мережі LTE/MVNO

Номер тракту	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{V\_5G/NR}$ , с	0,148	0,100	0,249	0,110	0,009	0,138	0,083	0,067	0,083
Номер тракту	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$T_{V\_5G/NR}$ , с	0,067	0,15	0,082	0,143	0,141	0,084	0,226	0,142	0,267

Визначивши необхідні значення мінімального часу затримки пакетів і довжини пакетної черги в опорній мережі 5G Core Network і в кожному слайсі мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) необхідно визначити характеристики з'єднань з опорною мережею 5G Core Network.

Для їх розрахунку розглянемо модель мережі 5G/NR, в якій всі слайси представлені в якості вузлів мережі, підключених до опорної мережі 5G Core Network, також представленої у вигляді вузла, а з'єднання є гілками моделі мережі.

Тоді базисна матриця  $B_{\eta\_Link}$ , згідно рис. 3.1, об'єктами якої є базисні матриці всіх слайсів мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) має вигляд [13-15]:

$$B_{\eta\_Link} = \begin{bmatrix} B_{\eta\_Link}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta\_Link}^{2,j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{\eta\_Link}^{k+1,j_{k+1}} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де  $B_{\eta\_Link}^{i,j_i}$  – матриця базисних розрізів  $k$ -того слайсу мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC),  $i = \overline{1, k}$ ;

$B_{\eta\_Link}^{k+1,j_{k+1}}$  – матриця базисних розрізів мережі 5G/NR;

$k$  – кількість слайсів.

Базисна матриця  $B_{\eta\_Link}$  буде виглядати наступним чином:



$$B_{\eta\_Link} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Значення затримок пакетів у мережних вузлах визначаються як сума затримок передачі пакетів у кожному слайсу мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC). Використовуючи значення  $\tau_{\eta\_5G/NR}^{i,j}$ , визначимо середні затримки пакетів у підмережах  $\tau_{\eta\_Link}^i$ :

$$\tau_{\eta\_Link}^i = \sum_{j=1}^p \tau_{\eta\_5G/NR}^{i,j}, \quad (3.7)$$

де  $\tau_{\eta\_Link}^i$  – значення середньої затримки передачі пакетів у  $i$ -тому слайсі,  $i = \overline{1, k+1}$ ;

$\tau_{\eta\_LTE/MVNO}^{i,j}$  – значення середньої затримки передачі пакетів у  $j$ -тому ( $j = \overline{1, p}$ ) об'єкті  $i$ -того слайсу  $i = \overline{1, k+1}$ ;

$k$  – кількість підмереж.

Визначимо значення часу затримки передачі пакетів  $T_{v\_Link}$  у з'єднаннях Link як [13-15]:

$$\begin{bmatrix} \tau_{v\_Link}^1 \\ \tau_{v\_Link}^2 \\ \vdots \\ \tau_{v\_Link}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta\_Link}^{1,j_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{\eta\_Link}^{2,j_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta\_Link}^{k+1,j_{k+1}} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} \tau_{\eta\_Link}^1 \\ \tau_{\eta\_Link}^2 \\ \vdots \\ \tau_{\eta\_Link}^{k+1} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де  $\tau_{\eta\_Link}^i$  – затримка пакетів у  $i$ -тому слайсі,  $i = \overline{1, k}$ ;

$\tau_{\eta\_5G/NR}^{i,j}$  – затримка пакетів у  $j$ -тому об'єкті  $i = \overline{1, k}$ ;

$k$  – кількість слайсів.

Отримаємо значення часу затримки передачі пакетів  $T_{v\_Link}$  у з'єднаннях Link:

$$T_{v\_Link} = \begin{bmatrix} 0.166 \\ 0.045 \\ 0.068 \end{bmatrix}.$$

Отримаємо значення середнього часу затримки передачі пакетів  $T_{v\_Link}$  у об'єктах:

$$T_{\eta\_Link} = \begin{bmatrix} 0.415 \\ 0.249 \\ 0.415 \\ 0.369 \\ 0.415 \\ 0.347 \end{bmatrix}.$$

Результати розрахунків показників функціонування віртуальних середовищ мережі 5G/NR показані на рис. 3.2.

Таким чином, для мережі 5G/NR запропоновано використання вузлового тензорного методу на основі декомпозиції, який дозволяє розділити задану структуру мережі 5G/NR на віртуалізовані слайси та опорну мережу 5G Core, і отримати показники якості QoS як для кожного слайсу окремо, так і для всієї мережі в цілому.

### 3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження

Згідно проведених розрахунків середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу 5G/NR можливо зробити наступні висновки:

- використання запропонованого вузлового тензорного методу на основі декомпозиції для дослідження показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR дозволило отримати значення середнього часу затримки пакетів як для кожного з слайсів мережі радіодоступу eMBB (Slice-1 eMBB), mMTC (Slice-2 mMTC) та URLLC (Slice-3 URLLC) так і для опорної мережі 5G Core Network;

- результати середнього часу затримки пакетів, який створюється в буферних пристроях вузлів мережі та backhaul-лінках між функціональними об'єктами мережі дозволили отримати значення для середнього часу затримки в мережі в цілому.

Важливим питанням дослідження є отримання значень середнього часу затримки для мережі в цілому з урахуванням затримки пакетів в мережних вузлах. Результати розрахунків зведемо в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення середнього часу затримки пакетів в мережі 5G/NR

Шлях передавання трафіку	Затримк пакетів при передаванні трафіку $\tau_{затр}$ , с	Затримка пакетів у вузлах мережі $\tau_{\eta}$ , с	Затримка пакетів при передаванні трафіку $\tau_{затр з вуз}$ з урахуванням часу затримки у вузлах
Slice-1 eMBB gNB-12/3-4 – gNB-11/3-3 – AMF – LSR4/4-4 $v_{16/3-5} \rightarrow v_{12/3-1} \rightarrow v_{0-2}$	0,202	$\tau_{\eta 12/3-4} = 0,159,$ $\tau_{\eta 11/3-3} = 0,110$	0,471 с
Slice-1 eMBB gNB-12/3-4 – gNB-10/3-2 – – gNB-11/3-3 AMF – LSR4/4-4 $v_{14/3-3} \rightarrow v_{15/3-4} \rightarrow v_{12/3-1} \rightarrow$ $v_{0-2}$	0,507	$\tau_{\eta 12/3-4} = 0,067,$ $\tau_{\eta 10/3-2} = 0,100,$ $\tau_{\eta 11/3-3} = 0,110$	0,784 с
Slice-2 mMTC gNB-8/2-1 – AMF-5/2-1 – LSR3/1-3 $v_{11/2-5} \rightarrow v_{0-1}$	0,233	$\tau_{\eta 8/2-1} = 0,083,$ $\tau_{\eta 5/2-1} = 0,067,$ $\tau_{\eta 3/1-3} = 0,141$	0,524 с
Slice-3 URLLC gNB-15/4-3 – AMF-13/4-1 – LSR2/1-2 $v_{18/4-2} \rightarrow v_{0-3}$	0,150	$\tau_{\eta 15/4-3} = 0,267,$ $\tau_{\eta 13/4-1} = 0,226$	0,643 с

За розрахунками можливо зробити наступні висновки:

- шлях з найменшим часом затримки передавання пакетів Slice-1 eMBB - gNB-12/3-4 – gNB-11/3-3 – AMF – LSR4/4-4 має час затримки  $\tau_{затр} \approx 0,471$  с;
- шлях з найбільшим часом затримки передавання трафіку Slice-1 eMBB gNB-12/3-4 – gNB-10/3-2 – gNB-11/3-3 AMF – LSR4/4-4 має час затримки  $\tau_{затр} \approx 0,784$  с.





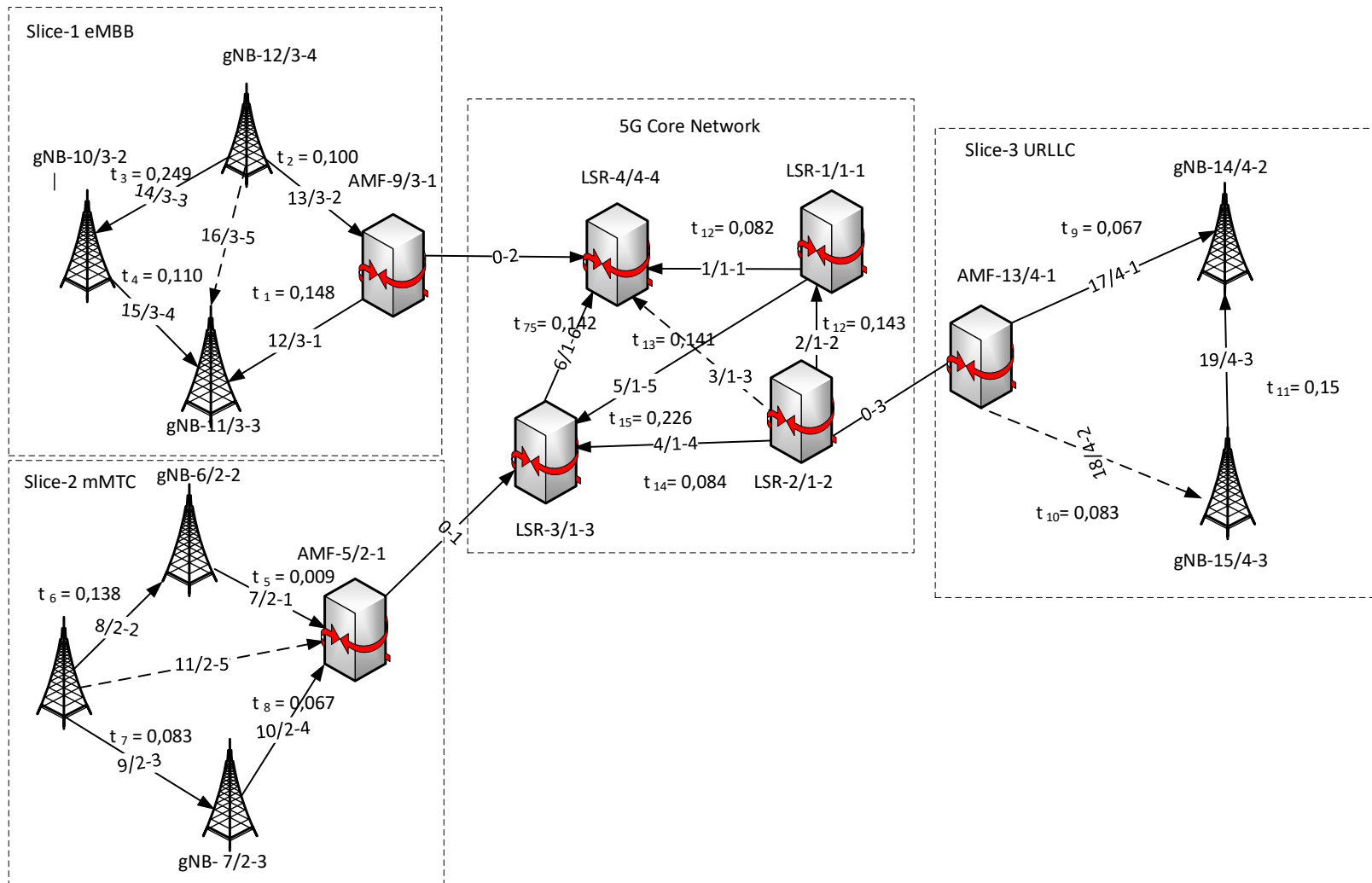


Рисунок 3.2 – Результати розрахунків показників якості функціонування мережі 5G/NR

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даній магістерській роботі розглянуті питання дослідження показників віртуалізованого середовища мережі 5G/NR. Проаналізовано функціональну архітектуру мережі 5G/NR і визначено призначення усіх її складових. Для знаходження показників якості функціонування мережі 5G/NR обрано вузловий тензорний метод на основі декомпозиції.

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведено аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR задля забезпечення характеристик якості обслуговування трафіку з метою надання номенклатури послуг eMBB, mMTC та URLLC.

2. Запропоновано оцінку показників якості функціонування трафіку мережі 5G/NR на базі вузлового тензорного методу на основі декомпозиції. Отримані результати, такі як: значення середнього часу затримки пакетів, середня довжина пакетної черги, які можуть бути використані для мереж різних технологій побудови.

3. Запропонований вузловий тензорний метод на основі декомпозиції оцінки показників якості функціонування віртуалізованого середовища мережі 5G/NR дозволяє отримати результати для заданої структури мережі, згідно якої можливо визначити оптимальну конфігурацію з'єднання базових станцій gNB за критерієм завантаження базових станцій gNB і заданих інтенсивностей запитів на обслуговування з метою надання нормативних значень показників якості функціонування мережі.

4. Отримані результати надають можливість проводити розрахунки показників віртуалізованого середовища мережі 5G/NR.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 <https://www.ericsson.com>
- 2 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TR 38.913 Study on New Radio Access Technology; Radio Access Architecture and Interfaces
- 3 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TS 38401 NG-RAN; Architecture description
- 4 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TS 38300 NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2
- 5 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TS 38.321 NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification
- 6 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TS 38.322 NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification
- 7 3GPP 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification TS 38.323 NR; Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification
- 8 3GPP TS 38.331 NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification
- 9 3GPP TS 37.324 E-UTRA and NR; Service Data Adaptation Protocol (SDAP) specification
- 10 3GPP TS 23.251 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network Sharing; Architecture and functional description.
- 11 Richart, Matías (2020). "Slicing With Guaranteed Quality of Service in WiFi Networks". IEEE Transactions on Network and Service Management. 17 (3): 1822–1837.
- 12 View on 5G Architecture. 5GPPP. 2017.
- 13 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.
14. Стрелковська І.В. Деякі характеристики QoS в обслуговування мережі LTE / І.В. Стрелковська, Д.В. Кордон // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали десятої міжнар. наук.-пр. конф. м. Одеса 16-19 лист. 2020 р. – Одеса: ОНАЗ, 2020. – С. 384-386.
15. Соловська І.М., Орлов Н.Д. Аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR. IX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Гуманітарний і

інноваційний ракурс професійної майстерності: Пошуки молодих вчених»: матеріали конф., 15 грудні 2023 р.: тези доп. – Одеса: МГУ, 2023.

16. Положення факультету кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук про підготовку та захист кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів денної та заочної форми навчання: методичний посібник / І.В. Стрелковська, І.М. Соловська, Т.І. Григор'єва, Д.М. Розенвассер, . – Одеса: МГУ, 2023. – 45 с.

## Додаток А ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ



Міжнародний гуманітарний університет  
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії  
та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерних наук

**Магістерська робота  
на тему  
Аналіз показників функціонування віртуалізованих  
середовищ мережі 5G/NR**

Виконав: студент 2 курсу, гр. КТК-2.1 спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
Орлов Н.Д.  
Керівник – к.т.н., доц. Соловська І.М.

Рисунок А.1 – Титульний лист презентації

**Вступ**

- Розвиток мереж 5G на базі технології New Radio передбачає значне збільшення швидкості передавання даних та зменшення часу затримки пакетів.
- Рекомендацією 3GPP TR 38.913 визначено групи послуг мережі 5G, такі як групи послуг мобільного широкосмугового доступу eMBB, масивних машинних комунікацій mMTC та послуги з'єднання з наднизькою затримкою URLLC.
- Розвиток таких послуг вимагає від оператора забезпечення необхідних значень характеристик якості QoS, серед яких найбільш критичним є значення середнього часу затримки.
- Архітектура мережі 5G/NR використовує програмно-конфігуровану мережу радіодоступу SDR та опорну мережу SDN з використанням процедури віртуалізації мережних функцій на базі технології Network Slicing.

Рисунок А.2 – Вступ



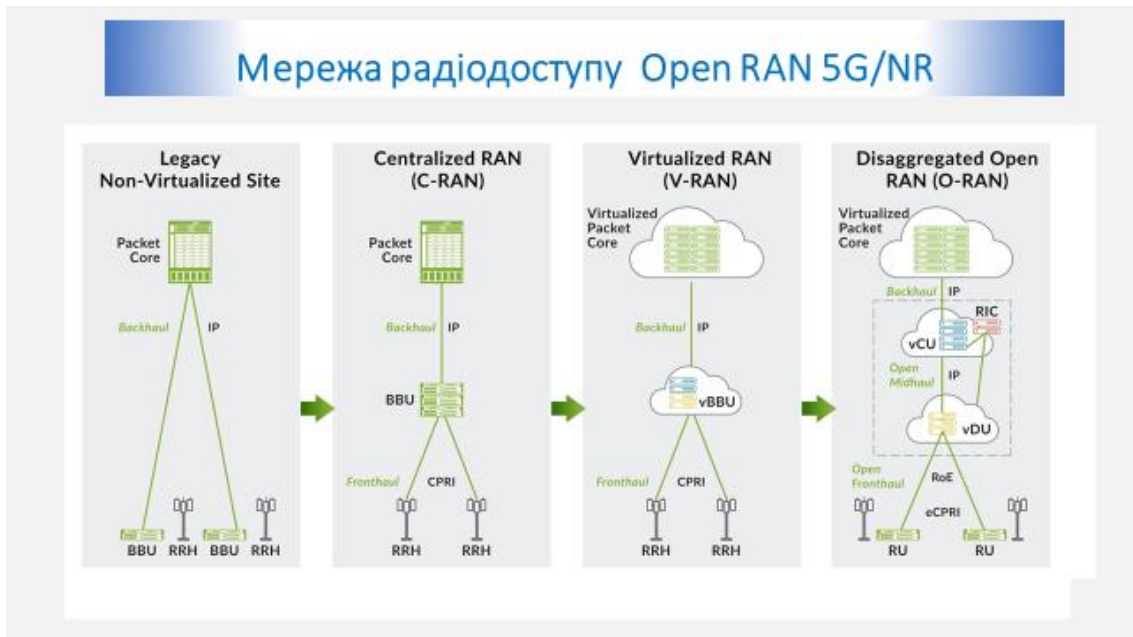


Рисунок А.3 – Структурна схема мережі радіодоступу

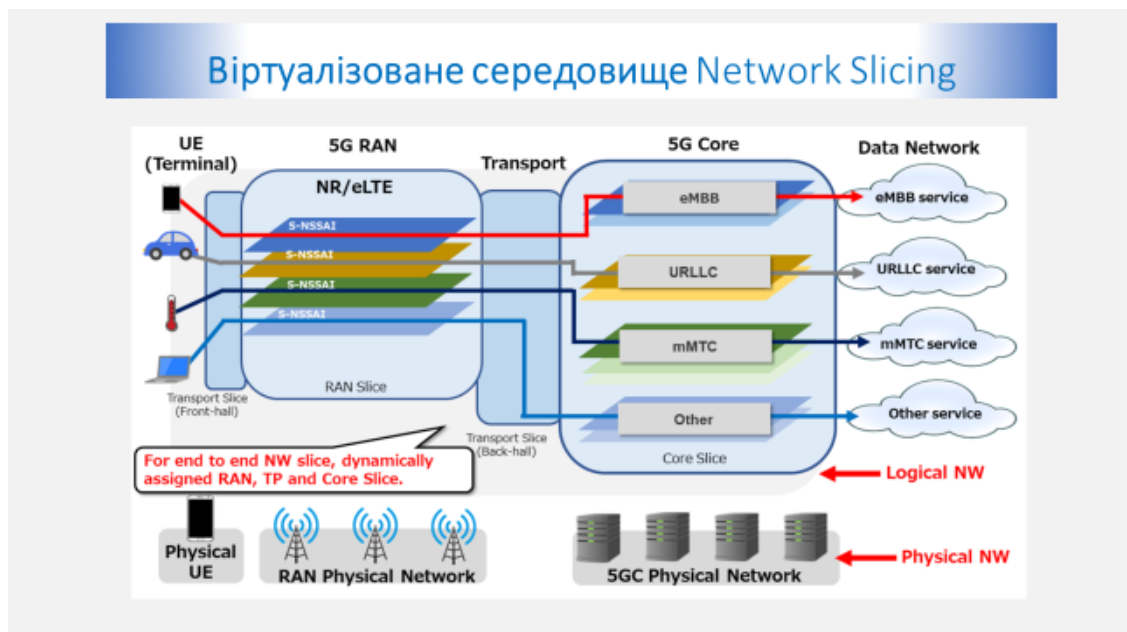


Рисунок А.4 – Віртуалізоване середовище Network Slicing

## Постановка завдання дослідження

- На етапі розвитку мережі 4G/LTE важливим питанням є аналіз показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR та вибір конфігурації Network Slicing шляхом логічного з'єднання базових станцій gNB у віртуалізованій мережі із забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS.
- Метою роботи є дослідження показників якості функціонування 4G/LTE важливим питанням є аналіз показників якості функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR та вибір оптимальної конфігурації з'єднань базових станцій gNB за критерієм мінімального часу затримки пакетів і з'єднуючих їх Backhaul-лінків .
- Для дослідження запропоновано використання **вузлового тензорного методу на основі декомпозиції**, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики мережі, з урахуванням структури мережі 5G/NR та напрямків передачі трафіку й враховуванням функціональних можливостей віртуалізованих об'єктів мережі.

Рисунок А.5 – Постановка завдання дослідження

## Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції

В якості інваріантного функціонального виразу використовуємо формулу Літла:

$$h_v^i = l_v^i \cdot \tau_i^v \quad (i = \overline{1, m}) \quad (1)$$

де  $h_v$  – середня довжина черги пакетів для передачі  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;

$\tau_v$  – середня затримка пакетів в  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;

$l_v$  – середня інтенсивність трафіку середня затримка пакетів в  $i$ -му backhaul-лінку між об'єктами мережі 5G/NR;

$m$  – загальна кількість трактів взаємодії,

$$H_v = L_v \cdot T_v, \quad H_\eta = L_\eta \cdot T_\eta \quad (2)$$

$H_v$  та  $H_\eta$  – тензори, які визначають середню довжину пакетної черги у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$T_v$  та  $T_\eta$  – тензори, що визначають середній час затримки пакетів у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR;

$L_v$  та  $L_\eta$  – тензори, що визначають інтенсивність трафіку у буферних пристроях функціональних вузлів мережі 5G/NR у системі координат вузлових пар мережі 5G/NR.

Рисунок А.6 – Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції

## Вузловий тензорний метод на основі декомпозиції

Перетворення тензорів при зміні систем координат розгляду виконується за допомогою наступних виразів:

$$H_{\eta} = B_{\eta} H_{\nu}^+, \quad (3)$$

де  $H_{\eta}^+$  – тензор довжини черги пакетів в СК гілок, в трактах між базовими станціями gNB мережі 5G/NR.

Тензор інтенсивностей трафіку в буферних пристроях базових станцій gNB, має вид:

$$L_{\eta} = B_{\eta} L_{\nu} B_{\eta}^t, \quad (4)$$

Тензор середнього часу затримки пакетів в СК вузлових пар, які представлені базовими станціями gNB, знаходиться з виразу (4):

$$T_{\eta} = (L_{\eta})^{-1} H_{\eta} \quad (5)$$

де  $(L_{\eta})^{-1}$  – зворотна матриця інтенсивності трафіку в СК вузлових пар мережі.

Тензор часу затримки пакетів в СК гілок, які представлені backhaul-лінками між базовими станціями gNB, має вид:

$$T_{\nu} = B_{\eta}^t T_{\eta}$$

(5)

Рисунок А.7 – Вузловий тензорний метод

## Фрагмент віртуалізованої мережі 5G/NR

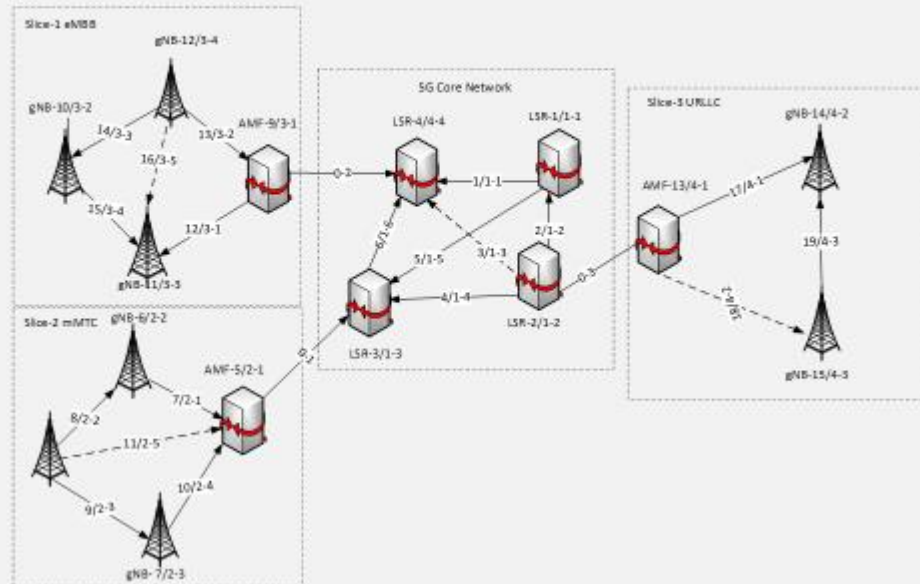


Рисунок А.8 – Фрагмент віртуалізованої мережі 5G/NR

### Вирішення задачі визначення показників якості функціонування мережі 5G/NR

Для рішення поставленого завдання вважаємо відомими :

- структуру фрагмента мережі 5G/NR, яка представлена у вигляді графу;
- кожен слайс має обраний напрямок передавання трафіку, наприклад для Slice-1 eMBB це gNB-12/3-4-gNB-11/3-3 в мережі RAN 5G/NR, для якого необхідно забезпечити передачу пакетів з черги умовної довжини 100 тис. пакетів;
- базисну матрицю вузлових пар  $B_{\eta}$

$$B_{\eta} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок А.9 – Вирішення задачі визначення показників якості мережі 5G/NR

### Вирішення задачі визначення показників якості функціонування мережі 5G/NR

Знайдемо середнє значення  $L_{\eta}$  інтенсивності трафіку у базових станціях gNB мережі

$$L_{\eta} = B_{\eta} \cdot L_{\nu} \cdot B_{\eta}^T = \begin{pmatrix} 700 & -300 & -400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -300 & 1400 & -600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -400 & -600 & 1400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1300 & -800 & -500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -800 & 1800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -500 & 0 & 900 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1100 & 0 & -700 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800 & -500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -700 & -500 & 1200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1500 & -700 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -700 & 700 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Середній час затримки  $T_{\eta}$  пакетів в буферних пристроях базових станцій gNB мережі

$$T_{\eta} = L_{\eta}^{-1} \cdot H_{\eta} = \begin{pmatrix} 0.24907 \\ 0.30067 \\ 0.11097 \\ 0.13 \\ 0.06667 \\ 0.08333 \\ 0.14096 \\ 0.14139 \\ 0.22022 \\ 0.125 \\ 0.26786 \end{pmatrix} \tag{7}$$

Рисунок А.10 – Вирішення задачі дослідження

### Вирішення задачі визначення показників якості функціонування мережі 5G/NR

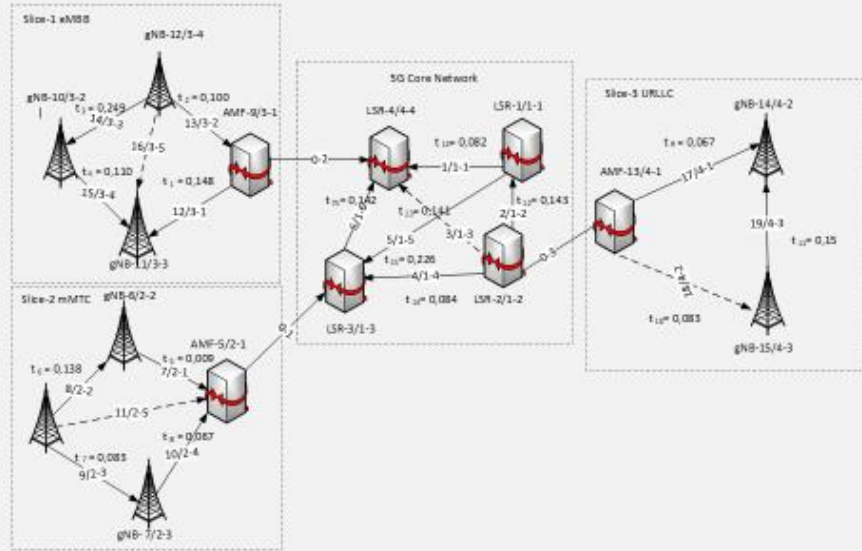


Рисунок А.11 – Результати рішення

### Вирішення задачі визначення показників якості мережі 5G/NR

Шлях передавання трафіку	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку $t_{\text{опт}}$ , с	Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі $t_p$ , с	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку $t_{\text{опт}}$ з урахуванням часу затримки у вузлах
Slice-1 eMBB gNB-12/3-4 – gNB-11/3-3 – AMF – LSR4/4-4 $V_{12/3-4} \rightarrow V_{11/3-3} \rightarrow V_{9/3-1} \rightarrow V_{4/4-4}$	0,202	$t_{p12/3-4} = 0,159$ , $t_{p11/3-3} = 0,110$	0,471 с
Slice-1 eMBB gNB-12/3-4 – gNB-10/3-2 – gNB-11/3-3 AMF – LSR4/4-4 $V_{12/3-4} \rightarrow V_{10/3-2} \rightarrow V_{11/3-3} \rightarrow V_{9/3-1} \rightarrow V_{4/4-4}$	0,507	$t_{p12/3-4} = 0,067$ , $t_{p10/3-2} = 0,100$ , $t_{p11/3-3} = 0,110$	0,784 с
Slice-2 mMTC gNB-8/2-1 – AMF-5/2-1 – LSR3/1-3 $V_{8/2-1} \rightarrow V_{5/2-1} \rightarrow V_{3/1-3}$	0,233	$t_{p8/2-1} = 0,083$ , $t_{p5/2-1} = 0,067$ , $t_{p3/1-3} = 0,141$	0,524 с
Slice-3 URLLC gNB-15/4-3 – AMF-13/4-1 – LSR2/1-2 $V_{15/4-3} \rightarrow V_{13/4-1} \rightarrow V_{2/1-2}$	0,150	$t_{p15/4-3} = 0,267$ , $t_{p13/4-1} = 0,226$	0,643 с

Рисунок А.12 – Розрахунок часу затримки



## Висновки

1. Проведено аналіз показників функціонування віртуалізованих середовищ мережі 5G/NR задля забезпечення характеристик якості обслуговування трафіку з метою надання номенклатури послуг eMBB, mMTC та URLLC.
2. Запропоновано оцінку показників якості функціонування трафіку мережі 5G/NR на базі вузлового тензорного методу на основі декомпозиції. Отримані результати, такі як: значення середнього часу затримки пакетів, середня довжина пакетної черги, які можуть бути використані для мереж різних технологій побудови.
3. Запропонований вузловий тензорний метод на основі декомпозиції оцінки показників якості функціонування віртуалізованого середовища мережі 5G/NR дозволяє отримати результати для заданої структури мережі, згідно якої можливо визначити оптимальну конфігурацію з'єднання базових станцій gNB за критерієм завантаження базових станцій gNB і заданих інтенсивностей запитів на обслуговування з метою надання нормативних значень показників якості функціонування мережі.

Рисунок А.13 – Висновки