

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 ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED**

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

_____ Дерев'яно А.К. _____

Керівник Соловська І.М. _____

Рецензент Григорієва Т.І. _____

ДОВІДКА

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

Дерев'янка Артема Костянтиновича

на тему Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

Висновок нормоконтролера Поякнено згідно до кваліфікаційної роботи виконано з належним перуванням ДСТУ. Оформлено згідно вимог внутрішнього положення НТУ
Нормоконтролер к.т.н., доцент ВВ Педен
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату Згідно з сертифікатом ID унікальним є роботи Кірибура
Відповідальна особа к.т.н., доцент ВВ Педен
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і. б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) _____ магістерської роботи
(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Дерев'янка А.К. проведена " 15 " травня 2023 р.
(прізвище і.б.)

Висновки Кваліфікаційна робота виконана у повному обсязі. В роботі проведено аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced. Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт зі спеціальності "Інформатика та радіотехніка та рекомендована до захисту.

Члени комісії

[підпис]
(підпис)

К.т.н., доцент Цюпа І.Г.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

[підпис]
(підпис)

к.т.н., доцент Педен В.В.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

[підпис]
(підпис)

в.к.т. кафе КІ та ІТ Шевченко 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 магістр
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
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

Дерев'янку Артему Костянтиновичу

1. Тема роботи: Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

керівник роботи Соловська Ірина Миколаївна, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук
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 4G/LTE-Advanced, протоколи та інтерфейси згідно 3GPP Rel. 13-14. 2) Характеристики технологій та номенклатура послуг, які надаються в мережі 4G/LTE-Advanced. 3) Специфікації 3GPP та рекомендації Y.1541 та G.1000, щодо регламентації показників якості обслуговування QoS в мережі 4G/LTE-Advanced. 4) Технічні специфікації 3GPP щодо впровадження інфраструктури мережі 4G/LTE-Advanced.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Розділ 1: Аналіз основних підходів до визначення характеристик якості мережі 4G/LTE-Advanced

Розділ 2: Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced за допомогою вузлового тензорного методу

Розділ 3: Вирішення задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

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

Слайд 1 – Архітектура мережі 4G/LTE-Advanced

Слайд 2 – Аналіз основних підходів до визначення характеристик якості мереж 4G/LTE-Advanced

Слайд 3 – Визначення значення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу E-UTRAN мережі 4G/LTE-Advanced

Слайд 4 – Визначення значення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу E-UTRAN при взаємодії базових станцій eNode з урахуванням часу затримки пакетів у вузлах

Слайд 5 – Аналіз отриманих результатів

6. Консультанти розділів роботи

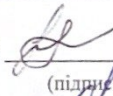
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023-28.09.2023	<i>вск</i>
2	Аналіз основних підходів до визначення характеристик якості мережі 4G/LTE-Advanced	29.09.2023-23.10.2023	<i>вск</i>
3	Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced за допомогою вузлового тензорного методу	24.10.2023 – 09.11.2023	<i>вск</i>
4	Вирішення задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced	10.11.2023-23.11.2024	<i>вск</i>
5	Висновки та рекомендації	24.11.2023-30.11.2023	<i>вск</i>
6	Перелік джерел посилання	1.12.2023-5.12.2023	<i>вск</i>
7	Додаток А. Перелік копій демонстраційного матеріалів	6.12.2023–8.12.2023	<i>вск</i>

Студент


(підпис)

А.К. Дерев'яно

Керівник роботи


(підпис)

І.М. Соловська

ВІДГУК КЕРІВНИКА

на кваліфікаційну роботу здобувача другого (магістерського) рівня
Дерев'янка Артема Костянтиновича
на тему: «Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі
4G/LTE-Advanced»

Сучасним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні є подальше впровадження мереж 4G/LTE-Advanced, яка спрямована на збільшення пропускної спроможності радіоінтерфейсу, вдосконалення мережевої архітектури та суттєвого збільшення номенклатури послуг високошвидкісного доступу. Важливим питанням на етапі подальшого впровадження мереж мобільного зв'язку технології 4G/LTE-Advanced є оцінка характеристик якості обслуговування трафіку в мережі, саме цьому питанню присвячена магістерська робота.

Для дослідження характеристик якості мережі мобільного зв'язку технології 4G/LTE-Advanced обраний вузловий тензорний метод, який дозволяє враховувати як структурні, так і функціональні характеристики об'єктів мережі 4G/LTE-Advanced. При рішенні поставленого завдання визначені характеристики якості обслуговування QoS, а саме, середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги. Отримані результати дозволили обґрунтовано надати рекомендації щодо визначення оптимальної конфігурації з'єднання базових станцій e-NodeB в мережі радіодоступу E-URTAN.

Під час написання магістерської роботи здобувач Дерев'янка А.К. 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 Дерев'янка А.К. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з телекомунікацій та радіотехніки за заявленою спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

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

I.M. Соловська

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу здобувача другого (магістерського) рівня
Дерев'янка Артема Костянтиновича
на тему: «Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в
мережі 4G/LTE-Advanced»

Магістерська робота здобувача Дерев'янка А.К. присвячена дослідженню характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced.

Актуальність теми безсумнівна, адже сьогодні основним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку України є подальше впровадження технології LTE-Advanced для забезпечення високошвидкісного радіодоступу та сучасної номенклатури послуг з гарантованою якістю обслуговування QoS.

Магістерська робота виконана у повному обсязі у відповідності з завданням.

У роботі розглянуті питання впровадження технології LTE-Advanced для існуючої мережі мобільного оператора. За допомогою вузлового тензорного методу отримані результати оцінки характеристик якості обслуговування трафіку в мережі технології LTE-Advanced. Отримані результати дозволяють дати рекомендації щодо конфігурації з'єднання базових станцій e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN мережі мобільного зв'язку технології 4G/LTE-Advanced.

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

До недоліків магістерської роботи варто віднести:

1. Доцільно було б розглянути декілька топологій побудови мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

2. При дослідженні характеристик якості обслуговування трафіку в мережі, можливо було б, розглянути ще ймовірнісні характеристики, наприклад, ймовірність втрат пакетів.

Вказані недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

У цілому, кваліфікаційна робота здобувача Дерев'янка А.К. відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт здобувачів другого (магістерського) рівня та заслуговує оцінки «добре».

Здобувач Дерев'янка А.К. 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:
04.01.2024 10:27:52 EET

Дата отчета:
04.01.2024 11:39:52 EET

ID проверки:
1016044820

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:
100001433

Название файла: МР Деревянко А. 28.12.2023 перев

Количество страниц: 52 Количество слов: 8188 Количество символов: 59843 Размер файла: 3.86 MB ID файла: 1015742574

17% Совпадения

Наибольшее совпадение: 9.2% с источником из Библиотеки (ID файла: 1015327953)

10.9% Источники из Интернета 823 Страница 54

13.5% Источники из Библиотеки 69 Страница 58

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 4

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 46 с., 6 рисунків, 6 таблиць, 1 додаток, 14 джерел.

МЕРЕЖА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ, 4G, ТЕХНОЛОГІЯ LTE-ADVANCED, МЕРЕЖА РАДІОДОСТУПУ E-UTRAN, ОПОРНА МЕРЕЖА EPS, БАЗОВА СТАНЦІЯ E-NODEB, СЕРВІСНИЙ ШЛЮЗ S-GW, ПАКЕТНИЙ ШЛЮЗ P-GW, ВУЗЛОВИЙ ТЕНЗОРНИЙ МЕТОД, ІНТЕНСИВНІСТЬ ТРАФІКУ, ХАРАКТЕРИСТИКИ QoS, СЕРЕДНІЙ ЧАС ЗАТРИМКИ ПАКЕТІВ, ДОВЖИНА ПАКЕТНОЇ ЧЕРГИ

Об'єкт дослідження – трафік мережі 4G/LTE-Advanced, який обслуговується в мережі радіодоступу E-UTRAN базовими станціями e-NodeB.

Мета роботи – аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced.

Метод дослідження – вузловий тензорний метод.

У магістерській роботі проведено дослідження характеристик якості обслуговування трафіку, який обслуговується в мережі мобільного зв'язку 4G/LTE-Advanced. Проаналізовано архітектуру мережі та основні процедури забезпечення нормативних значень характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE.

Для дослідження обґрунтовано обрано вузловий тензорний метод, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні характеристики, так і функціональні властивості мережі 4G/LTE-Advanced. В ході рішення поставленого завдання отримані значення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу E-UTRAN. На конкретному прикладі мережі мобільного 4G/LTE-Advanced продемонстровано розв'язання задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку, таких як середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги і отримано результати ефективного використання мережевих ресурсів при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

ABSTRACT

Text part of the master's thesis: 46 p., 6 figures, 6 tables, 1 appendix, 14 references.

MOBILE COMMUNICATION NETWORK, 4G, LTE-ADVANCED TECHNOLOGY, E-UTRAN RADIO ACCESS NETWORK, ERS CORE NETWORK, E-NODEB BASE STATION, S-GW SERVICE GATEWAY, P-GW PACKET GATEWAY, NODAL TENSOR METHOD, TRAFFIC INTENSITY, QoS CHARACTERISTICS, AVERAGE PACKET DELAY TIME, PACKET QUEUE LENGTH

The object of study is the traffic of the 4G/LTE-Advanced network, which is served in the E-UTRAN radio access network by e-NodeB base stations.

Purpose - to analyse the characteristics of traffic quality in the 4G/LTE-Advanced network.

The research method is the nodal tensor method.

In the master's thesis, the characteristics of the quality of service of traffic served in the 4G/LTE-Advanced mobile network were studied. The network architecture and basic procedures for ensuring the normative values of traffic quality characteristics in an LTE network are analysed.

For the study, the nodal tensor method was reasonably chosen, which allows simultaneously studying both the structural characteristics and functional properties of the 4G/LTE-Advanced network. In the course of solving the task, the values of the average packet delay time in the E-UTRAN radio access network were obtained. Using a specific example of a 4G/LTE-Advanced mobile network, the paper demonstrates the solution to the problem of determining the characteristics of traffic quality of service, such as the average packet delay time and packet queue length, and obtains the results of efficient use of network resources with guaranteed minimum packet delay time.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED	11
1.1 Аналіз технологічного стану розвитку мереж LTE-Advanced та LTE-Advanced Pro	11
1.2 Архітектура мережі мобільного зв'язку на базі технології LTE-Advanced..	14
1.3 Підтримка параметрів якості обслуговування QoS в мережі LTE-Advanced.	22
2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED ЗА ДОПОМОГОЮ ВУЗЛОВОГО ТЕНЗОРНОГО МЕТОДУ	29
2.1 Постановка задачі та вибір математичного апарату дослідження	29
2.2 Основні принципи побудови тензорної моделі	31
2.3 Вузловий тензорний метод дослідження характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced	34
3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED	41
3.1 Розрахунок характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі мобільного зв'язку 4G/LTE-Advanced	41
3.2 Балансування трафіку в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced	48
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	57
ДОДАТОК А ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМООНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	59

ВСТУП

Технологічний рівень розвитку мобільного зв'язку України знаходяться на етапі розвитку мережі четвертого покоління 4G, з використанням технології LTE-Advanced (Long Term Evolution) (згідно Rel. 12-14). Основною перевагою технології LTE-Advanced є висока швидкість передачі даних, яка дозволить забезпечити послуги високошвидкісного пакетного передавання даних, до яких віднесенні відео-сервіси реального часу та послуги LTE-VoIP.

Архітектура мережі LTE-Advanced складається з мережі радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), яка забезпечує підключення мобільних станцій абонентів до пакетних базових станцій e-NodeB (evolved NodeB). Мобільність абонентів підтримується за рахунок модулів MME (Mobility Management Entity), встановлених при кожній e-NodeB. Особливістю реалізації мережі радіодоступу E-UTRAN є встановлення шлюзового обладнання S-GW (Serving Gateway) при кожній eNodeB для реалізації функцій підключення абонентів різних технологій радіодоступу BWA (Broadband Wireless Access). Пакетне ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) складається з апаратно-програмних засобів, які дозволяють обслуговувати пакетний трафік з інтелектуальними можливостями за допомогою шлюзів S-GW та P-GW (Packet Data Gateway).

Сьогодні існує значна потреба у високошвидкісному доступі це зумовлено наявністю значної кількості послуг відеозображень, відеонагляду та послуг реального часу, таких як Mobile-TV високої чіткості, все це потребує підтримки нормативних значень характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced.

В цьому змісті й розрахована магістерська робота, яка розглядає аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced. Використання вузлового тензорного методу дозволить визначити необхідні характеристики якості, такі як середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги. Отримані результати допоможуть визначити оптимальну структуру мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та з'єднання між базовими станціями e-NodeB, які забезпечать ефективне використання мережних ресурсів при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED

1.1 Аналіз технологічного стану розвитку мереж LTE-Advanced та LTE-Advanced Pro

Основними тенденціями розвитку мереж мобільного зв'язку України, згідно прогнозу розвитку технологій Technical Report Ericsson [1], на період до 2025 року є розвиток мереж 5G (Generation), кількість підключень яких буде становити понад 2,6 млрд. користувачів. При цьому, середня потреба у високошвидкісному трафіку відносно одного пристрою користувача на смартфоні становить від 7,2 ГБ до 24 ГБ до кінця 2025 року. Такий значний ріст трафіку пов'язаний з появою нових високошвидкісних послуг, таких як: потокове відео з використанням технологій віртуальної та доповненої реальності, відео-стріми та HD-відео.

У 2023 році очікується більш ніж 5,4 млрд. підключень до мережі LTE-Advanced. На даний час в світі налічується біля 5,9 млрд. абонентів мобільного зв'язку і біля 8 млрд. користувачів послугами мереж мобільного зв'язку. До кінця 2025 року очікується, що біля 83% підключень буде відбуватися за допомогою смартфонів, а мировий мобільний трафік становитиме понад 160 ЕБ в місяць, значною часткою буде відеотрафік – 76%. Однак, згідно Ericson Mobility Report [1], у найближчих шести роки основною технологією мобільного зв'язку залишиться технологія LTE, а саме її релізи LTE Advanced і LTE Advanced Pro. Розвиток мереж п'ятого покоління 5G буде ґрунтуватися на використанні опорної мережі технологій LTE Advanced і LTE Advanced Pro.

Сьогодні послуги мобільного зв'язку в Україні надають такі оператори, як: ПрАТ «МТС Україна» (під брендом «Vodafone»), ПрАТ «Київстар» (під брендом «Київстар») та ПрАТ «Астеліт» (під брендом «lifecell»). Всі три оператори працюють в мережі GSM/GPRS/EDGE та мають поверх накладену мережу третього покоління 3G/UMTS та четвертого 4G/LTE-Advanced [2-4]. В мережах мобільного зв'язку України спостерігається зменшення абонентської бази, яке зв'язане з тим, що оператори впроваджують безлімітні тарифи, які включають спілкування в месенджерах, доступ до високошвидкісного інтернету та доступ до інших інтернет сервісів. Тому абоненту простіше буде користуватися SIM-карткою одного мобільного оператора і здійснювати спілкування і івклики

через месенджери, аніж використовувати декілька SIM-карт, для дзвінків в мережі одного оператора. Активне впровадження мереж мобільного зв'язку технологій 4G/LTE-Advanced, а також запуск безлімітних Інтернет-тарифів дозволяє операторам активно розвивати мережі та впроваджувати релізи технології LTE Advanced Pro.

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 [5-7]. 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 [5-7]. 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. 1.1 [5].

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики основних релізів технології LTE [5]

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/SC-FDMA	FDD/TDD, OFDMA/SC-FDMA	FDD/TDD, OFDMA/SC-FDMA
Швидкість передавання даних	до 150 Мбіт/с	до 300 Мбіт/с	до 1 Гбіт/с
Ширина смуги частот	20, 40 МГц	100 МГц	до 640 МГц
Час затримки	50 мс	10 мс	2 мс
Вид модуляції	QPSK, 16 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	64 QAM, 256 QAM
Тип MIMO	2x2, 4x4	MIMO 8x8	MIMO 8x8
Агрегація несучих	-	5 CA	32 CA
Категорія абонентського пристрою	UE cat. 3,4	UE cat. 6,9, 10	UE cat. 11,12,16,18

Значний інтерес оператори також мають до технології 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 2023 році очікується біля 1000 запусканих комерційних мереж стандарту LTE-Advanced. Також до 2023 року технології Інтернету речей IoT будуть активно розвиватися, 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 [5-7]:

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

1.2 Архітектура мережі мобільного зв'язку на базі технології LTE-Advanced

3GPP Long Term Evolution (LTE) – технологія подальшого розвитку мереж мобільного зв'язку, яка забезпечує передачу даних та нові принципи побудови мереж мобільного зв'язку на базі IP-технологій, які відрізняються високими швидкостями передачі даних [5-7].

Відповідний стандарт розроблений і затверджений міжнародним партнерським об'єднанням 3GPP у релізах Rel. 10-12. Реалізація технології LTE забезпечує перехід від систем широкосмугового радіодоступу WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) до систем OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), а також перехід від систем з комутацією каналів до системи e2e IP комутації пакетів [5-7].

Технологія LTE-Advanced забезпечує високу пропускну спроможність мережі та підтримку ігрових додатків, відео та mobileTV за рахунок низького часу відгуку, значну інтерактивність та швидкість завантаження даних. Технологія LTE-Advanced підтримує можливість передачі мови по мережі IP/IMS з підтримкою характеристик якості обслуговування QoS (Quality of Service). Побудовано технологію на базі мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів OFDMA на лінії від базової станції eNodeB з модуляцією 16/64QAM для повністю All over IP мережі з шириною каналу до 100 МГц, використовуючи TDD і FDD профілі [5-7].

Технологія LTE-Advanced використовує OFDM одночасно з технологією MIMO антен. На додаток до LTE учасники проекту 3GPP визначили плоску архітектуру мережі на базі IP-протоколу як частину програми розвитку архітектури системи – SAE (System Architecture Evolution) [5].

Призначенням архітектури LTE-Advanced є ефективна підтримка будь-якої IP-послуги з погляду широкого використання. Дана архітектура заснована, та й розвилася на базі існуючих опорних мереж стандарту GSM/GPRS/EDGE/UMTS.

Мережева архітектура LTE-Advanced базується на побудові нової мережі радіодоступу E-UTRAN та розвинутого пакетного ядра EPC (Evolved Packet Core).

Мережа радіодоступу E-UTRAN забезпечує підключення мобільних станцій до пакетних базових станцій eNodeB (evolved NodeB), які підтримують мобільність абонентів за рахунок модулів MME (Mobility Management Entity), встановлених при кожній e-NodeB [5-7].

Особливістю реалізації e-NodeB є можливості керування використанням радіочастотного ресурсу, розподіл пакетного навантаження та контроль мобільності абонента, які раніше виконувалися RNC (Radio Network Control). Особливістю E-UTRAN є можливості топологічної побудови мережі за рахунок використання інтерфейсу X2 [7].

Важливою особливістю реалізації мережі радіодоступу E-UTRAN є встановлення шлюзового обладнання S-GW (Serving Gateway) при кожній e-NodeB для реалізації функцій підключення абонентів різних технологій радіодоступу BWA. Пакетне ядро мережі EPC складається з апаратно-програмних засобів, які дозволяють обслуговувати пакетне навантаження з інтелектуальними можливостями за допомогою шлюзів S-GW та P-GW (Packet Data Network – Gateway). Архітектура мережі LTE/MVNO зображена на рис. 1.1 [5-7].

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 EPC [5-7].

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 [7].

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.

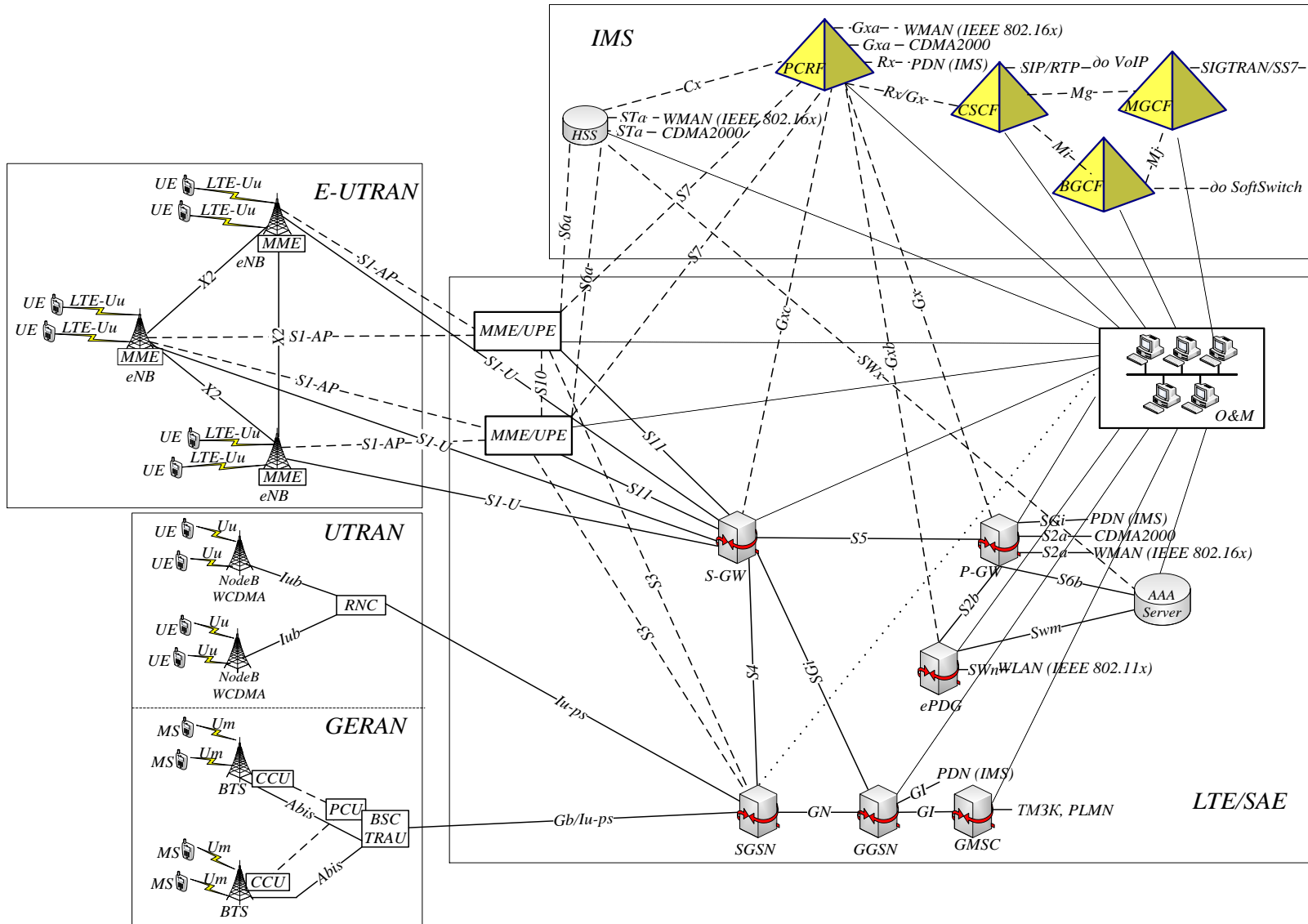


Рисунок 1.1 – Архітектура мережі LTE-Advanced на базі мережі оператора мобільного зв'язку

Радіочастотна характеристика для LTE-Advanced визначена у двох технічних документах 3GPP: 36.101 для користувачького обладнання UE (User Equipment) і 36.104 для e-NodeB [5-7].

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.

Базові станції BTS (Base Transceiver Station), які додатково мають кодеки CCU для можливої передачі інформації у вигляді пакетів по технології FR (Frame Relay). З'єднання між UE та BTS відбувається по інтерфейсу Um [7].

Контролер базових станцій BSC (Base Station Controller), дообладнаний контролером пакетів PCU (Packet Control Unit) і виконує функції концентрації пакетних даних, що надходять від усіх BTS/CCU. Інтерфейс з'єднання BSC та BTS – Abis, який служить для виконання таких функцій, як передача інформації користувача, сигналізація між BSC і BTS, передача синхросигналів на BTS [5].

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 [5].

Шлюзовий центр комутації GMSC (Gateway MSC), який володіє такими ж функціями як і MSC та 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 [5-7].

Сервісний вузол підтримки GPRS (Serving GPRS Support Node, SGSN) виконує функції пакетного комутатора, що використовує технологію пакетної комутації ATM, виконуючи перетворення кадрів з GSM-формату в формат TCP/IP. З'єднання між вузлом SGSN та BSC виконується за допомогою інтерфейсу G_b [7].

Шлюзовий вузол підтримки GPRS (Gateway GPRS Service Node, GGSN) – маршрутизатор, який відповідає за передачу пакетів до пакетних мереж. Взаємодія між вузлами SGSN та GGSN виконується за допомогою протоколу GTP (GPRS Tunneling Protocol) та інтерфейсу Gn. З'єднання мережі з іншими мережами пакетних даних PDN (Packet Data Network) виконується по інтерфейсу G_i [7].

Регістр ідентифікації обладнання EIR (Equipment Identification Register). Взаємодія з вузлом SGSN відбувається за допомогою інтерфейсу Gf, який дозволяє перевіряти легітимність використання мобільного терміналу абонента по

його IMEI-коду, виконуючи запити до баз даних IMEI-кодів оператора, що знаходяться в базах даних EIR [7].

Сервер абонентів власної мережі HSS (Home Subscriber Server) підключається до пакетної опорної мережі через інтерфейс, який базується на протоколі Diameter, що дозволяє створити уніфікований і більш простий розв'язок для площини керування в IP-мережі, оскільки мережна сигналізація для керування правилами й тарифікації вже базується на цьому протоколі. Взаємодіє з вузлом SGSN по інтерфейсу Gr, з блоком MME та шлюзом S-GW – по інтерфейсу S6a, з GMSC – по інтерфейсу C [6].

Стандарт GSM і технологія WCDMA/HSPA інтегруються в LTE-Advanced за допомогою стандартизованих інтерфейсів, що з'єднують вузол SGSN і вдосконалену опорну мережу. Сюди входять інтерфейси з MME для передачі контексту й установки каналів при переміщенні між технологіями доступу, а також зі шлюзом для установки IP-з'єднання з обладнанням користувача UE (User Equipment). Так що для терміналів GSM і WCDMA/HSPA вузол шлюзу функціонує в якості GGSN (вузла підтримки шлюзу GPRS), що дозволяє створювати загальну опорну пакетну мережу для GSM, WCDMA/HSPA і LTE шляхом з'єднання SGSN і MME в одному вузлі [6].

Розглянемо програмно-апаратні засоби, що входять до складу мережі радіодоступу E-UTRAN та опорної мережі EPC.

Архітектура підсистеми радіодоступу E-UTRAN базується на нових пакетних базових станціях e-NodeB, які з'єднуються з UE за допомогою інтерфейсу Uu-LTE. Базові станції e-NodeB обслуговують один або декілька E-UTRAN стільників. Підтримують режими FDD або TDD, або одночасно два режими FDD/TDD. Взаємодія між e-NodeB організована інтерфейсом X2, а фізичне з'єднання з опорною мережею EPC інтерфейсом S1. Якщо більш докладно розглянути їхню взаємодію, то вони з'єднуються з MME за допомогою інтерфейсу S1-MME, а з обслуговуючим шлюзом S-GW через інтерфейс S1-U [6].

На e-NodeB в мережах LTE покладено виконання наступних функцій [6]:

- управління радіоресурсами: розподіл радіоканалів, динамічний розподіл ресурсів у висхідних і низхідних напрямках - так звана диспетчеризація ресурсів (scheduling) та ін.;

- стискання заголовків IP-пакетів, шифрування потоку даних користувача;

- вибір блоку управління мобільністю при включенні в мережу користувачького терміналу за відсутності в того інформації про минуле підключення;
- маршрутизація в користувачькій площині пакетів даних у напрямку до обслуговуючого шлюзу;
- вимір і складання відповідних звітів для управління мобільністю та диспетчеризація.

Модуль керування мобільністю MME є об'єктом платформи керування в EPC і реалізує функції сигналізації й безпеки, контролю безпеки AS, управління сигналізацією для підтримки мобільності між 3GPP мережами доступу, вибору мережі передавання даних PDN, модулю керування мобільністю MME для хендовера, вибору SGSN для 3GPP хендовера до мереж 2G/3G та мереж доступу, роумінгу (S6a у напрямку HSS), автентифікації, керування функціями замовника. З'єднується з іншими модулями MME за допомогою інтерфейсу S10, а з шлюзом S-GW по інтерфейсу S11 [5-7].

Модуль MME мережі LTE-Advanced при взаємодії з мережею GERAN забезпечує виконання наступних функцій [5-7]:

- вибір і взаємодія з вузлом SGSN з метою підтримки мобільності терміналу;
- автентифікація й авторизація користувачів.

Обслуговуючий шлюз S-GW призначений для обробки та маршрутизації пакетних даних, які обслуговуються мережею радіодоступу E-UTRAN. Обслуговуючий шлюз S-GW виконує маршрутизацію пакетних даних, та одночасно виконує роль вузла керування мобільністю для користувальницьких пакетних даних при хендовері між базовими станціями e-NodeB, а також функціонує як вузол керування мобільністю між мережею LTE та іншими мережами. Обслуговуючий шлюз S-GW відповідає за виконання наступних функцій:

- визначення місцезнаходження мобільного пристрою при хендовері;
- буферизація пакетів даних в низхідному напрямленні, призначених для абонентських терміналів UE, які знаходяться в режимі очікування, та ініціалізації процедури запиту послуги;
- санкціоноване перехоплення користувальницької інформації;
- маршрутизація та перенаправлення пакетів даних;

- взаємодія з функціональним вузлом управління політикою тарифікації та білінга PCRF з питання початку з'єднання, завершення з'єднання;
- тарифікація абонентів та білінг.

При взаємодії з мережею GERAN обслуговуючий шлюз S-GW виконує наступні функції [6]:

- взаємодії з сервісним вузлом SGSN для підтримки мобільності;
- маршрутизації та передачі трафіку користувача між сервісним вузлом SGSN та пакетним шлюзом P-GW;
- керування якістю передачі даних та підтримки QoS.

Пакетний шлюз P-GW забезпечує вихід на пакетні мережі та організовує точку доступу до зовнішніх IP-мереж, також пакетний шлюз P-GW виконує функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача. Іншою важливою роллю шлюзу P-GW є забезпечення взаємодії пакетної в пакетній мережі EPC.

Пакетний шлюз P-GW забезпечує виконання наступних функцій [5-7]:

- фільтрації користувальницьких пакетів;
- санкціонованого перехвату користувальницької інформації;
- розподілення IP-адрес для абонентських терміналів UE;
- маркування пакетів транспортного рівня в низхідному напрямку;
- тарифікації послуг та їх селекція.

Базова пакетна мережа EPC, містить вузли MME/UPЕ, які складаються з модулів мобільності MME і модулів підтримки мобільності користувача UPЕ, та дозволяють забезпечити взаємодію між модулями мобільності MME розташованими в мережі E-UTRAN та обладнанням в мережі IMS (IP Multimedia Subsystem) [5-7].

Для забезпечення можливості обслуговування користувачів в пакетній мережі EPC на рівні керування мережею IMS встановлюються наступні об'єкти [5]:

- сервер домашніх абонентів HSS (Home Subscriber Server), який об'єднує бази даних і призначений для збереження даних абонентів.

Сервер HSS фактично замінює набір реєстрів VLR (Visitors Location Register), HLR (Home Location Registry), які використовувались в мережах 2G та 3G. Сервер домашніх абонентів HSS слугує для збереження наступної інформації:

- користувальницьких ідентифікаторів, таких як: IMEI (International Mobile Equipment Identity), IMSI (International Mobile Subscriber Identity), MSISDN (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number);

- номерів та адресної інформації користувачів;
- дані безпеки абонентів: інформація для контролю доступу до мережі, аутентифікація та авторизація;
- інформація про місцезнаходження абонента на міжмережному рівні, тобто, якщо навіть абонент покине мережу LTE, то в базі даних сервера HSS збережеться інформація про те в яку мережу він перейшов для його пошуку у випадку вхідного виклику;
- інформація про профіль абонента, гарантує дані необхідні для процедур шифрування, аутентифікації і т.п..

Мережа LTE-Advanced може включати один або декілька серверів домашніх абонентів HSS. Кількість серверів HSS залежить від географічної структури мережі та кількості абонентів [5-6].

Вузол встановлення рахунків абонентам PCRF (Policy and Charging Rules Function) виконує функції керування політикою PF (Policy Function), яка складається з двох функцій: контроль шлюзу та контроль якості обслуговування QoS. Під контролем шлюзу розуміється своєчасність і безпомилковість визначення таких подій як: початок та завершення надання послуг, зміна параметрів надання послуг [6].

Керування якістю включає в себе безперервний моніторинг і підтримку заданих параметрами характеристик якості надання послуг, при чому не тільки голосових з'єднань, а й пакетних сесій, керування нарахуванням плати CF (Charging Function), яке обов'язково передбачує on-line тарифікацію, тобто абонент і оператор можуть в реальному часі відслідковувати стан рахунку.

Вузол управління політикою PCRF підтримує декілька моделей нарахування плати: по наданому об'єму послуг, по витраченому часу на послугу, по факту надання послуги, а також комбіновані моделі. Вузол PCRF повинен виконувати вказані вище функції навіть тоді коли абонент знаходиться за межами операторської мережі [6].

Сервери автентифікації, авторизації та обліку AAA (Authentication, Authorization and Accounting) забезпечують автентифікацію на основі одного або декількох атрибутів, таких як: IMSI, MSISDN, IMEI, ім'я користувача і інше. Комбінації цих параметрів налаштовуються в функціях керування політикою Policy Engine, що визначає статичні правила, які застосовуються при процедурі автентифікації [6].

Сервер AAA підтримує декілька політик автентифікації, які також налаштовуються в функціях керування політикою Policy Engine. Сервер AAA підтримує функцію «Чорний список», таким чином, якщо користувач в ході автентифікації вводить неправильні паролі, при досягненні певної кількості невдалих спроб, сервер AAA може заблокувати користувача, далі протягом певного часу сервер AAA буде неуспішно автентифікувати користувача навіть у разі надання коректного пароля [6].

До складу сервера AAA входить підсистема управління, що виконує наступні функції [6]:

- управління користувачами системи;
- управління системними параметрами, яке виконується через графічний інтерфейс користувача, оператори системи можуть керувати параметрами системи, такими як: внутрішні параметри системи, шаблони (пере налаштування політики і правила), політики автентифікації і авторизації, управління пулами IP адрес, управління режимом Proxu і т.інш.
- управління абонентськими профілями. Профілі абонентів зберігаються у внутрішній базі даних сервера AAA. Через інтерфейс користувача оператори можуть керувати абонентськими профілями і виконувати наступні дії: створення абонента; видалення абонента; перегляд інформації про абонента; зміна пароля абонента і зміна інших атрибутів.

1.3 Підтримка параметрів якості обслуговування QoS в мережі LTE-Advanced

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 різної номенклатури послуг та забезпечення функціонування безлічі додатків, які надаються в мережі [12].

Трафік, який обслуговується в потоках EPS (Evolved Packet Service), належить до різної номенклатури послуг [13]:

- відеовиклики Live streaming в реальному часі,
- потокове відео Buffering streaming з буферизацією,
- мова, відео Live streaming,

– інтерактивні ігри,
 – Real-time Gaming,
 – послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, sharing, ftp) та має різні вимоги до характеристик QoS, які наведені в табл. 1.2 [11-13].

Обслуговування потоків трафіку в мережі LTE-Advanced (3GPP TR 23.401), виконується за допомогою наскрізного каналу за замовчуванням без гарантованої швидкості передачі Non-GBR та виділеного наскрізного каналу з гарантованою швидкістю передачі GBR [11-13].

Процес встановлення з'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS показаний на рис. 1.1.

Технічний рапорт 3GPP TR23.401 [7] регламентує наступні характеристики QoS для дев'яти класів обслуговування, кожному з яких відповідає свій ідентифікатор QCI (QoS Class Identifier), які наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.2 – Специфікації QoS для мережі LTE згідно 3GPP TR23.401 [7]

Клас QCI	Тип потоку	Пріоритет	Час затримки пакетів, мс	Ймовірність втрат пакетів PERL	Послуги
1	GBR	2	100	10^{-2}	Виклики VoIP в реальному часі
2		4	150	10^{-3}	Відеовиклики (Live streaming) в реальному часі
3		3	50		Real-time Gaming
4		5	300	10^{-6}	Потокове відео (Buffering streaming) з буферизацією
5	Non-GBR	1	100		IMS-сигналізація
6		6	300		Відео (Buffering streaming) з буферизацією, послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, ftp)
7		7	100	Мова, відео (Live streaming), інтерактивні ігри	
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	Відео (Buffering streaming) з буферизацією, послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, sharing, ftp)
9		9	300		

З'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS (згідно 3GPP TR23.401) на ділянках мережі показаний на рис. 1.2.

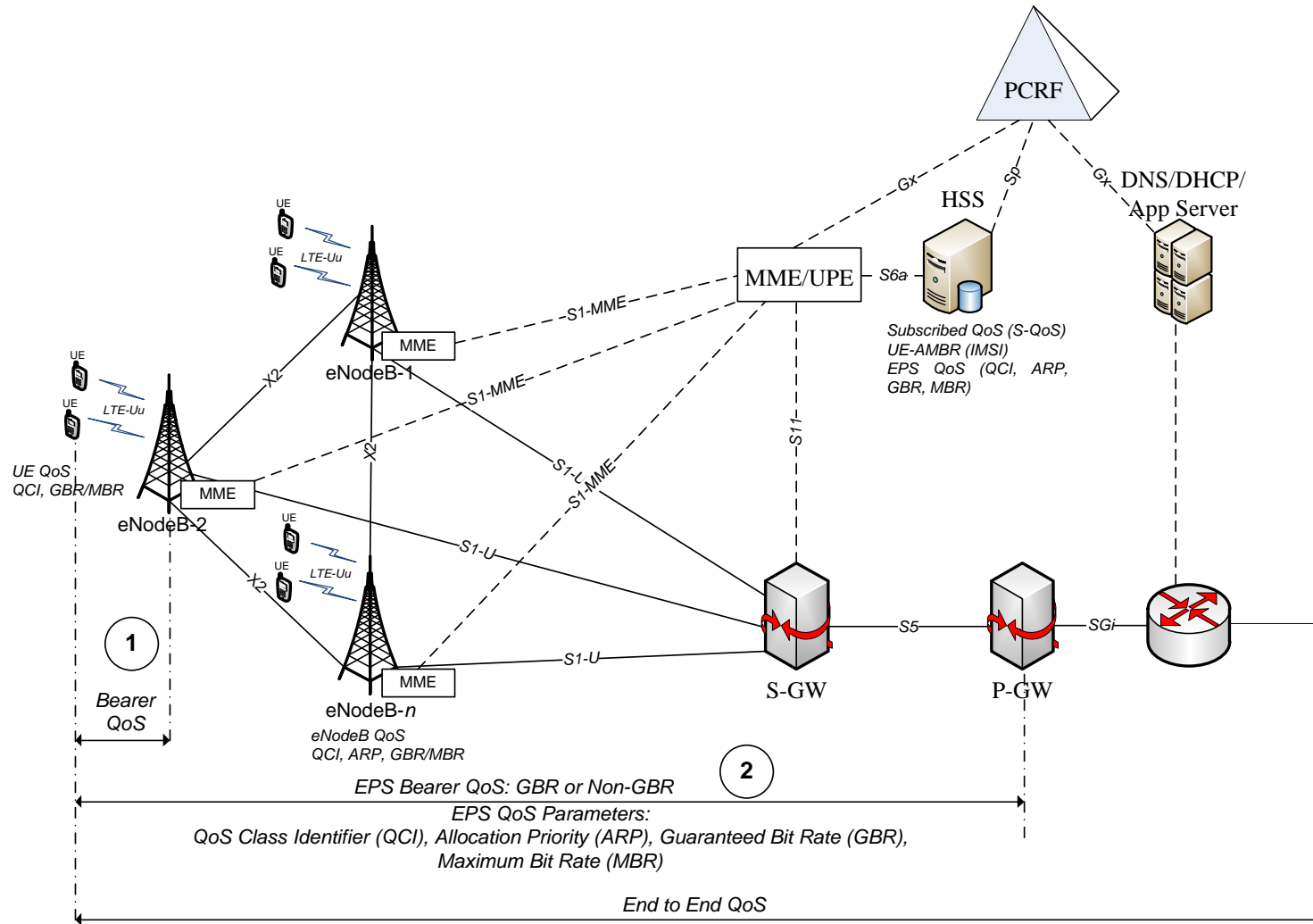


Рисунок 1.2 – З'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS (згідно 3GPP TR23.401)

У результаті аналізу процедур обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced можливо зробити висновки про те, що:

1. Топологія з'єднань базових станцій e-NodeB чинить великий вплив на підтримку характеристик якості обслуговування в мережі 4G/LTE-Advanced за рахунок можливості замикання навантаження, за допомогою інтерфейса X2, всередині окремих ділянок мереж [6-8].

2. Оцінка параметрів обслуговування трафіку виконується на етапі експлуатації мережі. Саме вона визначає вибір оптимальної структури мережі 4G/LTE-Advanced.

3. Параметри пропускної спроможності та доступу до номенклатури послуг у мережі 4G/LTE-Advanced, залежить від кількості активних користувачів у мережі, а пропускна здатність радіоінтерфейсу може значно варіюватися, в результаті активності користувачів, викликаючи перевантаження в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced.

Аналіз забезпечення характеристик якості обслуговування QoS фокусує увагу на впливі пакетних черг в об'єктах мережі при передачі трафіку, черги означають невизначену затримку при передачі трафіку, що є головним джерелом проблем для чутливого до затримок пакетного трафіку. Виходячи з цієї причини необхідні засоби аналізу, для забезпечення компромісу між прагненням гранично завантажити мережу і виконанням вимог QoS одночасно для всіх типів трафіку.

Тому в роботі планується вирішити задачу аналізу характеристик якості QoS обслуговування трафіку у мережі 4G/LTE-Advanced пропускної здатності, часу затримки пакетів та довжини пакетної черги, з метою щодо оптимізації топології з'єднань базових станцій e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN мережі 4G/LTE-Advanced.

2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED ЗА ДОПОМОГОЮ ВУЗЛОВОГО ТЕНЗОРНОГО МЕТОДУ

2.1 Постановка задачі та вибір математичного апарату дослідження

Вирішення задач з впровадження перспективних мереж мобільного зв'язку на нових технологічних основах тісно пов'язано з необхідністю використання цілісної методології дослідження. Будь-яка мережа мобільного зв'язку, зокрема мережа LTE-Advanced, являє собою складну організаційно-технологічну систему. Основними факторами складності якої виступає взаємодія мережі мобільного зв'язку з іншими системами, велика розмірність, динамічний характер функціонування, а також вплив на роботу системи зовнішніх факторів [8-10].

Складність завдань дослідження мереж мобільного зв'язку, побудованих на базі технології LTE-Advanced, полягає в тому, що їх рішення вимагає врахування не тільки структурних особливостей побудови мереж, але й технологічних особливостей їхньої побудови. На етапі дослідження виконується рішення певної послідовності задач: обґрунтованого вибору архітектури мережі, визначення кількості і функціональних характеристик апаратно-програмних засобів мережі і необхідних засобів мережної взаємодії [8-10].

Необхідно виділити також ряд завдань, які потребують вирішення на етапі дослідження характеристик якості обслуговування трафіку мережі мобільного зв'язку технології LTE-Advanced.

По-перше, мережна архітектура LTE-Advanced, зокрема мережа радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced виключає використання контролерів базових станцій, припускаючи можливість з'єднання базових станцій e-NodeB з метою замикання навантаження. Тому досить актуальним є рішення задачі вибору оптимальної топології з'єднань e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS, таких як значення середнього часу затримки пакетів.

По-друге, потребує вирішення завдання оцінки характеристик якості QoS мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced в цілому, а також окремих її об'єктів, наприклад, мережних шлюзів S-GW/P-GW. 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 LTE-Advanced та напрямків передачі трафіку, а й буде враховувати функціональні можливості окремих об'єктів мережі.

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 друг для друга вихідні дані та різноманітні обмеження [8-10].

Єдиний підхід до дослідження мережі LTE-Advanced як складної системи дозволяють отримати тензорні методи аналізу та синтезу. Тензорна уява володіє максимальною цілісністю, дозволяючи сконцентрувати основну увагу на самій системі незалежно від можливих координат її розгляду. В рамках тензорного аналізу система представлена в вигляді тензору, який відображає інваріантний геометричний об'єкт, координати якого при перетворенні системи координат, змінюються за лінійним законом [8-10].

Тензорний аналіз мереж оснований на сумісному використанні функціональних рівнянь системи та її графо-топологічному описі, що являє собою додаткове джерело інформації для ефективного складання та вирішення цих рівнянь. Можливість сумісного використання та дослідження структури телекомунікаційної системи та процесів, які протікають в ній, є головною перевагою тензорної методології досліджень. Наряду з тензорним методом аналізу, для дослідження характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced можливо використовувати математичний апарат теорії графів та мережевого аналізу, а також теорії телетрафіку [8-10].

Математичний апарат теорії графів і мережевого аналізу призначений для вирішення задач маршрутизації, пошуку найкоротших шляхів доставки трафіку, мережевого планування, розподілу ресурсів мережі, та інші. Однак недоліком цих методів є ряд обмежень, таких як неможливість врахування динаміки трафіку та заздалегідь детерміновані зв'язки, що може призвести до нераціонального використання пропускної здатності мережі LTE-Advanced. Окремі напрямки можуть виявитися перенавантаженими, тоді як інші навпаки – слабо або ж зовсім не завантаженими.

Математичний апарат теорії телетрафіку володіє дуже великою кількістю математичних моделей для розгляду будь-яких об'єктів мережі та дозволяє

вирішувати великий спектр задач з визначення характеристик якості, таких як середній час обслуговування в мережі, час затримки та ін. Великим недоліком моделей, які основані на базі теорії телетрафіку, є те, що вони не враховують структурну організацію мережі, яка суттєво впливає на всі функціональні характеристики мережі LTE-Advanced [8-10].

Тензорний аналіз дозволяє в одному математичному об'єкті об'єднати всі необхідні структурні та функціональні характеристики мережі LTE-Advanced. Це можливо завдяки тому, що тензор є математичним об'єктом більш загального характеру, ніж матриця і є можливість отримати значення характеристик великої кількості функціональних вузлів мережі LTE-Advanced [10]. Таким чином використання тензорного аналізу для знаходження характеристик якості трафіку мережі LTE-Advanced є доцільним та найбільш раціональним.

2.2 Основні принципи побудови тензорної моделі

Для того, щоб створити тензорну модель мережі мобільного зв'язку як складної системи необхідно дотримуватись послідовності наступної методології [8-10]:

1. Виконання геометризації мережі: введення понять простору, систем координат і правил їх перетворення.
2. Подання інваріантного рівняння поведінки мережі, її основних властивостей і характеристик. Визначення інваріантів, коваріантних і контраваріантних величин.
3. Обґрунтування і вибір множини систем координат, у рамках яких можна здійснити розрахунок шуканих параметрів мережі.

Геометризація топологічної моделі мережі припускає введення векторного простору мережі, визначення його базисів, а також установку правил координатного перетворення між ними. Введення простору – структури дозволяє визначити склад і взаємозв'язок елементів телекомунікаційної системи, представленої у вигляді графа, який складається із вузлів та гілок, з'єднаних тим чи іншим способом. Для введеного простору структури вводиться розмірність, яка задається одномірним симпліціальним комплексом (одномірною мережею), яка визначає дискретний m -мірний простір.

Спосіб завдання інформативних систем координат визначає вибір способу розгляду об'єкту у вибраному просторі. Головною особливістю тензорного

підходу являється те, що реальна величина не залежить від системи координат, хоча значення її проєкцій в різних системах координат можуть бути різними.

Завдання інваріантного рівняння припускає, що інваріант в тензорній моделі це функціональне рівняння, яке описує принципи функціонування незалежно від системи координат.

Процес геометризації топологічної моделі, окрім введення векторного простору мережі і визначення його базисів, припускають також встановлення правил координатного перетворення при переходах між цими базисами. Зв'язок проєкцій одного і того ж тензора, отриманих в різних базисах, здійснюється за допомогою відповідних матриць координатного перетворення – базисних матриць.

Відносно базисної матриці визначаються правила перетворення величин – коваріантні та контраваріантні і відповідно способи їх перетворення.

Проєкції тензора перетворюються за певними законами. Наявність такої формули перетворення дає можливість знати проєкції тільки в одній системі координат і без нового проєктування визначати проєкції того ж об'єкту в будь-якій іншій системі координат.

У тензорному аналізі мереж топологічний опис структури мережі, що моделюється, проводиться за допомогою n -мереж, що відповідають симпліціальному поданню відповідної розмірності. Так, аналогом графового зображення структури мережі є одновимірна мережа. У випадку опису структури мережі в рамках апарату тензорного аналізу за допомогою одновимірної мережі, остання залежно від способу впливу може трактуватися як контурна, вузлова або ортогональна. У контурних мережах відправною точкою аналізу є контур, у вузлових — пари вузлів, а в ортогональних мережах поняття контуру і вузлової пари використовуються спільно, доповнюючи один одного. Відмінною рисою контурних і вузлових мереж є обов'язкова однотипність впливів на елементи мережі. Для ортогональних мереж вплив може носити комбінований характер, що дозволяє розглядати контурні і вузлові мережі як окремі випадки прояву ортогональних мереж. Використання під час топологічного опису мережі того або іншого типу багато в чому залежить від характеру розв'язуваної задачі і, у свою чергу, повністю визначає як спосіб функціонального опису мережі, так і метод розрахунку шуканих параметрів [8].

Між кількістю незалежних контурів r і кількістю незалежних вузлових пар u мережі s має місце значення [10]:

$$n = r + s. \quad (2.1)$$

У мережі з m вузлами кількість незалежних вузлових пар однозначно визначається з виразу [10]:

$$s = m - a, \quad (2.2)$$

тим самим, виходячи з виразу (2.1) обумовлюючи формульну залежність для розрахунку кількості незалежних контурів у мережі довільної конфігурації [10]:

$$r = n - s. \quad (2.3)$$

У введеному n -мірному просторі необхідно зробити опис мережі за допомогою функціонального рівняння, яке відображає залежність між відомими та шуканими параметрами мережі. Цей вираз буде інваріантним для поставленої задачі. Представлення інваріантного рівняння у тензорному вигляді дозволяє застосовувати правила перетворення тензорів та їх проєкцій у різних системах координат. Тензорне інваріантне рівняння зберігає свою форму незмінною незалежно від координатної системи розгляду мережі [10].

Для забезпечення різностороннього опису системи у розглянутому n -мірному дискретному просторі-структурі можна взяти до уваги цілий ряд систем координат (СК).

Основна вимога, яка має задовольнятися в процесі вибору, це інформативність таких систем координат, тобто в цих СК мають бути шукані або відомі проєкції різних компонентів заданого тензора, спираючись на які можна розрахувати необхідні компоненти в тій або іншій СК [10].

Відповідно до властивостей тензора за його відомими проєкціями в одній системі координат (СК) можна одержати проєкції в інших СК, якщо відомі закони переходу від однієї системи координат до іншої. З погляду системології, зміна системи координат може означати зміну аспекту розгляду досліджуваної системи, а проєкції тензора можуть відображати величини показників, що характеризують основні її властивості в прийнятому для розгляду аспекті [10].

Частіше для дослідження використовують подання мережі в системах координат контурів, вузлових пар та ортогональних СК контурів та вузлових пар.

2.3 Вузловий тензорний метод дослідження характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

Для рішення поставленого завдання аналізу характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced доцільно використання вузлового тензорного методу, за допомогою якого можливо вирішити наступні задачі [10]:

- задачі багатошляхової маршрутизації трафіку з мінімальним гарантованим часом доставки пакетів при збалансованому завантаженні мережних ресурсів;

- задачі раціонального використання та балансування мережних буферних ресурсів мережі при заданому середньому часу затримки пакетів з урахуванням особливостей топології мережі і використовуваних протоколів;

- задачі визначення характеристик якості систем складної територіально-розподіленої структури: для кожного об'єкту мережі окремо та для усієї мережі в цілому.

Для дослідження розглянемо фрагмент архітектури мережі 4G/LTE-Advanced, а саме мережу радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced у виді графу, вершинами якого являються n вузлів мережі, представлені базовими станціями e-NodeB, а дуги графу моделюють m трактів взаємодії між базовими станціями e-NodeB. Структура мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced у виді графу визначає простір, розмірність якого відповідає кількості трактів взаємодії мережі [10].

Тензорне моделювання мережі LTE-Advanced припускає її опис в метричному просторі. Причому, в якості метрики може виступати величина інтенсивності надходження пакетів в трактах, що наглядно може бути підтверджено в ході тензорного узагальнення формули Літтла [8-10]:

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

де h_v^i – середня довжина черги пакетів для передачі i -му тракті взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

τ_i^v – середній час затримки пакетів в i -му тракті взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

l_v^i – середня інтенсивність трафіку в i -му тракті взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

m – загальна кількість трактів взаємодії.

По аналогії з тензорним підходом, запропонованим Кроном та розвинутим у роботах [8-10] структура мережі LTE-Advanced описується одномірним симпліціальним комплексом (одномірна мережа), яка, в свою чергу, визначає дискретний m -мірний простір. При цьому гілки графу мережі $v_i, i = \overline{1, m}$ моделюють тракти взаємодії між базовими станціями e-NodeB, а вузли мережі – базові станції e-NodeB $N_j, j = \overline{1, n}$ об'єкти мережі LTE-Advanced.

Тоді рівняння (2.4) запишемо в тензорному вигляді [8-10]:

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

де H – одновалентний коваріантний тензор, який характеризує середню довжину пакетної черги;

L – двічі контраваріантний тензор середньої інтенсивності трафіку;

T – одновалентний коваріантний тензор, який є тензором часу середніх затримок передачі пакетів.

У впровадженому m -мірному просторі виконаємо тензорний опис системи в рамках вузлового тензорного методу. В якості інформативних систем координат будуть впроваджені до розгляду дві координатні системи. Перша – система координат гілок мережі, представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB, а друга – система координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями eNodeB [8-10].

В ході рішення поставленого завдання знаходження характеристик якості обслуговування трафіку мережі LTE-Advanced знайдемо такі характеристики якості як, середній час затримки пакетів у трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB – T_v та вузлах мережі T_n – базових станціях e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Запишемо вираз (2.5) для заданої системи координат гілок, якими представлені тракти взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, рівняння (2.5) буде мати вигляд [8-10]:

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

де $H_v = (h_1^v \ h_2^v \ \dots \ h_\rho^v)^t$ – тензор, що визначає середню довжину пакетної черги в мережі у системі координат гілок, трактив взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

$T_v = (\tau_1^v \ \tau_2^v \ \dots \ \tau_\rho^v)^t$ – тензор часу середніх затримок передачі пакетів у трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

$L_v = (l_v^{ij})$ – тензор середньої інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

n – кількість базових станцій e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

У системі координат вузлових пар, яка представлена базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, рівняння (2.5) має вигляд [8-10]:

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

де тензор $H_\eta = (h_1^\eta \ h_2^\eta \ \dots \ h_\rho^\eta)^t$ – визначає середню довжину пакетної черги у системі координат вузлових пар, які представлені базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

$T_\eta = (\tau_1^\eta \ \tau_2^\eta \ \dots \ \tau_\rho^\eta)^t$ – тензор середніх значень часу затримки передачі пакетів у вузлах мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, які представлені базовими станціями e-NodeB;

$L_\eta = (l_\eta^{ij})$ – тензор середніх інтенсивностей трафіку в системі координат вузлових пар мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, які представлені базовими станціями e-NodeB.

Вузловий тензорний метод визначає перетворення заданих тензорів між системами координат гілок та вузлових пар мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Проекції тензору середньої довжини пакетної черги H_η в системі координат вузлових пар мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, яка представлена базовими станціями e-NodeB, визначаються як [8-10]:

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

де H_η – тензор, який визначає середню довжину пакетної черги в базових станціях e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced в системі координат вузлових пар;

B_η – базисна матриця перетворення між системами координат;

H_v^+ – тензор середньої довжини вихідної пакетної черги для кожного тракту взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Проекції двічі контрваріантних тензорів в системі координат вузлових пар, представлених базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced визначаються за формулою [8-10]:

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

$L_\eta = (l_\eta^{ij})$ – двічі контрваріантний тензор середніх інтенсивностей трафіку в системі координат вузлових пар, представлених базовими станціями e-NodeB;

B_η – базисна матриця перетворення між системами координат;

$L_v = (l_v^{ij})$ – тензор середніх інтенсивностей трафіку в гілках мережі, представлених трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

B_η^t – транспонована базисна матриця перетворення між системами координат.

Визначаються проекції коваріантних тензорів в системі координат базисних вузлових пар мережі E-UTRAN/LTE-Advanced [8-10] за допомогою виразу, отриманого з (2.7):

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

де T_η – тензор середнього часу затримки пакетів у системі координат вузлових пар мережі, який визначає час затримки пакетів у базових станціях e-NodeB;

H_η – вектор, який визначає довжину пакетної черги в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced у системі координат вузлових пар мережі, базових станціях e-NodeB;

$[L_\eta]^{-1}$ – зворотна матриця середньої інтенсивності трафіку у системі координат вузлових пар.

Визначаються проекції коваріантних тензорів в системі координат гілок мережі LTE-Advanced, які представлені базовими станціями e-NodeB [8-10]:

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

де T_v – проекція тензорів в системі координат гілок, яка задана тензором середнього часу затримок пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі LTE-Advanced;

B_η^t – транспонована базисна матриця перетворення між системами координат;

T_η – тензор середнього часу затримки пакетів у системі координат вузлових пар мережі, який визначає час затримки пакетів у базових станціях e-NodeB.

Отриманий вираз (2.11) дозволяє вирішити поставлене завдання й знайти мінімальний час доставки пакетів із черги на вихідному вузлі мережі LTE-Advanced.

Значення середньої довжини пакетної черги визначається проекцією тензора H_v в системі координат гілок мережі LTE-Advanced [8-10]:

$$H_v = L_v T_v, \quad (2.12)$$

де $H_v = (h_1^v \quad h_2^v \quad \dots \quad h_\rho^v)^t$ – тензор, що визначає середню довжину черги пакетів у системі координат гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

$T_v = (\tau_1^v \quad \tau_2^v \quad \dots \quad \tau_\rho^v)^t$ – тензор середнього часу затримок передачі пакетів у трактах мережі, які представлені трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

$L_v = (l_v^{ij})$ – тензор середніх інтенсивностей трафіку в гілках мережі, представлених трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Наведена послідовність тензорних виразів дозволяє вирішити поставлене завдання визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, до яких віднесені [8-10]:

– значення середнього часу затримки пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB та безпосередньо буферних пристроях базових станцій e-NodeB;

– значення середньої довжини пакетної черги пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB та безпосередньо буферних пристроях базових станцій e-NodeB.

3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ 4G/LTE-ADVANCED

3.1 Розрахунок характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі мобільного зв'язку 4G/LTE-Advanced

Мережа 4G/LTE-Advanced побудована на базі мережі радіодоступу E-UTRAN, яка виключає використання контролерів та передбачає можливості з'єднання між базовими станціями всередині мережі радіодоступу E-UTRAN [14].

При рішенні поставленого завдання дослідження характеристик якості обслуговування трафіку враховується, що мережна архітектура E-UTRAN/LTE-Advanced виключає використання контролерів базових станцій, припускаючи можливість з'єднання базових станцій eNodeB з метою замикання навантаження в мережі радіодоступу [14].

Для рішення задачі аналізу характеристик якості передбачається вибір оптимальної топології з'єднань eNodeB за інтерфейсом X2 в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS.

На першому етапі дослідження розглянемо задачу визначення характеристик якості обслуговування трафіку QoS за допомогою вузлового тензорного методу та визначимо [14]:

- затримку в буферних пристроях базових станцій e-NodeB та трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;
- довжину черги в буферних пристроях базових станцій e-NodeB та трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

На другому етапі дослідження виконаємо вибір з'єднань між базовими станціями eNodeB в мережі UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і характеристик якості обслуговування трафіку QoS з метою підвищення пропускної спроможності мережі.

Для рішення поставленого завдання визначення характеристик якості обслуговування QoS завдання вважаємо відомими [14]:

- структуру фрагмента мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, яка представлена у вигляді графу та показана на рис. 3.1, граф мережі складається з $N=7$ вузлів, які моделюють базові станції e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та пов'язані за допомогою $v=9$ трактів взаємодії;

– відомо обраний напрямок передавання трафіку e-NodeB-1→e-NodeB-6 в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, для якого необхідно забезпечити передачу пакетів з черги умовної довжини 100 тис. пакетів;

– згідно графу, який показаний на рис. 3.1 сформуємо базисну матрицю вузлових пар B_η , яка має вигляд

$$B_\eta = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

– відомі середні інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, які представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Інтенсивності трафіку між базовими станціями e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

Середні інтенсивності трафіку L_v , тис. пакетів	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9
	500	350	1000	600	450	550	450	200	0

– відома довжина черги пакетів між заданою парою базових станцій eNodeB-1→eNodeB-6, що задана тензором H_v^+ :

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 100). \quad (3.2)$$

Для вирішення поставленого завдання аналізу характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced необхідно визначити [8-10]:

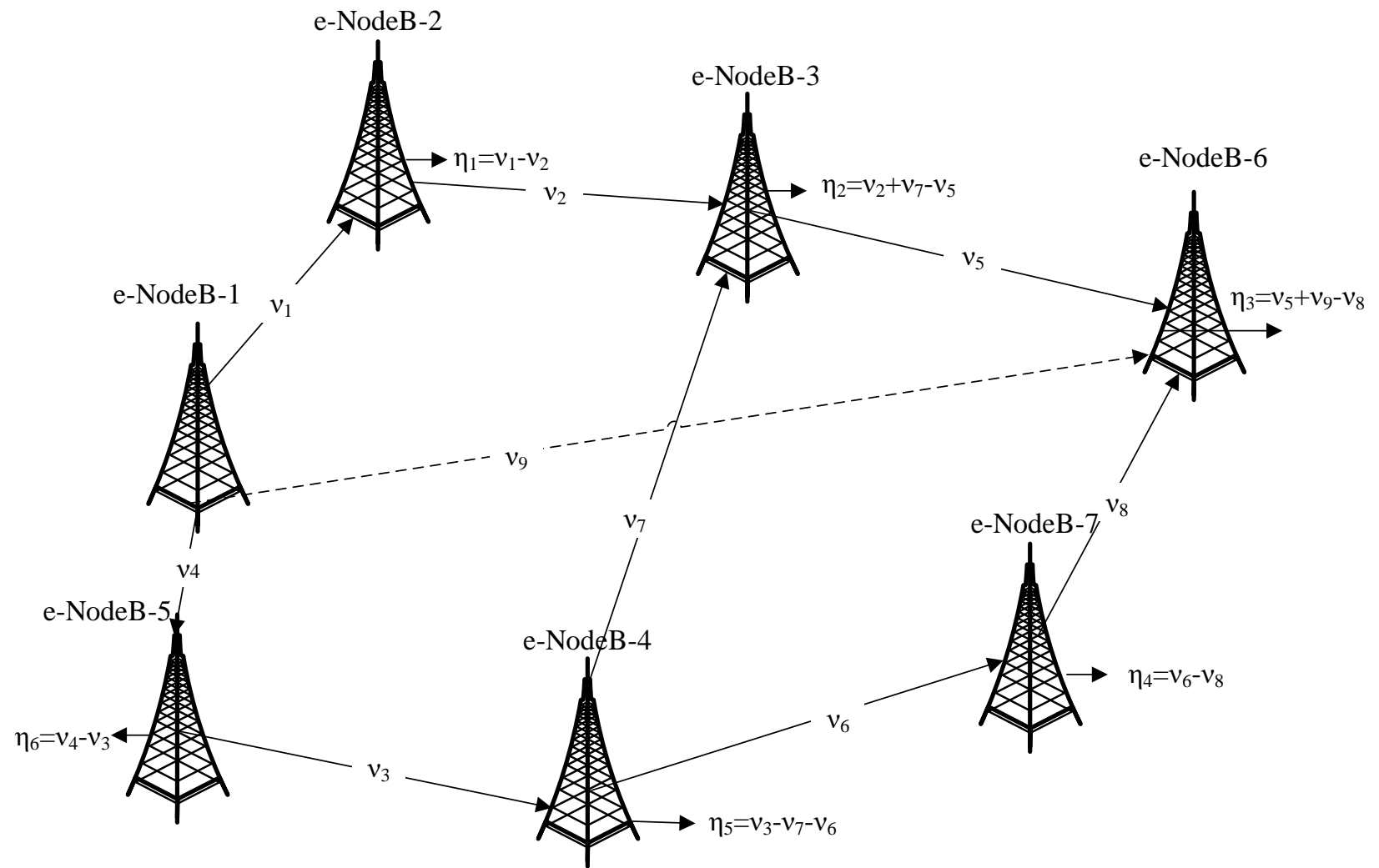


Рисунок 3.1 – Граф мережі E-UTRAN/LTE-Advanced

– затримка T_v пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями NodeB, при передачі їх з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1;

– затримка T_η пакетів у буферних пристроях базових станцій e-NodeB, мережі радіодоступу LTE-Advanced;

– пакетна черга буферних пристроїв H_η базових станцій e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та трактів їхньої взаємодії H_v ;

Використовуючи вираз (2.8), базисну матрицю вузлових пар B_η задану виразом (3.1) та задану середню довжину вихідної черги між заданою парою вузлів e-NodeB-1→e-NodeB-6 - H_v^+ (3.2) знайдемо довжину черги пакетів у буферних пристроях базових станцій розглядаємого фрагменту мережі E-UTRAN/LTE-Advanced [8-10]:

$$H_\eta = (0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0)^t. \quad (3.3)$$

Для визначення L_η інтенсивності трафіку у вузлах мережі - базових станціях e-NodeB мережі E-UTRAN використаємо формулу (2.9) та базисну матрицю вузлових пар B_η задану формулою (3.1) та значення інтенсивностей трафіку, заданих у табл. 3.1 [8-10]:

$$L_\eta = \begin{pmatrix} 850 & -350 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -350 & 1250 & -450 & 0 & -450 & 0 \\ 0 & -450 & 650 & -200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -200 & 750 & -550 & 0 \\ 0 & -450 & 0 & -550 & 2000 & -1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1000 & 1600 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

Затримка T_η пакетів у вузлах мережі - в буферних пристроях базових станцій e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN можна знайти за допомогою формули (2.7) [8-10]:

$$T_\eta = [L_\eta]^{-1} \cdot H_\eta, \quad (3.5)$$

тоді, за допомогою формул (3.3), (3.4) та (3.5) отримаємо

$$T_{\eta} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 1,570 & 0,956 & 0,862 & 0,650 & 0,573 & 0,358 \\ 0,956 & 2,322 & 2,093 & 1,578 & 1,391 & 0,869 \\ 0,862 & 2,093 & 3,627 & 2,080 & 1,517 & 0,948 \\ 0,650 & 1,578 & 2,080 & 3,207 & 1,799 & 1,124 \\ 0,573 & 1,391 & 1,517 & 1,799 & 1,902 & 1,182 \\ 0,358 & 0,869 & 0,948 & 1,124 & 1,182 & 1,368 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,086 \\ 0,209 \\ 0,363 \\ 0,208 \\ 0,151 \\ 0,095 \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Затримка T_v в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB визначається за допомогою формули (2.11) та використовуючи базисну матрицю вузлових пар B_{η} (3.1). Для розрахунків використано значення затримки пакетів у вузлах мережі - в буферних пристроях базових станцій e-NodeB (3.6) [8-10]:

$$T_v = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,086 \\ 0,209 \\ 0,362 \\ 0,208 \\ 0,152 \\ 0,095 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,086 \\ 0,123 \\ 0,057 \\ 0,094 \\ 0,153 \\ 0,056 \\ 0,057 \\ 0,154 \\ 0,362 \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Довжина пакетної черги H_v передачі пакетів в трактах взаємодії між eNodeB згідно формули (2.6) використовуючи отриманні значення в табл. 3.1 та результат визначення середнього часу затримки (3.7) згідно [8-10]:

$$H_v = (43,1 \quad 43,1 \quad 56,8 \quad 56,8 \quad 69,0 \quad 30,9 \quad 25,9 \quad 30,9 \quad 0)^t.$$

Згідно проведених розрахунків (рис. 3.2), мінімальний час доставки пакетів з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1 умовної довжиною 100 тис. пакетів приблизно становить 0,362 с.

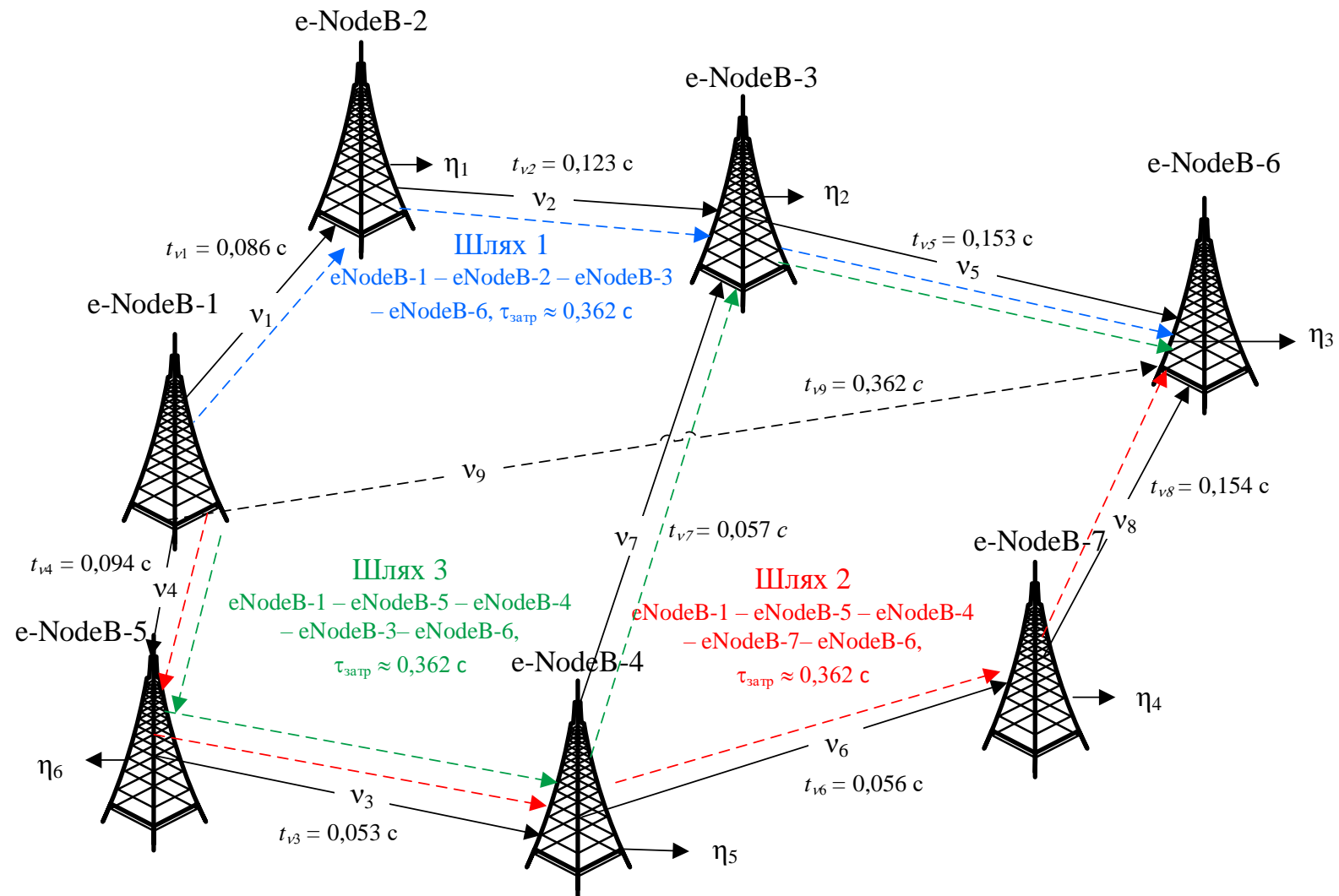


Рисунок 3.2 – Характеристики якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

Важливо відмітити, що час затримки в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced є однаковим для всіх шляхів доставки пакетів. Наприклад, розглянемо три будь-які шляхи (рис. 3.2) [14]:

– перший шлях eNodeB-1 – eNodeB-2 – eNodeB-3 – eNodeB-6 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v1} + \tau_{\text{затр } v2} + \tau_{\text{затр } v5} \approx 0,362 \text{ с}$;

– другий шлях eNodeB-1 – eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-7 – eNodeB-6 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v4} + \tau_{\text{затр } v3} + \tau_{\text{затр } v6} + \tau_{\text{затр } v8} \approx 0,362 \text{ с}$;

– третій шлях eNodeB-1 – eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-3 – eNodeB-6 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v4} + \tau_{\text{затр } v3} + \tau_{\text{затр } v7} + \tau_{\text{затр } v5} \approx 0,362 \text{ с}$.

На рис. 3.2 представлені результати рішення задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

На рис. 3.2 зазначено час середньої затримки пакетів, завантаженості базових станцій мережі eNodeB при передачі пакетів із вихідної черги, час затримки пакетів на кожному вузлі мережі 4G/LTE-Advanced.

3.2 Балансування трафіку в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

Згідно отриманих результатів вирішення задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced виконаємо другий етап дослідження – вибір оптимальної топології з'єднань базових станцій e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку. Для цього розглянемо можливості організації додаткових напрямків передавання трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced [8-10].

Наприклад, розглянемо додаткові напрямки передавання трафіку між eNodeB-1 – eNodeB-4 та eNodeB-4 – eNodeB-6 (рис. 3.3).

Тоді структура фрагмента мережі LTE, яка представлена у вигляді графу (рис. 3.3) складається з $N=7$ базових станцій eNodeB та пов'язані за допомогою $v=11$ трактів взаємодії.

Відомо обраний напрямок eNodeB-1→eNodeB-6, для якого необхідно забезпечити передачу пакетів з черги умовної довжини 100 тис. пакетів.

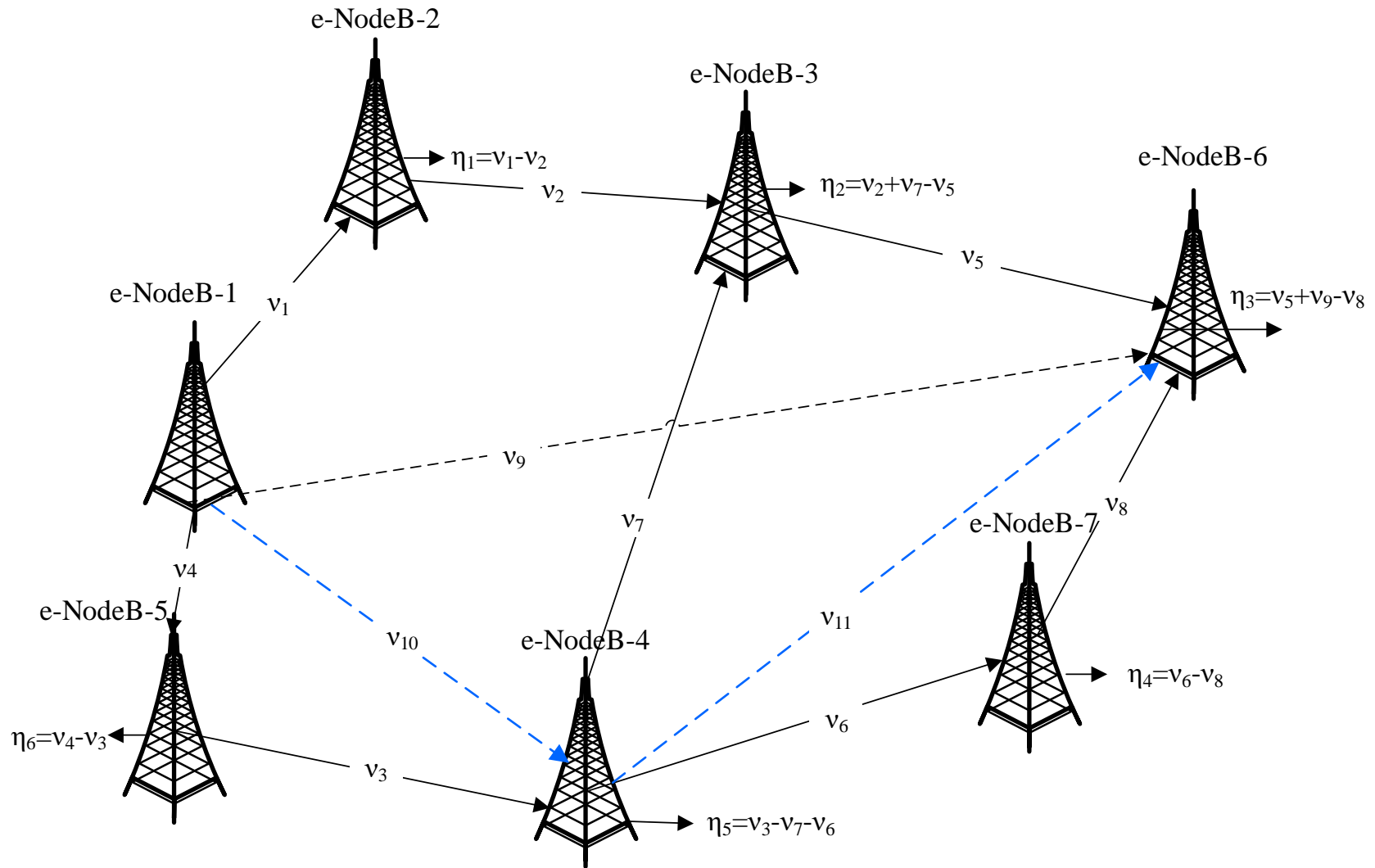


Рисунок 3.3 – Фрагмент мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з додатковими напрямками передавання трафіку

Згідно графу з додатковими напрямками, який показаний на рис. 3.3 сформуємо базисну матрицю вузлових пар B_η .

$$B_\eta = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

Вважаємо відомими середні інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, які представлені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Середні інтенсивності трафіку в трактах взаємодії мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced з додатковими напрямками

Інтенсивність трафіку L_v , тис. пакетів	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}
	500	350	1000	600	450	550	450	200	0	500	500

Знайдемо середній час затримки T_v пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB при передачі їх з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1 та середній час затримки T_η пакетів у буферних пристроях базових станцій e-NodeB, мережі E-UTRAN/LTE-Advanced для фрагменту мережі, яка показана на рис. 3.3 при заданих вище умовах.

Тобто, для розглянутого фрагменту мережі E-UTRAN/LTE-Advanced (рис. 3.1) збільшимо кількість шляхів передавання трафіку, тим самим збільшимо пропускну спроможність мережі та визначимо середній час затримки пакетів.

Знайдемо середнє значення L_η інтенсивності трафіку у базових станціях e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced згідно формулі (2.9) та відомої базисної матриці вузлових пар B_η (3.8) з урахуванням додаткових напрямків передавання трафіку та значень інтенсивностей трафіку, заданих у табл. 3.2 [14-16]:

$$L_{\eta} = \begin{pmatrix} 850 & -350 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -350 & 1250 & -450 & 0 & -450 & 0 \\ 0 & -450 & 1150 & -200 & -500 & 0 \\ 0 & 0 & -200 & 750 & -550 & 0 \\ 0 & -450 & -500 & -550 & 3000 & -1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1000 & 1600 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Затримка T_{η} пакетів у буферних пристроях базових станцій e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced визначається виразом (3.5) [8-10]:

$$T_{\eta} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 1,459 & 0,686 & 0,464 & 0,350 & 0,309 & 0,193 \\ 0,686 & 1,668 & 1,127 & 0,850 & 0,750 & 0,469 \\ 0,464 & 1,127 & 1,891 & 1,148 & 0,877 & 0,548 \\ 0,350 & 0,850 & 1,148 & 2,330 & 0,942 & 0,589 \\ 0,309 & 0,750 & 0,877 & 0,942 & 0,966 & 0,603 \\ 1,931 & 0,469 & 0,548 & 0,589 & 0,603 & 1,002 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,046 \\ 0,112 \\ 0,189 \\ 0,114 \\ 0,087 \\ 0,054 \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Затримка T_v передачі пакетів з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1 в трактах взаємодії визначається за формулою (2.11) використовуючи базисну матрицю вузлових пар B_{η} (3.2) та (3.10) отримаємо [8-10]:

$$T_v = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,046 \\ 0,112 \\ 0,189 \\ 0,114 \\ 0,087 \\ 0,054 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,046 \\ 0,066 \\ 0,032 \\ 0,054 \\ 0,076 \\ 0,027 \\ 0,024 \\ 0,074 \\ 0,189 \\ 0,087 \\ 0,101 \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

Згідно проведених розрахунків, мінімальний час доставки пакетів з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1 умовної довжиною 100 тис. пакетів приблизно становить 0,189 с.

Важливо відмітити, що час затримки в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced є однаковим для всіх шляхів доставки пакетів. Наприклад, розглянемо три будь-які шляхи [8-10]:

– eNodeB-1 – eNodeB-2 – eNodeB-3 – eNodeB-4 – eNodeB-6 має час затримки

$$\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v1} + \tau_{\text{затр } v2} + \tau_{\text{затр } v7} + \tau_{\text{затр } v11} \approx 0,189 \text{ с};$$

– eNodeB-1 – eNodeB-4 – eNodeB-6 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v10} + \tau_{\text{затр } v11} \approx 0,189 \text{ с};$

– eNodeB-1 – eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-6 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v4} + \tau_{\text{затр } v3} + \tau_{\text{затр } v11} \approx 0,189 \text{ с}.$

На рис. 3.4 представлені результати рішення задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з додатковими напрямками передавання трафіку.

Згідно проведених розрахунків часу затримки пакетів в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE з додатковими напрямками передавання трафіку та без них можливо зробити наступні висновки: збільшення кількості трактів взаємодії між базовими станціями eNodeB дозволило збільшити пропускну спроможність мережі та зменшити час затримки пакетів в мережі радіодоступу.

Однак, при балансуванні трафіку також необхідно врахувати час затримки, який створюється в буферних пристроях вузлів мережі.

Визначимо час затримки пакетів при балансуванні трафіку для мережі з додатковими напрямками передавання трафіку з різними шляхами його доставки з урахуванням затримки пакетів в мережних вузлах, отриманих у виразі 3.10. Результати розрахунків зведемо в табл. 3.3.

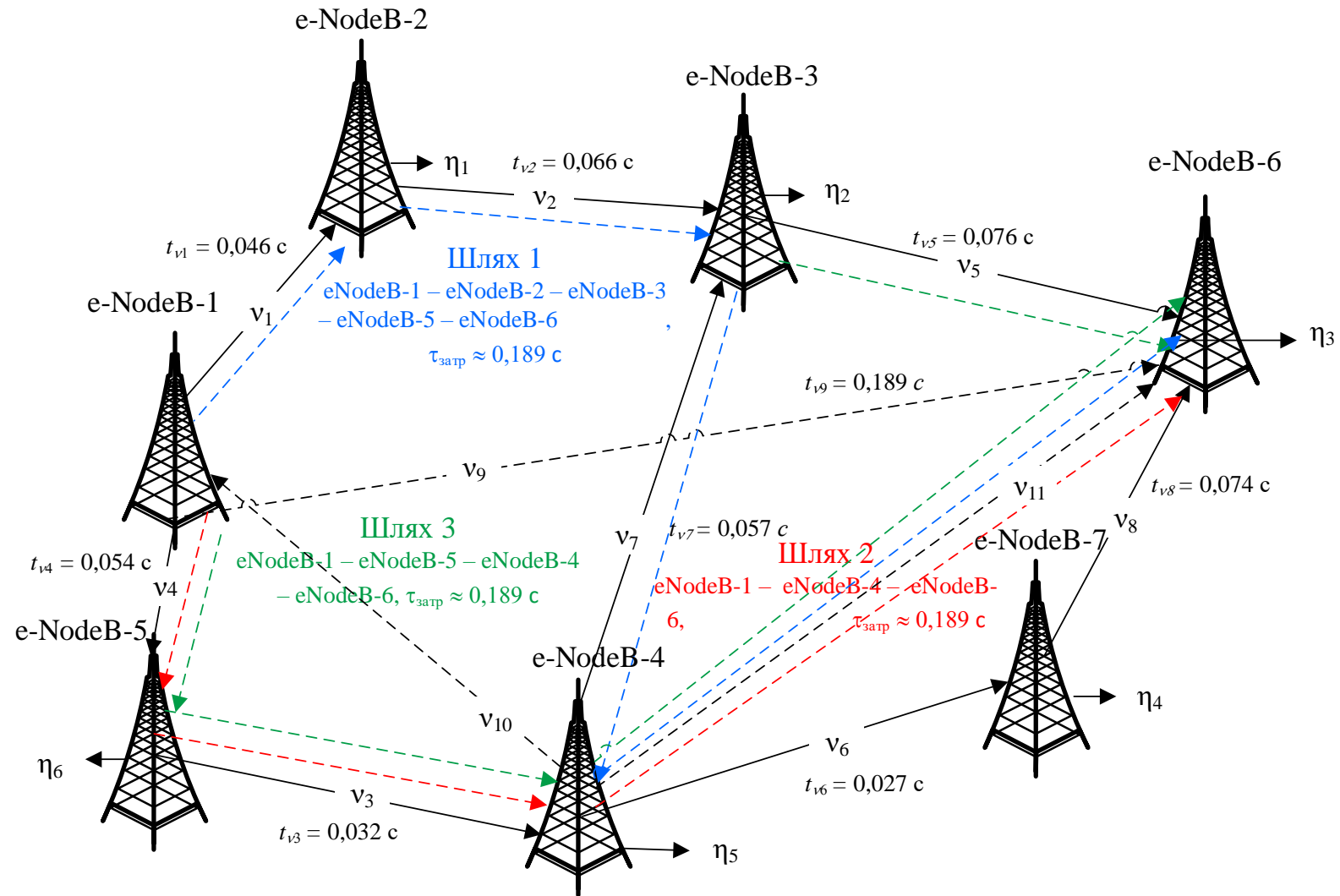


Рисунок 3.4 – Характеристики QoS мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з додатковими напрямками

Таблиця 3.3 – Інтенсивності трафіку в трактах взаємодії мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

Шлях	Затримка при передаванні трафіку $\tau_{\text{запр}}, \text{с}$	Затримка у вузлах мережі $\tau_{\eta}, \text{с}$	Затримка при передаванні трафіку $\tau_{\text{запр з вуз}}$ з урахуванням затримки у вузлах
eNodeB-1–eNodeB-4 –eNodeB-6 $v_{10} \rightarrow v_{11}$	0,189	$\tau_{\eta 5} = 0,087,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,465 с
eNodeB-1–eNodeB-5 –eNodeB-4–eNodeB-6 $v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_{11}$	0,189	$\tau_{\eta 6} = 0,054,$ $\tau_{\eta 5} = 0,087,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,519 с
eNodeB-1–eNodeB-2 –eNodeB-3–eNodeB-6 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5$	0,189	$\tau_{\eta 1} = 0,046,$ $\tau_{\eta 2} = 0,112,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,536 с
eNodeB-1–eNodeB-4 – eNodeB-3 – eNodeB-6 $v_{10} \rightarrow v_7 \rightarrow v_5$	0,189	$\tau_{\eta 5} = 0,087,$ $\tau_{\eta 2} = 0,112,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,577 с
eNodeB-1–eNodeB-2 –eNodeB-3–eNodeB-4 –eNodeB-6 $v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5$	0,189	$\tau_{\eta 1} = 0,046,$ $\tau_{\eta 2} = 0,112,$ $\tau_{\eta 5} = 0,087,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,623 с
eNodeB-1–eNodeB-5 –eNodeB-4–eNodeB-7 –eNodeB-6 $v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_6 \rightarrow v_8$	0,189	$\tau_{\eta 6} = 0,054,$ $\tau_{\eta 5} = 0,087,$ $\tau_{\eta 4} = 0,114,$ $\tau_{\eta 3} = 0,189$	0,633 с

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даній магістерській роботі розглянуто аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE. Запропоновано використання вузлового тензорного методу, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики мережі.

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. При рішенні поставленого завдання визначені характеристики якості обслуговування трафіку QoS, а саме, затримку пакетів та довжина черги за допомогою вузлового тензорного методу. Для рішення задачі оцінки характеристик якості обслуговування трафіку запропоновано використання додаткових напрямків передавання трафіку в мережі радіодоступу для підвищення характеристик якості.
2. Проведено порівняння результатів часу затримки для різних конфігурацій мережі радіодоступу – з додатковими напрямками та без них. Визначено, що час доставки пакетів з черги 100 тис. пакетів для мережі без додаткових трактів становить 0,362 с, а з додатковими - 0,189 с.
3. Результати розрахунків дозволяють проводити розрахунки параметрів характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 <https://www.ericsson.com>
- 2 <https://www.vodafone.ua>
- 3 <https://kyivstar.ua>
- 4 <https://www.lifecell.ua>
- 5 3GPP TS 23.251 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network Sharing; Architecture and functional description.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Strelkovskaya I. QoS characteristics providing in network traffic balancing/ I. Strelkovskaya, I. Solovskaya, N. Severin // Proceedings of the 5th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ-2017), Koethen, Germany, March, 16, 2017.– Anhalt University of Applied Sciences. – P. 9-16. DOI: 10.13142/KT10005.02.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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).
- 12 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, 2012.

13 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.

14 Соловська І.М., Дерев'янюк А.К. Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced. ІХ 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.

15 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 характеристик якості обслуговування
трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

Виконав: студент 2 курсу, гр. КТК-2.1
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
Деревянко А.К.

Керівник – к.т.н., доц. Соловська І.М.

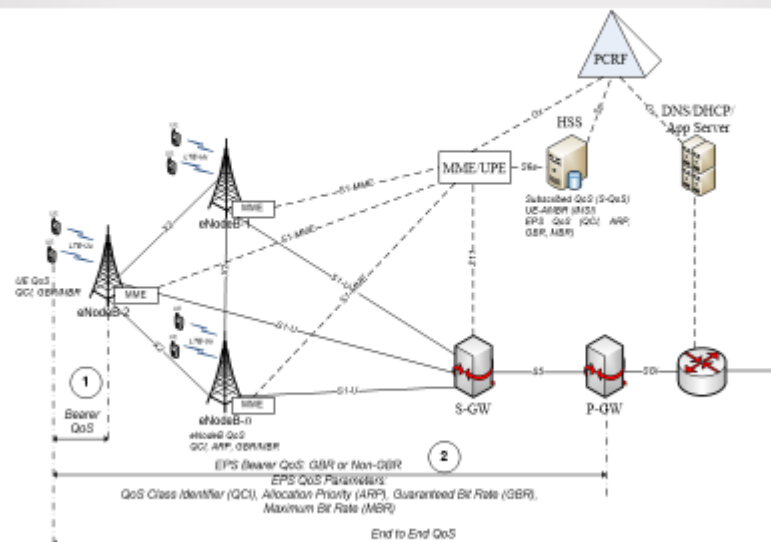
ВСТУП

- ❑ Технологічний рівень розвитку мобільного зв'язку України знаходяться на етапі розвитку мережі четвертого покоління 4G, з використанням технології LTE-Advanced (Long Term Evolution) (згідно Rel. 12-14).
- ❑ Основною перевагою технології LTE-Advanced є висока швидкість передачі даних, яка дозволить забезпечити послуги високошвидкісного пакетного передавання даних, до яких віднесенні відео-сервіси реального часу та послуги LTE-VoIP.
- ❑ Аналіз характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced дозволить визначити оптимальну структуру мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та з'єднання між базовими станціями e-NodeB, які забезпечать ефективне використання мережних ресурсів при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

- В магістерській роботі поставлена задача аналізу характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced.
- В якості математичного апарату використовується вузловий тезорний метод, використання якого дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики мережі в межах одного методу.
- Вирішення поставленого завдання дозволить отримати розв'язання задачі визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced, таких як середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги і отримано результати ефективного використання мережевих ресурсів при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

Забезпечення наскрізної якості обслуговування QoS (згідно 3GPP TR23.401)



Вузловий тензорний метод

В якості інваріантного функціонального виразу використовуємо формулу Літла:

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

де h_v – середня довжина черги пакетів для передачі i -му тракті взаємодії між базовими станціями e-NodeB;

τ_{i_v} – середній час затримки пакетів в i -му тракті між базовими станціями e-NodeB;

l_v – середня інтенсивність трафіку в i -му тракті між базовими станціями e-NodeB;

m – загальна кількість трактів взаємодії.

Рівняння (1) в системах координат гілок та вузлових пар приймає вигляд:

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

H_v та H_η – тензори, що визначають середню довжину пакетної черги у системі координат гілок та вузлових пар, трактів взаємодії між базовими станціями e-NodeB та буферними пристроями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

T_v та T_η – тензори, що визначають середній час затримки пакетів у системі координат гілок та вузлових пар, трактів взаємодії між базовими станціями e-NodeB та буферними пристроями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

L_v та L_η – тензори, що визначають інтенсивність трафіку у системі координат гілок та вузлових пар, трактів взаємодії між e-NodeB та буферними пристроями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced/

Вузловий тензорний метод

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

$$H_\eta = B_\eta H_v^+, \quad (3)$$

де H_η^+ – тензор середньої довжини черги пакетів в СК гілок, в трактах між базовими станціями e-NodeB мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Тензор інтенсивностей трафіку в буферних пристроях базових станцій e-NodeB, має вид:

$$L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t, \quad (4)$$

Тензор середнього часу затримки пакетів в СК вузлових пар, які представлені базовими станціями e-NodeB, 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 трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB, має вид:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta. \quad (6)$$

Хід рішення

Для рішення поставленого завдання вважаємо відомими:

- структуру фрагмента мережі LTE, яка представлена у вигляді графу (рис. 2);

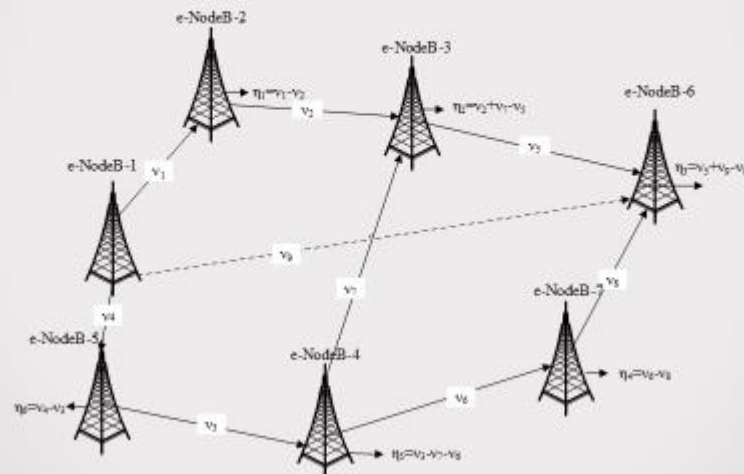


Рисунок 2 – Фрагмент мережі E-UTRAN/LTE-Advanced у вигляді графу

Хід рішення

- відомо обраний напрямок eNodeB-1→eNodeB-6, для якого необхідно забезпечити передачу пакетів з черги умовної довжини 100 тис. пакетів;
- базисна матриця вузлових пар;

$$B_{\sigma} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

- відомі інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN, які представлені у табл. 1;

Таблиця 1 – Середні інтенсивності трафіку між базовими станціями e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

Середні інтенсивності трафіку L_{ij} , тис. пакетів	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9
	500	350	1000	600	450	550	450	200	0

ХІД РІШЕННЯ

- відома довжина вихідної черги пакетів між заданою парою вузлів eNodeB-1 → eNodeB-6, що задана тензором $H_{v,u}$:

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 100)$$

Для вирішення поставленого завдання аналізу характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced необхідно визначити:

- середній час затримки T_v пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB, при передачі їх з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1;
- середній час затримки T_v пакетів у буферних пристроях базових станцій e-NodeB, мережі радіодоступу LTE-Advanced;
- завантаженість пакетної черги буферних пристроїв H_v базових станцій e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та трактів їхньої взаємодії H_v .

ХІД РІШЕННЯ

Знайдемо середнє значення L_{η} інтенсивності трафіку у базових станціях e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

$$L_v = \begin{pmatrix} 850 & -350 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -350 & 1250 & -450 & 0 & -450 & 0 \\ 0 & -450 & 650 & -200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -200 & 750 & -550 & 0 \\ 0 & -450 & 0 & -550 & 2000 & -1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1000 & 1600 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Середній час затримки T_{η} пакетів в буферних пристроях базових станцій e-NodeB мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced визначається виразом

$$T_v = 10^{-3} \begin{pmatrix} 1,570 & 0,956 & 0,862 & 0,650 & 0,573 & 0,358 \\ 0,956 & 2,322 & 2,093 & 1,578 & 1,391 & 0,869 \\ 0,862 & 2,093 & 3,627 & 2,080 & 1,517 & 0,948 \\ 0,650 & 1,578 & 2,080 & 3,207 & 1,799 & 1,124 \\ 0,573 & 1,391 & 1,517 & 1,799 & 1,902 & 1,182 \\ 0,358 & 0,869 & 0,948 & 1,124 & 1,182 & 1,368 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,086 \\ 0,209 \\ 0,363 \\ 0,208 \\ 0,151 \\ 0,095 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Результати рішення

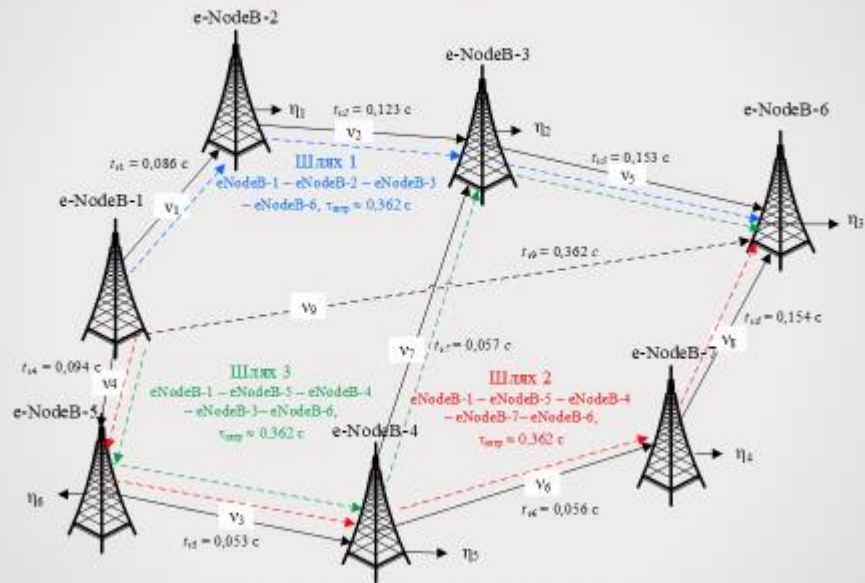


Рисунок 3 – Результати розрахунків характеристик якості обслуговування трафіку в мережі 4G/LTE-Advanced

БАЛАНСУВАННЯ ТРАФІКУ

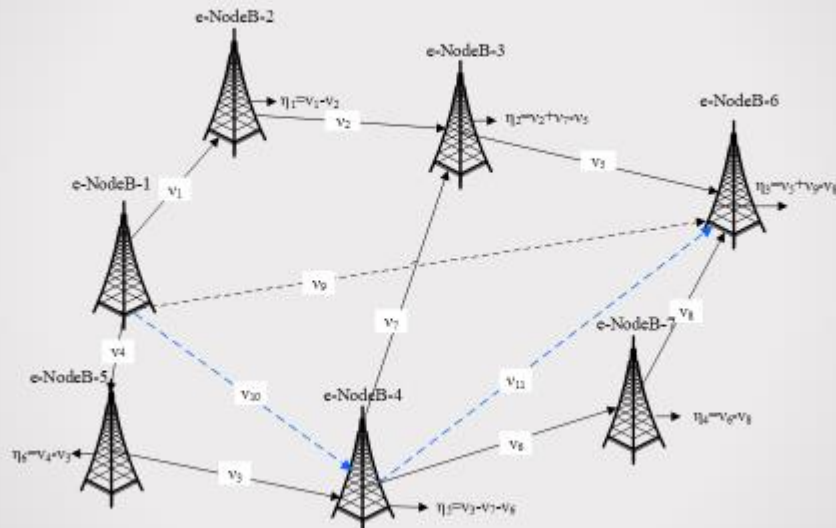


Рисунок 4 – Фрагмент мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з додатковими напрямками передавання трафіку

Результати рішення з додатковими напрямками

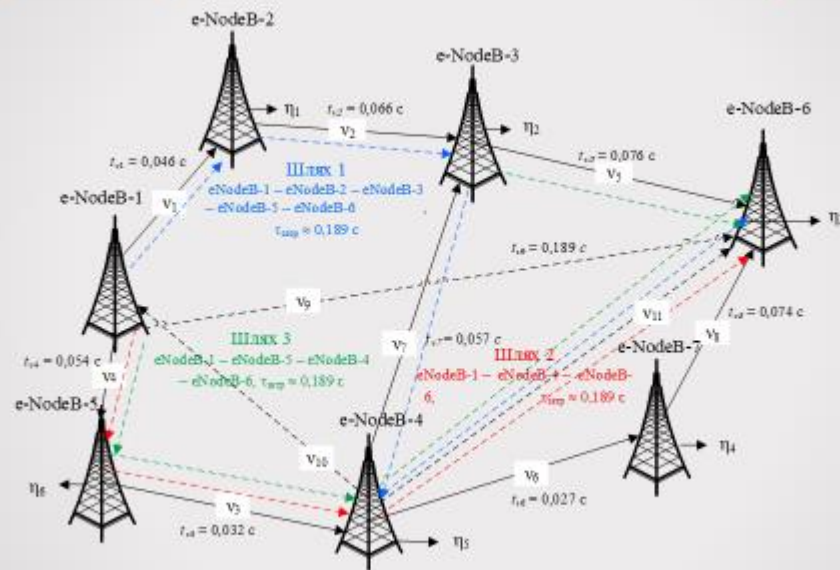


Рисунок 5 – Результати розрахунків для мережі з додатковими напрямками передавання трафіку

Висновки та рекомендації

1. При рішенні поставленого завдання визначені характеристики якості обслуговування трафіку QoS, а саме, середній час затримки пакетів та довжина пакетної черги за допомогою вузлового тензорного методу. Розглянуто мережу з додатковими напрямками передавання трафіку з метою отримання оптимальної топології з'єднань e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.
2. Для різних конфігурацій мережі радіодоступу E-UTRAN без додаткових напрямків передавання трафіку та з їхнім використанням отримані результати середнього часу затримки пакетів. Встановлено, що мінімальний час доставки пакетів з черги на вихідному вузлі e-NodeB-1 умовної довжиною 100 тис. пакетів для мережі без додаткових напрямків передавання трафіку приблизно становить 0,362 с, а з використанням додаткових напрямків передавання трафіку приблизно 0,189 с.
3. Отримані результати надають можливість проводити різносторонню оцінку параметрів діючих мереж та мереж, що проектуються, а також дозволяють оцінити та розрахувати показники, що можуть характеризувати взаємодію даних мереж.