

МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерних наук

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
першого (бакалаврського) рівня

на тему Дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G

Виконав: студент 4 курсу, групи КІ-4
спеціальності
123 Комп'ютерна інженерія

Притула О.С.

Керівник Соловська І.М.

Рецензент Цюха А.Г.

Одеса – 2023 р.

ДОВІДКА

кафедри КН про виконану бакалаврську роботу
студента 4 курсу ФКПІ та КН групи КІ-4

Притули Олександра Сергійовича

на тему Дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G

Висновок нормоконтролера попозитивного записки до кваліфікаційної роботи виконавця з науковим порушенням 2023 р.
визначення науковий ступінь, вчене звання, посада МІУ, який має вплив
Нормоконтролер в.к. каф. ІТ І.В. Калашнік
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату відносно з ідентифікацією ID № 1015327953 унікальності підтверджено

Відповідальна особа в.к. каф. ІТ І.В. Калашнік
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) бакалаврської роботи

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Притули О.С. проведена "23" 06 2023 р.
(прізвище і б.)

Висновки виконана робота відповідає вимогам, якісні проведені розрахунки підтверджують достатню кваліфікаційний рівень виконавця. Метою роботи було проведення дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G. Виконано дослідження за допомогою встановленої мережної мережі, отримано результати дослідження впливу параметрів мережі на якість надання послуг мережі IoT/4G.

Виконана робота бакалавра відповідає вимогам стандарту та рекомендацій до захисту в ДЕК.

Члени комісії К.т.н., доц. Соловєва Т.М.
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і б.)
К.т.н., доц. Тршор'єва Т.І.
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і б.)
К.т.н., доц. Ціпка А.Г.
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і б.)

МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерних наук
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 12 Інформаційні технології
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КН

к.т.н., доц.

І.М. Соловська

“ 7 ” 04 2023 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

Притулі Олександр Сергійовичу

1. Тема роботи: Дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G

керівник роботи к.т.н., доцент каф. КН Соловська І.М.

затверджені наказом закладу вищої освіти від 7 квітня 2023 р. № 587

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1) Архітектура мережі IoT/4G/LTE технології NB-IoT, протоколи та інтерфейси згідно рекомендацій 3GPP Rel. 13-14. 2) Характеристики технологій та номенклатура послуг, які надаються в мережі IoT/4G/LTE NB-IoT. 3) Специфікації 3GPP та рекомендації Y.1541 та G.1000, щодо регламентації показників якості обслуговування QoS в мережі IoT/4G/LTE NB-IoT. 4) Технічні специфікації 3GPP щодо впровадження інфраструктури E-UTRAN мережі IoT/4G/LTE NB-IoT.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Розділ 1: Огляд технологій мережі Інтернет речей 4G/LTE

Розділ 2: Вузловий тензорний метод дослідження характеристик якості QoS

Розділ 3: Вирішення задачі визначення характеристик якості надання послуг мережі 4G/IoT

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

Слайд 1 – Архітектура мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE на базі технології NB-IoT/LTE

Слайд 2 – Вузловий тензорний метод дослідження характеристик якості QoS

Слайд 3 – Визначення середнього часу затримки пакетів в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE при взаємодії базових станцій eNode/NB-IoT

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

Слайд 5 – Аналіз отриманих результатів


6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв


7. Дата видачі завдання 25.11.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	14.04.2023	вис
2	Огляд технологій мережі Інтернет речей 4G/LTE	21.04.2023	вис
3	Вузловий тензорний метод дослідження характеристик якості QoS	5.05.2023	вис
4	Вирішення задачі визначення характеристик якості надання послуг мережі 4G/IoT	18.05.2023	вис
5	Висновки та рекомендації	26.05.2023	вис
6	Перелік посилань	2.06.2023	вис
7	Додаток А. Перелік демонстраційного матеріалів	12.06.2023	вис
8			

Студент 
(підпис)

О.С. Притула

Керівник роботи 
(підпис)

І.М. Соловська

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської роботи: 71 с., 13 рисунків, 7 таблиць, 1 додаток, 23 джерела.

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МЕРЕЖА 4G, ТЕХНОЛОГІЯ LTE, ТЕХНОЛОГІЯ NB-ІОТ, МЕРЕЖА РАДІОДОСТУПУ E-UTRAN, ОПОРНА МЕРЕЖА EPS, БАЗОВА СТАНЦІЯ E-NODE-B, 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 Інтернет речей, який обслуговується в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE на базі технології NB-IoT.

Мета роботи – дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G.

Метод дослідження – вузловий тензорний метод.

У бакалаврській роботі для існуючої мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE розглянуто надання послуг Інтернету речей на базі технології NB-IoT. Розглянуто можливості розрахунку характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G, для чого запропоновано математичний апарат тензорного аналізу. На конкретному прикладі продемонстровано розв'язання задачі визначення характеристик якості мережі QoS і отримано результати ефективного використання мережевих ресурсів при гарантованому мінімальному часі доставки пакетів.

ABSTRACT

Text part of the bachelor thesis: 71 p., 13 figures, 7 tables, 1 appendix, 23 sources.

INTERNET OF THINGS, 4G NETWORK, LTE TECHNOLOGY, NB-IoT TECHNOLOGY, E-UTRAN RADIO NETWORK, E-NODE-B BASE STATION, S-GW SERVICE GATEWAY, P-GW PACKET GATEWAY, NODAL TENSOR METHOD, TRAFFIC INTENSITY, QUALITY OF SERVICE CHARACTERISTICS, AVERAGE PACKET DELAY TIME, PACKET QUEUE LENGTH

Object of study – Internet of Things traffic served in the E-UTRAN/LTE radio access network based on NB-IoT technology.

The purpose of this paper is to study the characteristics of the quality of IoT/4G network services.

Research method – nodal tensor method.

In the bachelor's thesis, the provision of Internet of Things services based on NB-IoT technology is considered for the existing E-UTRAN/LTE radio access network. The possibilities of calculating the characteristics of the quality of IoT/4G network services are considered, for which the mathematical apparatus of tensor analysis is proposed. On a specific example, the solution of the problem of determining the quality characteristics of the QoS network is demonstrated and the results of efficient use of network resources with guaranteed minimum packet delay time are obtained.

ВІДГУК КЕРІВНИКА

на бакалаврську роботу студента Притули О.С.
на тему «Дослідження характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G»

Сучасним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні є подальше впровадження технології Інтернет речей IoT на базі існуючих мереж четвертого покоління 4G/LTE та перехід до перспективних мереж п'ятого покоління 5G/NR. Важливим питанням на етапі подальшого впровадження мережі Інтернету речей є оцінка характеристик якості надання послуг, саме цьому питанню присвячена бакалаврська робота.

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

Під час написання бакалаврської роботи студ. Притула О.С. 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 роботі.

Бакалаврська робота студ. Притула О.С. заслуговує оцінки «відмінно», а студент присвоєння за заявленою спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія кваліфікації бакалавр з комп'ютерної інженерії.

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



I. М. Соловська

РЕЦЕНЗІЯ

на бакалаврську роботу студента Притули О.С.
на тему «Дослідження характеристик якості надання послуг мережі
IoT/4G»

Бакалаврська робота студ. Притули О.С. присвячена дослідженню характеристик якості надання послуг Інтернету речей на базі мережі мобільного зв'язку технології 4G/LTE-Advanced.

Актуальність теми безсумнівна, адже сьогодні основним напрямком розвитку мереж Інтернету речей є використання мережі мобільного зв'язку 4G/LTE-Advanced на базі технології NB-IoT. Бакалаврська робота виконана у повному обсязі у відповідності з завданням.

У роботі розглянуті питання впровадження мережі Інтернету речей на базі технології NB-IoT для існуючої мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced мобільного оператора. За допомогою вузлового тензорного методу отримані результати оцінки характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G. Отримані результати дозволяють дати рекомендації щодо конфігурації з'єднання базових станцій e-NodeB в мережі радіодоступу E-UTRAN технології LTE-Advanced.

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

До недоліків бакалаврської роботи варто віднести:

1. Доцільно було б розглянути декілька топологій побудови мережі E-UTRAN мережі LTE-Advanced.
2. При дослідженні характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G можливо було б розглянути ще ймовірнісні характеристики, наприклад, ймовірність втрат пакетів.

Вказані недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

В цілому бакалаврська робота студ. Притули О.С. відповідає вимогам до випускних бакалаврських робіт та заслуговує оцінки «добре», а студент присвоєння, за заявленою спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія, кваліфікації бакалавр з комп'ютерної інженерії.

Рецензент,
к.т.н., доцент каф. КБ та ТЗІ
Державного університету
інтелектуальних технологій
та зв'язку



Л.Г. Йона

Ім'я користувача:
Анна Серединко

Дата перевірки:
23.06.2023 14:30:15 EEST

Дата звіту:
23.06.2023 14:31:33 EEST

ID перевірки:
1015683841

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100001433

Назва документа: Бакалаврська робота_Притула_О_13_06_2023

Кількість сторінок: 65 Кількість слів: 14103 Кількість символів: 101176 Розмір файлу: 1.51 MB ID файлу: 1015327953

15.5% Схожість

Найбільша схожість: 3.61% з Інтернет-джерелом (<https://visn-icct.uu.edu.ua/index.php/icct/issue/download/1/1>)

14.9% Джерела з Інтернету 929 Сторінка 67

3.51% Джерела з Бібліотеки 7 Сторінка 73

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнено

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 355

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ 4G/LTE	12
1.1 Класифікація технологій Інтернет речей IoT	12
1.2 Технологія NB-IoT	13
1.3 Технологія LTE-M	21
1.4 Характеристики послуг мережі Інтернету речей IoT	23
1.5 Архітектура мережі 4G/LTE	26
1.6 Архітектура мережі IoT/4G на базі технології NB-IoT/LTE	34
1.7 Підтримка характеристик якості обслуговування QoS	36
1.8 Обґрунтування необхідності дослідження характеристик якості IoT/4G ..	38
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕРЕЖІ IoT/4G ЗА ДОПОМОГОЮ ВУЗЛОВОГО ТЕНЗОРНОГО МЕТОДУ	41
2.1 Підтримка характеристик якості обслуговування QoS в мережі IoT.....	41
2.2 Постановка задачі та вибір математичного апарату	42
2.3 Особливості побудови тензорної моделі	44
2.4 Вузловий тензорний метод визначення характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G.....	47
3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕРЕЖІ IoT/4G.....	52
3.1 Розрахунок характеристик якості QoS надання послуг мережі IoT/4G на базі технології NB-IoT	52
3.2 Аналіз отриманих результатів	59
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ.....	64
Додаток А. ПЕРЕЛІК ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	66

ВСТУП

Сучасним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні є подальше впровадження технології Інтернет речей IoT (Internet of Things) на базі існуючих мереж четвертого покоління 4G/LTE (Long Term Evolution) та перехід до перспективних мереж п'ятого покоління 5G/NR (New Radio).

Оператори мобільного зв'язку та виробники обладнання передбачають подальший розвиток послуг Інтернету речей IoT, який буде супроводжуватися подальшим розвитком міжмашинних комунікацій M2M (Machine to Machine) та з'єднань між пристроями D2D (Device to Device) без використання інфраструктури мобільної мережі. В якості основних технологій, які реалізують мережу Інтернету речей IoT використані: LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), EC-GSM (Extended Coverage GSM) та NB-IoT (NarrowBand-IoT Internet of Things).

Для відповідної та злагодженої роботи мережі Інтернету речей IoT на базі мобільної мережі 4G (Generation) технології LTE необхідно забезпечувати обслуговування трафіку з підтримкою характеристик якості QoS (Quality of service) та досягати нормативних значень таких характеристик, як: пропускна спроможність, час затримки передачі пакетів та довжина пакетної черги.

Рішення задачі підтримки характеристик якості QoS при наданні послуг мережі IoT/4G передбачає вибір певної послідовності вузлів IoT за заданими критеріями, раціонального використання і балансування мережевих буферних ресурсів і визначення характеристик якості обслуговування трафіку з різними класами QoS. Такі задачі можна вирішити за допомогою використання вузлового тензорного методу, що дозволяє знайти значення характеристик обслуговування трафіку QoS і необхідну функціональність мережевого обладнання вузлів і трактів взаємодії відповідно.

В цьому сенсі й розрахований зміст бакалаврської роботи, який розглядає дослідження характеристик якості надання послуг Інтернету речей IoT, реалізованої на базі мережі радіодоступу E-UTRAN технології LTE/4G та базових станціях e-NodeB технології NB-IoT (Narrow Band Internet of Things). Рішення поставленої задачі дозволить виконати обґрунтований вибір топології з'єднання базових станцій e-NodeB/NB-IoT. Отримані результати дослідження дозволять отримати можливість проводити різносторонню оцінку параметрів діючих мереж та мереж, та оцінити й розрахувати характеристики, що можуть характеризувати взаємодію мереж Інтернету речей.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ 4G/LTE

1.1 Класифікація технологій Інтернет речей IoT

Сучасним напрямком розвитку мереж мобільного зв'язку (ММЗ) в Україні є подальше впровадження технологій Інтернет речей IoT (Internet of Things) на базі існуючих мереж четвертого покоління 4G/LTE (Long Term Evolution) та перехід до перспективних мереж п'ятого покоління 5G/NR (New Radio).

Сьогодні оператори мобільного зв'язку та основні виробники обладнання ММЗ передбачають подальший розвиток саме послуг IoT та прогнозують подальший зріст кількості реалізованих міжмашинних комунікацій M2M (Machine to Machine) та взаємодії пристроїв D2D (Device to Device). Кількість технологій, які використовують мережі Інтернету речей IoT мережі досить значний. Для підключення різних пристроїв IoT на невеликі відстані застосовуються технології, що використовують Mesh-архітектуру, такі як: 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks), Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee IP та інші. Для зв'язку на значні відстані використовуються технології C-UNB (Cooperative Ultra Narrowband), енергоефективна технологія дальньої дії LPWA (Low-Power Wide-Area) та технологія LoRaWAN. Особливої уваги слід приділити технологіям, які використовують існуючі інфраструктури мереж мобільного зв'язку, такі як EC-GSM (Extended coverage Global System of Mobile IoT), LTE-M (Long Term Evolution for Machine-Type Communications) та NB-CIoT (Narrowband Cellular IoT) [1].

3GPP (3rd Generation Partnership Project) пропонує три варіанти технологій для реалізації мережі Інтернет речей IoT на базі існуючих мереж мобільного зв'язку [1]:

- EC-GSM-IoT передбачає організацію мережі Інтернет речей IoT на базі мережі стандарту GSM з розширеним покриттям та використанням «низького» частотного діапазону;

- LTE-M на базі існуючої мережі мобільного зв'язку технології LTE, який адаптований для комунікацій M2M та D2D з використанням енергоефективної роботи (строком до 10 років) у спеціальному частотному діапазоні шириною 1,4 МГц;

- NB-IoT на базі вузькосмугового NB (Narrow Band) на базі мережі мобільного зв'язку технології LTE, який використовує існуючу смугу 180 кГц.

Важливою перевагою вищезазначених технологій NB-IoT, LTE-M і ES-GSM-IoT є те, що їх впровадження базується на існуючій інфраструктурі мережі мобільного зв'язку, не потребує встановлення нового обладнання, а лише оновлення програмного забезпечення мережі в існуючих частотних діапазонах.

Відомо, що найбільш доцільною для розгортання низькошвидкісної мережі IoT є технологія NB-IoT, а найбільш перспективною – LTE-M у напрямку переходу до мереж п'ятого покоління 5G. Порівняння технологій Інтернету речей IoT наведено в табл. 1.1 [2-5].

Існуюча інфраструктура мереж IoT використовує безліч IoT-пристроїв, які виставляють різні вимоги до мережі Інтернету речей. В одних випадках для надання послуг IoT може знадобитися висока швидкість передачі даних, а в інших – максимальне покриття для забезпечення вільного переміщення місцевістю.

В цілому, доцільною буде наступна класифікація. Пристрої Інтернету речей, які класифікуються як Cat (Cat M1) та використовують низькошвидкісні технології NB-IoT/Cat-M2 та ES-GSM потребують швидкості передавання до 200 кбіт/с – це датчики світла, води та зараження повітря, промислові датчики та лічильники світла та води, переносні користувацькі фітнес-браслети, часи, розумні паркування та інші.

Пристрої Cat-M1/Cat-M/LTE-M – використовують швидкості передавання даних до 100 Мбіт/с для мультимедійних таблоїдів, пристроїв відеостереження здоров'я Health, розумних годинників, пристроїв безпеки, систем моніторингу, відеонагляду та роутерів й мостів IoT Aggregators.

1.2 Технологія NB-IoT

Розглянемо більш детально можливості використання технології NB-IoT для реалізації мережі Інтернет речей. Специфікаціями 3GPP в Rel. 13-14 [6-8] технологія NB-IoT мережі LTE (LTE-Advanced, LTE Pro) решламентовані наступні характеристики, як: використання мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), забезпечення дальності зв'язку і підтримка значного терміну служби акумуляторної батареї (до 10 років). Бюджет радіолінії технології NB-IoT був поліпшений на 20 дБ порівняно з радіолінією технології LTE-Advanced. Серед основних технологічних особливостей, що закладені в технології NB-IoT слід зазначити наступні [6]:

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технологій 3GPP для IoT

Характеристики	LTE-M (1,4 МГц)	NB-IoT (200 кГц)	ES-GSM (200 кГц)	LoRaWAN
Поліпшене покриття, в приміщенні	156 дБ (+15 дБ)	164 дБ (+20 дБ)	164 дБ (+ 20 дБ)	156 дБ (+15 дБ)
Радіус дії, км	10	10-15	10-15	10-20
Ємність, термінал/стільник/180 кГц	52 000			
Швидкість передавання даних, Мбіт/с	1	0,2	0,07	0,06
Термін автономної роботи, років	10			
Сценарій використання спектру	In-band	In-band, Stand along, Guard-band	Stand along	In-band, Stand along, Guard-band

- ширина радіоканалу становить 180 (200) кГц для абонентського обладнання в лінії вниз, так і вгору;
- застосування OFDMA-доступу в лінії вниз з рознесенням піднесучих 15 кГц (для нормального префіксу CP) або до 3,75 Гц;
- використання в лінії вгору двох режимів: FDMA-доступу з GMSK-модуляцією і SC-FDMA-доступу;
- застосування однієї опорної несучої для синхронізації при різних режимах роботи;
- застосування поліпшеного S1-інтерфейсу до базової мережі CN (Core Network) і пов'язаних радіо протоколів, що визначають системні аспекти, такі як зниження трафіку сигналізації при передачі невеликих обсягів даних від пристроїв NB-IoT;
- використання характеристик каналу, які базуються на споживаній потужності, часі затримки і значенні пропускну здатності, коли їх передбачається задіяти в Gb-інтерфейсі до базової мережі CN.

Фізичні ресурси мережі радіодоступу E-UTRAN технології LTE/4G в лінії вгору розподіляються між пристроями Інтернету речей у вигляді частотно-часових блоків PRB (Physical Resource Block) (рис. 1.1) [6-8].

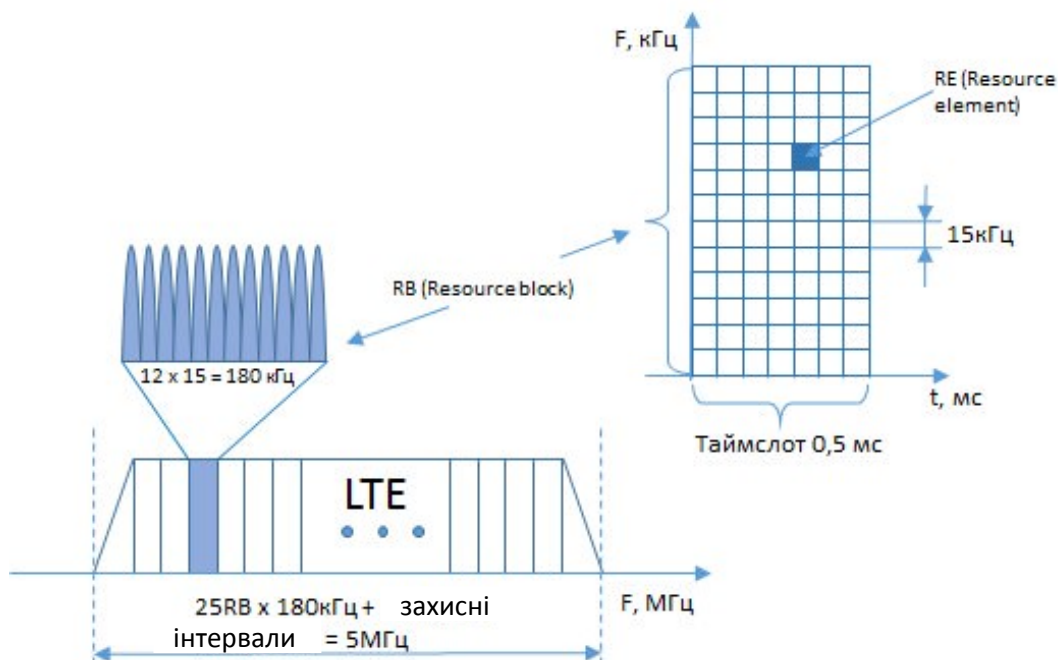


Рисунок 1.1 – Приклад формування частотно-часових блоків технології NB-IoT

Для LTE-сигналу використовується принцип мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів OFDM з рознесенням на 15кГц. У напрямку «вниз» DL (Downlink) від базової станції e-NodeB використовується мультиплексування OFDMA, а напрямку «уверх» UL (Uplink), напрямком до базової станції e-NodeB використовується мультиплексування з частотним розподілом та передаванням на одній несучій SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Несуча в технології LTE розділена на ресурсні блоки RB (Resource block), кожен з яких складається з 12 піднесучих з загальною шириною займаної смуги в $12 \times 15 \text{кГц} = 180 \text{кГц}$ (рис.1.1). Кожен ресурсний блок розділений на $12 \times 7 = 84$ ресурсних елементи RE (Resource element).

Ширина одного каналу технології NB-IoT еквівалентна ширині одного ресурсного блоку RB та 6 – 100 раз менш ніж частотний канал LTE, дані про ширину каналу технології NB-IoT наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристика ширини каналів технології NB-IoT

Ширина каналу, МГц	0,18	1,4	3	5	10	15	20
Кількість N_{RB}	1	6	15	25	50	75	100

Ресурси одного такого частотно-часового блоку PRB, ширина якого по частоті для технології NB-IoT дорівнює відповідній ширині каналу, містять [6-8]:

1) частотний канал з 12 піднесучих радіочастот шириною 15 кГц кожний, в частотній області з використанням фазової квадратурної маніпуляції QPSK, квадратурно-амплітудної модуляції 16QAM або 64QAM, що рознесені між собою на 15 кГц, загальна ширина частотно-часових блоків PRB складає $12 \times 15 \text{кГц} = 180 \text{кГц}$;

2) часовий канал, розділений на субфрейми довжиною 1 мс, що включають два слоти по 0,5 мс кожен, кожен слот утворений шістьма або сіма символами SC-FDMA ($N_{ULsimbl} = 6$ або 7) у часовій області в залежності від типу циклічного префіксу CP;

3) сукупність сигналів: LTE CRS cell (specific reference signal) опорний сигнал стільника, LTE CSI-RS (Channel State Information Reference Signal) опорний сигнал стану каналу, LTE PDCCH (Downlink Control Channel) фізичний канал управління лінії вниз, NB-IoT RE (NarrowBand Internet of Things Radio Equipment) вузькосмуговий канал абонентського обладнання.

Технологія NB-IoT використовує два основні стани протоколу управління радіоресурсами RRC: RRC_Idle (очікування) і RRC_Connected (з'єднання). У режимі очікування RRC Idle пристрої є енергозберігаючими, а також радіоресурс, які будуть використані для передачі звітів про виміри і опорних (референсних) сигналів в лінії вгору, а в режимі з'єднання RRC_Connected абонентські пристрої отримують або передають дані безпосередньо.

Стандартизація 3GPP визначає три основних режими використання смуги частот для технології NB-IoT (рис. 1.2) [6]:

1) In-band, коли всередині полоси частот технології LTE для пристроїв NB-IoT використовуються ресурсні радіоблоки всередині радіоканалу, вже виділеного для мережі LTE (рис. 1.2а);

2) Stand along, це окрема смуга частот, незалежна від смуги технології LTE, коли дозволений спектр для пристроїв NB-IoT обирається у дозволених каналах мереж 3GPP на принципах рефармінгу, а фактично заміщення (наприклад, для технології LTE і стандарту GSM);

3) Guard band, коли смуга всередині захисної полоси частот технології LTE для роботи пристроїв NB-IoT використовує надлишковий спектр частотного каналу в межах виділеного каналу LTE на його невикористаній частині.

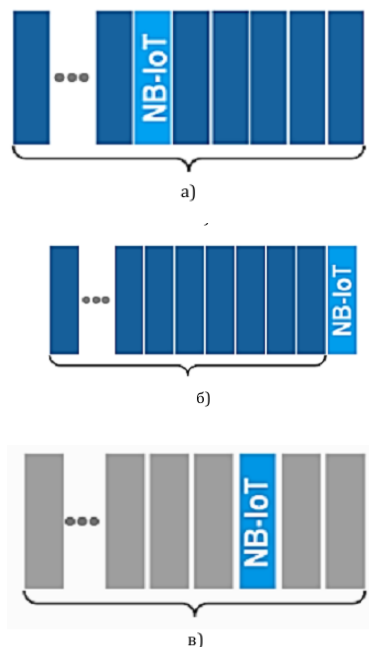


Рисунок 1.2 – Режими використання смуги частот для технології NB-IoT, а) режим In-band, б) Stand alone, в) Guard band

Виходячи з вищезазначених сценаріїв, для організації мереж Інтернету речей IoT/M2M в технологіях NB-IoT можуть бути використані смуги мережі GSM, так як по ширині канал NB-IoT збігається зі стандартним каналом GSM (рис. 1.2а).

Як видно на рис. 1.2б, при використанні каналу технології LTE шириною 10 МГц займана ефективна ширина каналу, що визначається числом використовуваних 50 ресурсних радіоблоків, що становить 9 МГц і зліва і справа від основного спектру сигналу виникають захисні смуги Guard band (рис. 1.2в) шириною по 500 кГц. Таким чином, в цих захисних смугах при ширині каналу LTE 5 і 10 МГц можна передати як мінімум два канали NB-IoT, а при ширині каналу 15 і 20 МГц – по два і більше.

При передачі вниз на фізичному рівні NB-IoT визначені канали синхронізації NPSS: первинний і вторинний, а також канали:

- передачі даних NPDSCH (Narrow-band Physical Downlink Shared Channel);
- управління NPDCCH (Narrowband Physical Downlink Control Channel);
- передачі системної інформації NPBCH (Narrowband Physical Broadcast Channel).

Структура кадру вниз технології LTE зберігається. Кадр тривалістю 10 мс складається з 10 субкадрів, кожен по 1 мс (два слоти по 0,5 мс). Канальний ресурс відокремлений на ресурсний блок RB, де в смузі 180 кГц передача йде на 12 піднесучих з рознесенням між частотами 15 кГц.

У часовій області в кожному слоті передають 7 OFDM-символів (14 в субкадрі). Розподіл каналів показано на рис. 1.3. Кожен кадр починається передачею каналу NPBCH, який займає нульовий субкадр. В кожному 5-му субкадрі передають сигнал NPSS, а в останньому субкадрі кожного парного кадру сигнал NSSS. У решти вільних субкадрах розміщуються канали передачі даних NPDSCH або управління NPDCCH [6].

Парний кадр

Непарний кадр

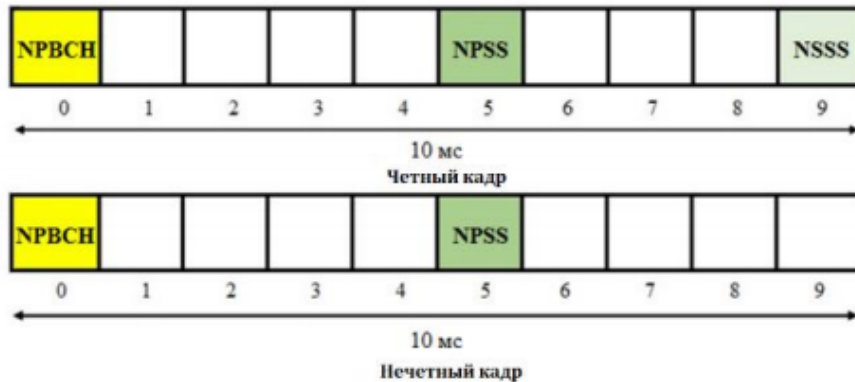


Рисунок 1.3 – Канальний ресурс NB-IoT

Технологія NB-IoT/LTE має можливість передавати дані в напрямку вверх UL на одній піднесучій. Якщо пристрою виділяються блоки ресурсних груп, які з одного чи кількох ресурсних блоків RB, то для технології NB-IoT мінімальною одиницею є ресурсний елемент RE, ними задається радіоресурс доступний пристрою IoT. В цьому випадку пристрій передає сигнал в UL на одній піднесучій, яка становить 15кГц. При цьому, для технології NB-IoT стандартизовано поділ ресурсних блоків RB на 48, тоді кожний має ширину 3,75кГц у напрямку UL. Тривалість ресурсних елементів RE становить 2 мс, тому інформаційна ємність їх змінюється (рис. 1.4).

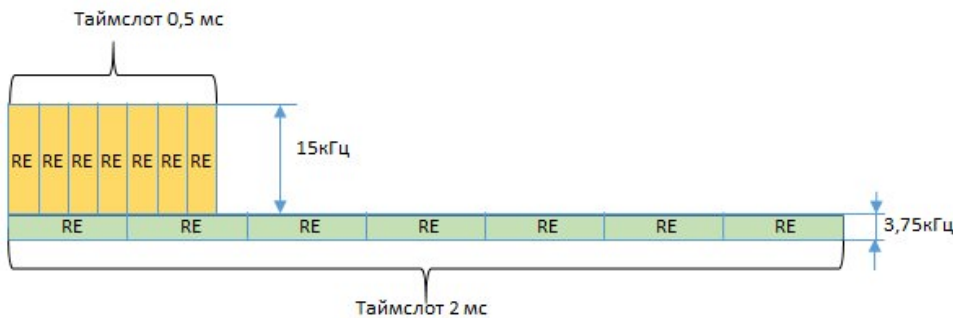


Рисунок 1.4 – Тривалість ресурсних елементів RE

Передача сигналу у вузькій смузі на одній піднесучій 15 кГц або 3,75 кГц, дозволяє значно збільшити спектральну щільність сигналу, та відповідно відношення сигнал/шум, що дуже важливо для пристроїв IoT, які мають набагато менш потужні передавачі, ніж у базової станції e-NodeB. Така ситуація для технології NB-IoT, так само, як і для технології LTE є важливою, адже потужність пристроїв IoT обмежена та становить 23дБм (200мВт).

Швидкості передачі для пристроїв NB-ІоТ досягаються тільки при високій якості сигналу. В цілому, відповідно до Rel. 13, швидкість передавання в низьсхідному напрямку становить 25,2 кбіт/с (рис. 1.5).

Сигнальна взаємодія, що включає призначення каналу DCI і підтвердження прийому АСК, не адаптована, як для технології LTE, для отримання максимальних швидкостей.

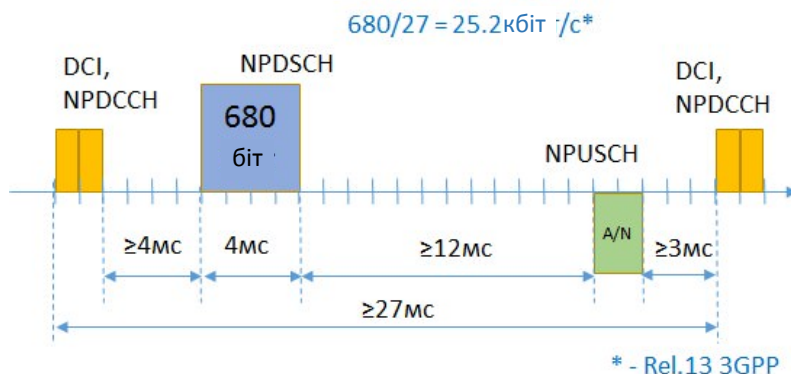


Рисунок 1.5 – Швидкість передачі низьсхідному напрямку DL

З рис. 1.5 видно, що в технології NB-ІоТ, на відміну від технології LTE, пристрій ІоТ не може зайняти весь доступний частотний ресурс. Тому частину радіоресурсу базової станції e-NodeB, що залишилася, можливо використовувати для взаємодії з іншими пристроями ІоТ. Аналогічна ситуація у висхідному напрямку UL (рис. 1.6). Швидкість передавання даних для збільшеного NPUSCH до 1000 біт дозволяє досягти швидкості 22,2 кбіт/с для Single Tone та до 58,8 кбіт/с для Multi-Tone.

кбіт

біт

кбіт

біт

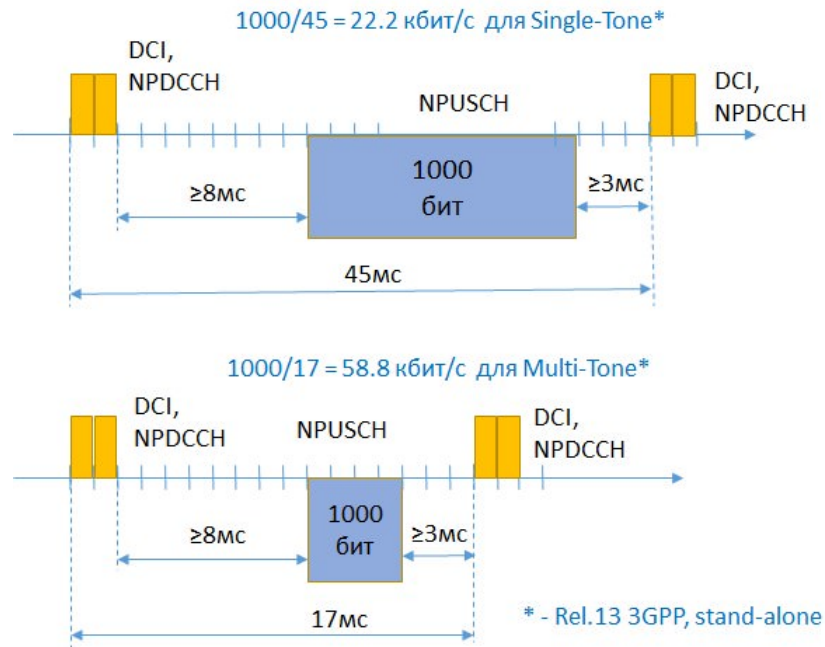


Рисунок 1.6 – Швидкість передачі у висхідному напрямку UL

Так, використання Dual-HARQ і збільшений розмір самих транспортних блоків до 2536 біт (реліз 14 3GPP), дозволяють збільшити швидкість передачі у низьхідному DL та висхідному UL напрямках більш ніж 100 кбіт/с.

1.3 Технологія LTE-M

Розглянемо більш детально можливості використання технології LTE-M для реалізації мережі Інтернет речей [6-8]. Технологія LTE-M це скорочення від назви LTE-MTC LPWA (Low Power Wide Area) для пристроїв Інтернету речей IoT з малою потужністю і великим радіусом. Ця технологія базується на інфраструктурі існуючої мережі LTE та розрахована на малопотужні, прості в реалізації IoT-пристрої (Cat M1), що забезпечує більший радіус покриття, ніж LTE-мережа.

Збільшення радіусу дії як в технології LTE-M, так і в технології NB-IoT досягається шляхом Power boosting, коли потужність з невикористовуваних піднесучих перерозподіляється на користь активних піднесучих, а також завдяки додатковим повторам при передачі транспортних блоків (стандартом передбачено до 2048 повторів пакетів). Досяжний радіус технології LTE-M становить до 15 км, але при цьому навіть IoT-пристрої, що знаходяться в украй поганих радіо умовах, наприклад, на багаторівневих підземних парковках, зможуть надсилати й отримувати дані Deep indoor.

Максимальна теоретично досяжна швидкість для технології LTE-M становить 1 Мбіт/с, що значно вище, ніж для технології NB-IoT, яка забезпечує швидкість до 170 кбіт/с, і дозволяє розширити сферу застосування технології (наприклад, можливе використання її для передачі трафіку з камер відеоспостереження). Режим дуплексування прийому і передачі – напівдуплексний. Стандартом також вводяться нові фізичні канали в низхідному каналі – канал управління MPDCCH (MTC Physical Downlink Control Channel), канал для передачі даних і сигнальних повідомлень RRC (Radio Resource Control) і NAS (Non Access Stratum) протоколів MPDSCH, а також канал широкомовної системної інформації MPBCH; в висхідному – канал випадкового доступу MPRACH, канал управління MPUCCH, канал даних і сигнальних повідомлень протоколів 3-го рівня MPUSCH.

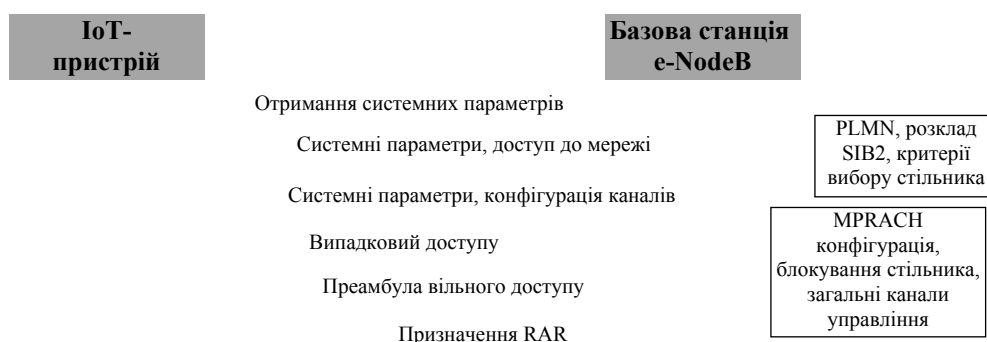
Розглянемо процес встановлення з'єднання для технології LTE-M при виділенні частотно-часового ресурсу (рис. 1.7) [6].

Крок 1. IoT-пристрій повинен отримати системні параметри, щодо початкового доступу до мережі (наприклад, PCI – фізичний ідентифікатор стільника), передану в першому системному блоці SIB1 (System Information Block) інформацію в каналі управління MPDSCH.

Крок 2. Пристрій IoT зчитує SIB2 для отримання інформації про параметри фізичних каналів, зокрема, каналу MPRACH (наприклад, prach-FreqOffset – визначає позицію блоків каналу випадкового доступу по частоті, rootSeqIndex і prachCS – параметри для генерації преамбули випадкового доступу).

Крок 3. Декодувавши інформацію SIB2, пристрій IoT може знайти канал випадкового доступу MPRACH і відправити преамбулу, повідомляючи базову станцію e-NodeB про те, що є дані для відправки або скачування.

Крок 4. Преамбулою випадкового доступу є послідовність, що володіє властивостями нульової авто- і взаємної кореляції, а також постійною амплітудою. На відміну від технології LTE, пристрій посилає преамбулу не один раз, а numRepetitionPreambleAttempt раз (параметр SIB2), що збільшує час затримки на встановлення з'єднання і значно знижує пропускну здатність мережі.



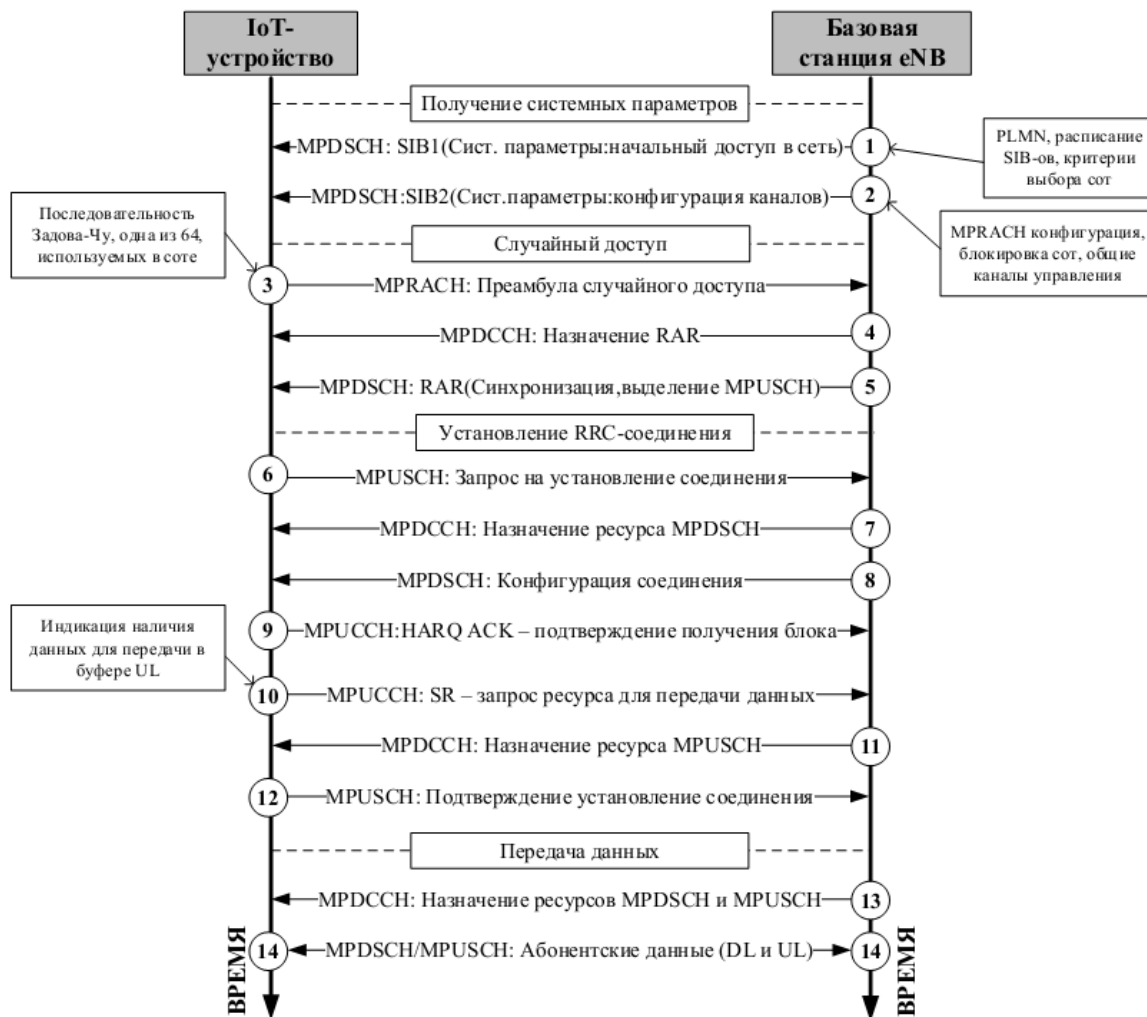


Рисунок 1.7 – Алгоритм встановлення з'єднання для LTE-M

Крок 5. Відповідь на преамбулу випадкового доступу міститься в повідомленні RAR (Random Access Response). Для того, щоб його «знайти», IoT-пристрій зчитує інформацію каналу управління MPDCCH (крок 4), де функція розподілу радіоресурсів рівня управління множинним доступом до середовища MAC (Medium Access Control) відправляє повідомлення про призначення IoT-пристрою ресурсів каналів MPDSCH і MPUSCH. На п'ятому кроці IoT-пристрій отримує RAR, що містить наступну інформацію: ідентифікатор отриманої преамбули, виділення ресурсних блоків у висхідному каналі MPUSCH з певною модуляцією, кодуванням і числом повторних передач, а також інформацію для синхронізації висхідного каналу TA (Timing Advanced).

Крок 6-8. У виділеному каналі MPUSCH IoT-пристрій повинен відправити запит на встановлення з'єднання разом зі своїм ідентифікатором для подальшої авторизації (крок 6), потім знову декодує MPDCCH (крок 7), щоб отримати

інформацію про те, в якому субкадрі eNodeB відповідає на запит, відправлений на шостому кроці (крок 8).

Крок 9-14. Відправивши цю відповідь, мережа повідомила користувача про те, що ресурси для нього активовані і абонент може відправляти і дані (крок 14). З цього моменту абонент відправляє підтвердження про успішність отримання транспортних блоків (крок 9) за допомогою механізму HARQ (Hybrid Automated Repeat Request), а також запити на виділення каналів SR (Scheduling Request) - крок 10. Для того, щоб завершити цю сигнальну взаємодію, IoT-пристрій повинен направити повідомлення «RRC Connection Complete» (крок 12), попередньо отримавши ресурси каналу MPUSCH в каналі MPDCCH (крок 11). Кожен пакет користувача в висхідному UL і DL каналі призначається каналом управління MPDCCH (крок 13).

1.4 Характеристики послуг мережі Інтернету речей IoT

Інтернет речей – концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані датчики, а також, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичними пристроями і комп'ютерними мережами, за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку [1].

Окрім датчиків, мережа може мати виконавчі пристрої, вбудовані у фізичні об'єкти і пов'язані між собою через проводові чи без проводові мережі. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливість зчитування та приведення в дію, функцію програмування та ідентифікації, а також дозволяють виключити необхідність участі людини, за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів [2-4].

В мережі Інтернету речей використовуються наступні групи послуг, викладені в Rel. 14 3GPP [6].

Послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB (Enhanced mobile broadband), до яких віднесені: високошвидкісний доступ до Інтернет для Веб-перегляду, потокове відео, доповнена AR (Augmented reality) та віртуальна реальність VR (Virtual reality).

Всі послуги eMBB зумовлюють максимізації швидкості передачі даних, забезпечення надійності даних та ймовірність втрати та помилок пакетів $P_{PER} = 10^{-3}$. Для реалізації послуг eMBB мережі IoT необхідно передбачити наступні технологічні можливості на базі технології LTE IoT/4G [6]:

- висока пропускна спроможність мережі для густонаселених районів, як усередині приміщень, так і на вулиці, наприклад, в міських центрах, офісних будівлях або громадських місцях, таких як, стадіони або конференц-зали;

- розширені можливості підключення користувачів з різними IoT-пристроями;

- висока мобільність користувачів, в тому числі й в рухомих транспортних засобах.

Послуги мобільного широкосмугового доступу eMBB є найбільш затребуваними в промисловій ділянці IoT, таких як [6]:

- послуги агросектора (моніторинг стану ґрунтів, фіксування показників вологи датчиками, онлайн спостереження погодних умов);

- послуги логістики (доставка товарів, автоматизований спосіб вирішення проблем);

- послуги ритейлу (забезпечення споживачів товарами виходячи з потреби, магазини без касирів, додаткова реальність – камери, що розпізнають емоції покупців біля прилавків з товарами);

- послуги інфраструктури міст (планування маршрутів транспорту на підставі даних про переміщення людей по місту, відеоспостереження, контроль за рівнем води в водоймах, датчики шуму і забруднення);

- послуги телекому ("розумні" сервіси і додатки на базі мережі LoRaWAN (Low-power Wide-area Network), це бездротова технологія передачі невеликих за обсягом даних на дальні відстані, яка розроблена для розподілених мереж телеметрії, міжмашинної взаємодії та Інтернету речей);

- послуги медицини (електронна медична карта, комп'ютеризований введення замовлень лікарів, ePrescription, телемедицина, інформатика здоров'я споживачів, управління знаннями в галузі охорони здоров'я (прикладі включають ресурси лікарів, такі як Medscape і MDLinx), віртуальні команди охорони здоров'я (для трансмуральної допомоги), mHealth або mHealth.

Послуги масивного машинного зв'язку mMTC (Massive machine communication type) забезпечують вузькосмуговий доступ в Інтернет для пристроїв зондування, вимірювання та моніторингу. Послуги mMTC забезпечують функціонування розумних будинків, місць з надвисокою концентрацією датчиків та надають моніторинг персоналу і обладнання на виробництві.

Послуги надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications): забезпечують послуги автоматизації виробництва, автономного керування та віддаленої хірургічної операції, віддалений контроль абонента, дрони, камери спостереження, Smart Grid розумні мережі, Real-time (послуги з оприлюднення екстрених служб: поліції, швидкої допомоги служб, тактильний інтернет (віддалена хірургія, діагностика).

Послуги URLLC мають значні вимоги до характеристик якості QoS, вимагають часу затримки $t_{\text{затр}} = 1$ с та ймовірністю втрат пакетів $P_{\text{PER}} = 10^{-5}$ згідно ITU-R M.2410.0.

Розглянувши основні послуги мережі Інтернету речей IoT слід зазначити, що їхнє впровадження потребує зміни існуючої інфраструктури мережі мобільного зв'язку операторів України. Це пов'язано насамперед з вимогами до надання послуг, а саме характеристик якості QoS (Quality of Service). Значна кількість перелічених послуг не потребує значної пропускної спроможності мережі, однак вимагає нормативного значення часу затримки пакетів та ймовірності їхньої втрати.

В даній роботі розглядаються послуги масивного машинного зв'язку mMTC, які забезпечують вузькосмуговий доступ IoT-пристроїв телеметрії, вимірювання та моніторингу, взаємодію пристроїв M2M, D2D, забезпечують функціонування розумних будинків, місць з надвисокою концентрацією датчиків та надають моніторинг персоналу і обладнання на виробництві.

1.5 Архітектура мережі 4G/LTE

3GPP Long Term Evolution (LTE) – технологія подальшого розвитку мереж мобільного зв'язку, яка забезпечує передачу даних та принципи побудови мереж мобільного зв'язку з використанням мультиплексування за допомогою ортогональних несучих OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), багатоантенних систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) та системної архітектури мережі SAE (System Architecture Evolution) на базі e2e IP-комутації пакетів [9-13].

Відповідна технологія має реалізації, розроблені та затверджені 3GPP у Rel. 8-14, технічні характеристики кожного релізу наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики основних релізів технології LTE

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	2×2, 4×4	MIMO 8×8	MIMO 8×8
Агрегація несучих	-	5 CA	32 CA
Категорія абонентського пристрою	UE cat. 3,4	UE cat. 6,9, 10	UE cat. 11,12,16,18

Для даного етапу розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні використовуємо реліз технології LTE-Advanced (4G) Rel. 10-12.

Мережа четвертого покоління 4G на базі технології LTE-Advanced складається з мережі радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) та опорної пакетної мережі EPC (Evolved Packet Core). Мережа радіодоступу E-UTRAN забезпечує підключення абонентських пристроїв UE (User Equipment) до пакетних базових станцій e-NodeB (evolved NodeB), які підтримують мобільність абонентів за рахунок модулів мобільності MME (Mobility Management Entity), встановлених при кожній e-NodeB [12].

Пакетне ядро мережі EPC складається з апаратно-програмних засобів, які дозволяють обслуговувати пакетний трафік з інтелектуальними можливостями за

допомогою сервісного шлюзу S-GW (Servicing GateWay) та пакетного шлюзу P-GW (Packet Data Network GateWay) [12-13].

Для забезпечення необхідної функціональності у мережевій архітектурі технології LTE-Advanced передбачено видалення контролеру RNC (Radio Network Control), за рахунок чого керування використанням радіочастотного ресурсу та розподілу навантаження переходить до обладнання базових станцій e-NodeB. Архітектура мережі 4G/LTE-Advanced зображена на рис. 1.8 [12-13].

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).

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. Радіочастотна характеристика для LTE-Advanced визначена у двох технічних документах 3GPP: 36.101 для користувацького обладнання UE (User Equipment) і 36.104 для e-NodeB [12-13].

Мережа технології LTE-Advanced завжди функціонує на базі існуючої мережі мобільного оператора GSM (Global System for Mobile Communications)/GPRS (General Packet Radio Service)/EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Опорна мережа GSM/GPRS/EDGE включає в себе наступні об'єкти [12-13]:

- 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 пристроєм користувача UE та базовою станцією BTS відбувається по інтерфейсу U_m ;

- контролер базових станцій BSC (Base Station Controller), дообладнаний контролером пакетів PCU (Packet Control Unit), який виконує функції концентрації пакетних даних, що надходять від усіх BTS/CCU. Інтерфейс з'єднання контролером базової станції BSC та базовою станцією BTS – Abis, який служить для виконання таких функцій, як передача інформації користувача, сигналізація між BSC і BTS, передача синхросигналів на базову станцію BTS;

– центр комутації MSC (Mobile Switching Center), який об'єднує базу візитних абонентів VLR (Visitor Location Register), забезпечує встановлення з'єднань і надання різних видів послуг, з'єднання між центром комутації MSC/VLR та контролером базових станцій BSC відбувається за допомогою інтерфейсу A;

– шлюзовий центр комутації GMSC (Gateway MSC), який володіє такими ж функціями як і центр комутації MSC та забезпечує взаємодію із зовнішніми мережами мобільного зв'язку PLMN. Інтерфейс з'єднання GMSC з MSC/VLR – E;

– сервісний вузол підтримки GPRS SGSN (Serving GPRS Support Node) виконує функції пакетного комутатора на базі технології 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;

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

– реєстр ідентифікації обладнання EIR (Equipment Identification Register) використовує інтерфейс G_r для перевірки легітимності використання абонентського пристрою UE та його IMEI-коду, виконуючи запити до баз даних IMEI-кодів оператора, що знаходяться в базах даних EIR;

– сервер домашніх абонентів 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. Взаємодія з вузлом SGSN виконується по інтерфейсу Gr, а з модулем мобільності MME та обслуговуючим шлюзом S-GW– по інтерфейсу S6a, з GMSC – по інтерфейсу C.

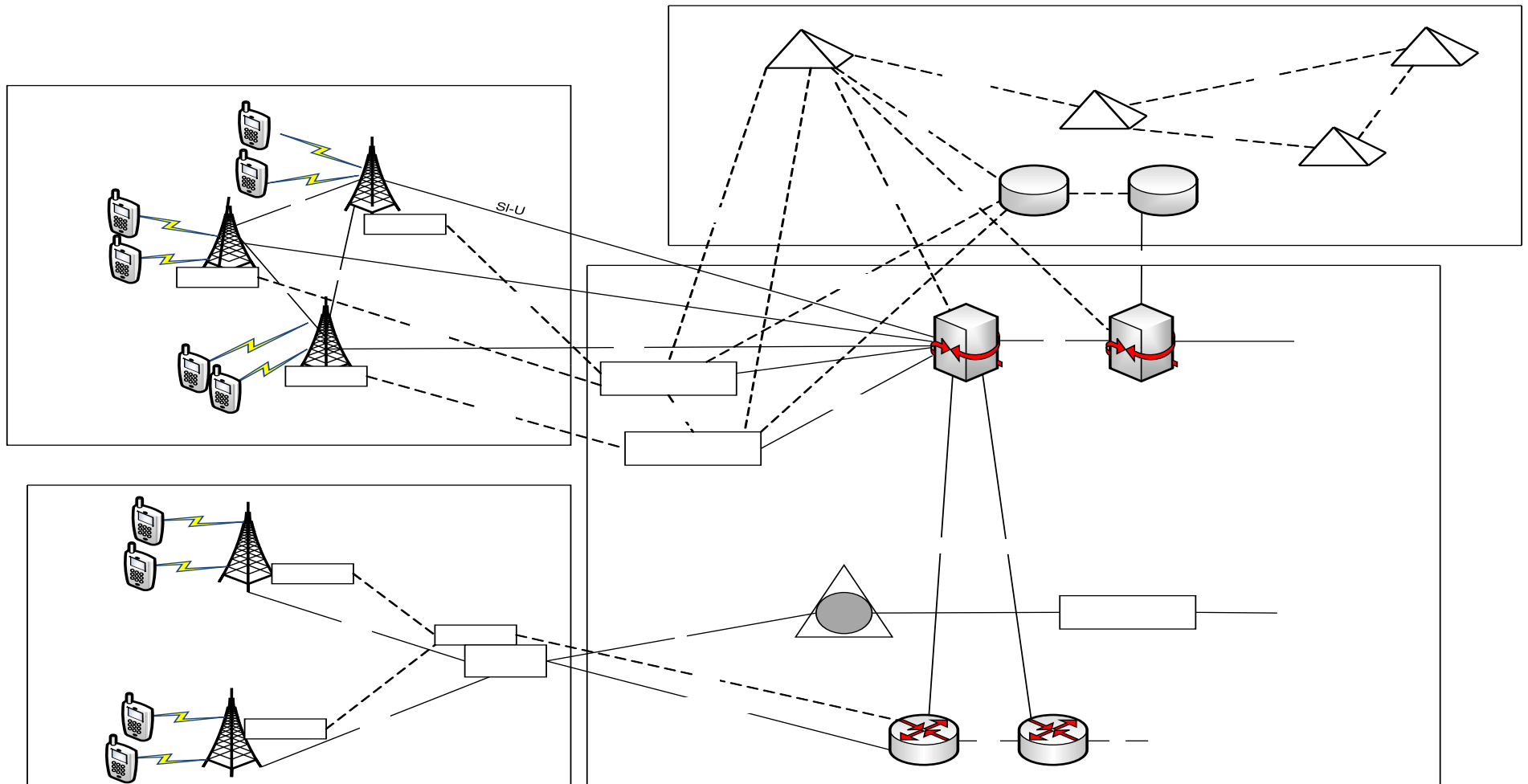


Рисунок 1.8 – Архітектура мережі LTE-Advanced на базі мережі оператора мобільного зв'язку

Розглянемо програмно-апаратні засоби, що входять до складу мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та пакетного ядра мережі EPC [9-13].

Архітектура підсистеми радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced базується на 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/LTE-Advanced стільників та підтримують режими організації радіоканалів FDD (Frequency Division Duplexing) або TDD (Time Division Duplex), або одночасно два режими FDD/TDD. Взаємодія між базовими станціями 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 модулями мобільності MME за допомогою інтерфейсу S1-MME, а з обслуговуючим шлюзом S-GW через S1-U [9].

На базові станції e-NodeB в мережі LTE-Advanced покладено виконання наступних функцій [9]:

- управління радіоресурсами: розподіл радіоканалів, динамічний розподіл ресурсів у висхідних і низхідних напрямках – диспетчеризація ресурсів (scheduling) та інші;

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

- вибір блоку управління мобільністю MME при включенні в мережу абонентського терміналу UE за відсутності в того інформації про минуле підключення;

- маршрутизація в користувацькій площині пакетів даних у напрямку до обслуговуючого шлюзу S-GW;

- вимір і складання відповідних звітів для управління мобільністю та диспетчеризація.

Модуль керування мобільністю MME є об'єктом платформи керування в пакетному ядрі 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 хендоверу, вибору SGSN для 3GPP хендовера до мереж 2G/3G та мереж доступу, роумінгу (S6a у напрямку серверу домашніх користувачів HSS), автентифікації, керування функціями замовника. З'єднується з іншими модулями MME за допомогою інтерфейсу S10, а з обслуговуючим шлюзом S-GW по інтерфейсу S11 [9-13].

Модуль мобільності MME мережі LTE-Advanced при взаємодії з мережею GSM/GPRS/EDGE забезпечує виконання наступних функцій [9]:

- 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/LTE-Advanced. 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-Advanced та іншими мережами. Обслуговуючий шлюз S-GW відповідає за виконання наступних функцій [9]:

- 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 GSM/GPRS/EDGE обслуговуючий шлюз S-GW виконує наступні функції [12]:

- 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. Іншим призначенням пакетного шлюзу P-GW є забезпечення взаємодії пакетної в пакетній мережі EPS.

Пакетний шлюз P-GW забезпечує виконання наступних функцій [12]:

- 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/UPC, які складаються з модулів мобільності MME і модулів підтримки мобільності користувача UPC, та дозволяють забезпечити взаємодію між модулями мобільності MME розташованими в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced та обладнанням в мережі IMS (IP Multimedia Subsystem) [12].

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

- 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 [12]:

- користувальницьких ідентифікаторів, таких як: міжнародний ідентифікатор мобільного обладнання IMEI (International Mobile Equipment Identity), міжнародний ідентифікатор мобільного абоненту IMSI (International Mobile Subscriber Identity), номер мобільної станції 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-Advanced, 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 інше.

Мережа LTE-Advanced може включати один або декілька серверів домашніх абонентів HSS. Кількість серверів HSS залежить від географічної структури мережі та кількості абонентів [12].

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.

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 [12].

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.

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 [12-13].

До складу сервера AAA входить підсистема управління, що виконує наступні функції [12-13]:

- 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 Proxу і т.д.

– 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.

1.5 Архітектура мережі IoT/4G на базі технології NB-IoT/LTE

Розглянемо фрагмент мережі четвертого покоління 4G на базі технології NB-IoT/LTE, який показано на рис. 1.9. Він складається з мережі радіодоступу E-UTRAN на базі технології LTE-Advanced, опорних шлюзів обслуговування S-GW та пакетного шлюзу P-GW, які забезпечують мобільність користувачів і забезпечують підключення терміналів до зовнішньої мережі передачі даних та станцій eNodeB-NB, які обслуговують пристрої IoT. В якості пристроїв мережі IoT використовують Smart TV, ноутбуки, планшети, смартфони, HD камери, датчики [14-15].

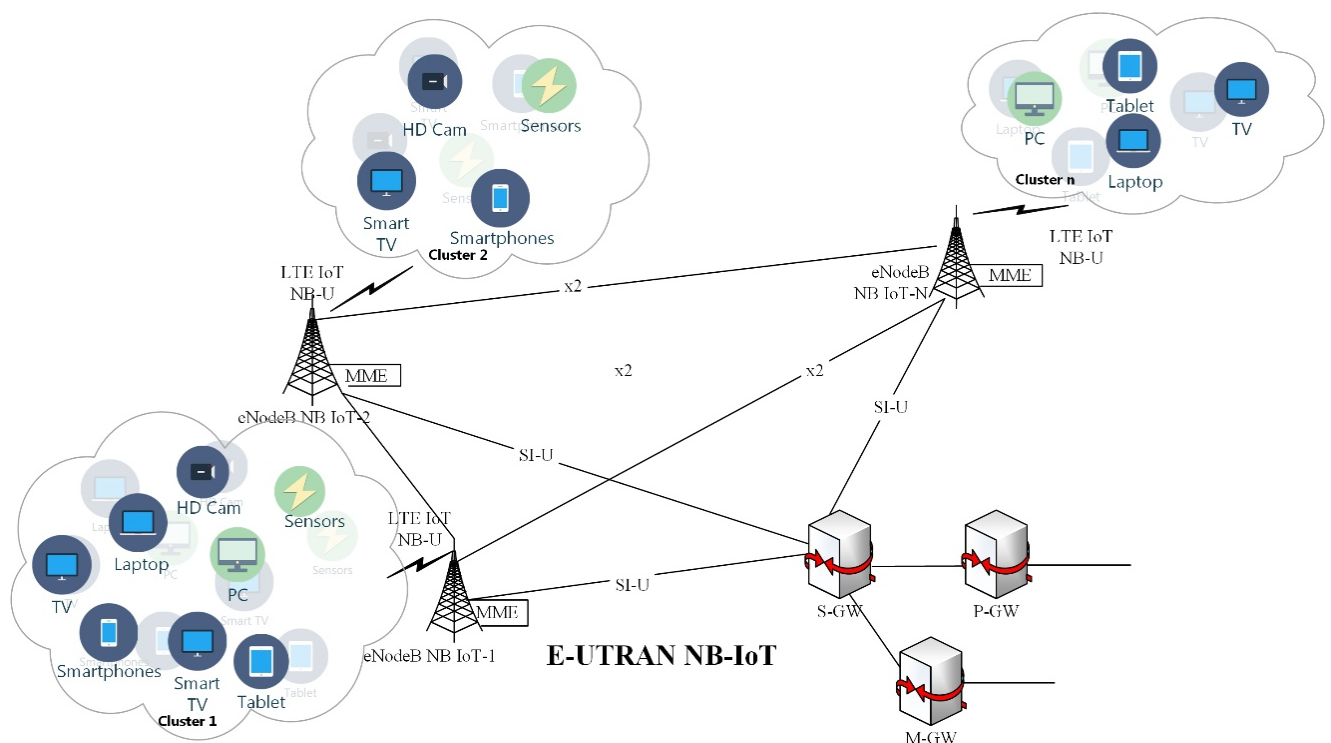


Рисунок 1.9 – Фрагмент мережі мобільного зв'язку на базі технології NB-IoT/LTE

Мережа радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced забезпечує підключення IoT-пристроїв до пакетної базової станції e-NodeB, які підтримують модулі MME, встановлені при кожній базовій станції e-Node B. В мережі E-UTRAN/LTE-Advanced можлива взаємодія між базовими станціями e-NodeB за допомогою інтерфейсу X2 з метою замикання навантаження в підсистемі радіодоступу [14-15].

Модуль управління мобільністю MME – основний вузол управління для доступу в мережу E-UTRAN/LTE-Advanced, обробки сигнальної і службової інформації. Він забезпечує збереження службової інформації абонента і управління нею, авторизацію IoT-пристроїв в мережі мобільного зв'язку і загальне управління мобільністю. Модуль MME впроваджується на рівні E-UTRAN, забезпечуючи взаємодію з базовими станціями e-NodeB через інтерфейс S1, і на рівні пакетної мережі EPC з IoT-пристроями через інтерфейс S1-AP [14-15].

Шлюз обслуговування S-GW, забезпечує мобільність користувачів, є основною межею між мережею радіо доступу та базовою мережею EPC. Обслуговуючий шлюз S-GW транслює абонентські та сигнальні данні між eNodeB та пакетним шлюзом P-GW за допомогою інтерфейсу SI-U. Шлюз пакетної передачі P-GW забезпечує підключення терміналів до зовнішньої мережі передачі даних [14-15].

Мережа радіодоступу E-UTRAN LTE IoT підключає пристрої IoT (датчики, пристрої вимірювання та телеметрії), аксесуари M2M (smart-M2M objects, IoT-пристрої) IoT до пакетних базових станцій eNodeB/NB-IoT, які взаємодіють між собою та за допомогою інтерфейсу LTE IoT NB-U (рис. 1.10) [14-15].

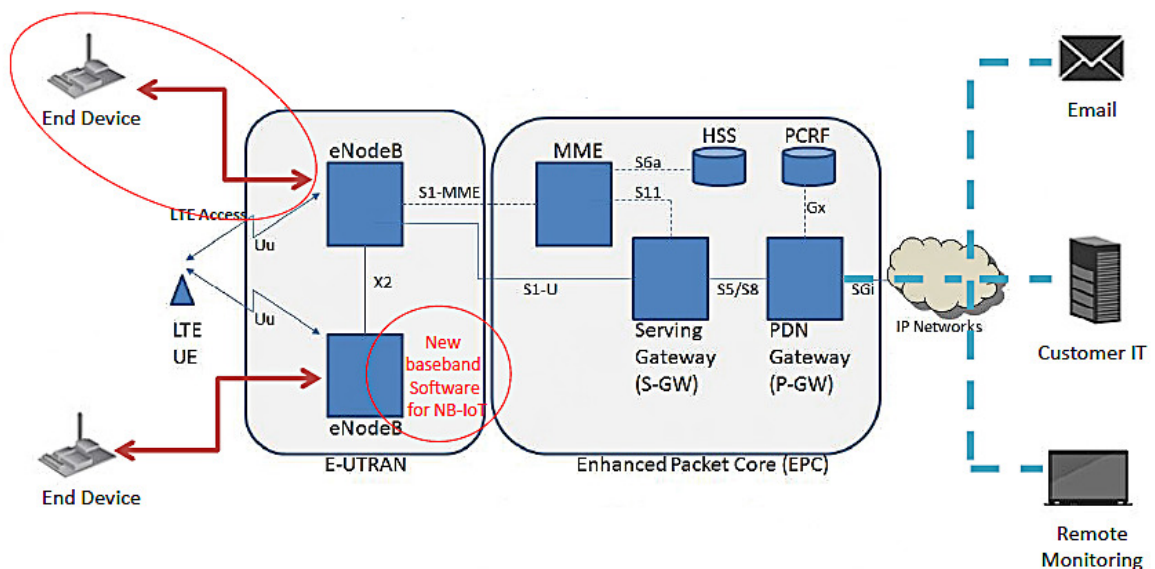


Рисунок 1.10 – Архітектура мережі NB-IoT

1.7 Підтримка характеристик якості обслуговування QoS

Питання оцінки характеристик якості обслуговування трафіку, при впровадженні послуг мережі 4G/IoT достатньо актуальні, мережі операторів мобільного зв'язку на даний час достатньо активно модернізуються, оператори додають послуги Інтернету речей з підтримкою певних характеристик якості QoS. Саме від принципу оцінки характеристик якості обслуговування в мережі оператора мобільного зв'язку залежить якість надання послуг IoT.

В мережі LTE-Advanced забезпечення якості обслуговування QoS зумовлено необхідністю підтримки різної номенклатури послуг та забезпечення функціонування безлічі додатків, які надаються в мережі. До характеристик якості QoS надання послуг 4G/LTE віднесено [16]:

- тип ресурсу (GBR, затримка критичного GBR або Non-GBR);
- рівень пріоритету; значення затримки пакетів (включно з часом затримки пакетів в межах базової мережі EPC);
- ймовірність втрат та помилок пакетів (тільки для ресурсів GBR і GBR);
- максимальний обсяг пакета даних (тільки для критичного до затримки типу ресурсу GBR).

Трафік, який обслуговується в потоках EPS (Evolved Packet Service), належить до різної номенклатури послуг (Відеовиклики (Live streaming) в реальному часі, Поточкове 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. 1.4 [16].

Обслуговування потоків EPS в мережі LTE-Advanced, згідно 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.

Потоки GBR забезпечуються виділеними ресурсами на час передачі, за умови нормованого часу затримки, а потоки EPS без гарантованої швидкості передачі даних Non-GBR використовуються з виділенням ресурсів за принципом Best effort, а пропускна здатність з'єднання завжди не гарантована [16].

Технічний рапорт 3GPP TR23.401 [16] регламентує наступні характеристики QoS для дев'яти класів обслуговування, кожному з яких відповідає свій ідентифікатор QCI (QoS Class Identifier), які наведені в табл. 1.4 [16].

Таблиця 1.4 – Специфікації QoS для мережі LTE згідно 3GPP TR23.401 [16]

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		Потокове відео (Buffering streaming) з буферизацією
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	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		8	300		Відео (Buffering streaming) з буферизацією, послуги на
9		9	300		

					базі TCP/IP (e-mail, chat, sharing, ftp)
--	--	--	--	--	--

Ідентифікатор QCI визначає групу послуг (див. табл. 1.4) та тип ресурсу (гарантований GBR або негарантований Non-GBR), встановлює пріоритет (від 1 до 9) для послуг, сумарний час затримки передачі пакетів (50-300 мс) та значення ймовірності втрат пакетів (10^{-2} – 10^{-6}). Кожному класу відповідає визначена номенклатура послуг. Наприклад, класи QCI 1,2, 3 і 7 – це послуги реального часу протоколу UDP/IP, для яких в мережі LTE-Advanced критичним є значення середнього часу затримки IP-пакетів та ймовірності їхньої втрати PERL (Packet Error Loss Rate), мінімізація цих показників може бути досягнута тільки при використанні протоколу TCP/IP.

1.8 Обґрунтування необхідності дослідження характеристик якості IoT/4G

Розвиток існуючих мобільних мереж, в першу чергу, передбачає розвиток послуг Інтернету речей IoT (Internet of Things) на базі між машинних M2M (Machine to Machine) та D2D (Device to Device) комунікацій, які пред'являють до мереж інші, багато в чому протилежні вимоги, обумовлені характеристиками трафіку Інтернету речей IoT, що генерується додатками IoT, а також різними обмеженнями та вимогами до пристроїв IoT.

Під Інтернетом речей розуміють глобальну інфокомунікаційну інфраструктуру з можливостями автоматичної конфігурації, яка об'єднує фізичні і віртуальні "речі", що володіють не тільки фізичними властивостями, але і віртуальною суб'єктністю [8].

Існуючі і потенційні додатки IoT досить різноманітні, проте за вимогами до пристроїв і характеристикам трафіку їх умовно поділяють за різними групами послуг: мобільного широкосмугового доступу eMBB, масового машинного зв'язку mMTC та надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC.

Для технологічного забезпечення можливостей надання послуг IoT, які відрізняються, як вимогами до швидкості та значень часу затримки пакетів для їхнього надання 3GPP в Релізі 13-14 [6] пропонується використання вузькосмугового Інтернет речей NB-IoT (Narrowband Internet of Things), що дозволяє на базі мережі технології LTE надавати для IoT-пристроїв низькошвидкісні послуги передачі даних до 200 кбіт/с, крім того, 3GPP для

обслуговування M2M-трафіку масового типу рекомендує використання технології EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM for IoT) і LTE-M для M2M-пристроїв зі швидкістю передачі до 1 Мбіт/с. Це дозволяє зробити висновки про те, що пристрої IoT мають різні вимоги до технологій мережі IoT з точки зору швидкості передавання даних, мобільності пристроїв IoT та генерують різний за характеристиками трафік в мережі IoT.

На даний час не існує загальноприйнятого підходу та визначених рекомендацій щодо обслуговування трафіку M2M та D2D-пристроїв, в тому числі оптимального методу для розподілу обмеженої кількості радіоресурсів між користувачами та великою кількістю IoT-пристроїв. Значна кількість досліджень науковців спрямована на дослідження характеристик M2M-трафіку, який має малий розмір переданих блоків даних і велику кількість пристроїв, що підключаються [6].

Трафік в мережі IoT визначається як від об'єму передаваних даних кожного з пристроїв IoT, так і загальною їх кількістю. Природно, що при різних способах класифікації IoT-пристроїв оцінки величини цього трафіку можуть істотно відрізнятись. Виходячи з основних положень концепції Інтернету речей IoT, до IoT-пристроїв можливо віднести всі автоматичні пристрої, що мають доступ до інфокомунікаційної мережі. Крім цього до них також можуть бути віднесені і іншого роду об'єкти, в тому числі, і віртуальні речі.

При дослідженні характеристик IoT-трафіку має значення відповідний клас послуг IoT, який визначає швидкісні характеристики та значення часових затримок для кожної групи послуг (мобільного широкосмугового доступу eMBB, масового машинного зв'язку mMTC та надзвичайно надійного з'єднання з низькою затримкою URLLC) [6].

В даний час досить складно виконувати досліджування IoT-трафіку, бо поки не має певної визначеної функціональності, пов'язаної з отриманням і передачею інформації, а в основному розглядаються M2M-пристрої, під якими будемо розуміти будь-які пристрої, здатні відправляти дані через мережу зв'язку і функціонувати без безпосередньої участі людини.

Тоді під IoT-трафіком будемо розуміти характеристики потоку пакетів, які створюються IoT-речами мережі. Залежно від виду додатків конкретної IoT-мережі ці характеристики можуть бути істотно різними. Потоки пакетів IoT описуються параметрами трафіку (інтенсивністю надходження пакетів, розміром пакетів) так і характеристиками потоку, такими як закон розподілу інтервалів часу

між пакетами. Потоки будемо вважати випадковими та в деяких послугах – детермінованими.

Під якістю обслуговування QoS надання послуг будемо розуміти здатність мережі IoT відповідати висунутим до неї вимогам, яка може бути описана чисельними значеннями одного або декількох вимірюваних або обчислюваних параметрів. У більшості випадків, а також в даній роботі, якість обслуговування трафіку в мережі IoT буде характеризуватися швидкісними параметрами (пропускною здатністю), часовими параметрами (часом затримки доставки пакетів) і ймовірносними параметрами (ймовірністю втрат та спотворення пакетів).

Концепція Інтернет речей передбачає широке застосування технологій міжмашинної взаємодії M2M, відмінною рисою даної технології є те, що передача даних здійснюється між різними датчиками низької обчислювальної потужності, що володіють малими обсягами пам'яті і малим споживанням енергії. Автономність використання, самоорганізація, низьке енергоспоживання і можливість віддаленого доступу дозволяє мережам M2M займати провідні позиції в таких областях як логістика, сільське господарство, моніторинг екологічного середовища, моніторинг стихійних лих. Однак кількість цих датчиків буде значною, а їхній трафік буде істотно впливати на мережі IoT та якість обслуговування.

На практиці недовгі сеанси зв'язку M2M-пристроїв ускладнюють або виключають здатність здійснювати контроль якості радіоканалів, використовуючи метод оцінки тривалості розмови або зайняття. Застосування подібних систем контролю може відобразитися на властивостях трафіку. Важливо також враховувати, що поведінка деяких IoT-пристроїв може бути залежною, що призведе до масової активності IoT-пристроїв та в підсумку призведе до неконтрольованого зростання IoT-трафіку. Таким чином, на сьогоднішній день важливо вміти правильно оцінювати IoT-трафік, а також його вплив на роботу мережного обладнання та якість послуг, що надаються.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕРЕЖІ ІoT/4G ЗА ДОПОМОГОЮ ВУЗЛОВОГО ТЕНЗОРНОГО МЕТОДУ

2.1 Підтримка характеристик якості обслуговування QoS в мережі 4G/IoT

Питання оцінки характеристик якості надання послуг мережі Інтернету речей достатньо актуальні, мережі операторів мобільного зв'язку 4G/IoT на даний час достатньо активно використовують послуги IoT, кількість користувачів та послуг постійно зростає і потребує надання послуги IoT з підтримкою певних характеристик QoS. Саме від принципу оцінки характеристик якості обслуговування в мережі оператора мобільного зв'язку 4G/IoT залежить якість надання послуг IoT та пакетної передачі даних.

У результаті аналізу послуг та процедур обслуговування трафіку в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced на базі технології NB-IoT можливо зробити висновки про те, що:

1. Топологія з'днань базових станцій e-NodeB/NB-IoT чинить великий вплив на підтримку характеристик якості обслуговування QoS в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced за рахунок можливості замикання навантаження, за допомогою інтерфейса X2, всередині окремих ділянок мережі.

2. Оцінка параметрів створюємого навантаження мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE виконується на етапі проектування, але на етапі розвитку технології NB-IoT та подальшої експлуатації виникає необхідність врахування додаткового навантаження мережі NB-IoT. Саме результати оцінка параметрів створюємого навантаження мережі NB-IoT визначають вибір оптимальної структури мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced.

3. Параметри швидкості доступу до номенклатури послуг у мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, залежить від кількості одночасно активних користувачів у мережі, а пропускна здатність радіоінтерфейсів 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, адже черги означають невизначену затримку при передачі трафіку, що є головним джерелом проблем для чутливого до затримок пакетного трафіку. Виходячи з цієї причини

необхідно виконати аналіз, для забезпечення компромісу між прагненням гранично завантажити мережу і виконанням вимог QoS одночасно для всіх типів трафіку. Тому в бакалаврській роботі планується вирішити задачу оцінки характеристик якості надання послуг у мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, таких як: пропускна здатність, час затримки пакетів та довжина пакетної черги.

Результати вирішення поставленої задачі дозволять надати рекомендації щодо оптимізації топології з'єднань базових станцій e-NodeB/NB-IoT в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced.

2.2 Постановка задачі та вибір математичного апарату

Важливою задачею при дослідженні характеристик якості надання послуг мережі 4G/IoT на базі технології NB-IoT/LTE-Advanced є забезпечення необхідної пропускної спроможності для надання послуг IoT та інших показників якості обслуговування QoS, таких як: час затримки пакетів, ймовірність втрат пакетів та довжина пакетної черги.

Одним з важливих показників оцінки характеристик якості мережі мобільного зв'язку, яка функціонує на базі пакетного передавання all over IP, є значення часу затримки пакетів. Саме збільшення часу затримки пакетів призводить до неможливості надання послуг Інтернет речей в мережі NB-IoT/LTE-Advanced. Тому на етапі дослідження характеристик якості функціонування мережі NB-IoT/LTE-Advanced та подальшої її експлуатації завжди визначають прогнозовані значення характеристик якості обслуговування та їхню відповідність нормативним значенням. Однак, складність цієї задачі полягає у тому, що вона потребує врахування не тільки структурних особливостей побудови існуючих та впроваджуваних мереж радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, а ще й технологічних особливостей їхньої побудови.

Особливістю реалізації мережевої архітектури мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced є можливості взаємодії між пакетними базовими станціями e-NodeB/NB-IoT і, відповідно, принципи вибору оптимальної конфігурації з'єднання базових станцій e-NodeB/NB-IoT. Організація взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT відбувається згідно потреб оператора та за умови підтримки нормативних значень характеристик якості обслуговування QoS трафіку.

Для дослідження характеристик якості мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced можливо використовувати:

- математичний апарат теорії телетрафіку,
- математичний апарат теорії графів й мережевого аналізу,
- інші математичні апарати, наприклад, математичний апарат тензорного аналізу [17].

Математичний апарат теорії телетрафіку володіє великою кількістю математичних моделей для розгляду різних об'єктів мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced в залежності від моделі потоку пакетів, які надходять, закону розподілу тривалостей обслуговування та принципів обслуговування з кінцевою або нескінченною чергою пакетів. Вона дозволяє вирішити значний клас задач з визначенням характеристик якості для різних систем масового обслуговування, таких як, середній час обслуговування та затримки, пропускної здатності та коефіцієнту використання ресурсів мережі, ймовірності відмови та інших [17].

Математичний апарат теорії графів і мережного аналізу призначений для розв'язання задач маршрутизації, пошуку найкоротших шляхів, мережевого планування і розподілу ресурсів мережі та інше. Прикладом тому можуть служити широко використовувані в задачах маршрутизації задачі оптимального знаходження найкоротших маршрутів (алгоритми Галагера, Форда-Фалкерсона) [17].

Тензорний аналіз дозволяє в одному математичному об'єкті об'єднати структурні та функціональні властивості розглядаємої мережі E-UTRAN/LTE-Advanced. Таким чином, використання даного методу є більш доцільним, адже при дослідженні структурних властивостей мережі застосовують матричні методи, а для дослідження функціональних властивостей мережі – методи теорії телетрафіку [17].

В якості методу тензорного аналізу використовуємо вузловий тензорний метод, який дозволяє вирішувати наступні задачі [18]:

- задачі багатошляхової маршрутизації трафіку в мережі мобільного зв'язку з мінімальним гарантованим часом доставки пакетів при збалансованому завантаженні ресурсів мережі;
- задачі раціонального використання та балансування буферних ресурсів об'єктів мережі при допустимому середньому часу затримки пакетів з урахуванням особливостей топології мережі і використовуваних протоколів;

– задачі визначення характеристик якості при обслуговуванні трафіку з різними класами QoS, що дозволяє отримати значення характеристик якості для кожного з k-класів обслуговування і більш гнучко формувати обмеження для різних показників QoS відповідно до вимог до кожного з k-класів обслуговування.

Використання вузлового тензорного методу дозволить виконати дослідження характеристик якості QoS функціонування мережі IoT/4G, на прикладі структури вихідної мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, яка побудована на базі пакетних базових станцій e-NodeB/NB-IoT.

2.3 Особливості побудови тензорної моделі

Для того, щоб створити тензорну модель мережі мобільного зв'язку як складної системи необхідно дотримуватись послідовності наступної методології [17-18]:

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 проектування 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 [17-18].

Першим кроком при проведенні тензорного опису мобільної мережі є введення поняття простору. На відміну від однорідного безперервного простору при дослідженні параметрів мережі мобільного зв'язку, згідно [17-18], слід розглядати анізотропний простір-структуру, тому що об'єктом тензорного аналізу одновимірних мереж є дискретні простори, утворені сукупністю замкнених і розімкнених шляхів (контурів і пар вузлів). Розмірність такого простору, будучи структурним інваріантом, визначається загальною кількістю гілок у мережі, тобто кількістю окремих трактів передачі в мережі, і дорівнює n . У зв'язку з цим

множина структур, що відповідають різним варіантам з'єднань n гілок, може трактуватися як множина часткових систем координат у введеному n -мірному просторі. Перетворення ж структури мережі зі збереженням початкової кількості гілок або перехід від однієї сукупності незалежних шляхів до іншої трактується як перетворення системи координат. Таким чином, кожний шлях через свою незалежність визначає в рамках розглянутого простору-структури координатну вісь [17].

З курсу комбінаторної топології відомо, що кількість гілок у будь-якій одновимірній мережі, що подається на площині у вигляді графа, чисельно дорівнює сумі незалежних розімкнених і замкнених шляхів (контурів) r , а чисельність незалежних розімкнених шляхів (вузлових пар) s визначається різницею кількості вузлів m у мережі і кількістю незв'язних підмереж α . Загальна кількість базисних (координатних) шляхів, кожний з яких у частковій системі координат визначає координатну вісь, може перерозподілятися між кількістю незалежних контурів r і кількістю незалежних вузлових пар у мережі s , тобто має місце тотожність [17]:

.

У мережі з m вузлами кількість незалежних вузлових пар однозначно визначається з виразу [17]:

,

тим самим, для розрахунку кількості незалежних контурів у мережі довільної конфігурації використовується вираз [17]:

.

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 [17].

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 проекції різних компонентів заданого тензора, спираючись на які можна розрахувати необхідні компоненти в тій або іншій СК [17].

Відповідно до властивостей тензора за його відомими проекціями в одній системі координат (СК) можна одержати проекції 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 проекції тензора можуть відображати величини показників, що характеризують основні її властивості в прийнятому для розгляду аспекті [17].

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

2.4 Вузловий тензорний метод визначення характеристик якості надання послуг мережі IoT/4G

Розглянемо задачу визначення характеристик якості QoS надання послуг мережі IoT/4G мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced на базі базових станцій e-NodeB/NB-IoT за допомогою вузлового тензорного методу дослідження, який надає можливості одночасної оцінки як структурних, так і функціональних характеристик якості обслуговування трафіку за умов врахування особливостей структурної побудови мережі E-UTRAN/LTE-Advanced та її технологічних особливостей функціонування на базі IoT/NB-IoT [20-23].

Знайдемо характеристики якості обслуговування QoS трафіку базовими станціями e-NodeB/NB-IoT для фрагменту мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced. До характеристик якості обслуговування QoS трафіку в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced віднесено [20-23]:

- пропускну спроможність об'єктів мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,
- середній час затримки пакетів,
- середню довжину пакетної черги.

Для рішення поставленої задачі використовуємо вузловий тензорним метод, який дозволяє вирішити задачі оцінки характеристик якості QoS, забезпечуючи при цьому гарантований час доставки пакетів в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Тензорне моделювання мережі E-UTRAN/LTE-Advanced припускає її опис в метричному просторі. Причому, в якості метрики може виступати значення інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT, що наочно може бути підтверджено в ході тензорного узагальнення формули Літгла [20-23]:

$$h_v^i = l_v^i \cdot \tau_i^v, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.1)$$

де h^i – середня довжина пакетної черги для передачі i -му тракту взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

τ_i – середній час затримки пакетів в i -ому тракту взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

l^i – середня інтенсивність трафіку в i -ому тракту взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

n – загальна кількість трактів взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT за інтерфейсом X_2 .

Згідно вузлового тензорного методу розглянемо функціональні рівняння в двох системах координат [20-23]: системі координат (СК) гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced та системі координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Згідно [20-23], запишемо вираз (2.1) в тензорному виді у системі координат вузлових пар мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced:

$$H_v = L_v \cdot T_v, \quad (2.2)$$

де H_v – одновалентний коваріантний тензор середньої довжини черги пакетів в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

L_v – двічі контраваріантний тензор середньої інтенсивності трафіку в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,

T_v – одновалентний коваріантний тензор середніх значень часу затримок передачі пакетів в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Запишемо функціональне рівняння (2.1) для системи координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced [20-23]:

$$H_\eta = L_\eta \cdot T_\eta, \quad (2.3)$$

де H_η – одновалентний коваріантний тензор середньої довжини черги пакетів в системі координат вузлових пар, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,

L_η – двічі контраваріантний тензор середньої інтенсивності трафіку в системі координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,

T_η – одновалентний коваріантний тензор середнього часу затримок передачі пакетів в системі координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Вважаємо відомими перетворення між системами координат для заданих тензорів згідно [20-23].

Для вузлового тензорного методу перетворення проекції двічі коваріантного тензору L_η середньої інтенсивності передавання пакетів у функціональних об'єктах мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced між системою координат вузлових пар мережі та гілок мережі визначається за формулою [20-23]:

$$L_\eta = B \cdot L_v \cdot B', \quad (2.4)$$

де L_η – тензор середньої інтенсивності трафіку в системі координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,

B – базисна матриця перетворень між системами координат трактів взаємодії та базових станцій e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

L_v – тензор середньої інтенсивності трафіку в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced,

B' – транспонована базисна матриця перетворень між системами координат трактів взаємодії та базових станцій e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced.

Перетворення проєкції тензору завантаженості черги пакетами у функціональних об'єктах мережі E-UTRAN (базових станціях e-NodeB/NB-IoT) між системами координат базових станцій e-NodeB/NB-IoT та трактів взаємодії у мережі E-UTRAN/LTE-Advanced визначається виразом [20-23]:

$$H_\eta = B \cdot H_v^+, \quad (2.5)$$

де H_η – тензор середньої довжини пакетної черги в системі координат вузлових пар, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,

B – базисна матриця перетворень між системами координат трактів взаємодії та базових станцій e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

H_v^+ – тензор середньої довжини черги пакетів в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Для знаходження часу затримки пакетів в СК вузлових пар мережі, які представлені базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced T_η використовуємо вираз (2.3) та маємо:

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

тоді

$$T_\eta = (L_\eta)^{-1} H_\eta. \quad (2.6)$$

Перетворення проекції тензору T_n часових затримок пакетів в базових станціях e-NodeB/NB-IoT, між СК трактів взаємодії між e-NodeB/NB-IoT та базових станцій мережі E-UTRAN/LTE-Advanced виконується згідно виразу [20-23]:

$$T_v = B' \cdot T_n, \quad (2.7)$$

де T_v – тензор середніх значень часу затримок передачі пакетів в СК гілок мережі, яка представлена трактами взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced;

B' – транспонована базисна матриця перетворень між системами координат трактів взаємодії та базових станцій e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced;

T_n – тензор середнього часу затримок передачі пакетів в системі координат вузлових пар мережі, яка представлена базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Отримані значення характеристик якості будуть порівняні з нормативними значеннями характеристик якості обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced на базі технології NB-IoT.

3 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ МЕРЕЖІ ІoT/4G

3.1 Розрахунок характеристик якості QoS надання послуг мережі ІoT/4G на базі технології NB-IoT

Основним завданням розвитку мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced на базі технології NB-IoT є рішення задачі вибору оптимальної топології з'єднань між e-NodeB/NB-IoT в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і забезпеченням гарантованих параметрів якості обслуговування QoS.

В даній роботі розглянемо дві характеристики якості QoS, а саме, час затримки пакетів та довжину пакетної черги. Саме від часу затримки пакетів залежить можливість надання послуг Інтернету речей ІoT, таких як відео високої чіткості, високошвидкісний доступ до Інтернет, mobile-TV та інші. Збільшення часу затримки пакетів призводить до їхньої буферизації та очікування на обслуговування, в цьому разі затримка пакетів призводить до погіршення якості та потребує значного об'єму буферних пристроїв.

Рекомендація ІTU-T Y.1541 визначає для технології Ethernet наступні параметри якості обслуговування QoS для шістьох класів обслуговування для показників: IPTD – затримки передавання IP пакетів, IPDV – варіація затримки IP пакетів, IPLR – частка втрачених IP пакетів, IREP – частка спотворених IP пакетів [16]. Нормативні значення параметрів QoS приведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Нормативні значення параметрів QoS

Клас QoS	IPTD, мс	IPDV	IPLR	IREP
0	100	50	10^{-3}	10^{-4}
1	400	50	10^{-3}	10^{-4}
2	100	-	10^{-3}	10^{-4}
3	400	-	10^{-3}	10^{-4}
4	1	-	10^{-3}	10^{-4}
5	-	-	-	-

Тому розглянемо задачу визначення характеристик якості обслуговування QoS в мережі IoT на базі технології e-NodeB-IoT, а саме, часу затримки пакетів за допомогою вузлового тензорного методу та виконаємо вибір оптимальної топології з'єднань базових станцій e-NodeB/NB-IoT в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку і характеристик якості обслуговування QoS.

Фрагмент мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, яка представлена у вигляді графу на рис. 3.1, складається з $N = 8$ вузлів, які моделюють базові станції e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced та обслуговуючі шлюзи S-GW, які пов'язані за допомогою $v = 13$ трактів взаємодії за інтерфейсом X2.

Для передавання трафіку обраний напрямком e-NodeB-1→S-GW-1, для якого необхідно забезпечити передачу пакетів з черги умовної довжини 100 тис. пакетів.

Для рішення завдання визначення характеристик якості QoS надання послуг в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced завдання вважаємо відомими:

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

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

– відомі інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, які задані тензором інтенсивності трафіку L_v :

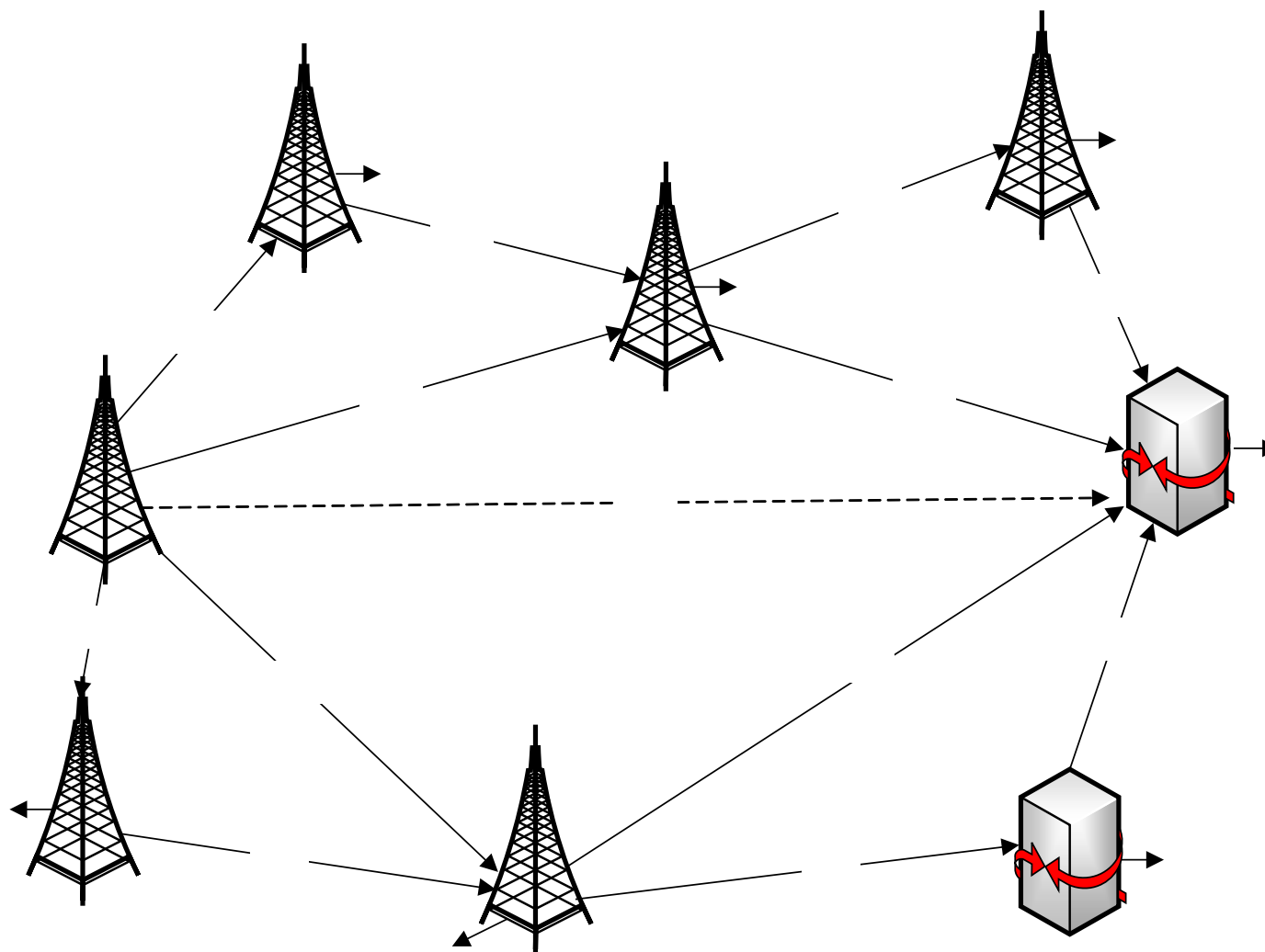


Рисунок 3.1 – Фрагмент мережі радіодоступу IoT/4G у вигляді графу

$$L_v = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 300 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 300 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 650 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 150 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 450 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

– відома довжина вихідної черги пакетів між заданою парою вузлів e-NodeB/NB-IoT-1→S-GW-1, що задана тензором H_v^+ :

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0). \quad (3.3)$$

Необхідно розрахувати [20-23]:

– середній час затримки T_v пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT при передачі їх з черги на вихідному вузлі e-NodeB/NB-IoT-1;

– середній час затримки T_n пакетів у вузлах, які представлені базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE та пакетних шлюзах S-GW;

– завантаженість пакетної черги H_n базових станцій e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE та трактів їхньої взаємодії H_v ;

Знайдемо характеристики якості обслуговування QoS мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, а саме, час затримки пакетів та завантаженість пакетної черги, використовуючи вузловий тензорний метод дослідження [20-23].

Для знаходження довжини черги пакетів у трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced використовуємо вираз (2.5) та базисну матрицю вузлових пар B_n (3.1) й задану довжину вихідної черги між заданою парою вузлів H_v^+ (3.3) [20-23]:

$$H_{\eta} = (0 \ 0 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0)^t. \quad (3.4)$$

Для знаходження значення L_{η} інтенсивності трафіку у базових станціях e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced використаємо формулу (2.4) та базисну матрицю вузлових пар B_{η} (3.1) й значення інтенсивностей трафіку, заданих формулою (3.2) [20-23]:

$$L_{\eta} = \begin{pmatrix} 350 & -250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -250 & 1350 & -300 & -500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -300 & 950 & -650 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -500 & -650 & 2400 & -800 & -450 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -800 & 1000 & -200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -450 & -200 & 1850 & -800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -800 & 950 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Знайдемо середнє значення часу затримки T_{η} пакетів в вузлах e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced згідно виразу (2.6), використовуючи вирази (3.4) та (3.5) отримаємо [20-23]:

$$T_{\eta} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 3,747 & 1,246 & 1,002 & 0,899 & 0,807 & 0,477 & 0,402 \\ 1,246 & 1,744 & 1,403 & 1,245 & 1,130 & 0,668 & 0,563 \\ 1,002 & 1,403 & 2,655 & 1,694 & 1,537 & 0,909 & 0,766 \\ 8,898 & 1,245 & 1,694 & 1,901 & 1,725 & 1,020 & 0,859 \\ 8,074 & 1,130 & 1,153 & 1,725 & 2,600 & 1,102 & 0,928 \\ 4,777 & 0,668 & 0,909 & 1,020 & 1,102 & 1,428 & 1,202 \\ 4,022 & 0,563 & 0,766 & 0,859 & 0,928 & 1,202 & 2,065 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,089 \\ 0,124 \\ 0,169 \\ 0,190 \\ 0,172 \\ 0,102 \\ 0,086 \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Час затримки T_v передачі пакетів з черги на вихідному вузлі eNodeB-1 в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT визначається за формулою (2.7), використовуючи базисну матрицю вузлових пар B_{η} (3.1) та (3.6) отримаємо [20-23]:

$$T_v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,089 \\ 0,124 \\ 0,169 \\ 0,190 \\ 0,172 \\ 0,102 \\ 0,086 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,089 \\ 0,045 \\ 0,035 \\ 0,124 \\ 0,065 \\ 0,020 \\ 0,190 \\ 0,120 \\ 0,085 \\ 0,016 \\ 0,088 \\ 0,070 \\ 0,017 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо довжину пакетної черги H_v передачі пакетів в трактах взаємодії між e-NodeB/NB-IoT згідно формули (2.2) використовуючи отриманні значення інтенсивностей трафіку згідно (3.2) та отримані значення часу затримки пакетів в трактах взаємодії між e-NodeB/NB-IoT згідно [20-23]:

$$H_v = (8.9 \quad 13.5 \quad 8.9 \quad 37.4 \quad 32.8 \quad 13.5 \quad 0 \quad 40.8 \quad 12.9 \quad 12.9 \quad 39.6 \quad 14.0 \quad 14.0)^t.$$

Згідно проведених розрахунків, мінімальний час доставки пакетів з черги на вихідному вузлі e-NodeB/NB-IoT-1 умовної довжиною 100 тис. пакетів приблизно становить 0,190 с.

На рис. 3.2 представлені результати рішення задачі визначення характеристик якості QoS надання послуг в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced.

На рис. 3.2 зазначені інтенсивності трафіку в трактах взаємодії між e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, завантаженості черги пакетами, час середньої затримки пакетів, завантаженості базових станцій мережі e-NodeB/NB-IoT при передачі пакетів із вихідної черги, час затримки пакетів на кожному вузлі мережі.

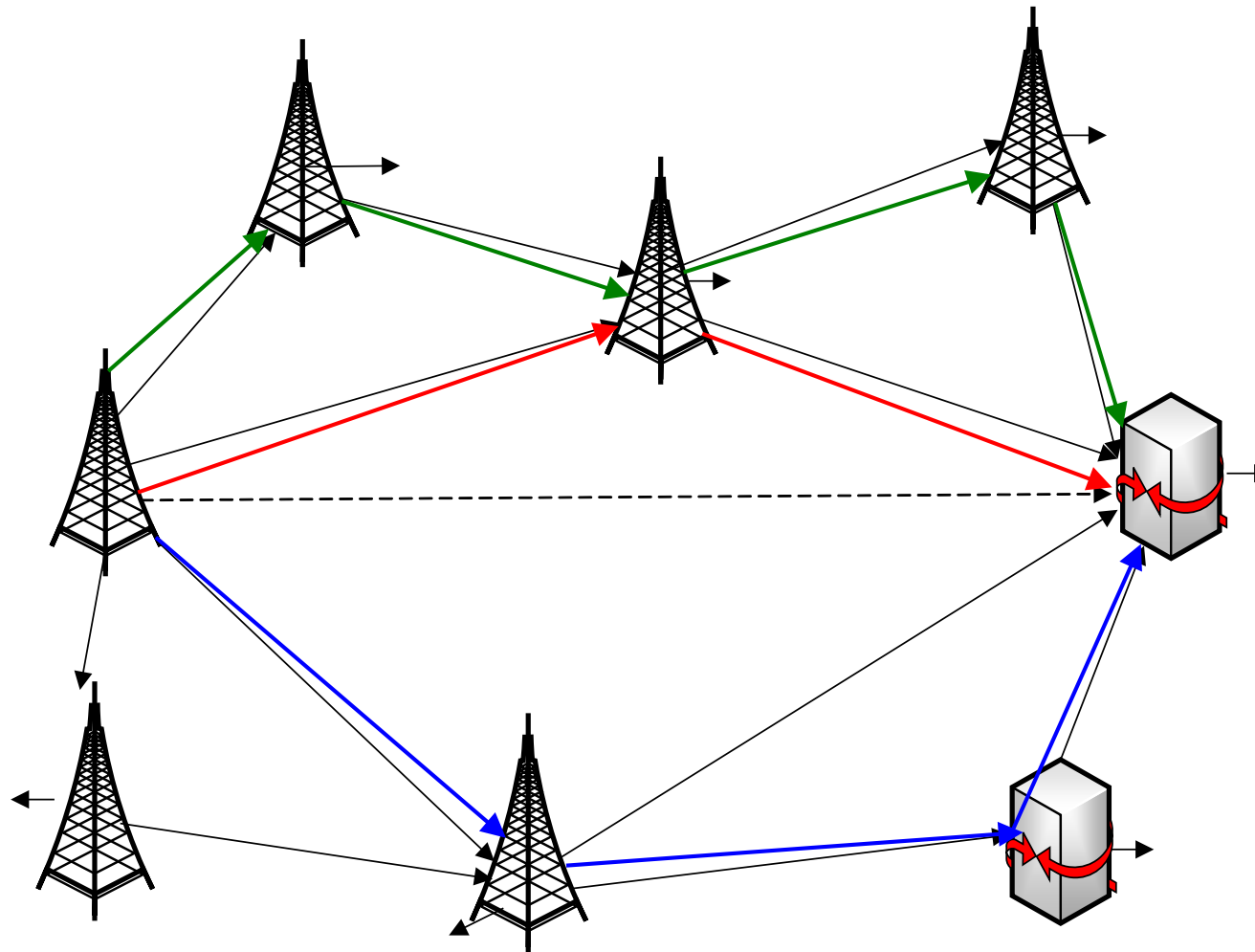


Рисунок 3.2 – Результати розрахунків середнього часу затримки в мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced

3.2 Аналіз отриманих результатів дослідження

Важливо відмітити, що час затримки в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced є однаковим для всіх шляхів доставки пакетів. Результати розрахунків зведемо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок часу затримки пакетів в трактах мережі LTE-Advanced

Шлях передавання трафіку	Задіяні тракти взаємодії	Значення часу затримки $\tau_{затр}$ пакетів при передаванні трафіку в мережі, с
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-3 – S-GW-1	$v_4 \rightarrow v_5$	0,190
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT – S-GW-2 – S-GW-1	$v_8 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{13}$	0,190
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-2 – e-NodeB/NB-IoT-3 – e-NodeB/NB-IoT-4 – S-GW-1	$v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_6$	0,190
e-NodeB-1 – e-NodeB-5 – S-GW-1	$v_8 \rightarrow v_{11}$	0,190
e-NodeB-1 – e-NodeB-2 – e-NodeB-3 – S-GW-1	$v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_5$	0,190
e-NodeB-1 – e-NodeB-6 – e-NodeB-5 – S-GW-2 – S-GW-1	$v_9 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{13}$	0,190

При визначенні характеристик якості QoS необхідно також врахувати час затримки, який створюється в буферних пристроях вузлів мережі представлених базовими станціями e-NodeB/NB-IoT.

Визначимо час затримки пакетів передавання трафіку з різними шляхами його доставки з урахуванням затримки пакетів в мережних вузлах. Результати розрахунків зведемо в табл. 3.3. На рис. 3.3 зазначені результати вирішення задачі визначення характеристик якості QoS та час середньої затримки пакетів в базових станціях e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced при передачі пакетів із вихідної черги на e-NodeB/NB-IoT-1.

Таблиця 3.3 – Розрахунок часу затримки пакетів в трактах взаємодії між e-NodeB/NB-IoT з врахуванням часу затримки у вузлах мережі e-NodeB/NB-IoT

Шлях передавання трафіку	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку $\tau_{затр}$, с	Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі τ_{η} , с	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку $\tau_{затр з вуз}$ з урахуванням часу затримки у вузлах, с
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-5 – S-GW-1 ($v_8 \rightarrow v_{11}$)	0,190	$\tau_{\eta 6} = 0,102,$ $\tau_{\eta 4} = 0,190$	0,482
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-3 – S-GW-1 ($v_4 \rightarrow v_5$)	0,190	$\tau_{\eta 2} = 0,124,$ $\tau_{\eta 4} = 0,190$	0,504
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-2 – e-NodeB/NB-IoT-3 – S- GW-1 ($v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_5$)	0,190	$\tau_{\eta 1} = 0,089,$ $\tau_{\eta 2} = 0,124,$ $\tau_{\eta 4} = 0,169$	0,572
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-5 – S-GW-2 – S-GW-1 ($v_8 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{13}$)	0,190	$\tau_{\eta 6} = 0,102,$ $\tau_{\eta 5} = 0,172,$ $\tau_{\eta 4} = 0,190$	0,654
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-6 – e-NodeB/NB-IoT-5 –	0,190	$\tau_{\eta 7} = 0,086,$ $\tau_{\eta 6} = 0,102,$ $\tau_{\eta 5} = 0,172,$	0,740

S-GW-2 – S-GW-1 ($v_9 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{13}$)		$\tau_{\eta_4} = 0,190$	
e-NodeB/NB-IoT-1 – e-NodeB/NB-IoT-2 – e-NodeB/NB-IoT-3– e-NodeB/NB-IoT-4– S- GW-1 ($v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2 \rightarrow v_6$)	0,190	$\tau_{\eta_1} = 0,089,$ $\tau_{\eta_2} = 0,124,$ $\tau_{\eta_3} = 0,169,$ $\tau_{\eta_4} = 0,190$	0,762

Проведені розрахунки часу затримки при передаванні трафіку з різними шляхами його доставки з урахуванням затримки пакетів дозволяють обрати шляхи з найменшим та найбільшим часом затримки пакетів [20-23]:

– шлях з найменшим часом затримки передавання пакетів e-NodeB-1 – e-NodeB-5 – S-GW-1 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v_8} + \tau_{\text{затр } v_{11}} + \tau_{\text{затр } \eta_6} + \tau_{\text{затр } \eta_4} \approx 0,102 + 0,088 + 0,102 + 0,190 \approx 0,482$ с;

– шлях з найбільшим часом затримки передавання трафіку NodeB/NB-IoT-1 – NodeB/NB-IoT-2 – NodeB/NB-IoT-3– NodeB/NB-IoT-4– S-GW-1 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx \tau_{\text{затр } v_1} + \tau_{\text{затр } v_3} + \tau_{\text{затр } v_2} + \tau_{\text{затр } v_6} + \tau_{\text{затр } \eta_1} + \tau_{\text{затр } \eta_2} + \tau_{\text{затр } \eta_3} + \tau_{\text{затр } \eta_4} \approx 0,089 + 0,035 + 0,045 + 0,020 + 0,089 + 0,124 + 0,169 + 0,190 \approx 0,762$ с.

Проведені розрахунки дозволяють обґрунтовано обрати оптимальну топологію з'єднань між базовими станціями e-NodeB в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced з урахуванням вибору напрямків передачі трафіку при умові забезпечення гарантованих параметрів якості обслуговування QoS.

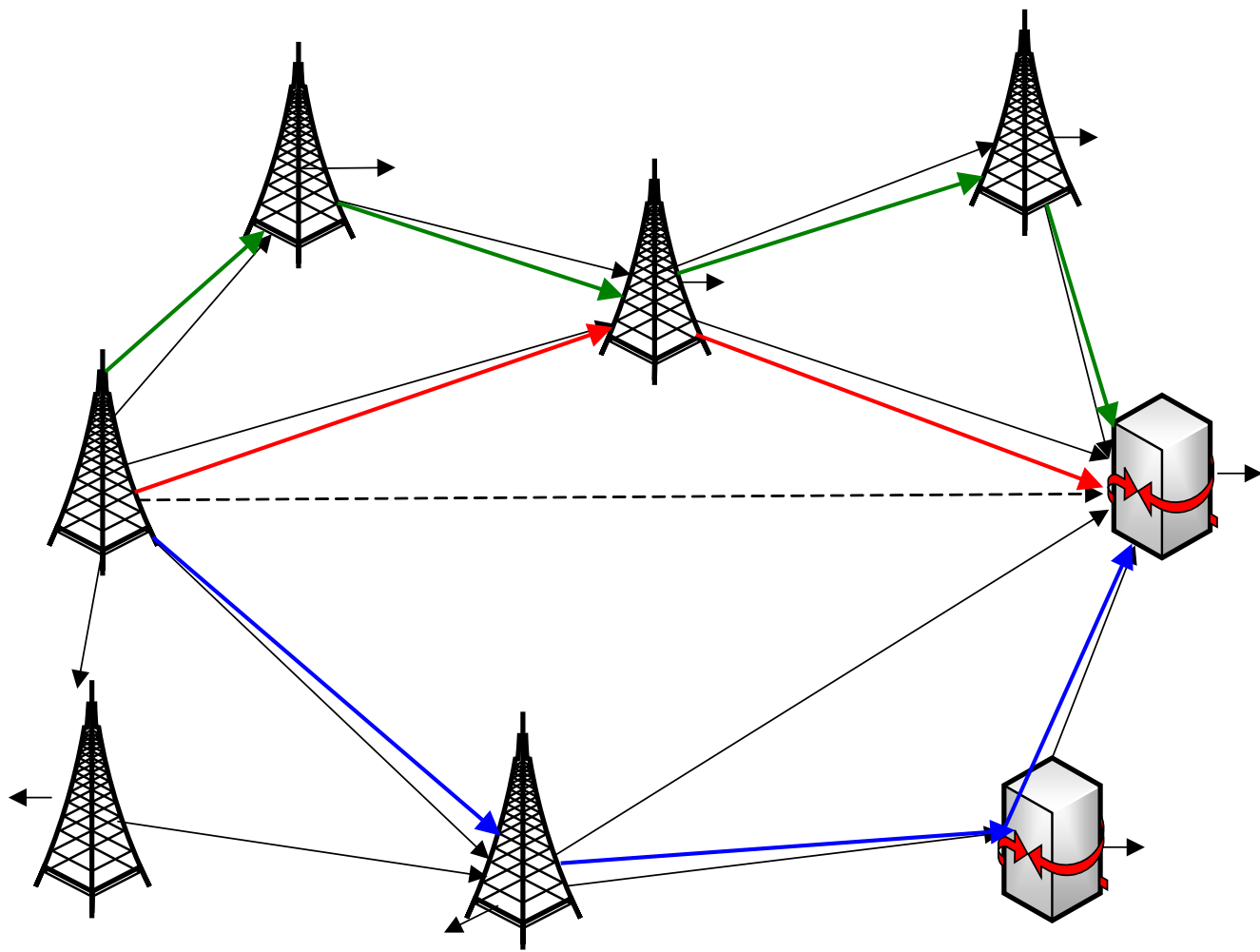


Рисунок 3.3 Результати розрахунків середнього часу затримки в мережі радіодоступу E-UTRAN/ LTE-Advanced з врахуванням часу затримки у вузлах мережі

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даній бакалаврській роботі розглянуті питання визначення характеристик якості QoS мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced для надання послуг Інтернету речей на базі технології NB-IoT. Для оцінки характеристик якості обслуговування трафіку мережі LTE-Advanced обрано вузловий тензорний метод.

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розглянуто архітектуру та функціональні об'єкти мережі IoT на базі інфраструктури мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced з використанням технології NB-IoT.

2. Для рішення поставленого в роботі завдання визначення характеристик якості обслуговування QoS надання послуг Інтернету речей в мережі E-UTRAN/LTE обґрунтовано обраний вузловий тензорний метод, який дозволяє одночасно досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики розглядаємої мережі.

3. В ході рішення поставленого в роботі завдання визначення характеристик якості обслуговування QoS в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced отримані значення середнього часу затримки пакетів в трактах взаємодії між базовими станціями e-NodeB/NB-IoT мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

4. Визначено час затримки пакетів для різних шляхів доставки трафіку з черги на вихідному вузлі eNodeB/NB-IoT -1 умовної довжиною 100 тис. пакетів для мережі, який приблизно становить 0,190 с. Встановлено, що з урахуванням часу затримки пакетів в вузлах мережі, шлях з найменшим часом затримки передавання пакетів eNodeB-1 – eNodeB-5 – S-GW-1 має час затримки 0,482 с, а шлях з найбільшим часом затримки передавання трафіку eNodeB/NB-IoT-1 – eNodeB/NB-IoT-2 – eNodeB/NB-IoT-3– eNodeB/NB-IoT-4– S-GW-1 має час затримки 0,762 с. З урахуванням часу затримки у вузлах мережі eNodeB/NB-IoT, має час затримки 0,482 с, а шлях з найбільшим часом затримки передавання трафіку – 654 с.

5. 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.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Офіційний сайт 3GPP. – Режим доступу: <https://3GPP.com>
2. Офіційний сайт Київстар. – Режим доступу: <https://kyivstar.ua>
3. Офіційний сайт Vodafone. – Режим доступу: <https://www.vodafone.ua>
4. Офіційний сайт Lifecell. – Режим доступу: <https://www.lifecell.ua>
5. Офіційний сайт Ericsson в Україні. – Режим доступу: <https://www.ericsson.com>
6. **3GPP TR 21.914 V14.0.0** Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items (Release 14), 2018-05.
7. **3GPP ETSI TR 38.913**, Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies, V14.3.0, 2017.
8. **D. Evans**, The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything, White Paper: Cisco, 2014.
9. **3GPP TS 23.251** 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network Sharing; Architecture and functional description.
10. **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.
11. **3GPP TS 23.401** 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access.
5. **3GPP TR 36.888**. Study on provision of low-cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipment's (UEs) based on LTE (V12.0.0).
12. **Hassan M.** Introduction to Mobile Network Engineering: GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G. 1st Edition, Kindle Edition, 2022.
13. **Cox C.** An introduction to LTE LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications. 2018, John Wiley & Sons.
14. **Greengard S.** The Internet of Things, revised and updated edition (The MIT Press Essential Knowledge series). The MIT Press; Updated edition (August 24, 2021).
15. **Tsiatsis V.** Internet of Things: Technologies and Applications for a New Age of Intelligence 2nd Edition. Academic Press; 2nd edition (December 14, 2018).
16. Сайт мобільних рішень. – Режим доступу: https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_QCI.html

17. **Математичні основи теорії телекомунікаційних систем** / [Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф. та інші]; за загальною редакцією В.В. Поповського. – Харків: Тов. «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.

18. **Стрелковська І.В.** Використання тензорного методу при розрахунках ТКС, яка представлена вузловою мережею [Електронний ресурс] / І.В. Стрелковська, І.М. Соловська // Проблеми телекомунікацій. – 2010. – № 1 (1). – С. 68-75. <http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101>

19. **Крон Г.** Тензорный анализ сетей / Г. Крон; [под ред. Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова; пер. с англ.]. – М.: Сов. Радио, 1978. – 720 с.

20. **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.

21. **Стрелковська І.В.** Визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced / І.В. Стрелковська, І.М. Соловська, Д.В. Кордон // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2021. – № 1 (01) – С. 35-51.

22. **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 (ICAIIIT-2017), Vol. 1, Is. 5, Koethen, Germany, March, 16, 2017.– Anhalt University of Applied Sciences. – P. 9-16. <https://doi.org/10.13142/KT10005.02>

23. **Стрелковська І.В.** Маршрутизація в мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку / І.В. Стрелковська, І.М. Соловська // Зв'язок. – 2015. – № 1 – С.25-30.

Додаток А. ПЕРЕЛІК ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ