

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

---

---

Інститут електроенергетики  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

студента Зубкова Олексія Олександровича

академічної групи 172-183-1

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

спеціалізації<sup>1</sup>

за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка

на тему Оптимізація ключових показників ефективності хендоверів

у мобільних мережах стандарту LTE

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.т.н., доц. Герасіна О.В.			
розділів:				
спеціальний	к.т.н., доц. Герасіна О.В.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			
Рецензент				
Нормоконтролер	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			

Дніпро  
2022

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
безпеки інформації та телекомунікацій  
\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня бакалавра**

студенту Зубкову Олексію Олександровичу академічної групи 172-183-1  
(прізвище ім'я по-батькові) (шифр)

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка

на тему Оптимізація ключових показників ефективності хендверів  
у мобільних мережах стандарту LTE

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 18.05.2022 № 268-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1	Аналіз основних положень технології мобільного зв'язку LTE, а також видів і процедур процесу хендовера.	25.02.2022 – 31.03.2022
Розділ 2	Аналіз алгоритму та параметрів хендовера в мережах мобільного зв'язку LTE та розробка імітаційної моделі для аналізу ключових показників ефективності хендверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку LTE.	01.04.2022 – 12.05.2022
Розділ 3	Розрахунки витрат на розробку підходу до векторного квантування параметрів лінійного передбачення.	13.05.2022 – 09.06.2022

Завдання видано \_\_\_\_\_

(підпис керівника)

Герасіна О.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі: \_\_\_\_\_

Дата подання до екзаменаційної комісії: \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_

(підпис студента)

Зубков О.О.

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 21 рис., 3 таблиці, 4 додатки, 37 джерел.

Об'єкт розробки – мережа мобільного зв'язку LTE.

Предмет розробки – імітаційна модель для аналізу ключових показників ефективності хендоверів.

Мета кваліфікаційної роботи – аналіз і оптимізація ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі.

Наукова новизна результатів полягає у тому, що знаючи домінуючу швидкість пересування мобільних терміналів UE, а також фізичну конфігурацію базових станцій, можна знизити ймовірність великої кількості пізніх і ранніх хендоверів в мережі LTE.

У першому розділі проаналізовано основні положення технології мобільного зв'язку LTE, а також види і процедури процесу хендовера.

У спеціальній частині роботи проаналізовано алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку LTE та розроблено імітаційну модель для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку LTE. За наслідками досліджень зроблено висновки щодо рішення поставленої задачі.

У економічному розділі виконані розрахунки витрат на розробку підходу до векторного квантування параметрів лінійного передбачення.

КЛЮЧОВИЙ ПОКАЗНИК ЕФЕКТИВНОСТІ, МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ХЕНДОВЕР, КУТ НАХИЛУ АНТЕНИ, АВТОМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, СОТА, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 69 с., 21 рис., 3 таблицы, 4 приложения, 37 источников.

Объект разработки – сеть мобильной связи LTE.

Предмет разработки – имитационная модель для анализа ключевых показателей эффективности хэндоверов.

Цель квалификационной работы – анализ и оптимизация ключевых показателей эффективности хэндоверов в мобильных сетях LTE с помощью разработанной имитационной модели.

Научная новизна результатов заключается в том, что зная доминирующую скорость передвижения мобильных терминалов UE, а также физическую конфигурацию базовых станций можно снизить вероятность большого количества поздних и ранних хэндоверов в сети LTE.

В первой главе проанализированы основные положения технологии мобильной связи LTE, а также виды и процедуры процесса хэндовера.

В специальной части работы проанализированы алгоритм и параметры хэндовера в сетях мобильной связи LTE и разработана имитационная модель для анализа ключевых показателей эффективности хэндоверов абонентов между сотами в сети 4-го поколения мобильной связи LTE. По результатам исследований сделаны выводы о решении поставленной задачи.

В экономическом разделе выполнены расчеты затрат на разработку подхода к векторному квантованию параметров линейного предсказания.

КЛЮЧЕВЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ, МОБИЛЬНАЯ СВЯЗЬ, ХЭНДОВЕР, УГОЛ НАКЛОНА АНТЕНА, АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, БАЗОВАЯ СТАНЦИЯ, СОТА, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## ABSTRACT

Explanatory note: p. 69, fig. 21, tab. 3, 4 additions, 37 sources.

The object of development is LTE mobile network.

The subject of development is a simulation model for the analysis of key performance indicators of handover.

The purpose of the qualification work is the analysis and optimization of key performance indicators of handover in mobile LTE networks with the help of the developed simulation model.

The scientific novelty of the results is that knowing the dominant speed of mobile UE terminals, as well as the physical configuration of base stations, you can reduce the likelihood of a large number of late and early handovers in the LTE network.

The first section analyzes the main provisions of LTE mobile technology, as well as the types and procedures of the handover process.

In a special part of the work the algorithm and parameters of handover in LTE mobile communication networks are analyzed and a simulation model is developed for analysis of key indicators of subscribers' handover efficiency between cells in the 4th generation LTE mobile communication network. Based on the results of research, conclusions were made on the solution of the problem.

The economic section calculates the costs of developing an approach to vector quantization of linear prediction parameters.

KEY EFFICIENCY INDICATOR, MOBILE COMMUNICATION, HANDOVER, ANTENNA TILT ANGLE, AUTOMATIC OPTIMIZATION, BASE STATION, CELL, SIMULATION MODELING

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АП – Абонентський пристрій;
- БС – Базова станція;
- ВЧ – Високочастотний;
- КПЕ – Ключовий показник ефективності;
- МС – Мобільна станція;
- НЧ – Низькочастотний;
- ШПФ – Швидке перетворення Фур'є;
- CP – Cyclic Prefix – Циклічний префікс;
- FDD – Frequency Division Duplex – Дуплексування з частотним розподілом каналів;
- LTE – Long Term Evolution – Технологія мобільного зв'язку 4-го покоління;
- MBSFN – Multimedia Broadcast multicast service Single Frequency Network – Мультимедійний ширококомовний сервіс для одночастотної мережі;
- MIMO – Multiple Input Multiple Output – Системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами;
- MME – Mobility Management Entity – Елемент управління мобільністю;
- OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – Мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів;
- OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – Метод забезпечення передачі інформації багатьом користувачам одного радіоспектра на основі технології OFDM;
- QoS – Quality of service – Якість послуг;
- RSRP – Reference Signal Received Power – Середнє значення потужності прийнятих пілотних сигналів;
- RSRQ – Reference Signal Received Quality – Якість прийнятих пілотних сигналів;

TDD – Time Division Duplex – Дуплексування з часовим розподілом каналів;

WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access – Широкопasmовий множинний доступ із кодовим розподілом каналів.

## ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	10
1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	13
1.1 Технологія мобільного зв'язку LTE.....	13
1.1.1 Напрями розвитку широкосмугового бездротового зв'язку.....	13
1.1.2 Розвиток технології LTE.....	15
1.1.3 Принципи побудови радіоінтерфейсу за технологією LTE.....	16
1.1.4 Низхідний канал.....	21
1.1.5 Висхідний канал.....	24
1.1.6 Інформаційні потоки.....	29
1.1.7 Багатоантенні системи.....	31
1.1.8 Механізм диспетчеризації та повторні передачі.....	32
1.2 Хендовер.....	34
1.2.1 М'який хендовер.....	34
1.2.2 Жорсткий хендовер.....	36
1.2.3 Вертикальний хендовер.....	38
1.3 Висновок. Постановка задачі.....	40
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	42
2.1 Алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку стандарту LTE.....	42
2.2 Імітаційне моделювання для аналізу продуктивності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE.....	48
2.3 Висновок.....	53
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	55
3.1 Визначення трудомісткості формування імітаційної моделі для аналізу ключових показників ефективності хендоверів.....	55
3.2 Розрахунок витрат на аналіз і оптимізацію ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE.....	56



	9
3.3 Висновок .....	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	62
ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи .....	66
ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії.....	67
ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу.....	68
ДОДАТОК Г. Відгук керівника кваліфікаційної роботи .....	69

## ВСТУП

Збільшення обсягів трафіку диктує нові вимоги до ємності мережі. Наразі все більше пристроїв підключаються до мережі Інтернет вимагаючи високої швидкості передачі інформації. Особливо популярним останнім часом є доступ до Всесвітньої мережі за допомогою бездротового зв'язку.

LTE (Long Term Evolution) – це технологія мобільного зв'язку 4-го покоління, яка активно впроваджується операторами для надання абонентом високошвидкісного доступу до мережі Інтернет [1-11].

Відмінними функціями будь-якої мережі мобільного зв'язку є: хендовер – естафетна передача обслуговування терміналу користувача UE (User Equipment) між базовими станціями, а також роумінг – міжоператорська угода, яка дозволяє абонентам однієї мережі використовувати інфраструктуру мережі іншого оператора, перебуваючи за межами дії домашньої мережі. Саме завдяки цим функціям абоненти й стають мобільними.

Хендовер (від англ. «handover» – передача) – в стільниковому зв'язку процес переходу абонента від однієї базової станції до іншої. В супутниковому зв'язку процес передачі контролю над супутником від одного науково-вимірювального пункту до іншого без порушення і втрати обслуговування.

Взагалі, хендовер – одна з найбільш складних процедур у мобільному зв'язку, що конфігурується численними параметрами на кожній базовій станції (радіопідсистема), та в налаштуваннях елементів підсистеми комутації. Ефективність хендовера оцінюється за допомогою таких показників, як ймовірність успішної підготовки до хендоверу, ймовірність успішного виконання хендовера та тривалість самої процедури.

Оптимізація хендовера, що полягає у поліпшенні значень перелічених вище ключових показників ефективності (КПЕ), тривалий час виконувалася інженерами операторів мобільного зв'язку вручну. Однак у мережах 4-го покоління активно запроваджуються алгоритми самооптимізації КПЕ SON (Self-Organizing Network) [2]. У зв'язку з цим розробка алгоритмів, що

оптимізують процедуру хендовер у мережах стандарту LTE, набуває особливої актуальності.

Вивченню питань мереж, що самооптимізуються, та автоматичному підстроюванню параметрів хендоверів присвячено багато публікацій, у тому числі роботи [3-7]. У роботі [3] авторами розроблена імітаційна модель у програмному середовищі QualNet, за допомогою якої вивчається вплив на показники ефективності двох параметрів хендовера – ТТТ (Time-To-Trigger) та Нус (Hysteresis). Автори роботи [4] роблять акцент на оптимізації аркуша сусідів NCL (Neighbor Cell List) на підставі інформації про відстань між базовими станціями та кутах нахилу антен у сотах. Описаний алгоритм дозволяє видаляти «непотрібних» сусідів на етапі запуску мережі, однак не впливає на ефективність хендовера вже добре конфігурованої мережі. У роботах [5, 6] було виконано імітаційне моделювання алгоритмів самооптимізації хендовера для випадку гетерогенної мережі (макро, мікро- та фемтосоти). Стаття [7] присвячена оптимізації хендоверів для бездротових мереж стандарту LTE за допомогою автоматичного підстроювання параметрів ТТТ та запасу потужності із використанням методів нечіткої логіки.

Перелічені роботи – далеко не повний список публікацій, присвячених зазначеній тематиці, що, безумовно, свідчить про її актуальність. Однак, як і раніше, відсутні результати імітаційного моделювання процедури хендовера в умовах, наближених до реальних, які дозволяли б проаналізувати вплив усіх його параметрів на ключові показники ефективності мобільних мереж стандарту LTE.

Таким чином, дослідження та розробка алгоритмів, що оптимізують процедуру хендовера у мережах мобільного зв'язку LTE наразі є актуальною задачею.

Метою роботи є аналіз і оптимізація ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі.

Постановка задачі:

- проаналізувати основні положення технології мобільного зв'язку LTE;
- провести аналіз видів і процедур хендовера;
- проаналізувати алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку стандарту LTE;
- розробити імітаційну модель для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE.

## 1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

### 1.1 Технологія мобільного зв'язку LTE

#### 1.1.1 Напрями розвитку широкосмугового бездротового зв'язку

Бездротові цифрові комунікації, бурхливо стартувавши, продовжують розвиватись надзвичайно швидко. Цьому сприяє неухильний прогрес у мікроелектроніці, що дозволяє випускати дедалі складніші і навіть дешевші засоби бездротового зв'язку. Бум стільникового зв'язку, який можна порівняти лише зі зростанням виробництва персональних комп'ютерів та розвитком Інтернету, не сповільнюється вже чверть століття.

Низька вартість, швидкість розгортання, широкі функціональні можливості передачі даних, телефонії, відеопотоків роблять наразі бездротові мережі одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційної індустрії [8-24].

Розвиток бездротового зв'язку супроводжується безперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти стільникового зв'язку GSM і CDMA, і навіть стандарти систем передачі IEEE 802 (рис. 2.1).

Історично технології бездротового зв'язку розвивалися за двома незалежними напрямками – системи телефонного зв'язку (стільниковий зв'язок) та системи передачі даних (Wi-Fi, WiMAX). Але потім стала спостерігатись очевидна тенденція до злиття цих функцій.

У свою чергу сучасні мережі передачі інформації обов'язково забезпечують заданий рівень якості послуг (QoS – Quality of service) для різних видів трафіку. Реалізується підтримка пріоритезації окремих потоків інформації, причому як на мережному/транспортному рівнях (на рівні TCP/IP), так і на рівні MAC (стандарти IEEE 802.16). Це дозволяє використовувати їх для надання послуг голосового зв'язку, передачі мультимедійної інформації тощо.

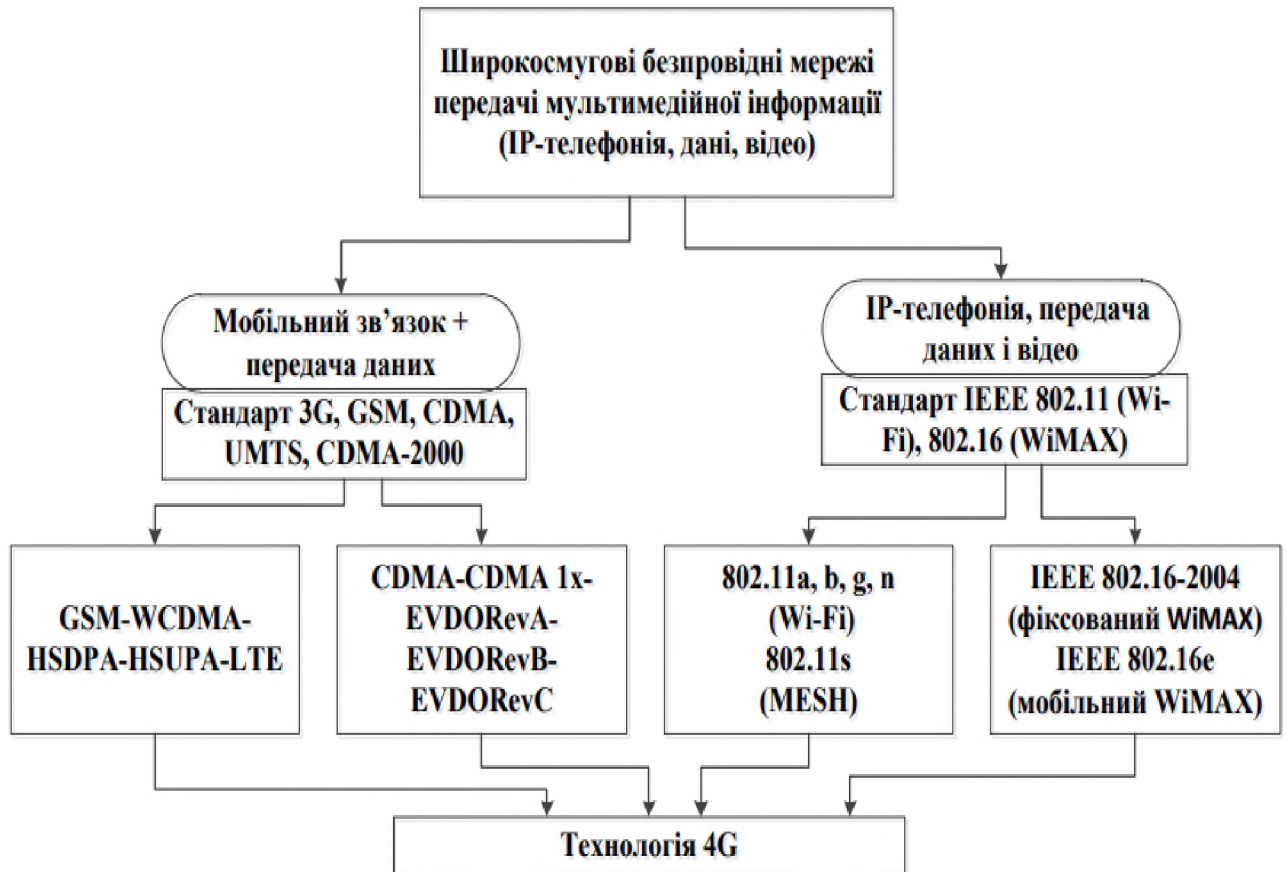


Рисунок 1.1 – Основні напрямки розвитку технології широкопугового зв'язку

У зв'язку з цим саме поняття мереж четвертого покоління (4G) було нерозривно пов'язане (якщо не синонімічно) зі створенням універсальних мобільних мультимедійних мереж передачі інформації.

Слід зазначити, що вимоги кінцевих користувачів до послуг постійно підвищуються. Мобільні мережі повинні використовуватися не тільки для стільникового зв'язку, але й для передачі відео, мобільного телебачення, музики та роботи з Інтернетом з високими швидкостями та якістю передачі.

Саме з цією метою в рамках проекту співробітництва у створенні мереж третього покоління 3GPP (3G Partnership Project) з 2004 р. було розпочато розробку технології LTE (від англ. «Long Term Evolution» – довготерміновий розвиток).

### 1.1.2 Розвиток технології LTE

Розробка технології LTE як стандарту офіційно розпочалася наприкінці 2004 року (рис. 1.2).

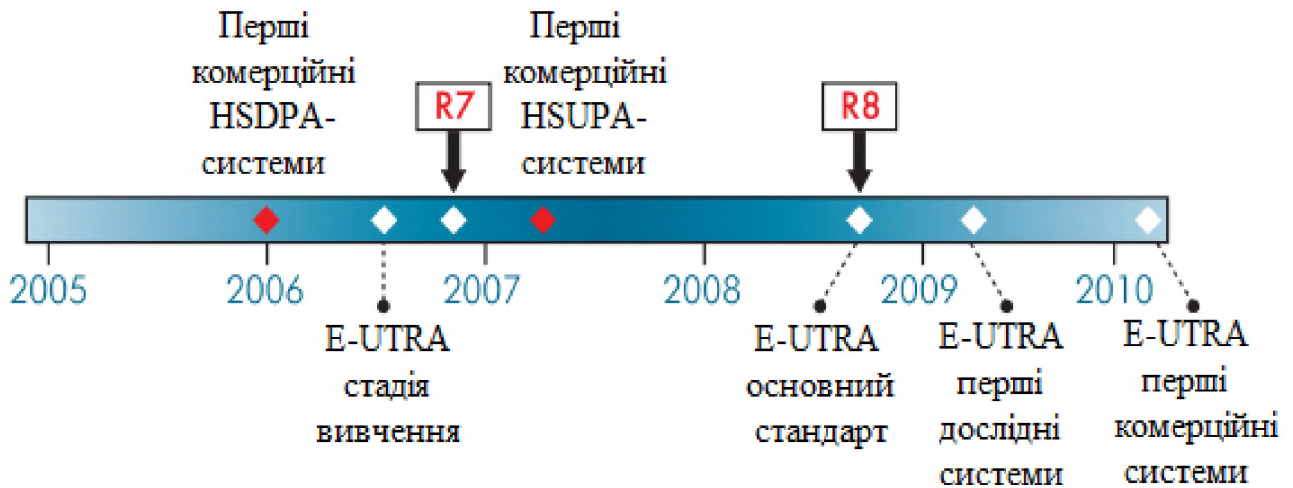


Рисунок 1.2 – Основні етапи розвитку технології LTE

Основною метою досліджень на початковому етапі був вибір технології фізичного рівня, яка б забезпечити високу швидкість передачі даних. Як основні були запропоновані два варіанти: розвиток існуючого радіоінтерфейсу WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access – широкопasmовий множинний доступ із кодовим розподілом каналів) та створення нового на основі технології OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів). В результаті проведених досліджень єдиною технологією виявилася OFDM, і в 2006 р. в 3GPP була створена перша специфікація на радіоінтерфейс Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Перші, попередні специфікації LTE створювалися в рамках так званого 3GPP Release 7. А в 2008 р. затверджено версію стандартів 3GPP (Release 8), що фіксує архітектурні та функціональні вимоги до систем LTE. У 2009 р. була поява перших дослідних систем на основі LTE, а у 2010 р. – перших комерційних мереж.

### 1.1.3 Принципи побудови радіоінтерфейсу за технологією LTE

LTE базується на трьох основних технологіях: OFDM, багатоантенні системи MIMO (Multiple Input Multiple Output) та еволюційна системна архітектура мережі (System Architecture Evolution) [25-30].

Принципово, що дуплексний розподіл каналів, можливий як частотний (FDD – Frequency Division Duplex), так і часовий (TDD – Time Division Duplex). Це дозволяє операторам дуже гнучко використовувати частотний ресурс. Таке рішення відкриває шлях на ринок тим компаніями, які не мають спарених частот. З іншого боку, підтримка FDD дуже зручна для традиційних мобільних операторів, оскільки у них спарені частоти є «за визначенням» – так організовані практично всі системи мобільного зв'язку. Сама ж по собі система FDD істотно ефективніша в плані використання частотного ресурсу, ніж TDD, – у ній менше накладних витрат (службових полів, інтервалів тощо).

Обмін між базовою станцією (БС) та мобільною станцією (МС) будується за принципом циклічно повторюваних кадрів (у термінології LTE – радіокадр) [26]. Тривалість радіокадру – 10 мс. Всі часові параметри в специфікації LTE прив'язані до мінімального часового кванту  $T_s=1/(2048 \cdot f)$ , де  $\Delta f$  – крок між піднесучими, стандартно – 15 кГц. Отже, тривалість радіокадру –  $307200T_s$ .

Стандарт LTE передбачає два типи радіокадрів. Тип 1 призначений для частотного дуплексування як для повного дуплексу, так і для напівдуплексу. Такий кадр складається з 20 слотів (тривалістю 0,5 мс), що нумеруються від 0 до 19. Два суміжні слоти утворюють субкадр (рис. 1.3). При повнодуплексному режимі радіокадри у висхідному та низхідному каналах передаються паралельно, але з обумовленим у стандарті часовим зрушенням.

Радіокадр типу 2 (рис. 1.4) призначений тільки для часового дуплексування. Він складається із двох напівкадрів тривалістю по 5 мс. Кожен напівкадр містить 5 субкадрів тривалістю 1 мс. Стандарт передбачає два цикли часового дуплексування – 5 та 10 мс. У першому випадку 1-й та 6-й субкадри ідентичні та містять службові поля DwPTS, UpPTS та захисний інтервал GP.



При 10-м циклі TDD 6-й субкадр використовується для передачі даних в низхідному каналі. Субкадри 0 і 5, а також поле DwPTS завжди відносяться до низхідного каналу, а субкадр 2 та поле UpPTS – до висхідного. Можливо декілька варіантів тривалості полів DwPTS, UpPTS та GP, але їх сума завжди дорівнює 1 мс.

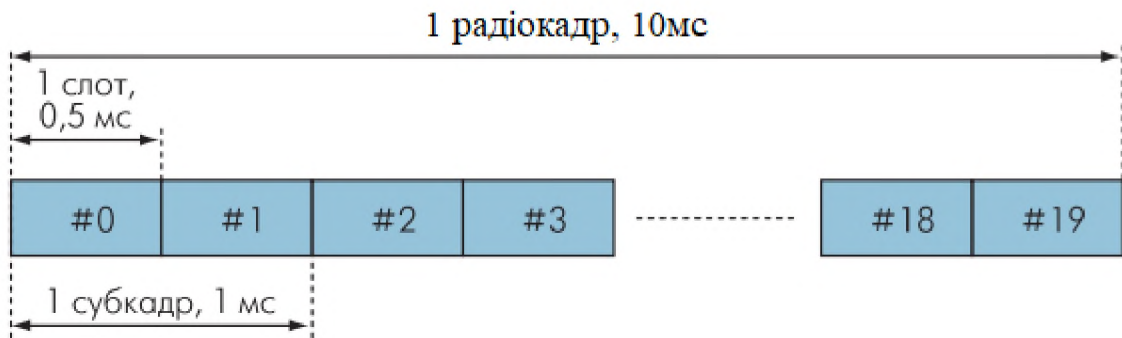


Рисунок 1.3 – Структура кадру LTE при частотному розподілі дуплексних каналів

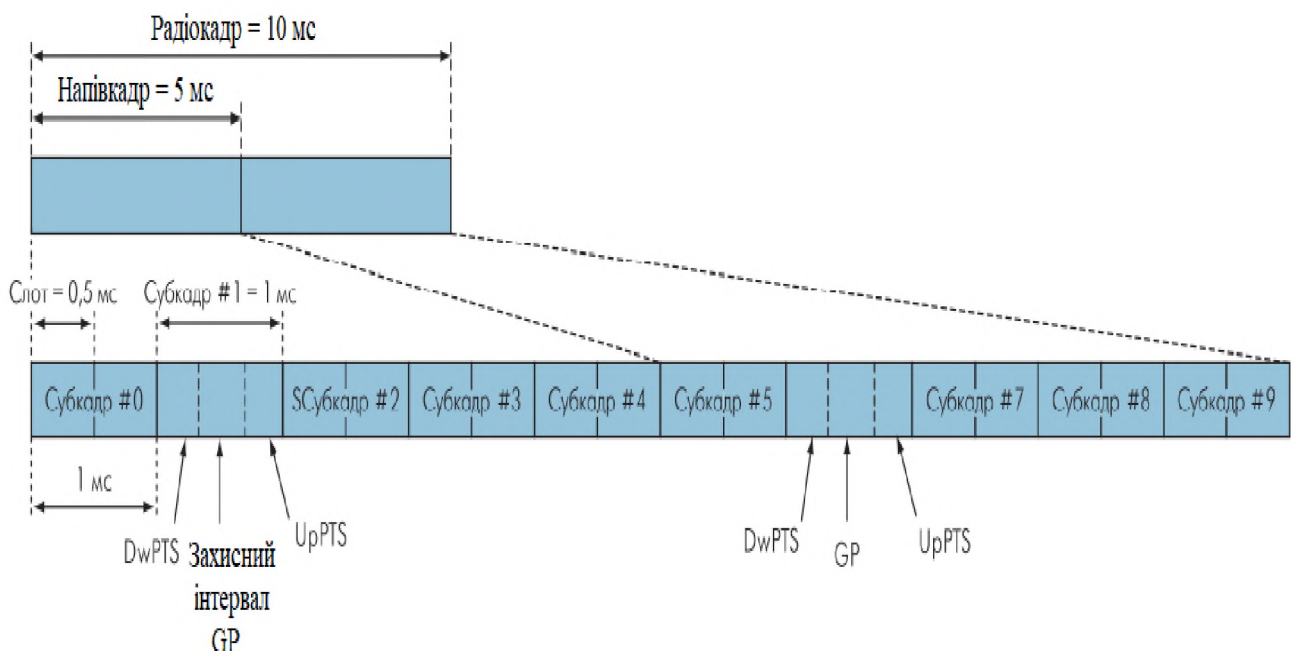


Рисунок 1.4 – Структура кадру LTE при часовому розподілі дуплексних каналів

Технологія OFDM, що використовується в LTE, передбачає передачу широкосмугового сигналу за допомогою незалежної модуляції вузькосмугових піднесучих видів  $S_k(t) = a_k \cdot \sin [2\pi (f_0 + k\Delta f)]$ , розташованих з певним кроком частоти  $\Delta f$ . Один OFDM символ містить набір модульованих піднесучих. У часовій області OFDM-символ включає поле даних (корисна інформація) і так званий циклічний префікс CP (Cyclic Prefix) – фрагмент кінця попереднього символу, що повторно передається (рис. 1.5).

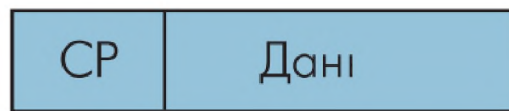


Рисунок 1.5 – OFDM-символ із циклічним префіксом

Призначення циклічного префікса – боротьба з міжсимвольною інтерференцією у приймачі внаслідок багатопроменевого поширення сигналу. Відбитий сигнал, що надходить із затримкою, потрапляє у зону префікса і накладається на корисний сигнал. У LTE прийнято стандартний крок між піднесучими  $\Delta f = 15$  кГц, що відповідає тривалості OFDM-символу 66,7 мкс.

Кожному абонентському пристрою (АП) у кожному слоті призначається певний діапазон каналних ресурсів у частотно часовій області (рис. 1.6) – ресурсна сітка.

Осередок ресурсної сітки – так званий ресурсний елемент – відповідає одній піднесучій у частотній області та одному OFDM-символу у часовій. Ресурсні елементи утворюють ресурсний блок – так звану мінімальну інформаційну одиницю у каналі. Ресурсний блок займає 12 піднесучих та 7 або 6 OFDM-символів, залежно від типу циклічного префікса – таким чином, щоб загальна тривалість слота становила 0,5 мс. Число ресурсних блоків NRB в ресурсній сітці залежить від ширини смуги каналу і становить від 6 до 110 (ширина частотних смуг висхідного/низхідного каналів LTE - від 1,4 до 20 МГц).

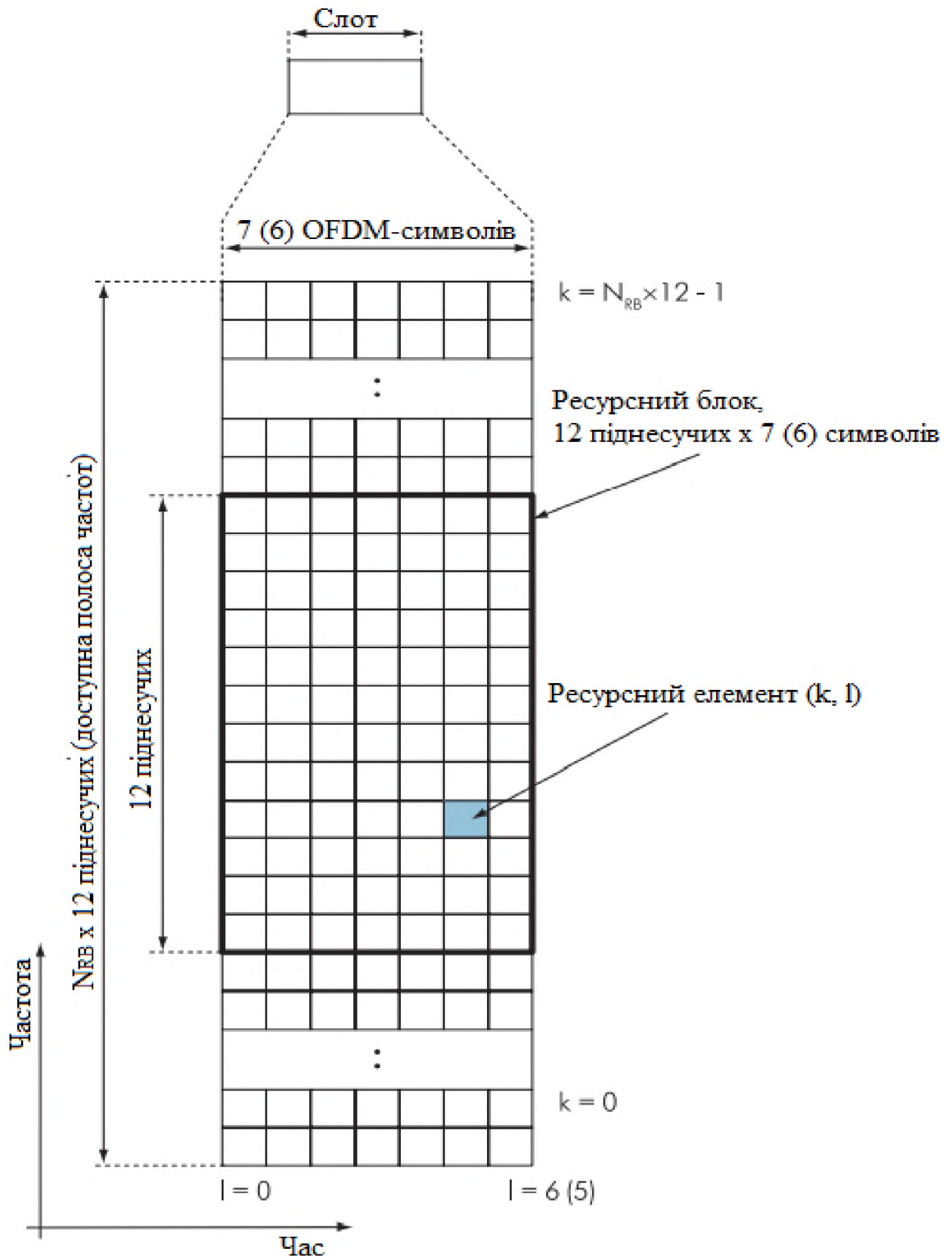


Рисунок 1.6 – Ресурсна сітка LTE при стандартному кроці піднесучих  $\Delta f = 15$  кГц

Ресурсний блок – це мінімальний ресурсний елемент, що виділяється абонентському пристрою планувальником базової станції. Про розподіл ресурсів у кожному слоті БС повідомляє у спеціальному керуючому каналі.

Кожна піднесуча модулюється за допомогою 4-, 16- і 64-позиційної квадратурної фазово-амплітудної модуляції (QPSK, 16-QAM або 64-QAM). Відповідно, один символ на одній піднесучій містить 2, 4 або 6 біт.

Специфікації LTE визначають декілька фіксованих значень для ширини висхідного та низхідного каналу між БС та АС (у мережах E-UTRA), параметри яких представлено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри каналу передачі між БС та АП

Ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100
Число піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Число номінальних несучих для ШПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Тактова частота для ШПФ, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Оскільки в OFDM використовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ), число формальних піднесучих для спрощення процедур цифрової обробки сигналу має бути кратним  $N=2^n$  (тобто 128, 256, ..., 2048). При цьому частота вибірок має становити  $F_s=\Delta f \cdot N$ .

При заданих у стандарті значеннях вона виявляється кратною 3,84 МГц – стандартній частоті вибірок технології WCDMA. Це є дуже зручним для створення багатомодових пристроїв, які підтримують як WCDMA, так і LTE.

Слід зазначити, що при формуванні сигналу амплітуди «зайвих» піднесучих (включаючи центральну піднесучу каналу) вважаються рівними нулю.

#### 1.1.4 Низхідний канал

У низхідному та висхідному каналі застосування технології OFDM різне. У низхідному каналі ця технологія використовується не тільки для передачі сигналу, але й для організації множинного доступу (OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) – тобто для мультиплексування абонентських каналів.

Крім описаного фізичного структурного блоку, вводиться поняття логічного структурного блоку. За кількістю ресурсних елементів вони еквівалентні, проте можливо два варіанти відображення ресурсних елементів фізичного блоку в логічний – один на один і розподілено. В останньому разі елементи логічного ресурсного блоку виявляються розподіленими по всій доступній ресурсній сітці.

На відміну від пакетних мереж, у LTE немає фізичної преамбули, яка необхідна для синхронізації та оцінки усунення несучої. Натомість у кожен ресурсний блок додаються спеціальні опорні та синхронізуючі сигнали. Опорні сигнали можуть бути трьох видів – опорний сигнал, що характеризує осередок (Cell-specific), сигнал, пов'язаний з конкретним абонентським пристроєм, та сигнал для спеціального мультимовного широкомовного сервісу MBSFN (Multimedia Broadcast multicast service Single Frequency Network – мультимедійний широкомовний сервіс для одночастотної мережі). Опорний сигнал служить для безпосереднього визначення умов у каналі передачі (оскільки приймачеві відоме його місцезнаходження та початкова форма). На основі цих вимірювань можна визначити реакцію каналу для інших піднесучих і за допомогою інтерполяції відновити їх початкову форму.

Опорний cell-specific-сигнал повинен бути присутнім у кожному субкадрі низхідного каналу (крім випадків MBSFN-передачі). Форма сигналу визначається на основі псевдовипадкової послідовності Голда (варіант  $m$ -послідовності), при ініціалізації якої використовується ідентифікаційний номер осередку БС (Cell ID).

Такий опорний сигнал рівномірно розподілено за ресурсними елементами (рис. 1.7). Так, при стандартній довжині префікса він транслюється в 0-му та 4-му OFDM-символі, при розширеному CP – під час 0-го та 3-го OFDM-символу. У частотній області опорні сигнали передаються через кожні шість піднесучих, причому зсув визначається ідентифікатором осередку, взятим за модулем 6.

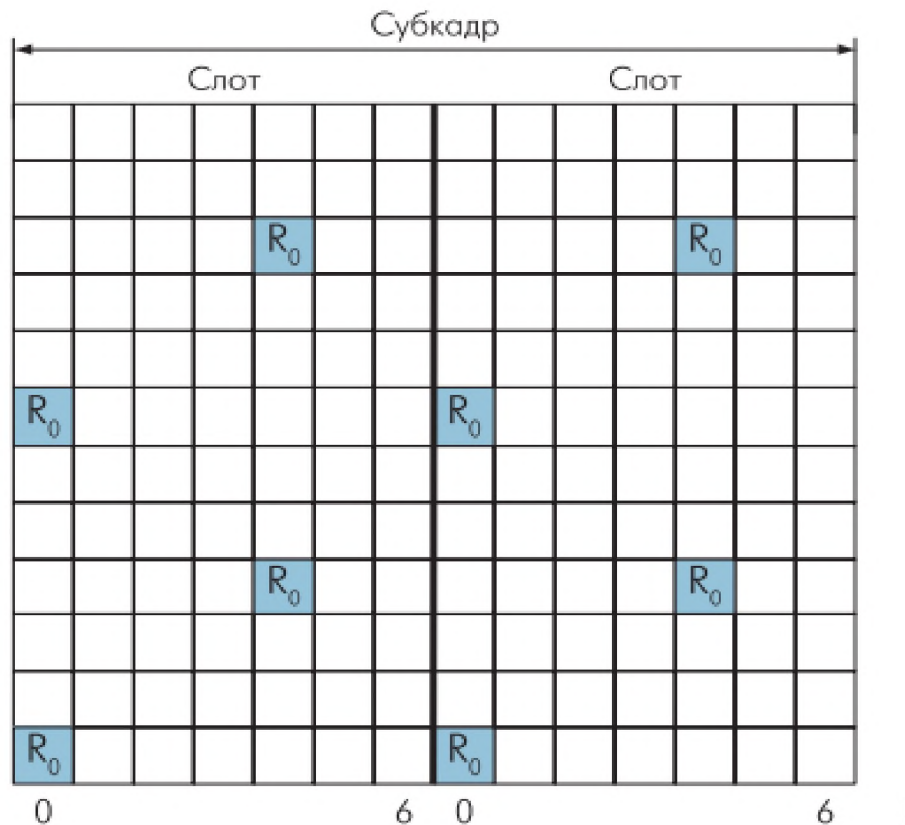


Рисунок 1.7 – Розташування опорного сигналу (cell-specific) у низхідному каналі ресурсної сітки LTE у разі роботи з однією антеною

Крім опорних сигналів, у низхідному каналі транслюються і синхронізуючі сигнали. Синхронізуючі сигнали також однозначно визначають Cell ID. У LTE прийнята ієрархічна структура ідентифікації осередку, як і в технології WCDMA, що передувє їй. Передбачається, що фізично доступно 504 Cell ID. Вони розбиті на 168 ID-груп, по 3 ідентифікатори в кожній. Номер групи  $N_1$  (0-167) та номер ідентифікатора в ній  $N_2$  (0-2) однозначно визначають ID комірки.

Використовується два синхросигнали – первинний та вторинний. Первинний синхросигнал є 62-елементною послідовністю в частотному плані, що задається послідовністю Задова-Чу на основі ідентифікатора  $N_2$ . Така послідовність з 62 піднесучих, розподілених по ресурсній сітці симетрично відносно її центральної частоти, передається в радіокадрі типу 1 в останньому символі OFDM-слотів 0 і 10 (субкадри 0 і 5). У радіокадрі типу 2 для передачі первинного синхросигналу використовується третій OFDM-символ субкадрів 1 і 6. Вторинний синхросигнал генерується на основі номера ID-групи  $N_1$ . Він передається в слотах 0 і 10 радіокадру типу 1 (п'ятий OFDM-символ при стандартному CP) та в слотах 1 і 11 радіокадру типу 2 (шостий OFDM-символ при стандартному CP).

Формування сигналу в низхідному каналі є достатньо стандартним для сучасних систем цифрової передачі (рис. 1.8).

Воно включає процедури каналного кодування, скремблювання, формування модуляційних символів, їх розподілу по антенних портах та ресурсних елементах та синтезу OFDM-символів. Канальне кодування має на увазі обчислення контрольних сум (CRC-24) для блоків даних, що надходять із MAC-рівня. Потім блоки з контрольними сумами обробляються кодером зі швидкістю кодування  $1/3$ .

У LTE передбачено застосування або згорткового коду, або турбо-коду. Кодована послідовність після перемежування (інтерлівінгу) надходить у скремблер – для вхідної послідовності  $\{x(i)\}$  виконується процедура виду

$$d_{\text{scr}}(i) = x(i) + c(i), \quad (1.1)$$

де  $c(i)$  – певна скремблююча послідовність.

Потім формуються комплексні модуляційні символи (QPSK, 16- і 64-QAM) та розподіляються за ресурсними елементами. Далі відбувається синтез OFDM-символів, їх послідовність надходить в модулятор, що формує вихідний високочастотний (ВЧ) сигнал в заданому частотному діапазоні.

Слід зазначити, що на стороні прийому всі процедури виконуються у зворотному порядку.

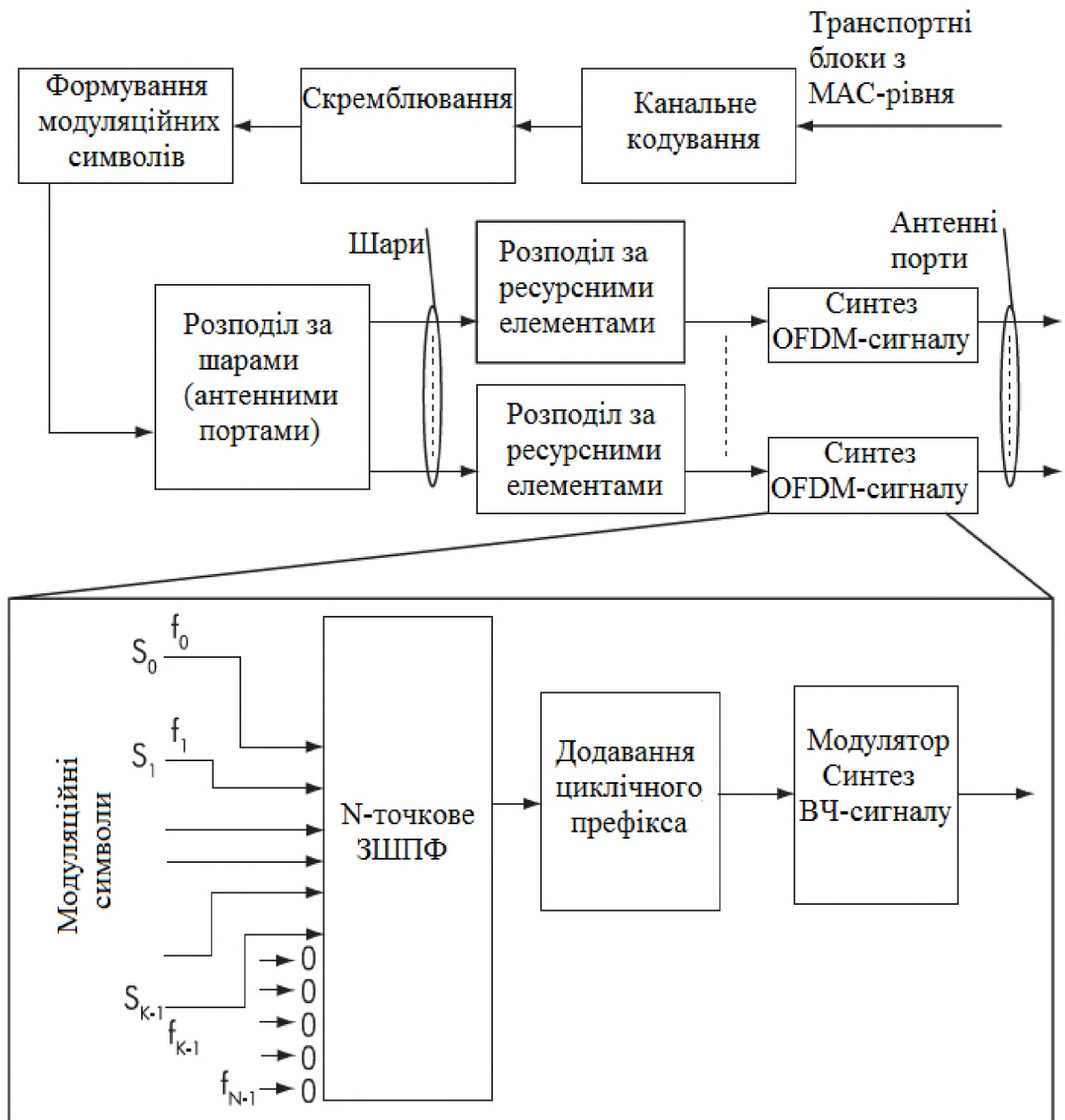


Рисунок 1.8 – Схема формування сигналу в низхідному каналі

### 1.1.5 Висхідний канал

Застосування OFDM у поєднанні з циклічним префіксом робить зв'язок стійким до часової дисперсії параметрів радіоканалу, в результаті на



приймальній стороні стає непотрібним складний еквалайзер. Це дуже корисно для організації низхідного каналу, оскільки спрощується обробка сигналу приймачем, що знижує вартість термінального пристрою і потужність, що споживається ним.

У висхідному каналі допустима потужність випромінювання значно нижча, ніж у низхідному. Тому первинним стає енергетична ефективність методу передачі з метою збільшення зони покриття, зниження вартості термінального пристрою і споживаної ним потужності.

Основний недолік технології OFDMA – високе співвідношення пікової та середньої потужності сигналу (PAR). Це пов'язано з тим, що у часовій області спектр OFDM-сигналу стає аналогічним Гаусовому шуму, що характеризується високим PAR. Крім того, сама по собі технологія OFDMA, з урахуванням необхідності мінімізувати крок між піднесучими та скорочувати відносну тривалість CP, висуває дуже високі вимоги до формування композитного сигналу. Мало того, що частотні неузгодженості між передавачем і приймачем і фазовий шум у сигналі можуть призвести до межсимвольної інтерференції на окремих піднесучих (тобто до інтерференції між сигналами різних абонентських каналів). При малому кроці між піднесучими до аналогічних наслідків, може привести і ефект Доплера, що дуже актуально для систем стільникового зв'язку, які передбачають високу мобільність абонентів.

У зв'язку з цим для висхідного каналу LTE було запропоновано нову технологію – SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access). Принципова її відмінність – якщо в OFDMA на кожній піднесучій одночасно передається свій модуляційний символ, то в SC-FDMA піднесучі модулюються одночасно і однаково, але модуляційні символи коротші. Тобто OFDMA символи передаються паралельно, SC-FDMA – послідовно. Таке рішення забезпечує менше відношення максимального та середнього рівнів потужності порівняно з використанням звичайної модуляції OFDM, внаслідок чого підвищується енергоефективність абонентських пристроїв та спрощується їх

конструкція (суттєво знижуються вимоги до точності частотних параметрів передавачів).

Структура SC-FDMA-сигналу багато в чому аналогічна технології OFDM. Також використовується композитний сигнал – модуляція множини піднесучих, розташованих з кроком  $\Delta f$ . Принципова відмінність у цьому, що всі піднесучі модулюються однаково – тобто одночасно передається лише один модуляційний символ (рис. 1.9).

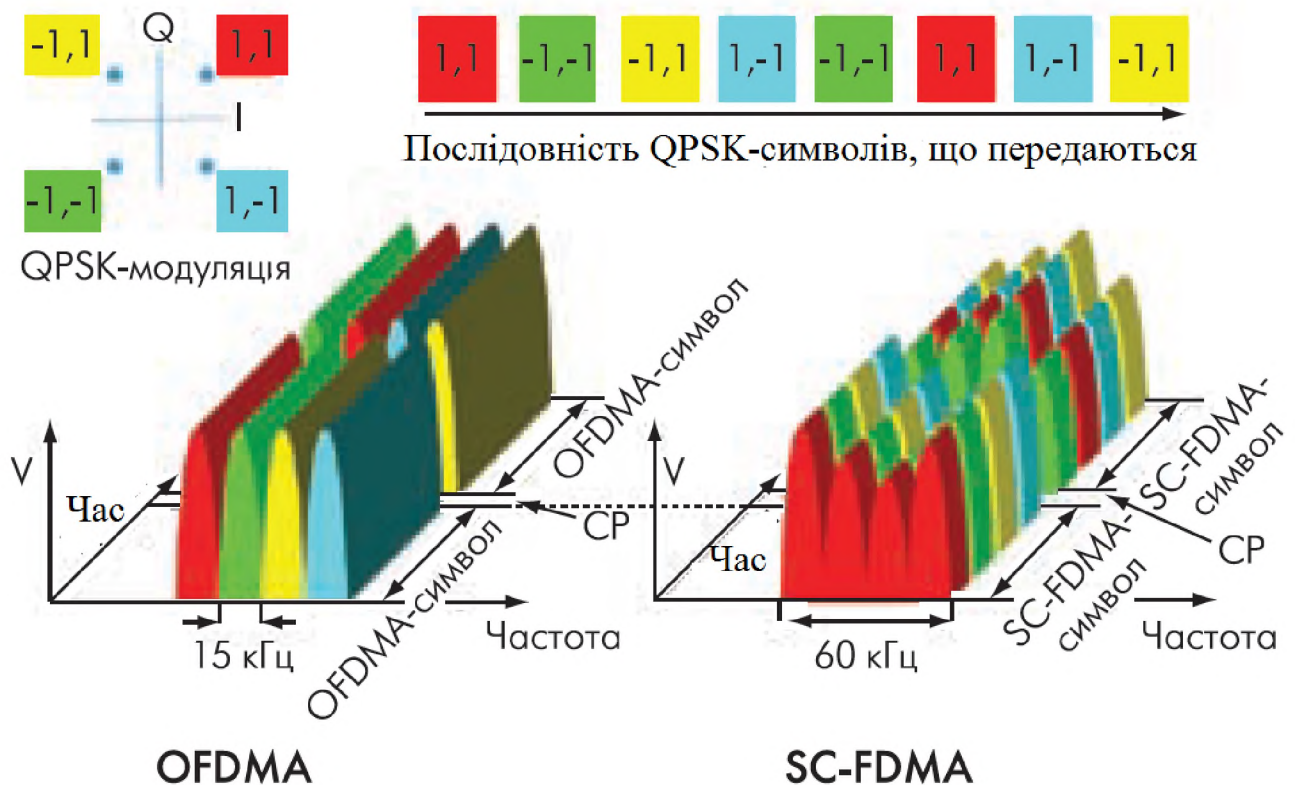


Рисунок 1.9 – Відмінність між OFDMA та SC-FDMA при передачі послідовності QPSK-символів

При цьому ресурсна сітка повністю аналогічна до низхідного каналу. Так само кожен фізичний ресурсний блок, відповідний слоту, займає 12 піднесучих з кроком  $\Delta f=15$  кГц у частотній області і 0,5 мс – у часовій. Ресурсному блоку відповідають 7 SC-FDMA-символів при стандартному циклічному префіксі та 6 – при розширеному. Тривалість SC-FDMA-символу (без префікса) дорівнює

тривалості OFDMA-символу і становить 66,7 мкс (тривалості відповідних циклічних префіксів також рівні між собою). У сітці може бути від 6 до 110 ресурсних блоків, але їхнє число має бути кратно 2; 3 або 5, що пов'язано з процедурою дискретного перетворення Фур'є. Ще одна особливість – підтримка модуляції 64-QAM в АП опціональна.

Кожному абоненту мережі для передачі даних від базової станції за допомогою функції планування на певний час виділяється певна кількість ресурсних блоків. Розклад передається абонентам службовими каналами в низхідному радіоканалі.

Однак якщо при OFDMA один модуляційний символ (QPSK, 16- або 64-QAM) відповідає OFDM-символу на одній піднесучій (15 кГц, 66,7 мкс), то при SC-OFDMA ситуація інша. У частотному плані ширина модуляційного символу виявляється рівною всій доступній смузі частот (він передається усім піднесучим одночасно). При цьому один SC-FDMA-символ містить кілька модуляційних символів – в ідеалі стільки ж, скільки піднесучих – але у відповідну кількість разів більш коротких порівняно з OFDMA, що повністю відповідає умовам теореми Котельникова-Шеннона.

Сама процедура формування SC-FDMA-сигналу відрізняється від схеми OFDMA. Після каналного кодування, скремблювання та формування модуляційних символів вони групуються в блоки  $M$  символів – субсимволів SC-FDMA (рис. 1.10). Очевидно, що безпосередньо віднести їх на піднесучі з кроком 15 кГц неможливо – потрібна в  $N$  разів більша частота, де  $N$  – це число доступних для передачі піднесучих. Тому, сформувавши групи  $M$  модуляційних символів ( $M < N$ ), їх піддають  $M$ -точковому дискретному Фур'є-перетворенню (ДПФ), тобто формують аналоговий сигнал. А вже потім за допомогою стандартної процедури зворотного  $N$ -точкового Фур'є-перетворення синтезують сигнал, відповідний незалежній модуляції кожної піднесучої, додають циклічний префікс і генерують вихідний ВЧ-сигнал. В результаті такого підходу передавач та приймач OFDMA- та SC-FDMA-сигналів мають схожу функціональну структуру (див. рис. 1.8 та 1.10).

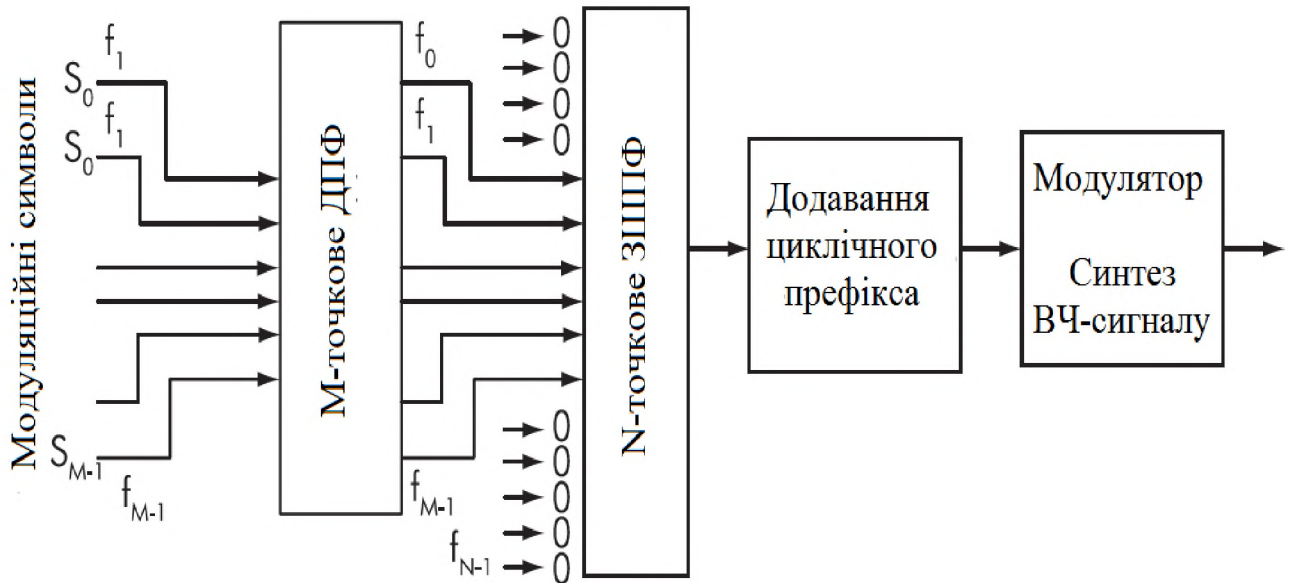


Рисунок 1.10 – Особливість формування вихідного сигналу у разі SC-FDMA

Слід зазначити, що АП може використовувати як фіксований частотний діапазон (використовуються суміжні ресурсні блоки, тобто суміжні піднесучі), так і розподілений – так званий режим стрибкоподібної перебудови частоти (FH). В останньому випадку для кожного слота висхідного каналу використовується новий ресурсний блок із доступної ресурсної сітки. Параметри перебудови частоти задаються мережевим устаткуванням і повідомляються як із ініціалізації абонентської станції у мережі, і під час роботи у каналі управління. У разі розподіленого способу – інформація від кожного абонента розташована у всьому спектрі сигналу (рис. 1.11), тому цей спосіб стійкий до частотно-виборчого завмирання. З іншого боку, при локалізованому способі розподілу можна визначити смугу, в якій для цього абонента досягається максимальна стійкість каналу до завмирань. Оскільки області завмирання сигналу всіх абонентів різні, можна досягти загальної максимальної ефективності використання радіоканалу. Однак це вимагає безперервного сканування частотної характеристики каналу для кожного пристрою та організації функції диспетчеризації.

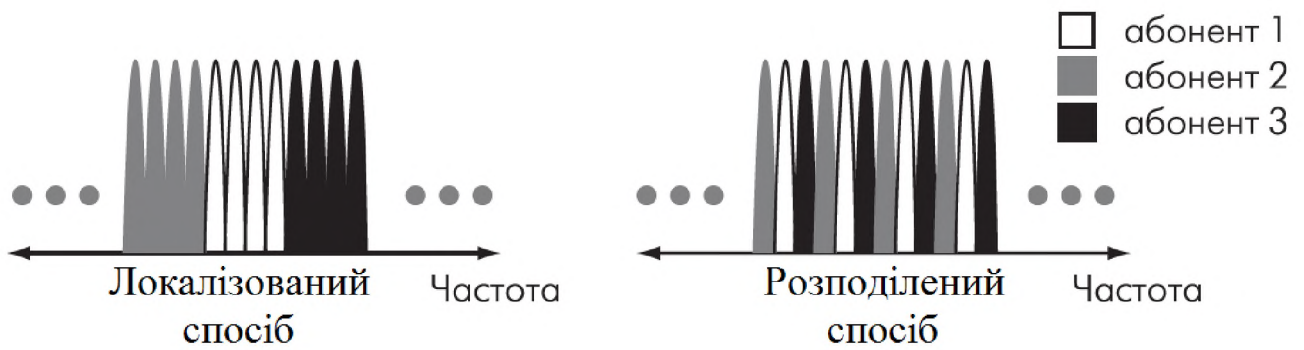


Рисунок 1.11 – Способи розподілу піднесучих в SC-FDMA

Крім власне інформації, що генерується функціями верхніх рівнів, у висхідному каналі передаються опорні сигнали. Їх призначення – допомогти приймачеві БС налаштуватися на певний передавач АП. Крім того, ці сигнали дозволяють оцінити якість каналу, що використовується в БС при диспетчеризації ресурсів. Опорні сигнали у висхідному каналі бувають двох видів – так звані «де модульовані» та зондові (sounding). Демодульовані опорні сигнали аналогічні опорним сигналам низхідного каналу. Вони передаються постійно. Так, у загальному інформаційному каналі послідовність демодульованого опорного сигналу передається у четвертому SC-FDMA-символі кожного слоту за стандартом CP. Зондові сигнали аперіодичні. Їх основне призначення – дати БС можливість оцінити якість каналу, якщо передача ще не ведеться.

### 1.1.6 Інформаційні потоки

Як у висхідному, так і в низхідному каналах передаються різні типи інформаційних потоків.

У висхідному каналі їх три - канал загального користування призначення (PUSCH), керуючий канал (PUCCH) та канал довільного доступу (PURCH). Призначення першого очевидне – передача інформації користувачів.

Керуючий канал містить таку інформацію, як індикатор якості каналу, повідомлення підтвердження доставки (ACK/NACK) та запит на отримання розкладу (про доступні ресурси). Канал загального користування та керуючий канал ніколи не транслюються одночасно одним АП. Для передачі каналу, що управляє, використовуються один ресурсний блок в кожному із слотів одного субкадра.

В залежності від формату PUSCH можливі чотири варіанти його розташування на ресурсній сітці (рис. 1.12), що визначаються змінною  $m$ .

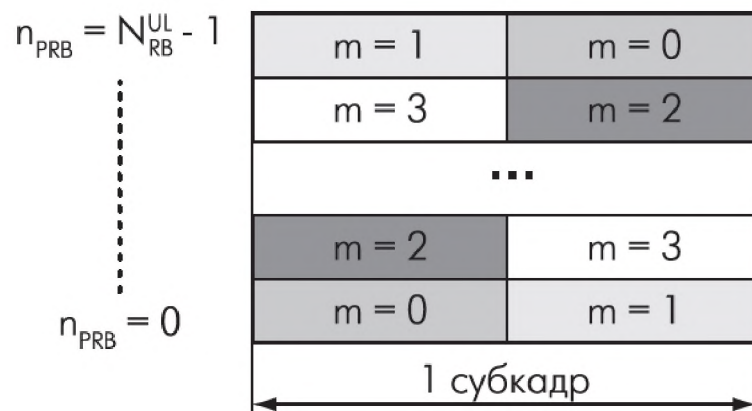


Рисунок 1.12 – Варіанти розташування каналу управління PUSCH у низхідному каналі

Канал довільного доступу служить для запиту початкової ініціалізації в мережі, при хендовері, при виході з режиму очікування в активний режим і т.п. Абонентській станції призначається інтервал у ресурсній сітці (номер фізичного ресурсного блоку та номер субкадра), протягом якого вона передає спеціальний пакет – преамбулу довільного доступу. Преамбула генерується на основі послідовностей Задова-Чу з нульовою зоною кореляції, всього визначено 64 різні преамбули на одну комірку. БС, прийнявши запит доступу, відповідає у тому самому каналі довільного доступу (але вже спадному) підтвердженням. Якщо підтвердження не одержано, АП повторює запит.

У низхідному напрямі інформаційних каналів значно більше. Це загальний канал (Physical Downlink Shared Channel – PDSCH); канал управління

(Physical Downlink Control Channel – PDCCH); канал групової передачі (Physical Multicast Channel – PMCH); широкомовний канал (Physical Broadcast Channel – PBCH); індикаторний канал керування форматом (Physical Control Format Indicator Channel – PCFICH) та індикаторний канал гібридної процедури повторного запиту (HARQ) Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH).

Призначення загального каналу очевидне – передача даних конкретним абонентським пристроям. У каналі управління PDCCH передаються таблиці з призначенням каналних ресурсів абонентським пристроям – як у низхідному, так і у висхідному каналах. У каналі PCFICH, який передається в кожному субкадрі, вказуються номери символів OFDM, які використовуються для трансляції повідомлень каналу управління PDCCH. Канал PHICH призначений для підтвердження доставки даних у висхідному каналі. Призначення каналів групової передачі та широкого мовлення також очевидні. Особливість широкомовного каналу – кожен блок транспортного широкомовного каналу (з верхніх рівнів протоколу) транслюється у чотирьох субкадрах, що йдуть з жорстко фіксованим інтервалом 40 мс. Це виключає необхідність у додаткових показниках розташування цих субкадрів.

### 1.1.7 Багатоантенні системи

Як і всі сучасні технології бездротового зв'язку, LTE підтримуються багатоантенні системи (MIMO). Враховуючи орієнтацію цієї технології на максимально прості абонентські пристрої, техніка MIMO у LTE максимально спрощена. Стандарт розглядає MIMO-схеми, 1, 2 і 4 передавальних та приймальних антен у різних поєднаннях.

У MIMO-системах є два основних види передачі – просторове мультиплексування та диверсифікована передача. Перший режим означає, що кожен антенний канал транслює незалежний інформаційний потік. При цьому самі канали мають бути некорельованими. Можливо два види просторово-

мультиплексованої передачі – для одного АП (SU-MIMO) та для групи АП (MU-MIMO).

У першому випадку БС передає кілька незалежних потоків даних одному АП. При цьому в АП має бути, принаймні, не менше антен, ніж у БС. У MU-MIMO ресурсні елементи з однаковими частотно-часовими параметрами повинні прийматися до різних АП (при цьому мова про цифрове формування діаграми спрямованості не йдеться).

Принципово, що одночасно по всіх антенних каналах може передаватися лише два кодові слова (тобто тільки два логічно незалежні інформаційні потоки). Тому, незважаючи на чотири можливі антенні канали, в режимі MU-MIMO БС в одному частотно-часовому діапазоні здатна працювати тільки з двома АП.

Диверсифікована передача означає, що декілька антенних каналів використовуються для передачі одного потоку даних. Ця техніка призначена для боротьби із завмираннями в радіоканалі і спрямована лише на покращення якості передачі в каналі. На швидкість передачі вона впливає опосередковано через підвищення якості каналу.

У висхідному каналі можлива схема просторового мультиплексування безлічі абонентів MU-MIMO. Декілька АП, кожен з однією антеною, можуть використовувати однакові частотно-часові ресурси, але за рахунок декорелювання антенних каналів БС працює з усіма ними одночасно.

### 1.1.8 Механізм диспетчеризації та повторні передачі

Під диспетчеризацією розуміється процес розподілу мережевих ресурсів між користувачами. Мета диспетчеризації – збалансувати якість зв'язку та загальної продуктивності системи. У LTE передбачена динамічна та статична диспетчеризація.

Динамічна диспетчеризація розподіляє ресурси залежно від стану каналу зв'язку. Вона забезпечує передачу даних на підвищених швидкостях (за рахунок



модуляції вищого порядку, зменшення ступеня кодування каналів, передачі додаткових потоків даних та меншої кількості повторних передач), задіявши для цього часові та частотні ресурси з відносно добрими умовами зв'язку. Таким чином, для передачі будь-якого конкретного обсягу інформації потрібно менше часу.

Для трафіку сервісів, що пересилають пакети з невеликим корисним навантаженням та через однакові проміжки часу (наприклад, IP-TV), обсяг службової інформації, необхідної для динамічної диспетчеризації, може перевищити обсяг корисних даних. Для таких випадків у LTE передбачена статична диспетчеризація.

Для надійної передачі інформації в технології LTE реалізовано традиційну систему повторної передачі Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ). Особливість її реалізації в LTE у тому, що одночасно може підтримуватись кілька (до 8) HARQ-процесів. Якщо дані (субкадр), які пов'язані з HARQ-процесом, прийшли успішно, приймач надсилає повідомлення про успішний прийом/неприйом даних (ACK/NACK). У разі відсутності підтвердження або повідомлення NACK відбувається повторне надсилання.

У низхідному каналі розташування і параметри (тип сигнально-кодової конструкції) субкадра, що повторно передається, повідомляються додатково, в каналі управління – так звана адаптивна передача, коли БС вибирає оптимальний ресурс для ретрансляції.

У висхідному каналі, якщо АП не отримав повідомлення ACK, він має повторити передачу. БС може повідомити АП параметри субкадра повторної передачі. Якщо ж по каналу управління такого повідомлення не надійшло, АП повторює передачу субкадра з такими ж параметрами, як і у вихідного субкадра, прийом якого не був підтверджений – неадаптивна ретрансляція.

Повторна передача відбувається через задане у специфікації LTE число субкадрів (від 4 до 9), яке залежить від типу дуплексування, типу радіокадра,

схеми розподілу каналів у разі TDD та номери неправильно прийнятого субкадру.

## 1.2 Хендовер

Як вже зазначалось раніше, хендовер – процедура передачі активного з'єднання між сотами. Він дозволяє абонентам не бути прив'язаним до будь-якої географічної точки і дає можливість пересуватися в межах мережі оператора без розриву з'єднання. Причиною хендовера може бути не тільки переміщення абонента в просторі, але і погіршення якості сигналу від поточної БС. Так, між абонентом і БС може виникнути завада, погіршитися метеоумови тощо.

Якщо передача управління сесією абонента здійснюється без втрати поточного з'єднання, хендовер зветься м'яким (типу «make-before-break»): МС може спілкуватися та зв'язуватися з декількома пристроями доступу одночасно. У іншому випадку, коли в кожний момент часу мобільний вузол асоціюється лише з однією БС або точкою доступу, хендовер зветься жорстким (типу «break-before-make»): тобто спочатку розривається з'єднання з поточною мережею та лише потім встановлюється з'єднання з новою.

В залежності від ініціатора хендовер може бути таким, що ініціюється мобільною станцією (Mobile-controlled), мережею (Network-controlled) або мобільною станцією у кооперації з мережею (Mobile-assisted). Хендовер між сусідніми сегментами мережі однієї технології зветься горизонтальним, між різними типами мереж – вертикальним (Vertical Handover – VHO)).

### 1.2.1 М'який хендовер

Відповідно до специфікації Європейського інституту по стандартизації в галузі телекомунікацій (ETSI) в стандарті UMTS прийнято виділяти кілька типів хендовера – м'які і жорсткі.

М'який хендовер (soft handover) (рис. 1.13) – мобільний термінал (UE) встановлює зв'язок в одні і ті ж проміжки часу з двома або більше базовими станціями (BTS) з'єднаними з одним, або різними RNC (контролер радіомережі). UE отримує список скремблюємих кодів сусідніх БС і вимірює потужності їх сигналів в пілотних каналах (CPICH) і каналах синхронізації (SCH).

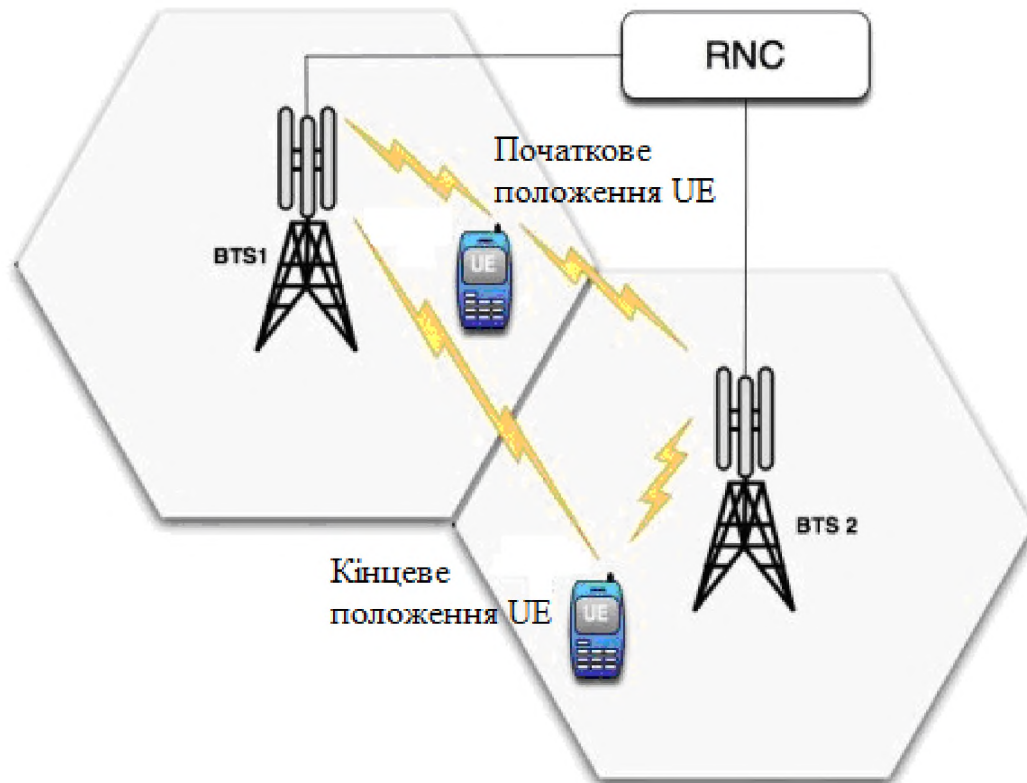


Рисунок 1.13 – М'який хендовер

У момент часу, коли ці потужності стають пропорційними з потужністю відповідних каналів, одержуваних від обслуговуючої BS, можливий м'який хендовер. Також слід зазначити, що soft handover може бути проведений тільки на одній частоті.

Окремим випадком м'якого хендовера є більш м'який хендовер (softer handover). Softer handover (рис. 1.14) на відміну від soft handover відбувається коли мобільний термінал переміщується з одного сектора в інший в межах

однієї секторизованої БС. При цьому вибір кадру з найменшим числом помилок проводиться контролером BTS, а не контролером радіомережі. Таким чином в м'яких хендоверах, поряд з мікрорознесенням в Rake-приймачах базових станцій при передачі вгору відбувається із макрорознесенням сигналів в контролері радіомережі (RNC). Результуючий сигнал вгору формує RNC, вибудовуючи послідовно в ланцюжок кадри, прийняті від різних базових станцій в залежності від якості їх прийому.

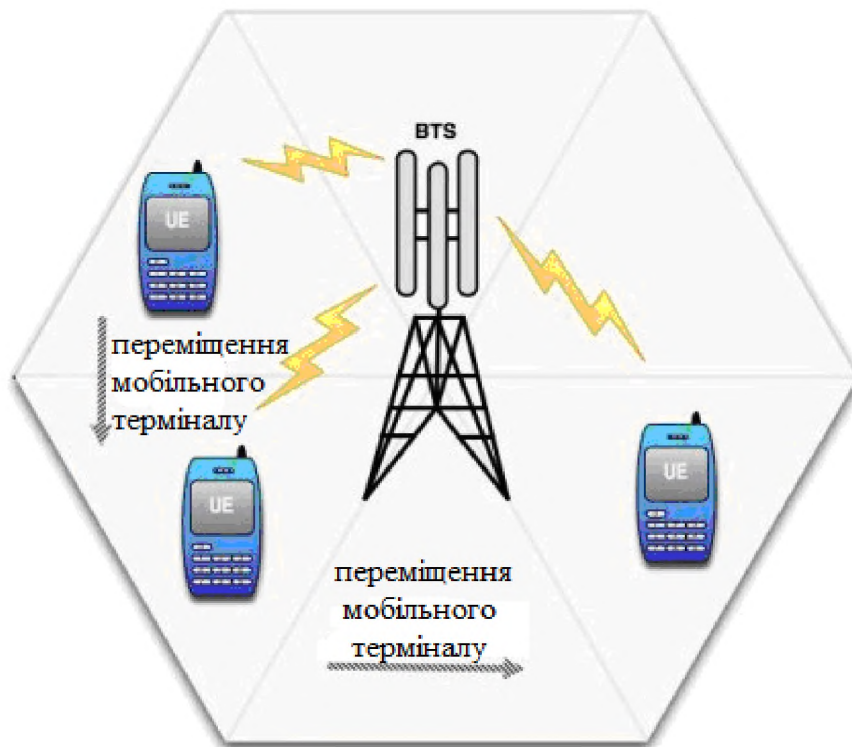


Рисунок 1.14 – Більш м'який хендовер

### 1.2.2 Жорсткий хендовер

Жорсткий хендовер (рис. 1.15) відбувається при переміщенні UE із зони функціонування однієї BTS в зону функціонування другий, що працює на іншій частоті. При здійсненні жорсткого хендовера мобільний термінал спочатку завершує процес доступу до послуг мережі в зоні дії обслуговуючої БС, а потім

починає його в зоні дії наступної базової станції. При цьому неможливий одночасний доступ до послуг мережі від двох БС. Для трафіку в режимі реального часу це може привести до короточасної втрати даних, але невибагливий до затримок трафік передається без втрат, оскільки існує система повторної передачі даних.

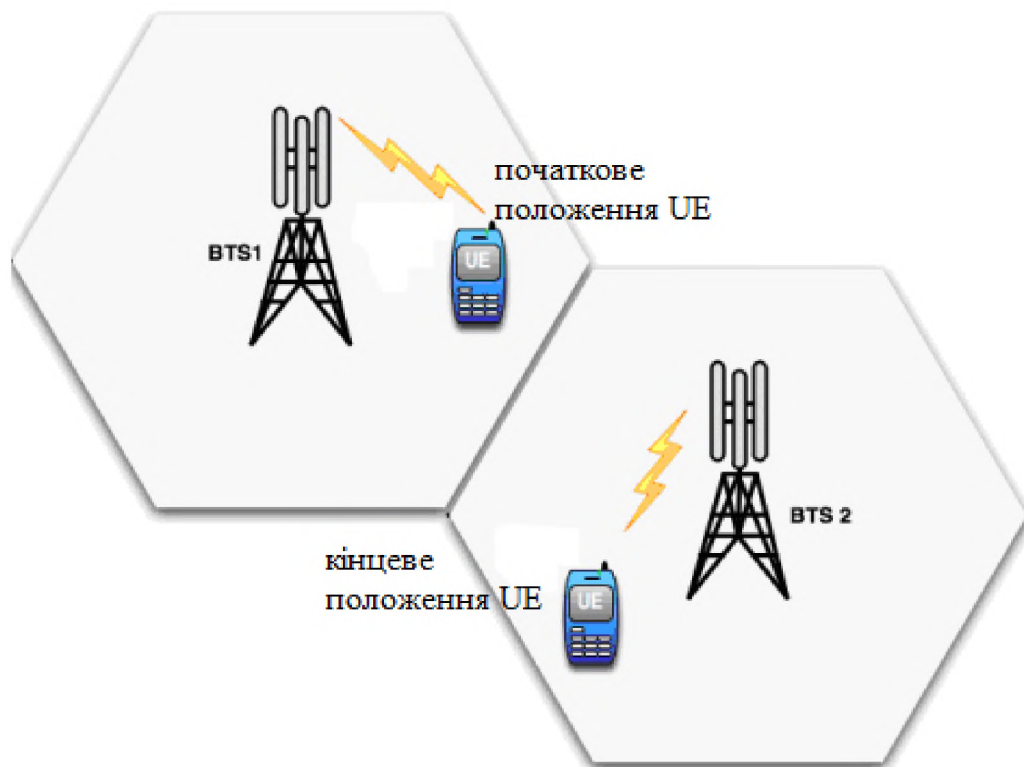


Рисунок 1.15 – Жорсткий хендовер

Жорсткий хендовер буває міжчастотним – пов'язаний з перемиканням на іншу частоту, наприклад при переході мобільного терміналу з макросотової мережі в мікросотову, коли на місцевості розгорнуто дві мережі UMTS різної конфігурації на різних частотах, а також міжсистемних (між UMTS і GSM).

Основу всіх хендоверів складають вимірювання, що виконуються UE і активними BTS. На основі аналізу результатів цих вимірювань рішення про запуск хендовера може виходити від RNC – (Network Evaluated Handover – НЕНО) або від мобільного терміналу. В цьому випадку хендовер відносять до класу МЕНО (Mobile Evaluated Handover). При цьому вирішальне право про

запуск процедури хандовера залишається за контролером радіомережі, оскільки тільки він розпоряджається каналним ресурсом мережі.

Виходячи з причин викликання хандовера, вони класифікуються наступним чином:

- хандовер порятунку (відбувається при падінні рівня сигналу до критичного значення);
- хандовер якості обслуговування (відбувається при зміні виду наданої послуги, наприклад, при переході від передачі пакетного трафіку до розмовного);
- хандовер перевантаження (відбувається при необхідності вирівнювання навантаження між окремими БС при передачі інформації).

### 1.2.3 Вертикальний хандовер

Вертикальний хандовер (рис. 1.16) можна класифікувати в залежності від причини на висхідний та низхідний.

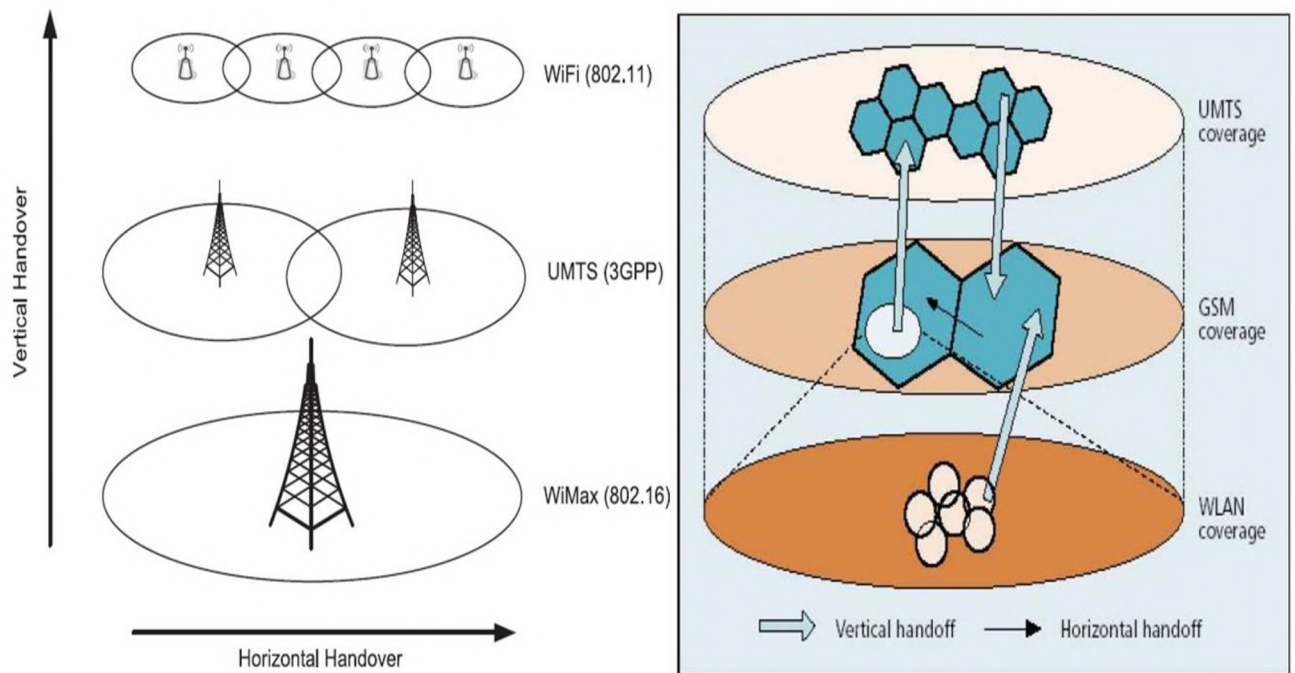


Рисунок 1.16 – Вертикальний хандовер

Низхідний хендовер здійснюється від більшої мережі з меншою швидкістю до меншої мережі з більшою швидкістю. Його основна особливість – це некритичність до затримки, оскільки немає ризику виходу з більшої мережі, до якої наразі приєднаний мобільний вузол. Такий хендовер здійснюється з метою оптимізації роботи мережі. Висхідний хендовер – той, що відбувається від меншої мережі з більшою швидкістю до більшої мережі з меншою швидкістю.

Такий тип хендовера здійснюється, коли мобільний вузол покидає мережу з меншим покриттям, тому такий хендовер є чутливим до затримок.

Основні вимоги до хендовера наступні: низькі затримки процедури, висока надійність, високий рівень успішності процедури, мінімальна кількість хендоверів (оскільки часті переключення призводять до значних енерговитрат та витрат корисної пропускної здатності мережі), мультикритеріальність – тобто врахування множини параметрів, забезпечення прозорого переміщення абонента, балансування навантаження на мережі радіодоступу. Техніка вертикального хендовера повинна обирати найбільш доречний момент його ініціювання та найбільш придатну мережу радіодоступу серед усіх доступних.

Вертикальний хендовер здійснюється у три етапи: збір інформації щодо наявних мереж, прийняття рішення щодо мережі призначення та власно здійснення хендовера.

На етапі збору інформації (виявлення мереж) мобільний вузол з множинними мережними інтерфейсами виявляє доступні бездротові мережі шляхом прослуховування та отримання службових розсилок цих мереж (service advertisements). Проте підтримка всіх цих інтерфейсів у активному стані потребує значних енерговитрат. Також необхідно зібрати інформацію щодо стану мобільного вузла (заряд батареї, ресурси, швидкість, клас послуг тощо), а також щодо потреб користувача (бюджет, потрібні послуги).

На етапі прийняття рішення, або запуску хендовера, вирішується, коли здійснити хендовер та до якої з наявних мереж. Ця фаза є найбільш критичною, оскільки від її результату залежить якість надання послуг.

На етапі здійснення хендовера відбувається безпосередня передача поточного сеансу до обраної на попередньому етапі мережі доступу. Це потребує передачі поточною мережею інформації щодо маршрутизації та іншої контекстної інформації стосовно МС в нову мережу якомога швидше. Апаратна реалізація хендовера можлива за рахунок впровадження технології SDR (Software Defined Radio).

### 1.3 Висновок. Постановка задачі

В розділі проаналізовано основні положення технології мобільного зв'язку LTE. Встановлено, що LTE – це технологія мобільного зв'язку 4-го покоління, яка активно впроваджується операторами для надання абонентом високошвидкісного доступу до мережі Інтернет. Відмінними функціями будь-якої мережі мобільного зв'язку є: хендовер – естафетна передача обслуговування терміналу користувача UE між базовими станціями для забезпечення безперервного сервісу, успішність якої – один із ключових показників ефективності будь-якої стільникової мережі. Хендовер – це найважливіша процедура, яка дозволяє абонентам мобільних мереж бути справді мобільними.

В розділі проаналізовано види і процедури процесу хендовера. Встановлено, що хендовер – одна з найбільш складних процедур у мобільному зв'язку, що конфігурується численними параметрами на кожній базовій станції (радіопідсистема), та в налаштуваннях елементів підсистеми комутації. Ефективність хендовера оцінюється за допомогою таких показників, як ймовірність успішної підготовки до хендоверу, ймовірність успішного виконання хендовера та тривалість самої процедури.



Оптимізація хендовера полягає у поліпшенні значень перелічених вище КПЕ. Встановлено, що у мобільних мережах LTE є можливість автоматично регулювати параметри, які впливають на ефективність хендоверів з метою підвищення їх успішності, а також оптимізації сигнального навантаження на радіопідсистему мережі.

У зв'язку з цим розробка алгоритмів, що оптимізують процедуру хендовер у мережах стандарту LTE, набуває особливої актуальності.

Таким чином, для виконання мети кваліфікаційної роботи необхідно:

- проаналізувати алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку стандарту LTE;
- розробити імітаційну модель для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE.

## 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 2.1 Алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку стандарту LTE

На рис. 2.1 представлена класифікація хендоверів в мережах LTE [8].

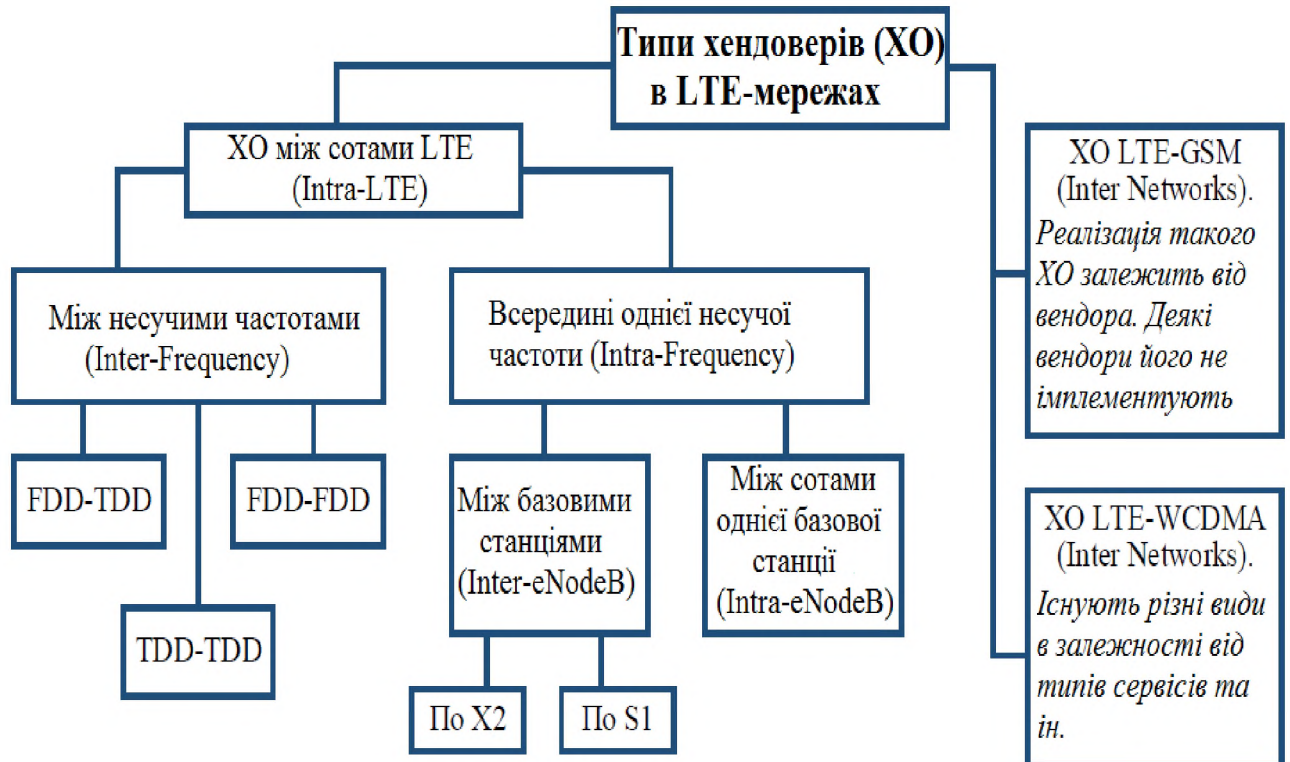


Рисунок 2.1 – Класифікація хендоверів у мережах LTE

Слід зазначити, що у рамках даної кваліфікаційної роботи було розглянуто лише хендовери між стільниками всередині мережі 4G. Хендовери між мережами LTE, 3G WCDMA (3<sup>rd</sup> Generation Wideband Code Division Multiple Access – технологія стільникового зв'язку 3-го покоління) та 2G GSM (2<sup>nd</sup> Generation Global System of Mobile – технологія стільникового зв'язку 2-го покоління) не є об'єктом цього дослідження.

Серед хендоверів між LTE-сотами розрізняють хендовери всередині однієї несучої частоти та між різними несучими (див. рис. 2.1). Принцип дії цих

хендоверів однаковий, і основна відмінність – це активація та здійснення вимірювань рівня: середнього значення потужності прийнятих пілотних сигналів (Reference Signal Received Power – RSRP) та якості прийнятих пілотних сигналів (Reference Signal Received Quality – RSRQ) сотів на різних частотах, що вимагають перебудови приймача мобільної станції на нову частоту.

Крім того, стільники, що працюють на різних несучих частотах, можуть бути запущені в різних режимах дуплексування висхідного та низхідного каналів – FDD (Frequency Division Duplex – дуплексування з частотним розподілом) або TDD (Time Division Duplex – дуплексування з часовим розподілом каналів).

Хендовер, що виконується між базовими станціями eNodeB, може відбуватися за інтерфейсом X2 (логічний інтерфейс між eNodeB) або за інтерфейсом S1 (інтерфейс між базовими станціями та такими елементами системи комутації як MME (Mobility Management Entity – елемент управління мобільністю) та обслуговуючим шлюзом Serving Gateway).

Розглянемо крок за кроком процедуру хендоверу [9]. На рис. 2.2 представлена часова діаграма повідомлень, якими обмінюються елементи LTE-мережі при виконанні хендовера абонента між eNodeB за інтерфейсом X2. Принцип хендовера по S1 і повідомлення, що передаються, відрізняються незначно [33-35].

Насамперед на кожній соті кожної базової станції eNodeB інженерами оператора мобільного зв'язку конфігуруються параметри хендоверів, які істотно впливають на ефективність цієї процедури. Ці параметри будуть більш детально описані нижче. Інформація про те, як сконфігуровані хендовери надається абонентам під час встановлення з'єднання у спеціальному повідомленні.

Під час активного з'єднання користувальницький термінал UE (User Equipment) проводить вимірювання RSRP та RSRQ обслуговуючої соти (Source – джерело) та сот-сусідів. Якщо рівень сигналу погіршується і в оточенні

абонента є сота з кращим рівнем або якістю радіосигналу, UE повідомляє про це свою соту спеціальним звітом.

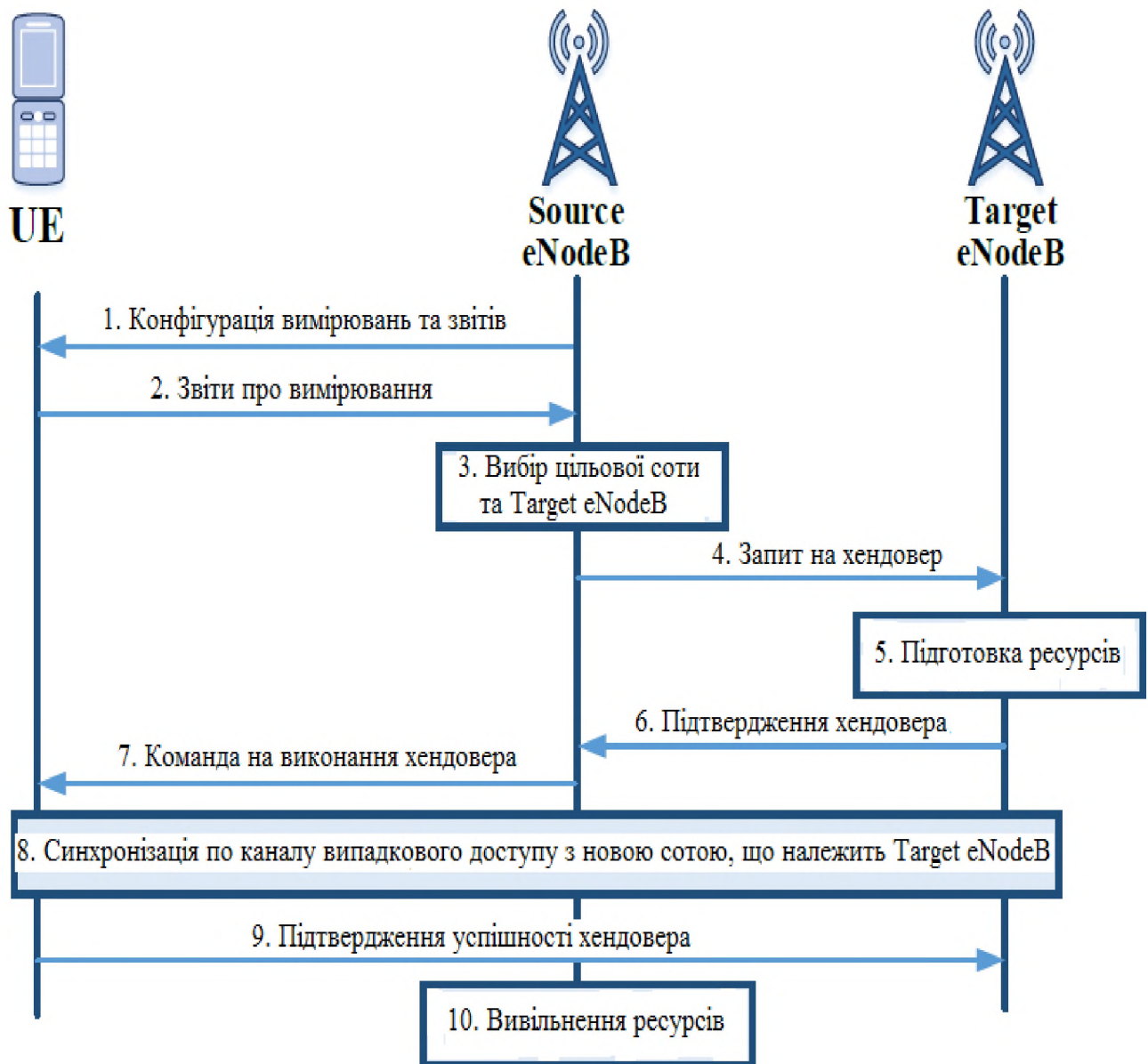


Рисунок 2.2 – Часова діаграма хендовера між eNodeB у мережах LTE

У звіті про вимірювання може бути вказана сусідня сота, чий сигнал кращий (Target – ціль). На підставі отриманих звітів про вимірювання eNodeB приймає рішення про ініціацію хендовера і надсилає відповідний запит соті, вибраній як ціль, за інтерфейсом X2 або S1.

Target eNodeB резервує свої ресурси для нового користувача UE, у випадку, якщо її радіоінтерфейс і транспортні канали вільні, повідомляє про це Source eNodeB, звідки був отриманий запит на хендовер. Отримавши це повідомлення Source eNodeB посилає абоненту команду на виконання хендовера, тобто відкріплення від обслуговуючої соти і синхронізація з новою сотою.

Успішно засинхронізувавшись із новою сотою, UE посилає їй повідомлення, що підтверджує закінчення хендовера. Повідомлення, що надсилаються абонентами та базовою станцією на радіоінтерфейсі, описуються протоколом RRC (Radio Resource Control [9]).

Якщо обмін сигнальних повідомлень між базовими станціями виконується за інтерфейсом X2, він описується протоколом X2AP [10]. Якщо ж базові станції обмінюються цими повідомленнями за інтерфейсом S1, він описується протоколом S1AP [11].

Розглянемо докладніше, якими параметрами конфігуруються хендовери в мережах LTE. UE за стандартом 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project – організація, що виконує стандартизацію мереж LTE) надсилає звіти про вимірювання у форматі спеціальних повідомлень 'Measurement reports' протоколу RRC.

Події, що ініціюють надсилання таких повідомлень, поділяються на дві групи:

- А – для мобільності всередині мережі LTE;
- В – для мобільності між мережами LTE, а також мережами інших поколінь.

Слід зазначити, що у рамках даної кваліфікаційної роботи розглядається лише подія А3, що є основним тригером для активації хендовера між сотами LTE.

На рис. 2.3 показаний загальний принцип активації вимірювань, відсилання звітів та параметри хендовера А3.

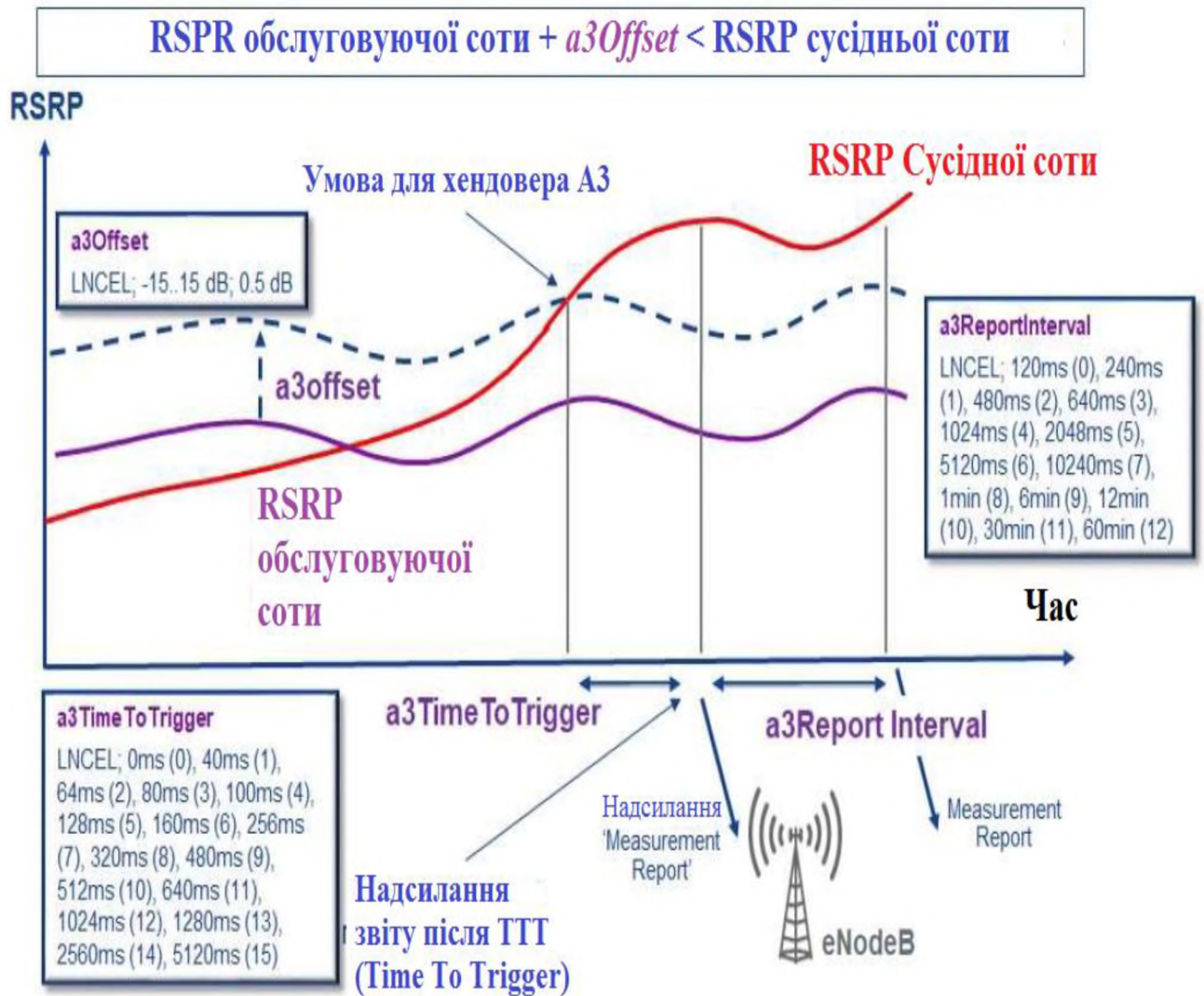


Рисунок 2.3 – Принцип та параметри А3-хендвера в мережах стандарту LTE

Подія А3 відбувається тоді, коли рівень сигналу RSRP від сусідньої eNodeB перевищує рівень сигналу від обслуговуючої eNodeB на певне значення ( $a3offset + Hyst$ ), що конфігурується оператором:

$$Meas_{neighbor} \geq Meas_{serving} + Offset + Hyst, \quad (2.1)$$

де  $Hyst$  – гістерезис, може набувати значень від 0 до 30 дБ;

$Meas_{neighbor}$  – значення рівня потужності сигналу RSRP сусідньої базової станції (БС), виміряне UE;

$Meas_{serving}$  – значення рівня потужності сигналу RSRP, що обслуговує eNodeB, виміряне мобільним терміналом;

$a3Offset$  – значення, на яке сигнал сусідньої базової станції має бути більше, ніж сигнал обслуговуючої базової станції для ініціалізації А3-хендовера, значення якого можуть варіюватись в інтервалі від -30 до +30 дБ.

Надсилання звітів про подію А3 припиняється, як тільки виконується умова:

$$Meas_{neighbor} \geq Meas_{serving} + Offset - Hyst \quad (2.2)$$

Умова (2.1) повинна виконуватись протягом ТТТ, значення якого також задається параметром і варіюється від 0 до 5120 мс. Крім того, існує параметр  $a3ReportInterval$ , що визначає, як довго абонент повинен повідомляти про те, що настала подія А3 і потрібен хендовер (від 120 мс до 60 хв), якщо не настає умова (2.2).

Варто зазначити, що для аналізу продуктивності мережі та для оптимізації хендоверів має значення наступна додаткова класифікація хендоверів:

- своєчасний хендовер – хендовер вчасно виконаний, без обриву з'єднання;
- занадто ранній хендовер – ТТТ має надто маленьке значення і eNodeB надто швидко приймає рішення про необхідність хендовера, не переконавшись, що сигнал сусіда справді добрий;
- занадто пізній хендовер – ТТТ має надто велике значення, внаслідок чого абонент надто пізно інформує eNodeB про необхідність хендовера та відбувається обрив з'єднання;
- Ping-Pong хендовер – абонент на межі двох сот постійно «перекидається» з однієї соти на іншу.

Слід зазначити, що оптимізація ключових показників ефективності хендоверів зазвичай націлена на те, щоб уникнути великої кількості останніх трьох типів хендоверів () та забезпечити високу ймовірність успішності своєчасних хендоверів.

## 2.2 Імітаційне моделювання для аналізу продуктивності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE

Для виконання імітаційного моделювання для аналізу продуктивності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку LTE у програмному середовищі MATLAB / Simulink було розроблено та реалізовано імітаційну модель А3-хендовера в мережах LTE [36-37].

Параметри, що були використані для конфігурації хендовера, описані вище:

- *Hyst* (гістерезис, може набувати значень від 0 до 30 дБ);
- *a3Offset* (значення, на яке сигнал сусідньої БС має бути більше, ніж сигнал обслуговуючої БС для ініціалізації А3-хендовера, значення якого можуть варіюватись в інтервалі від -30 до +30 дБ);
- *time-to-trigger* (ТТТ, значення якого варіюється в інтервалі від 0 до 5120 мс).

В ході імітаційного моделювання реєструвались та відслідковувались наступні події, важливі з погляду продуктивності хендоверів:

- загальна кількість неуспішних спроб пізнього хендовера (в результаті відбувається обрив зв'язку з Source eNodeB і не встигає встановитись з'єднання з Target eNodeB);
- загальна кількість неуспішних спроб раннього хендовера (абонент UE не встигає засинхронізуватись та успішно підключитись до Target eNodeB);
- загальна кількість Ping-Pong хендоверів – показує, як часто абонент переходить з соти на соту, перебуваючи на їхньому кордоні.

Слід зазначити, що високе значення останнього показника – загальної кількості Ping-Pong хендоверів – свідчення некоректного налаштування хендовера).

У табл. 2.1 наведено значення вхідних параметрів, які були прийняті для імітаційного моделювання.



Таблиця 2.1 – Вхідні параметри для імітаційного моделювання

Назва параметра	Значення параметра
Потужність передавача базової станції	43 дБм
Несуча частота LTE	2100 МГц
Ширина смуги частот у режимі FDD	15 МГц
Чутливість приймача мобільної станції UE	-110 дБм
Чутливість приймача базової станції eNodeB	-120 дБм
Швидкість руху абонента (UE_speed)	5, 10, 20, 70 км/год
TimeToTrigger	0, 40, 60...5120 мс
Hyst	0,1...30 дБ
A3Offset	-30...30 дБ
Модель розповсюдження сигналу	COST 231 Hata
Кількість сот	21
Тип базової станції	трьохсекторна
Число абонентів	100

Імітаційне моделювання хендоверів виконувалося в 21-й соті (7 трьохсекторних базових станцій), абоненти між якими були розподілені рівномірно і рухались у випадкових напрямках зі швидкістю, що задається в параметрах. Число абонентів у мережі було прийнято рівним 100, але варто зазначити, що в рамках даної моделі абонентське навантаження не впливає на успішність хендовера, передбачається відсутність навантажень на базових станціях (припущення, що спрощує).

За допомогою розробленої у програмному середовищі MATLAB / Simulink імітаційної моделі були отримані графіки залежностей ймовірностей занадто пізніх і занадто ранніх хендоверів від різних параметрів системи, таких як швидкість руху абонентів, *TTT*, *a2offset* і *Hyst*.

На рис. 2.4 представлена залежність ймовірності пізнього хендвера від величини таймера TTT для різних швидкостей руху абонентів та при фіксованому значенні  $a3offset+Hyst=5$ , основна проблема якого полягає у погіршенні рівня сигналу RSRP від обслуговуваної базової станції до критичних значень, що спричиняють обрив з'єднання. При цьому UE через некоректно настроєні параметри не встигає переключитися на цільову базову станцію.

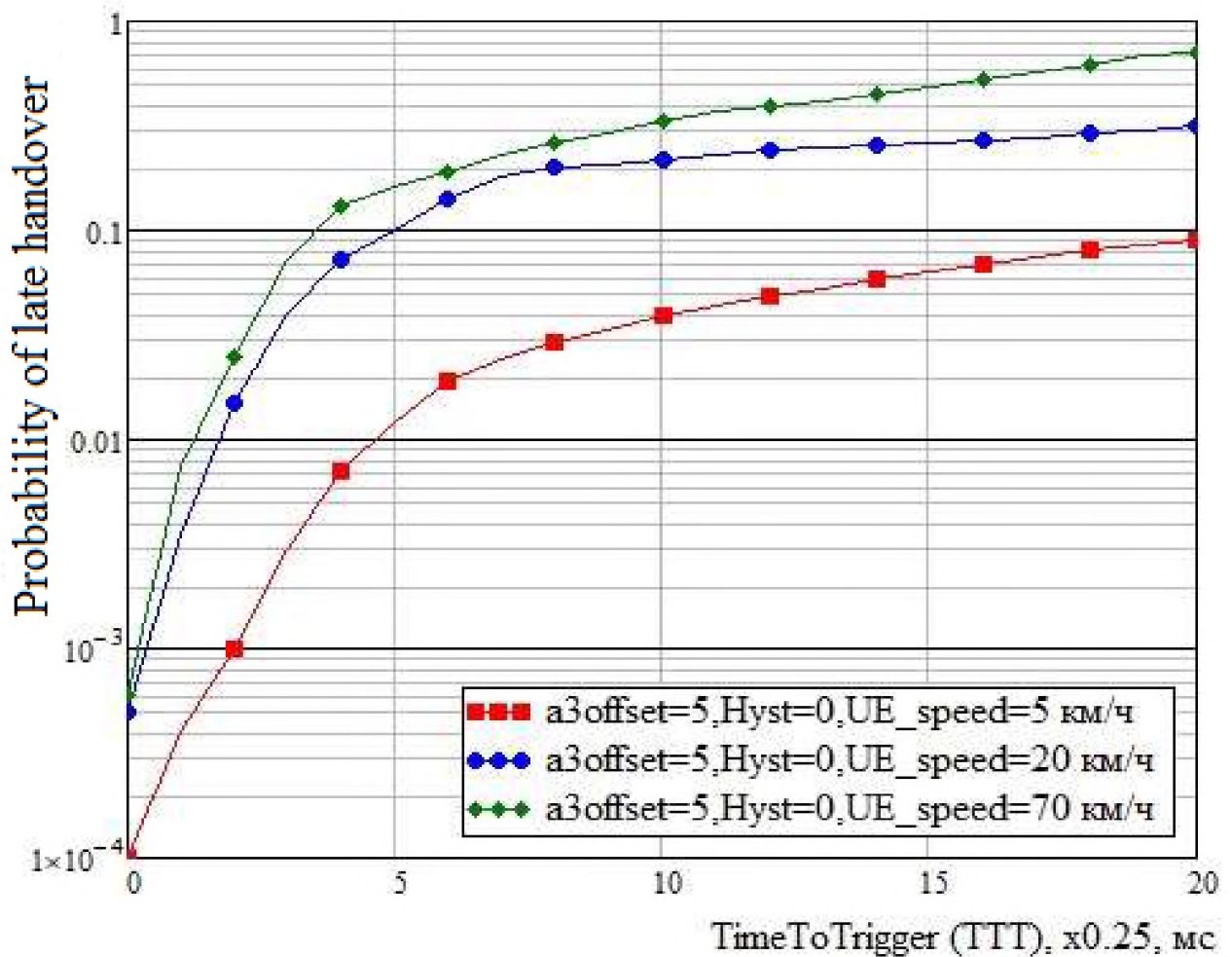


Рисунок 2.4 – Ймовірність занадто пізнього А3-хендвера в мережах LTE в залежності від величини TTT та для різних швидкостей руху абонентів UE

З рис. 2.4 очевидно, наскільки сильний вплив величини ТТТ на ймовірність успішності хендовера. Чим більше виставлено значення таймера, тим вища ймовірність пізнього хендовера.

Крім того, швидкість руху абонентів відіграє істотну роль на цей показник КПЕ. Якщо на мережі домінує трафік абонентів, що швидко рухаються, значення ТТТ має бути якомога нижчим, щоб уникнути великої кількості пізніх хендоверів.

На рис. 2.5 показані залежності ймовірностей пізніх та ранніх хендоверів від величини  $a3offset+Hyst$  при фіксованому короткому значенні таймера  $TTT=2$  мс та швидкостях абонентів 10 та 50 км/год.

Сума параметрів  $a3offset$  і  $Hyst$  визначає різницю рівнів RSRP обслуговуючої соти та соти-сусіда, при якій після закінчення ТТТ може статися хендовер. Очевидно, якщо дана сума менше 7 дБ, то висока ймовірність раннього хендовера, якщо ж вона більше 7 дБ, то зростає ймовірність пізніх хендоверів. Таким чином, було встановлено (див. рис. 2.5), що для даного сценарію багатопараметричної оптимізації значення 7 дБ є близьким до оптимального.

Таким чином, в розділі в програмному середовищі MATLAB / Simulink було розроблено імітаційну модель, яка дозволяє аналізувати продуктивність хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE.

Шляхом моделювання були отримані такі чисельні характеристики продуктивності хендоверів, як ймовірності пізніх та ранніх хендоверів в залежності від їх найважливіших параметрів ТТТ,  $a3Offset$  та  $Hyst$ , а також для різних швидкостей руху користувачів.

Результати імітаційного моделювання можуть бути корисними при налаштуванні параметрів реальної мережі.

Таким чином, знаючи домінуючу швидкість пересування мобільних терміналів UE, а також фізичну конфігурацію базових станцій (кількість секторів, кути нахилу антен, радіус сот, потужність передавача базової станції),

можна вибрати оптимальні значення перелічених вище параметрів, знизивши тим самим ймовірність великої кількості пізніх і ранніх хендверів в мережі LTE.

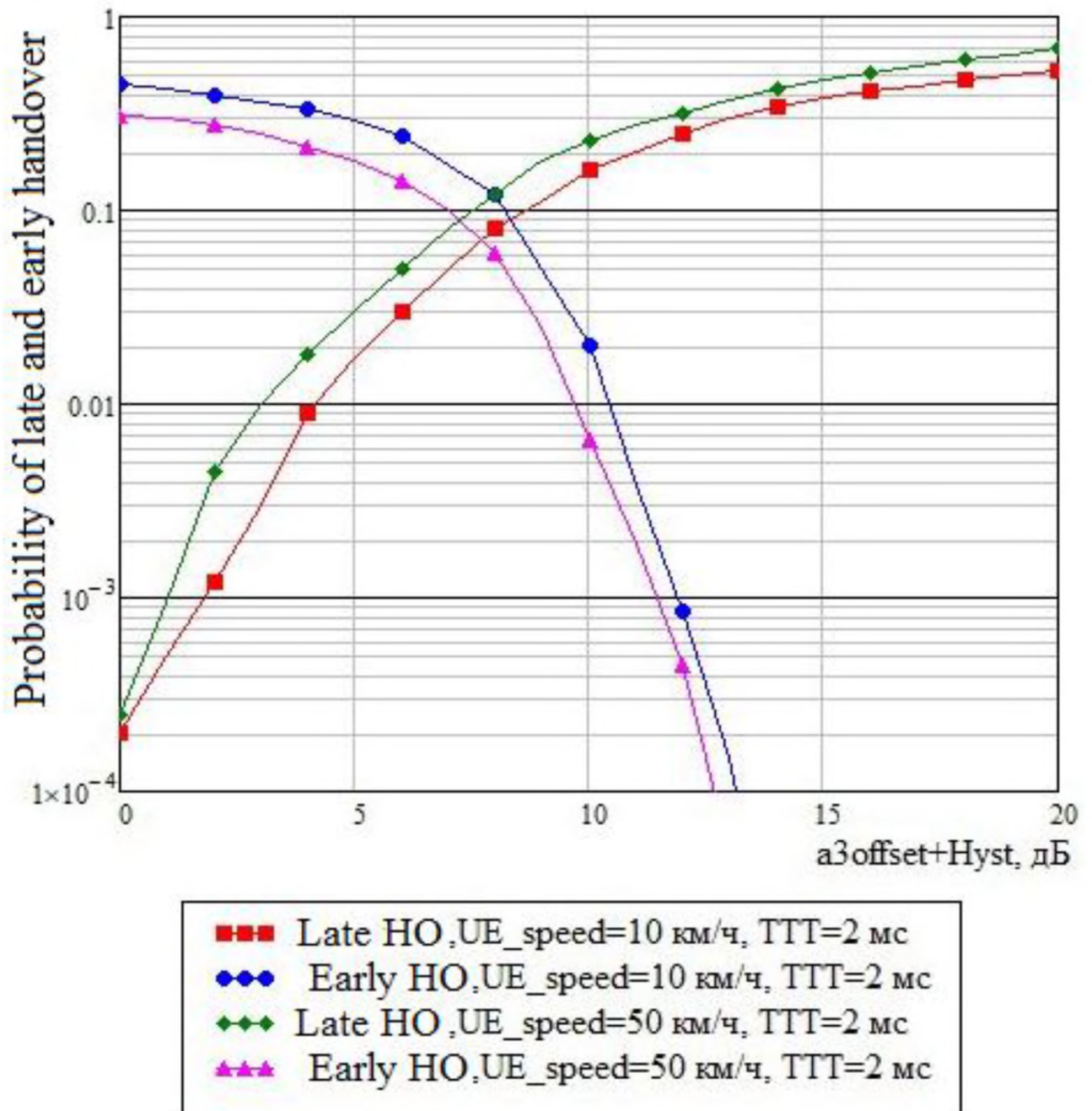


Рисунок 2.5 – Ймовірність занадто пізнього А3-хендвера в мережах LTE в залежності від величини TTT та для різних швидкостей руху абонентів UE

## 2.3 Висновки

В розділі наведено класифікацію хендоверів в мережах стандарту LTE. Детально досліджено алгоритм хендовера в мережах мобільного зв'язку стандарту LTE.

Детально розглянуто параметри, якими конфігуруються хендовери в мережах LTE:

- *Hyst* (гістерезис, може набувати значень від 0 до 30 дБ);
- *a3Offset* (значення, на яке сигнал сусідньої БС має бути більше, ніж сигнал обслуговуючої БС для ініціалізації А3-хендовера, значення якого можуть варіюватись в інтервалі від -30 до +30 дБ);
- *time-to-trigger* (ТТТ, значення якого варіюється в інтервалі від 0 до 5120 мс).

Для аналізу продуктивності мережі та для оптимізації хендоверів має значення наступна додаткова класифікація хендоверів:

- своєчасний хендовер – хендовер вчасно виконаний, без обриву з'єднання;
- занадто ранній хендовер – ТТТ має надто маленьке значення і eNodeB надто швидко приймає рішення про необхідність хендовера, не переконавшись, що сигнал сусіда справді добрий;
- занадто пізній хендовер – ТТТ має надто велике значення, внаслідок чого абонент надто пізно інформує eNodeB про необхідність хендовера та відбувається обрив з'єднання;
- Ping-Pong хендовер – абонент на межі двох сот постійно «перекидається» з однієї соти на іншу.

Оптимізація ключових показників ефективності хендоверів зазвичай націлена на те, щоб уникнути великої кількості занадто раннього, занадто пізнього та Ping-Pong хендоверів і забезпечити високу ймовірність успішності своєчасних хендоверів.

В розділі в програмному середовищі MATLAB / Simulink було розроблено імітаційну модель, яка дозволяє аналізувати продуктивність хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE.

Шляхом моделювання були отримані такі чисельні характеристики продуктивності хендоверів, як ймовірності пізніх та ранніх хендоверів в залежності від їх найважливіших параметрів TTT, a3Offset та Hyst, а також для різних швидкостей руху користувачів.

Результати імітаційного моделювання можуть бути корисними при налаштуванні параметрів реальної мережі. Знаючи домінуючу швидкість пересування мобільних терміналів UE, а також фізичну конфігурацію базових станцій (кількість секторів, кути нахилу антен, радіус сот, потужність передавача БС), можна вибрати оптимальні значення перелічених вище параметрів, знизивши тим самим ймовірність великої кількості пізніх і ранніх хендоверів в мережі LTE.

### 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Визначення трудомісткості формування імітаційної моделі для аналізу ключових показників ефективності хендоверів

Трудомісткість продукції – показник, який характеризує витрати робочого часу на виробництво будь-якої споживчої вартості або на виконання конкретної технологічної операції. Трудомісткість аналізу і оптимізації ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі розраховується за формулою (3.1):

$$t = t_0 + t_l + t_{al} + t_m + t_p \quad (3.1)$$

де  $t_0$  – витрати праці на підготовку і опис поставленого завдання;

$t_l$  – витрати праці на огляд науково-технічної літератури з технології мобільного зв'язку LTE;

$t_{al}$  – витрати праці на опис алгоритму та параметри хендовера в мережах;

$t_m$  – витрати праці на імітаційне моделювання для аналізу продуктивності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE;

$t_p$  – витрати праці на підготовку документації.

У таблиці 3.1 зведені данні тривалості процесів, що мали місце при аналізі та оптимізації ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі.

Таблиця 3.1 – Тривалість робочих процесів

Назва робочого процесу	Тривалість, год.
Витрати праці на підготовку і опис поставленого завдання	8
Витрати праці на огляд науково-технічної літератури з технології мобільного зв'язку LTE	36

Витрати праці на опис алгоритму та параметрів хендовера в мережах	30
Витрати праці на імітаційне моделювання для аналізу продуктивності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE	40
Витрати праці на підготовку документації	33

Отже, загальна трудомісткість за формулою 3.1:

$$t = 8 + 36 + 30 + 40 + 33 = 147 \text{ годин}$$

### 3.2 Розрахунок витрат на аналіз і оптимізацію ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE

Витрати на аналіз алгоритму та параметрів хендовера в мережах мобільного зв'язку LTE та розробку імітаційної моделі для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку LTE включають витрати на заробітну плату інженера телекомунікацій і вартість машинного часу.

Заробітна плата – винагорода, обчислена, зазвичай, у грошовому виразі, яку за трудовим договором власник або уповноважений ним орган виплачує працівникові за виконану ним роботу. Розмір заробітної плати залежить від складності та умов виконуваної роботи, професійно-ділових якостей працівника, результатів його праці та господарської діяльності підприємства.

Заробітна плата виконавців визначається за формулою 3.2:

$$ЗП = t C \quad (3.2)$$

де  $t$  – загальна трудомісткість аналізу і оптимізації ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі;



$C$  – середня годинна заробітна плата інженера телекомунікацій (основна і додаткова) з урахуванням відрахувань на соціальні потреби, грн/год.

Середня заробітна плата інженера телекомунікацій на 01.04.2022р. складає 16850 грн. Отже, заробітна плата інженера телекомунікацій з урахуванням премій (25%) і можливих надбавок (15%) складає 23590 грн.

Таким чином, річний фонд заробітної плати – 283080 грн. Єдиний соціальний внесок складає 36%, тобто 101908,8 грн.

Визначимо номінальний річний фонд робочого часу, при цьому прийнявши середню тривалість робочого дня рівної 8 годинам:

$$F_n = (T_k - T_{св} - T_{вих} - T_{від}) \cdot t_p \quad (3.3)$$

де  $T_k$  – кількість календарних днів у році, днів;

$T_{св}$  – кількість святкових днів у році, днів;

$T_{вих}$  – кількість вихідних днів у році, днів;

$T_{від}$  – календарна тривалість відпустки, днів.

Отже, річний фонд часу за формулою 3.3 дорівнює:

$$F = (356 - 10 - 104 - 22) \cdot 8 = 1832 \text{ годин}$$

Середня годинна заробітна плата інженера телекомунікацій визначається співвідношенням 3.4, яка має вигляд:

$$C_{зн} = \frac{\Phi ЗП_{сн}}{F_n} \text{ грн/год}, \quad (3.4)$$

де  $\Phi ЗП_{сн}$  – річний фонд заробітної плати з урахуванням відрахувань на соціальні потреби;

$F_n$  – річний фонд робочого часу.

Отже середня годинна заробітна плата інженера телекомунікацій з урахуванням ЄСВ за формулою 3.4 дорівнює:

$$C_{зн} = 384988,8 / 1832 = 210 \text{ грн}$$

Таким чином, витрати на оплату праці розробника складають з урахуванням формули 3.2 отримаємо:

$$ЗП = 147 \times 210 = 30870 \text{ грн}$$

Розрахунок вартості машинного часу, необхідного для розробки на ЕОМ включає витрати на програмне та апаратне забезпечення і витрати за електроенергію, здійснюється по формулі 3.5:

$$Z_{мч} = C_o + C_{ел} \quad (3.5)$$

де  $C_o$  – витрати на обладнання, грн;

$C_{ел}$  – витрати на електроенергію, грн.

Для розрахунку вартості машино-часу необхідно знати вартість ЕОМ та ПЗ на момент їх придбання і введення в експлуатацію, і вартість споживаної електроенергії. Вартість персонального комп'ютеру складає 35500 грн, Matlab 6.5 – 5000 грн, разом – 40500 грн.

Витрати на електроенергію залежать від часу роботи на ЕОМ та собівартості машино-години роботи ЕОМ і розраховується за формулою:

$$C_{ел} = C_{мч} \cdot t \quad (3.6)$$

$$C_{мч} = W \cdot C_{ел} \quad (3.7)$$

Де  $W$  – потужність ЕОМ,  $W = 0,5$  кВт/год.

$C_{ел}$  – вартість  $1кВт \cdot год$  електроенергії. За обсяг, спожитий понад 150 кВт · год до 600 кВт · год електроенергії на місяць (включно) складає 1,93 грн.

$$C_{ел} = 0,5 \times 1,93 \times 147 = 142 \text{ грн}$$

Отже, витрати на аналіз алгоритму та параметрів хендовера в мережах мобільного зв'язку LTE та розробку імітаційної моделі для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку LTE. складають:

$$B_{роз} = 30870 + 40500 + 142 = 71512 \text{ грн}$$

### 3.3 Висновок

В економічному розділі розраховані трудомісткість, що необхідна для аналізу і оптимізації ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі (147 годин), заробітна плата інженера телекомунікацій (30870 грн.), капітальні витрати на

аналіз і оптимізацію ключових показників ефективності хендверів в мобільних мережах LTE, що становлять 71512 грн.

## ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу основних положень технології мобільного зв'язку LTE встановлено, що LTE – це технологія мобільного зв'язку 4-го покоління, яка активно впроваджується операторами для надання абонентом високошвидкісного доступу до мережі Інтернет. Відмінними функціями будь-якої мережі мобільного зв'язку є: хендовер – естафетна передача обслуговування терміналу користувача UE між базовими станціями для забезпечення безперервного сервісу, успішність якої – один із ключових показників ефективності будь-якої стільникової мережі. Хендовер – це найважливіша процедура, яка дозволяє абонентам мобільних мереж бути справді мобільними.

2. В результаті аналізу видів і процедур процесу хендовера встановлено, що хендовер – одна з найбільш складних процедур у мобільному зв'язку, що конфігурується численними параметрами на кожній БС (радіопідсистема), та в налаштуваннях елементів підсистеми комутації. Ефективність хендовера оцінюється за допомогою таких показників, як ймовірність успішної підготовки до хендоверу, ймовірність успішного виконання хендовера та тривалість самої процедури. Оптимізація хендовера полягає у поліпшенні значень перелічених вище КПЕ. Встановлено, що у мобільних мережах LTE є можливість автоматично регулювати параметри, які впливають на ефективність хендоверів з метою підвищення їх успішності, а також оптимізації сигнального навантаження на радіопідсистему мережі.

3. Досліджено алгоритм хендовера та параметри, якими конфігуруються хендовери в мережах LTE, а саме: *Hyst* (гістерезис, може набувати значень від 0 до 30 дБ); *a3Offset* (значення, на яке сигнал сусідньої БС має бути більше, ніж сигнал обслуговуючої БС для ініціалізації А3-хендовера, значення якого можуть варіюватись в інтервалі від -30 до +30 дБ); *time-to-trigger* (ТТТ, значення якого варіюється в інтервалі від 0 до 5120 мс).

Для аналізу продуктивності мережі та для оптимізації хендоверів має значення наступна додаткова класифікація хендоверів: своєчасний хендовер; занадто ранній хендовер; занадто пізній хендовер; Ping-Pong хендовер. Оптимізація ключових показників ефективності хендоверів зазвичай націлена на те, щоб уникнути великої кількості останніх трьох хендоверів і забезпечити високу ймовірність успішності своєчасних хендоверів.

4. Розроблено імітаційну модель в програмному середовищі MATLAB / Simulink, яка дозволяє аналізувати продуктивність хендоверів абонентів між сотами в мережі 4-го покоління мобільного зв'язку стандарту LTE. Шляхом моделювання були отримані такі чисельні характеристики продуктивності хендоверів, як ймовірності пізніх та ранніх хендоверів в залежності від їх найважливіших параметрів  $TTT$ ,  $a3Offset$  та  $Hyst$ , а також для різних швидкостей руху користувачів.

Результати імітаційного моделювання можуть бути корисними при налаштуванні параметрів реальної мережі. Знаючи домінуючу швидкість пересування мобільних терміналів UE, а також фізичну конфігурацію базових станцій (кількість секторів, кути нахилу антен, радіус сот, потужність передавача БС), можна вибрати оптимальні значення перелічених вище параметрів, знизивши тим самим ймовірність великої кількості пізніх і ранніх хендоверів в мережі LTE.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sesia S. LTE – The UMTS Long Term Evolution: from Theory to Practice. : 2nd ed. / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker. – N.Y.: A John Wiley & Sons Ltd. – 2011. – 794 p.
2. Hamalainen S. LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. / S. Hamalainen, H. Sanneck, C. Sartori. – N.Y.: A John Wiley & Sons Ltd. – 2011. – 428 p.
3. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks / I.N.M. Isa, M.D. Baba, R.A. Rahman, A.L. Yusof. // 2015 International Conference on Computer, Communications and Control Theory (I4CT), Kuching, Malaysia, 21-23 April. – 2015.
4. Neighbour list optimization for real LTE radio networks / Duarte D., Vieira P., Rodrigues A., Martins A., Oliveira N., Varela L. // 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. – Bali, Indonesia. – 29–30 August, 2014.
5. Boujelben M. A novel self-organizing scheme for 4G advanced networks and beyond. / Boujelben M., Rejeb S. B., Tabbane S. // The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications. – Hammamet, Tunisia. – 17-19 June, 2014.
6. Mobility Robustness Optimization in Enterprise LTE Femtocells / Buenestado V., Ruiz-Aviles J. M., Toril M., Luna-Ramirez S. // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). – Dresden, Germany, – 2-5 June, 2013.
7. Munoz P. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks / P. Munoz, R. Barco, I. Bandera. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Vol. 62. Issue 5. – June. 2013. – P. 1895-1905.
8. Dahlman E. 4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband. / Dahlman E., Parkvall S., Skold J. – N.Y.: Academic Press, 2011. – 431 p.
9. ETSI TS136.331 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; Radio Resource Control (RRC). – Release 13. – 2016.

10. ETSI TS136.423 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; X2 Application Protocol (X2AP). – Release 13. – 2016.
11. ETSI TS136.413 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; S1 Application Protocol (S1AP). – Release 13. – 2016.
12. Воробієнко П.П. Телекомунікаційні та інформаційні мережі : підручник / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. – К.: САММІТ-Книга, 2010. – 708 с
13. Конахович Г.Ф. Системи радіозв'язку. Навчальний посібник. / Г.Ф. Конахович. – К.: НАУ, 2004 – 311с.
14. Игнатов В.О. Принципы построения эксплуатации систем связи воздушных судов: Учебное пособие / В.О. Игнатов, Г.Ф. Конахович, В.В. Уланський, Ю.М. Омелько. – К.: Книга, 1988. – 172 с.
15. Довгий С.О., Савченко О.Я., Воробієнко П.П. та ін. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, економіка, управління, регулювання / За ред. С.О. Довгого. – К.: Український Видатничий Центр, 2002. – 520 с.
16. Jyrki T. J. Penttinen. The LTE-Advanced Deployment Handbook. The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks. – England: John Wiley & Sons Ltd. – 2016.
17. Poikselkam M. Voice over LTE (VoLTE). / M. Poikselkam. – England: John Wiley & Sons Ltd. – 2012.
18. Ayman Elnashar, Mohamed A. El-saidny, Mahmoud R. Sherif. Design, Development and Performance of 4G-LTE Networks a Practical Approach. – England: John Wiley & Sons, Ltd. – 2014.
19. Jyrki T. J. Penttinen. The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile, and Satellite Systems. – England: John Wiley & Sons Ltd. – 2015.
20. Ajay R. Mishra. Fundamentals of Cellular Network Planning & Optimization. – England: John Willey & Sons Ltd. – 2004.
21. Holma H. LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. Second Edition. / H. Holma, A. Toskala – England: John Wiley & Sons, Ltd. – 2011.

22. Salo J. Practical Introduction to LTE Radio Planning. / Salo J., Nur-Adam M., Chang K. – Wiley and Son. – 2010.
23. Strykhalyuk B. Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, M. Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка. – X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. – 2014. – №4(40) – С. 125-132.
24. Hämäläinen S. et al. LTE Self-Organizing Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. – Wiley. – 2012.
25. Tomislav Blaich. Evolution of radio access network in 3G mobile systems. / Blaich Tomislav. – Revija 19. – 2006. – P. 54-68.
26. GPP TS 36.211. Physical Channels and Modulation (Release 8). – 3GPP, 12.2008.
27. 3GPP TR 23.882. 3GPP System Architecture Evolution: Report on Technical Options and Conclusions (Release 8). – 3GPP, 09.2008.
28. 3GPP TR 36.913 V8.0.0. Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced), Release 8. – 3GPP, 06.2008.
29. Moray Rumney. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA. / Rumney Moray. – Agilent Measurement Journal. – 2008. – № 4. – P. 18-27.
30. Long Term Evolution (LTE): an introduction. – White Paper. – Ericsson. – October 2007.
31. Sauter M. From GSM to LTE : an introduction to mobile networks and mobile broadband. / M. Sauter. – 2011. – 452 p.
32. Teng F. Sharing of unlicensed spectrum by strategic operators. / F. Teng, D. Guo, M.L. Honig // In Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014 IEEE Global Conference. – 2014, December. – P. 288-292.
33. Marquez-Barja J. An overview of vertical handover techniques: Algorithms, protocols and tools / J. Marquez-Barja, C. T. Calafate, J.-C. Cano, P. Manzoni // Computer Communications. – 2011. – vol. 34. – pp. 985–997.



34. Zekri M. A review on mobility management and vertical handover solutions over heterogeneous wireless networks / M. Zekri, B. Jouaber, D. Zeghlache // *Computer Communications*. – 2012. – vol. 35. – P. 2055–2068.

35. Stevens-Navarro E., Lin Y., Wong V.W.S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2008. – vol. 57. – P. 765–788.

36. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж. / Є.М. Чернихівський. – Львів: НУ«ЛП». – 2011. – С. 240-242.

37. Методичні рекомендації до виконання дипломних робіт (проектів) бакалаврів та магістрів спеціальностей 125 Кібербезпека, 172 Телекомунікації та радіотехніка / Упоряд.: О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, О.М. Алексєєв, О.В. Кручинін. – Дніпро: НГУ, 2018. – 50 с.

## ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	3	
2	A4	Список умовних скорочень	2	
3	A4	Зміст	2	
4	A4	Вступ	3	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі	29	
6	A4	Спеціальна частина	13	
7	A4	Економічний розділ	5	
8	A4	Висновки	2	
9	A4	Перелік посилань	4	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	1	
13	A4	Додаток Г	1	

ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії

1 Презентація Зубков.ppt

2 Диплом Зубков.doc



ДОДАТОК Г. Відгук керівника кваліфікаційної роботи

**ВІДГУК**

**на кваліфікаційну роботу студента групи 172-183-1 Зубкова О.О.**

**на тему: «Оптимізація ключових показників ефективності хендоверів у мобільних мережах стандарту LTE»**

Пояснювальна записка складається зі вступу, трьох розділів і висновків, розташованих на 69 сторінках.

Мета роботи є актуальною, оскільки вона спрямована на аналіз і оптимізація ключових показників ефективності хендоверів в мобільних мережах LTE за допомогою розробленої імітаційної моделі.

При виконанні роботи автор продемонстрував добрий рівень теоретичних знань і практичних навичок. На основі аналізу основних положень технології мобільного зв'язку LTE, а також видів і процедур процесу хендовера в ній сформульовані задачі, вирішенню яких присвячений спеціальний розділ. У ньому було проаналізовано алгоритм та параметри хендовера в мережах мобільного зв'язку LTE та розроблено імітаційну модель для аналізу ключових показників ефективності хендоверів абонентів між сотами.

Практична цінність роботи полягає в тому, що результати моделювання можуть бути корисними при налаштуванні параметрів реальної мережі.

До недоліків роботи слід віднести недостатню проробку окремих питань.

Рівень запозичень у кваліфікаційній роботі відповідає вимогам «Положення про систему виявлення та запобігання плагіату».

В цілому робота задовольняє усім вимогам, а її автор Зубков О.О. заслуговує на оцінку «  
» та присвоєння кваліфікації «Бакалавр з телекомунікацій та радіотехніки» за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

**Керівник роботи,  
к.т.н., доцент**

**О.В. Герасіна**