

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження параметрів продуктивності на рівні радіоінтерфейсу в  
безпроводовій гетерогенній мережі HetNet  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ІКІМ-22-1  
Акіменко А.С.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)  
Тип програми: освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма: Інфокомунікаційна  
інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент кафедри ІКІ ім. В.В. Поповського  
Токар Л.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Лемешко О.В.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації і радіотехніка  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма Інфокомунікаційна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024р.


## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Акіменку Андрію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження параметрів продуктивності на рівні радіо інтерфейсу в безпроводовій гетерогенній мережі HetNet  
затверджена наказом по університету від « 19 » жовтня 2023 р. № 1212Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25.01.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: вимоги до безпроводових гетерогенних мереж зв'язку Heterogenic Networks, вимоги до архітектури гетерогенної мобільної мережі HetNet, моделі взаємодій у гетерогенній системі, способи вибору технології в мережі HetNet, рішення завдань у гетерогенній структурі, що пов'язані з вибором мережі
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
  - 1) Огляд питань функціонування гетерогенних мереж
  - 2) Дослідження користувальницького радіодоступу в щільних гетерогенних мережах, розробка моделей взаємодій у гетерогенній мережі
  - 3) Аналіз та дослідження керування трафіком у гетерогенній мережі в режимах очікування та з'єднання
  - 4) Рішення завдань у гетерогенній структурі, пов'язаних з вибором мережі

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації


6. Консультанти розділів роботи


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна частина	доцент Токар Любов Олександрівна		02.01.2024

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	25.09.2023	виконано
3	Розробка 1 розділу	19.10.2023	виконано
4	Розробка 2 розділу	30.10.2023	виконано
5	Розробка 3 розділу	10.11.2023	виконано
6	Розробка 4 розділу	22.11.2023	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	09.12.2023	виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

Студент \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Акіменко А.С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ доцент Токар Л.О.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 82 с., 33 рис., 3 додатка, 71 джерело.

ГЕТЕРОГЕННА МЕРЕЖА, ТОЧКА ДОСТУПУ, РАДІОІНТЕРФЕЙС,  
БАЗОВА СТАНЦІЯ, МОБІЛЬНІСТЬ, ХЕНДОВЕР, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ.

Об'єкт дослідження – процеси створення та дослідження гетерогенних мереж HetNet.

Предмет дослідження – методи та способи аналізу параметрів продуктивності гетерогенних мереж HetNet.

Мета роботи – оцінка показників продуктивності гетерогенного безпроводового середовища HetNet на рівні радіоінтерфейсу.

Методи досліджень – аналіз, формалізація, порівняння, моделювання.

У роботі проведені дослідження, спрямовані на оцінку продуктивності гетерогенних мереж HetNet.

Проведено аналіз та дослідження моделей взаємодій у гетерогенній системі HetNet, проведено математичне моделювання та обрано мережний сценарій з використанням технологій LTE та Wi-Fi. Для оцінки продуктивності розглянуто ряд показників: пропускна здатність, навантаження трафіку на PoA, втрати даних та справедливість пропускної здатності.

Проведено аналіз та дослідження керування трафіком у мережі HetNet у режимах очікування та з'єднання, проведено аналіз чутливості за показниками загальної кількості НО в секунду в мережі для різних пар рівнів. Виконано дослідження способів вибору мережі на основі усередненої потужності сигналу, ймовірності збою та відстані. Запропоновано алгоритм для визначення найкращої доступної безпроводової мережі у гетерогенному середовищі, проведено оцінку алгоритму під час руху UE з постійною швидкістю.

## ABSTRACT

The report contains: 82 p., 33 fig., 3 application, 71 sources.

HETEROGENEOUS NETWORK, ACCESS POINT, RADIO INTERFACE, BASE STATION, MOBILITY, HANDOVER, BAND CAPACITY.

The object of research is the processes of creation and research of HetNet heterogeneous networks.

The subject of the research is methods and methods of analyzing performance parameters of HetNet heterogeneous networks.

The purpose of the work is to evaluate the performance indicators of the HetNet heterogeneous wireless environment at the level of the radio interface.

Research methods – analysis, formalization, comparison, modeling.

In the work, research aimed at evaluating the performance of heterogeneous HetNet networks was carried out.

The analysis and research of interaction models in the HetNet heterogeneous system was carried out, mathematical modeling was carried out and a network scenario using LTE and Wi-Fi technologies was selected. To evaluate performance, a number of indicators are considered: throughput, traffic load on PoA, data loss and bandwidth fairness.

An analysis and study of HetNet traffic management in standby and connected modes was carried out, a sensitivity analysis was carried out on the indicators of the total number of HOs per second in the network for different pairs of layers. Methods of network selection based on average signal strength, failure probability, and distance are investigated. An algorithm for determining the best available wireless network in a heterogeneous environment is proposed, and the algorithm is evaluated while the UE is moving at a constant speed.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів .....	8
Вступ .....	10
1 Огляд питань функціонування гетерогенних мереж.....	11
1.1 Аналіз багаторівневої мобільної мережної архітектури .....	11
1.2 Передумови розвитку гетерогенних HetNet мереж .....	12
1.3 Огляд досліджень щодо взаємозв'язку процесів у гетерогенному середовищі .....	15
1.4 Основи вирішення задачі оптимізації систем стільникового зв'язку на рівні радіоінтерфейсу .....	16
1.5 Перерозподіл радіоресурсів у мережах HetNet .....	18
1.6 Питання вирішення проблем мобільності .....	19
2 Дослідження користувальницького радіодоступу в щільних гетерогенних мережах .....	23
2.1 Архітектура інтерфейсів на UE в контексті керування радіоресурсами.....	23
2.2 Мережний сценарій .....	28
2.3 Сценарії вибору мережі .....	30
2.4 Моделі взаємодій у гетерогенній системі.....	31
2.5 Математичні моделі параметрів гетерогенної мережі.....	33
2.6 Методика розрахунку показників продуктивності.....	37
2.7 Оцінка мережі.....	40
3 Аналіз керування трафіком у гетерогенній мережі.....	46
3.1 Рішення для керування трафіком.....	46
3.2 Керування трафіком у режимі очікування.....	46
3.3 Принцип повторного вибору сот на основі абсолютних пріоритетів.....	48
3.4 Аналіз керування трафіком у режимі очікування.....	49
3.5 Аналіз керування трафіком у режимі з'єднання.....	53
4 Рішення завдань у гетерогенній структурі, пов'язаних з вибором мережі.....	62
4.1 Способи вибору мережі на основі усередненої потужності	

сигналу, ймовірності збою та відстані.....	62
4.2 Алгоритм вибору мережі в гетерогенному середовищі.....	66
4.3 Оцінка алгоритму вибору мережі.....	70
Висновки.....	74
Перелік джерел посилання.....	76
Додаток А	83
Додаток Б	84
Додаток В	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І  
ТЕРМІНІВ

БС – базова станція

ОС – операційна система

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

AP – Absolute Priorities

CHO – Conditional Handover

CA – Carrier Aggregation

DAPS – Dual Active Protocol Stack

D2D – Device-to-Device

DC – Dual Connectivity

EMBB – Enhanced Mobile Broadband

HCP – Handover Control Parameter

HetNet – Heterogenic Networks

HFP – Handover Failure Probability

HO – Handover

HOP – Handover Probability

HSPA – High Speed Packet Access

HPPP – Handover Ping-Pong Probability

HPO – Handover Parameter Optimization

IoT – Internet of Things

LBO – Load Balancing Optimization

LTE – Long Term Evolution

M2M – Machine-To-Machine

MS – Mobile Station

MultiNets – Multilayered Extended Semantic Networks

NSF – Network Selection Function

PoA – Point of Access

QoS – Quality of Service

QoE – Quality of Experience

RAT – Radio Access Technologies

RAN – Radio Access Network

RLF – Radio Link Failure



RRH – Remote Radio Head

RSRP – Reference Signal Received Power

RSCP – Received Signal Code Power

RSS – Received Signal Strength

SON – Self-Organization Network

TCP – Transmission Control Protocol

TS – Traffic Steering

UDP – User Datagram Protocol

UE – User Equipment

V2X – Vehicle-to-Everything

Wi-Fi – Wireless Fidelity

## ВСТУП

В умовах стрімкого глобального зростання обсягів трафіку мережі мобільного зв'язку наступного покоління повинні орієнтуватись на потреби клієнтів для підвищення якості обслуговування. Сучасні підходи для адаптації до зростаючого потоку інформації в найближчій перспективі, такі як розширення спектру та розгортання більшої кількості базових станцій (БС) в мобільній мережі, вже не будуть актуальними з точки зору вартості, масштабованості та гнучкості.

Різке збільшення обсягів інформаційного трафіку, яке, в основному, спричинене мобільним відео, соціальними медіа та різноманітними сервісами Інтернету речей - Internet of Things (IoT) змушує мобільних операторів шукати інноваційні способи управління мережами в умовах обмежених частотних та транспортних ресурсів.

Перед інфокомунікаційними компаніями постає завдання розвитку мереж, які були б інтегровані на усіх рівнях, поєднували би різні стандарти і технології, забезпечуючи безшовний перехід з одного стандарту до іншого, від однієї технології до іншої. Саме такі мережі отримали назву гетерогенних мереж зв'язку Heterogenic Networks (HetNet). В умовах гетерогенності та сумісної роботи багатьох операторів безпроводового зв'язку пріоритетним завданням стає ефективне управління спільними радіоресурсами і забезпечення прозорого пересування користувача, що включають у себе такі механізми як: підтримка мобільності, хендовер, забезпечення належного рівня якості та обслуговування згідно вимог системи QoS (Quality of Service), а також систему безпеки та тарифікації.

В роботі оглянуто питання взаємодій кількох технологій радіодоступу Radio Access Technologies (RAT) між користувачем та інфраструктурою, таких як Long Term Evolution (LTE) та Wireless Fidelity (Wi-Fi), що працюють як мережа HetNet. Показано, що найважливішими завданнями для роботи мережі є завдання задоволення користувача, що полягає у певній кількості радіоінтерфейсів для забезпечення безшовних з'єднань з різними точками доступу Point of Access (PoA) і високою пропускнуою здатністю. Проведено огляд досліджень щодо взаємозв'язку процесів у гетерогенному середовищі HetNet.

## 1 ОГЛЯД ПИТАНЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ

### 1.1 Аналіз багаторівневої мобільної мережної архітектури

Основним фактором, що зумовлюють розвиток мобільних мереж, є необхідність задовольнити зростаючий попит на підвищення швидкості передачі даних. Прикладами програм Enhanced Mobile Broadband (EMBB) є онлайнві ігри, відео високої чіткості та нові програми, такі, як доповнена та віртуальна реальність. Останні дані підтверджують ці тенденції: згідно зі звітом Ericsson Mobility Report 2019, у 2024 році в мережі п'ятого покоління 5G передаватиметься 35% мобільного трафіку даних, а останній за прогнозами досягне 131 екзобайт на місяць з основним внеском вищезгаданих додатків [1].

Рішення потреб у пропускну́ї здатності додатків полягає у розробці гетерогенних, щільних телекомунікаційних мереж. Це пов'язано з тим, що більшість традиційних смуг, зокрема частот в діапазоні 300 МГц – 3 ГГц, вже розподілено службам й пропускна здатність майже досягла межі Шеннона [2, 3]. Для таких мереж характерна наявність великих сот та безлічі дрібних сот, причому останні класифікуються як мікросоти, пікосоти або фемтосоти [4].

У той час як фемтосоти в основному використовуються всередині приміщень, мікро-і макросоти вже є важливими компонентами стільникового зв'язку поза приміщеннями. Як наслідок, їхнє ущільнення має вирішальне значення для забезпечення високих швидкостей передачі даних, підтримки великої кількості одночасних підключень та зниження енергоспоживання між користувачами та PoA завдяки більш короткій відстані.

Така багаторівнева мережна архітектура обов'язково використовує кілька технологій радіодоступу RAT між користувачем та інфраструктурою, таких як LTE, Wi-Fi, mmWave тощо. Відомо дослідження, де оглянуто системи доступу LTE з двома рівнями, а також різні RAT у системах 5G Radio Access Network (RAN), включаючи можливість підтримки впровадження віртуальних RAT [5, 6]. У такому сценарії користувачі завжди будуть мати більше радіоінтерфейсів для забезпечення безшовних з'єднань з різними PoA і високою пропускну́ю здатністю.

Однак низка ключових факторів вноситиме суттєвий внесок у виникнення численних проблем мобільності:

1) Використання міліметрових хвиль, оскільки вони характеризуються високими втратами у тракті.

2) Увімкнення різних типів БС з малим покриттям, таких як picocell, femtocell та БС на основі безпілотників.

3) Використання підвійного з'єднання Dual Connectivity (DC), агрегації носіїв Carrier Aggregation (CA), масове зростання числа мобільних з'єднань, різноманітність мереж, поява підключених дронів (як БС або User Equipment - UE), надшільні мережі, неефективні процеси оптимізації, централізовані операції оптимізації, часткова оптимізація, складні відносини.

Однак, основною проблемою слід назвати керування радіоресурсами, що є ключовим фактором ефективного проєктування гетерогенних мереж.

Взаємозв'язок між названими процесами та різними технологіями безпроводового зв'язку може викликати проблеми, які пов'язані з хендвером та мобільністю. Ризик стає критичним у сценаріях із високою швидкістю мобільності.

## 1.2 Передумови розвитку гетерогенних HetNet мереж

Зростання клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, що пов'язано зі зміною його характеру та структури, потребують безперервного та значного збільшення пропускної здатності цих систем.

При побудові на одній території мереж мобільного зв'язку кількох радіотехнологій (GSM/GPRS/EDGE, WCDMA/HSPA, LTE) перед телекомунікаційними операторами стоять завдання подальшого розвитку при одночасному забезпеченні економічної ефективності. Ефективне використання частотного радіоспектру, мережних технологій та інфраструктури стає важливим питанням досягнення успіху мережних компаній. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності. Одним із шляхів підвищення ємності мережі є просторове ущільнення та вдосконалення методів керування розподілом радіоресурсу.

Системи, що застосовують різні технології безпроводового доступу, функціонують у декількох частотних діапазонах, мають багаторівневу структуру й використовують у своїй топології соти різного розміру, називають різнорідними або безпроводовими гетерогенними мережами зв'язку HetNet [7].

Гетерогенні мережі HetNet забезпечують можливість оптимізації витрат та підвищення якості послуг шляхом вибору відповідної технології передачі, вибору смуги частот та архітектурного рівня, оптимального для конкретного завдання.

Передумовами виникнення HetNet мереж є наявність у телекомунікаційного оператора кількох мереж з різними технологіями, обмеженість частотного ресурсу й широке поширення багаторежимних, багатодіапазонних терміналів користувача. Однак, як основну умову, варто зазначити нерівномірність територіального розподілу абонентського трафіку в мережі [8].

На відміну від ідеалізованої моделі, в реальних мережах можна відмітити нерівномірність використання послуг зв'язку користувачами та генерацію трафіка у зонах його концентрації. Зниження мобільності абонентів, які використовують пакетну передачу даних стосовно голосових даних, підвищує нерівномірність розподілу трафіку. Це спостерігається не лише на рівні загальної мережі, а й на рівні окремих сот.

Практично у кожній соті є кілька точок концентрації трафіку. За даними різних операторів, 50-80% трафіку генерується на 10-15% від площі всієї мережі, і 40-50% – створюється 2-3% користувачами [9]. На рис. 1.1 показано структуру гетерогенної мережі, яка ґрунтується на фактичному попиті на трафік даних.

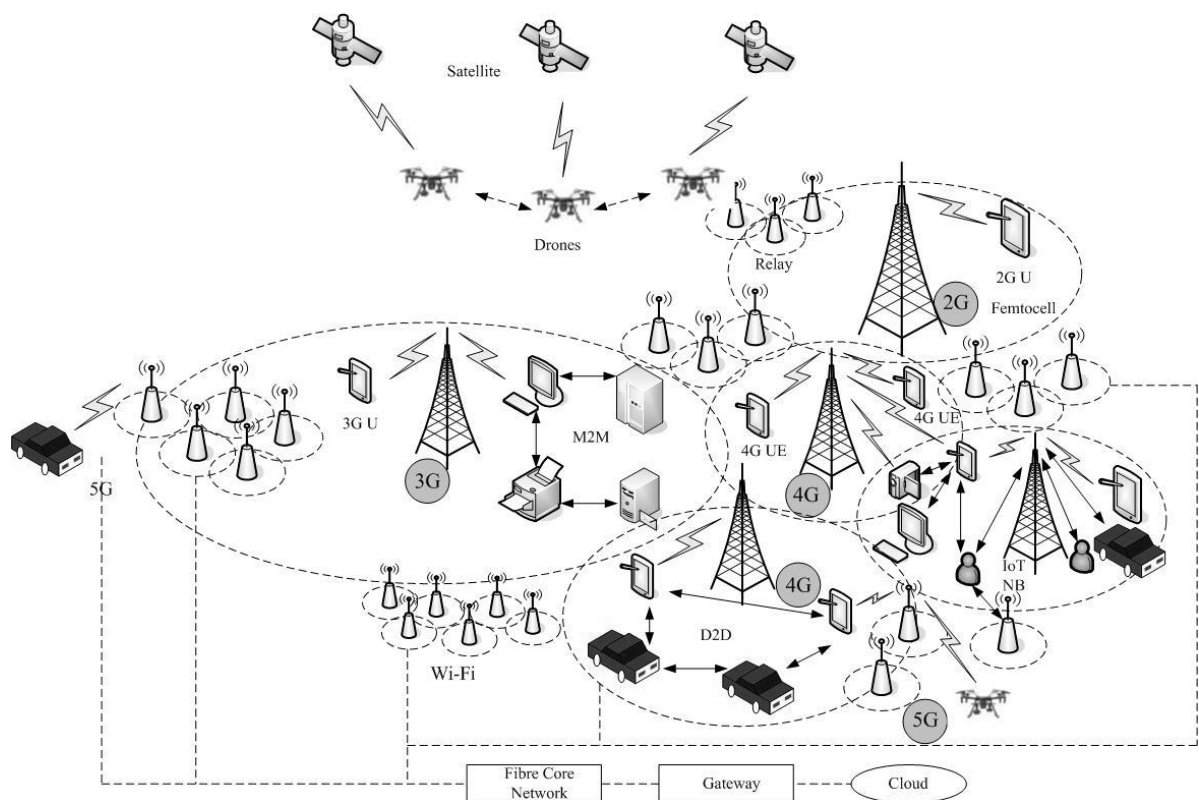


Рисунок 1.1 – Архітектура гетерогенної мобільної мережі HetNet

Використання гетерогенних мереж, у тому числі використання сот малого радіусу в місцях концентрації трафіку, дозволяє ефективно вирішити проблему забезпечення ємності мережі [9].

Класична архітектура мобільних мереж побудована з БС із приблизно однаковими параметрами потужності, територіями обслуговування та ємністю користувачів.

Потреба в оптимізації мобільних мереж викликана нерівномірністю розподілу користувачів (трафіку) по території, що обслуговується, і наявністю ділянок з недостатнім покриттям, одночасно з вимогою економічної ефективності, призвела до застосування БС з різними технічними характеристиками [10].

Технологія 5G забезпечує широкий спектр з'єднань, таких як IoT, Machine-to-Machine (M2M), Device-to-device (D2D), Vehicle-to-Everything (V2X) та Bluetooth. У сукупності вони впливають на бізнес та взаємодію з клієнтами.

Принцип роботи гетерогенної мережі з різними сотами HetNet показано на рис. 1.2.

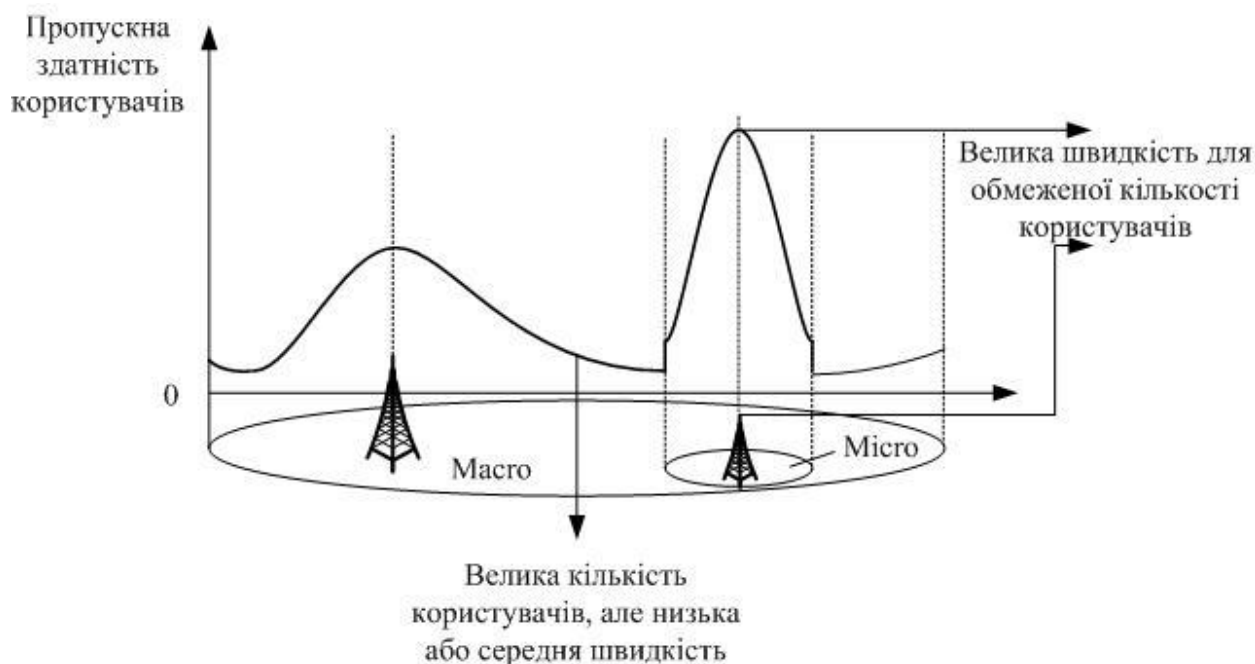


Рисунок 1.2 – Принцип роботи гетерогенної мережі з різними сотами

Відповідно до розв'язуваних завдань прийнято виділяти такі типи вузлів радіомережі у складі HetNet: макро-, мікро-, піко- та фемто-БС, віддалені радіомодулі Remote Radio Head (RRH) та ретранслятори [11].

Розподіл трафіку в багаторівневій мережі, управління мобільністю та ємністю мережі – взаємозалежні завдання, для оптимального вирішення яких необхідно використовувати комплексний підхід. Рішення забезпечується шляхом частотного планування, розробки та застосування політик розподілу трафіку за рівнями HetNet [12]. Взагалі комплексний підхід передбачає низку мережних умов: принципи вибору тієї чи іншої БС, частоти, технології обслуговування абонентського терміналу з урахуванням його розташування, швидкості руху, завантаження радіоінтерфейсів БС тощо.

Таким чином, реалізація мережі HetNet вимагає вирішення низки технічних завдань, що полягають у плануванні мережі, боротьбі з внутрішньою інтерференцією, організацією транспортної мережі (backhaul), в управлінні мережею та самоорганізації, в управлінні мобільністю тощо.

### 1.3 Огляд досліджень щодо взаємозв'язку процесів у гетерогенному середовищі

Передбачається, що гетерогенні мережі дозволяють одночасно зв'язувати користувачів з різними типами мережної інфраструктури, використовуючи функції множинної адресації мобільних пристроїв й безперешкодне перемикання з'єднання з однієї мережі PoA на іншу всередині RAN або між різними RAN [13,14].

Одночасна асоціація користувачів та перемикання між різними RAN повинні виконуватись з урахуванням характеристик кожної RAN, а також вимог додатків [15,16]. І тому в дослідженнях аналізуються механізми хендвера в гетерогенних середовищах [17,18]. Крім того, такі стандарти, як IEEE 802.21, забезпечують взаємодію між різнорідними мережами для оптимізації хендвера, однак без вказівки будь-яких механізмів вибору мережі [19].

Проблема визначення оптимального об'єднання користувачів за наявності різних технологій радіодоступу має велике значення. З теоретичної точки зору зазвичай використовуються два основні підходи: теорія ігор та оптимізація з використанням концепції корисності. Перший підхід спрямовано на формулювання гри, у якій можна забезпечити збіжність до рівноваги по Нешу й Парето – ефективність цієї рівноваги розглянуто в [20-22]. Другий підхід має на увазі вибір мережі, що відповідає найбільшому значенню корисності: корисність

може бути функцією споживання потужності, мережних умов або користувацьких переваг [23,24].

У роботі [25] розглянуто механізм зв'язку для ефективного розподілу ресурсів та управління завадами для сценарію співіснування Wi-Fi та стільникових технологій.

У роботі [26] досліджується міський сценарій розгортання, у якому малі соти Wi-Fi накладаються на мережу 3rd Generation Partnership Project (3GPP) LTE. Автори запропонували алгоритми вибору мережі з орієнтацією на користувача, щоб мінімізувати накладні витрати на зворотний зв'язок, враховуючи переваги користувача.

Менше досліджень зосереджено на розробці теоретичних моделей гетерогенної мобільної мережі з множинним радіодоступом, що дозволить оцінювати продуктивність великомасштабних систем.

В роботі [27] розглянуто багаторівневий гетерогенний сценарій і представлено алгоритм, заснований на теорії зіставлення, та планувальник, які максимізують кількість користувачів, що обслуговуються надійним чином. Запропоновано гнучку аналітичну модель, що охоплює географічні інтереси користувачів та розташування PoA, доступність різних радіоресурсів, просторову та часову динаміку попиту на користувальницький трафік та особливості багаторівневої мережної архітектури з покриттями PoA. Запропонований підхід дозволяє аналізувати великомасштабні системи.

#### 1.4 Основи вирішення задачі оптимізації систем стільникового зв'язку на рівні радіоінтерфейсу

Висока швидкість розвитку стільникових мереж зв'язку визначає підвищений інтерес до них з боку розробників програмного забезпечення, як у питаннях планування та оптимізації, так і в питаннях потреб в фахівцях технічних служб операторських компаній. Можливість збільшення ємності стільникових систем зв'язку за рахунок збільшення території, що обслуговується, і числа каналів з часом знижується.

Тому виникає завдання підвищення ефективності використання вже існуючих мереж. На перший план стає проблема необхідності вирішення задачі оптимізації стільникової системи на рівні радіоінтерфейсу, мета якої – максимально можливе збільшення пропускної здатності. Коли допустима межа



навантаження на частину мережі зв'язку перевищена, то виникає перевантаження. Це спостерігається в тому, що деяким користувачам не можуть бути надано послуги зв'язку (блокування з'єднання), в інших користувачів якість зв'язку стає нижчою за заданий рівень (обриви з'єднань, кількість помилок на біт повідомлення, високий рівень внутрішньосистемної завади).

Крім перевантажень мобільної мережі за рахунок, наприклад, масових перевантажень під час свят або очікуваних перевантажень (при недостатній швидкості збільшення абонентської ємності станцій – відкритті нової точки обслуговування користувачів, де ще недостатньо забезпечено необхідну абонентську ємність), можна виділити ще один вид навантаження – локальні навантаження [28].

Кожна сота мережі має межу обслуговування клієнтського навантаження. Для оператора мережі зв'язку будь-яке підвищене навантаження небажане, оскільки це супроводжується зниженням ключових показників якості роботи: знажається якість послуг, що надаються користувачам; зростає кількість обривів з'єднань користувачів. Тобто користувач ризикує не отримати послугу, при цьому ймовірність відмови обслуговування будь-якого користувача в соті при виникненні локального навантаження істотно зростає. Причиною локального навантаження є перевищення навантаження на соту за рахунок збільшення навантаження в області розташування деякої частини користувачів соти [29].

При цьому область розташування користувачів набагато менше області обслуговування соти. Локальне навантаження може бути наслідком надзвичайної події, масового заходу або інших причин, включаючи зовнішні впливи на мережу зв'язку третіх осіб [30].

Постійний розвиток у галузі інфокомунікацій призводить до створення різних технологій радіодоступу та появи значної кількості клієнтських пристроїв із підтримкою різних стандартів мобільного зв'язку, що вимагають об'єднання різних технологій у єдину конвергентну мережу та створення глобальної мережі мобільного гетерогенного зв'язку. При цьому спостерігається об'єднання різних сегментів безпроводових технологій з накладенням зон покриття, що дозволить підвищити пропускну здатність мережі та розширити зону її покриття, а для користувача – надати послуги з більш високою якістю та нижчою ціною.

У мобільному зв'язку найпоширенішою проблемою є вичерпання радіоресурсу соти в моменти пікового абонентського навантаження. В таких

випадках користувачі, які намагаються зателефонувати або скористатися іншими послугами зв'язку (наприклад, Інтернет), отримують відмову в обслуговуванні.

### 1.5 Перерозподіл радіоресурсів у мережах HetNet

Одним із перспективних рішень перерозподілу ресурсів в гетерогенній мережі є вирішення задачі підвищення доступності мережних радіоресурсів методом балансування абонентського навантаження [31]. При підвищеному навантаженні або перевантаженні одного або більше секторів мережі мобільного зв'язку із трьохсекторними антенами використовується вимушений перерозподіл радіоресурсів.

Мережі HetNet, що утворені шляхом інтеграції БС міліметрового діапазону з традиційними макро-БС із частотою менше 6 ГГц, є перспективним рішенням для збільшення пропускної здатності користувачів та швидкості передачі даних. Мережі HetNet вважаються однією із фундаментальних архітектур системи 5G. Але характеристики частот міліметрового діапазону можуть представляти нові проблеми, такі як більш значні втрати на трасі поширення, атмосферне поглинання та ослаблення в опадах. Такі проблеми збільшують можливість простою, тим самим знижуючи загальну продуктивність системи. Коли надійний зв'язок міліметрового діапазону є малоімовірним, БС міліметрового діапазону повинні співіснувати зі звичайними макро-БС із частотою менше 6 ГГц, щоб забезпечити користувачам безперешкодне з'єднання [32].

Малі соти (пікосоти, фемтосоти, мікросоти та ретранслятори) є архітектурою стільникової мережі, що забезпечуються малопотужними БС в порівнянні з макро-БС. Вони є ключовим елементом розвантаження мобільного трафіку в макросоті. Таким чином, через різницю в потужності передавачів між типами сот, користувачі воліють зв'язуватися з макросотами, що забезпечують сильний сигнал низхідного каналу. В результаті кількість кластерів, пов'язаних з малими сотами, значно нижча, ніж з макросотами. У такому разі конкуренція за систему ресурсів у макро-БС висока через надмірну кількість пов'язаних користувачів, у той час як системні ресурси БС міліметрового діапазону використовуються не повністю через обмежену кількість користувачів.

Такий дисбаланс навантаження в мережах HetNets призводить до несправедливого розподілу швидкості передачі даних між користувачами, а також невідповідності Quality of Experience (QoE) і QoS [33].

Рішення на основі алгоритму балансування навантаження ґрунтується на віддачі пріоритету сотам міліметрового діапазону mmWave при виборі цільової соти та об'єднанні користувачів для забезпечення балансування навантаження в мережах 5G HetNet з метою підвищення загальної продуктивності системи. Це двоетапний метод вибору цільових сот, що враховує рівень їх завантаження та потужність опорного сигналу – Reference Signal Received Power (RSRP). Цей метод віддає пріоритет сотам mmWave, що відповідають рівню навантаження та умовам RSRP при виборі цільової соти, використовуючи всі переваги унікальних властивостей сот mmWave (підвищену пропускну здатність мережі, спектральну ефективність та велику ширину смуги) для балансування трафіку. Ініціювання хендовера Handover (HO) та процес прийняття рішень проходять незалежно та виконуються для кожного користувача. При перевантаженні соти застосовуються різні процедури для балансування навантаження в залежності від типу цільової соти (макро-БС або БС міліметрового діапазону) [33].

## 1.6 Питання вирішення проблем мобільності

Масове зростання мобільних підключень, різноманітність мереж і трьохмірний 3D мобільний зв'язок (наприклад, дрони) спричинять радикальне збільшення попиту на мобільні дані. Обслуговування великої кількості UE вимагає розгортання великої кількості невеликих БС, що перекриваються. Це призведе до структурування надщільних систем у майбутніх мережах. У сукупності ці фактори значною мірою сприятимуть збільшенню незбалансованого навантаження та ймовірності передачі обслуговування.

На додаток до всіх цих факторів, використання неефективних методів хендовера ще більше посилить проблеми з мобільністю, що призведе до значного збільшення ймовірності хендовера Handover Probability (HOP), ймовірності збою хендовера Handover Failure Probability (HFP), ймовірності пінг-понга хендовера Handover Ping-Pong Probability (HPPP), часу переривання та погіршення пропускну здатності. У цьому випадку збій при передачі обслуговування буде збільшуватися через невеликий розмір соти, особливо в сценаріях з більш високою швидкістю мобільності. Це пов'язано з тим, що UE з високими мобільними швидкостями можуть перетнути соту протягом декількох секунд, і це знизить ймовірність прийняття рішення про передачу обслуговування та/або ймовірність завершення процедури обслуговування.

Мобільність у безпроводових мережах визначається як здатність підтримувати з'єднання UE з безпроводовою мережею, що обслуговується, під час переміщення UE всередині соти без будь-якого порушення в ідеальному випадку. Це вважається однією із основних функцій, що надаються мережами безпроводового зв'язку в порівнянні з проводовими мережами.

Завдяки властивості мобільності UE може мати гнучкість під час своїх переміщень. Ця функція дозволяє UE перемикає своє з'єднання під час свого переміщення з першої соти (обслуговуюча БС) до нової соти (цільова БС) поки є доступне покриття. Дані можуть бути перенаправлено зі старої обслуговуючої БС на нову цільову БС. Всі ці функції підвищують задоволеність UE та полегшують широку доступність безпроводових послуг у будь-який час.

Забезпечення безперебійного з'єднання при мобільності різних пристроїв UE вважається одним з основних завдань, що стоять перед практичною реалізацією технології 5G й наступних поколінь.

Для вирішення цих питань потрібні більш досконалі, надійні та ефективні протоколи мобільності, методи передачі обслуговування та системні рішення. Необхідна розробка протоколів управління мобільністю, методів самооптимізації параметрів передачі, моделей балансування навантаження, функцій координації, алгоритмів прийняття рішення про передачу, процедури передачі та методів прогнозування шляху. Для систем технології 4G було запропоновано кілька мобільних рішень, але вони не будуть повністю ефективними у мережах 5G. Нові рішення мають бути ефективно розроблені для роботи з майбутніми мережами, що характеризуються більш просунутими специфікаціями та вимогами, ніж попередні мережі.

В роботі розглянуто перспективні методи, створені задля вирішення проблем мобільності.

#### 1. Функція Self-Organization Network (SON).

Важливою функцією, яку слід відзначити у вирішенні проблем мобільності в мережах 4G і 5G, є функція мобільності в рамках SON, яка надалі може бути розроблена та збережена як один із основних компонентів системи 6G [34]. Функція SON – це одна з трьох основних підмереж, представлених в рамках самоорганізованої мережі, в мережах 4G і 5G. Основною метою SON є автоматизація процесу керування за рахунок динамічної адаптації параметрів системи.

#### 2. Функція Handover Parameter Optimization (HPO).

Функція оптимізації параметрів передачі НРО була представлена як фундаментальна функція при розгортанні мереж 4G та 5G. Її основна мета – автоматичне налаштування параметрів Handover Control Parameter (HCP) для підтримки якості мережі. Зокрема, метою ймовірності хендовера НОР є виявлення та коригування як відмови каналу Radio Link Failure (RLF), так і ефекту ймовірності пінг-понгу хендовера НРРР. Іншими словами, алгоритм НРО адаптивно регулює налаштування HCP для виявлення RLF або НРРР.

### 3. Функція Load Balancing Optimization (LBO).

Функція оптимізації балансування навантаження LBO адаптивно регулює параметри HCP, щоб збалансувати нерівне навантаження між сусідніми сотами. Баланс навантаження сот потрібно врахувати при перекритті двох сусідніх сот. Коли навантаження між цими двома сотами незбалансовані, то включається алгоритм LBO для налаштування параметрів HCP відповідної соти. Це виконується для передачі обслуговування UE, які розташовані на краю соти, в ту соту, яка надає більше ресурсів та із меншим навантаженням.

### 4. Увімкнення DC.

Хоча постійний струм є одним із факторів, що підвищують ймовірність передачі обслуговування, він також сприяє вирішенню проблем з мобільністю. У реалізації подвійного підключення DC UE може бути одночасно підключені через кілька носіїв до двох різних БС різних технологій.

Це сприятиме забезпеченню високих швидкостей передачі даних для UE, дозволяючи їм використовувати дві різні смуги частот двох різних технологій. Таким чином, загальна швидкість передачі даних UE є сукупною швидкістю передачі даних швидкостей 4G і 5G. Забезпечується більш стабільне з'єднання, оскільки основні дані керуватимуться макро-БС. Включення методу DC сприяє підвищенню швидкості передачі даних UE під час мобільності, а також зниженню ймовірності відключення, що виникає в результаті впровадження невеликих сот 5G.

### 5. Умовний хендовер.

Умовний хендовер Conditional Handover (CHO) – це новий метод, який було введено як частина функцій мобільності у 3GPP. Rel.16 [35]. Його мета полягає в тому, щоб підвищити надійність мобільності UE.

Цей метод працює на основі концепції розширеної підготовки для цільових БС до того, як буде ініційовано передачу обслуговування. CHO має деяку схожість з концепцією техніки м'якого хендовера з деякими змінами в операціях

та функціях хендовера. Цей метод починається з розширеної підготовки списку сусідніх БС, які можуть бути потенційними цільовими БС до того, як потужність опорного сигналу RSRP обслуговуючого UE впаде нижче порогового рівня.

#### 6. Стек протоколів подвійного активного хендовера.

Стек протоколу подвійного активного хендовера Dual Active Protocol Stack (DAPS) – це запропоноване компанією Ericsson рішення, яке сприяє скороченню часу переривання під час мобільності UE [36].

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИСТУВАЛЬНИЦЬКОГО РАДІОДОСТУПУ В ЩІЛЬНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ

### 2.1 Архітектура інтерфейсів на UE в контексті керування радіоресурсами

У контексті керування радіоресурсами в роботі розглянуто систему Multilayered Extended Semantic Networks (MultiNets), яка підтримує плавне перемикання між безпроводовими інтерфейсами на UE в режимі реального часу. MultiNets працює у трьох режимах: режим енергозбереження – для вибору інтерфейсу, який економить найбільше енергії залежно від стану пристрою; режим розвантаження – для розвантаження трафіку даних із мережі в мережу Wi-Fi; режим продуктивності – для вибору мережі для найшвидшого підключення до даних [37].

MultiNets обробляє сеанси без встановлення з'єднання та сеанси із встановленням з'єднання окремо під час перемикання User Datagram Protocol (UDP) і Transmission Control Protocol (TCP). TCP - домінуючі транспортні протоколи у пристроях UE. У роботі описано можливості перемикань з їх використанням.

Сеанси без встановлення з'єднання зустрічаються рідко: менше ніж 0,3% від суми трафіку. Їх легше перемикати. UDP-програми обмінюються даними, використовуючи DatagramSocket, кожне з'єднання прив'язане до порту та йому присвоєно IP-адресу та адресу доступного інтерфейсу операційної системи (ОС). Щоб переключити мережний інтерфейс, MultiNets спочатку вмикає новий інтерфейс і видаляє маршрут за замовчуванням через попередній інтерфейс, що не впливає на функціональність DatagramSocket: вихідний трафік відправляється з IP-адресою нового інтерфейсу, а вхідний трафік буде отримано за попереднім інтерфейсом. Потім MultiNets вимикає попередній інтерфейс, який спочатку призводить до деякої втрати пакетів трафіку, що в більшості випадків обробляється прикладним рівнем.

Сеанси, орієнтовані на з'єднання, переважно складаються з TCP, що становить близько 99,7%, але їх складніше перемикати. MultiNets виконує такі кроки для перемикання цих сеансів:

1) Крок 1. MultiNets підраховує кількість поточних TCP-з'єднань на попередньому інтерфейсі. При цьому вимикаються сеанси стану «встановлено», тобто ті, що минули під час підрахунку.

2) Крок 2. Якщо лічильник не дорівнює нулю, MultiNets додає нові записи таблиці маршрутизації для всіх з'єднань, де вказано адресу призначення, шлюз та маску для попереднього інтерфейсу. Це необхідно для того, щоб поточні сеанси TCP, як і раніше, залишалися в цьому інтерфейсі.

3) Крок 3. На цьому кроці MultiNets відображає новий інтерфейс та додає записи до таблиці маршрутизації для включення маршруту за замовчуванням і видаляє маршрут попереднього інтерфейсу за замовчуванням з таблиці маршрутизації. З цієї миті будь-які нові з'єднання починають використовувати новий інтерфейс.

4) Крок 4. MultiNets очікує наперед визначеного тайм-ауту для завершення поточних сеансів TCP через попередній інтерфейс, після чого повністю відключається попередній інтерфейс і система переходить на новий інтерфейс.

Користувачам MultiNets необхідно налаштувати мережу Wi-Fi, надавши інформацію автентифікації лише один раз. Після цього MultiNets динамічно перемикає інтерфейси, не вимагаючи ручного втручання. Таке комутаційне рішення в MultiNets є повністю клієнтським – воно не потребує додаткової підтримки з боку точок доступу або шлюзів. Більше того, MultiNet не вимагає модифікації мережних протоколів. У такому разі лише зчитується транспортна інформація та додаються або видаляються таблиці маршрутизації для виконання перемикавання. Тому наявні програми прозора працюють на MultiNets без будь-яких змін. Однак існує ймовірність того, що на 4 кроці при перемиканні дуже довгий сеанс TCP може бути перервано через тайм-аут. У цьому випадку емпірично виводиться значення тайм-ауту, для якого переривання стає рідкісним явищем. MultiNets використовує API для перемикавання на новий інтерфейс, що показано на рис. 2.1.

```

1 SwitchingManager mgr=new SwitchingManager(getSystemService("SwitchingService"));
2 try{
3     if(mgr.switchInterface(mgrMOBILE)==true){
4         //Success.New sessions start over 3G now
5     }
6 }catch(SwitchingException ex){ex.printStackTrace();}

```

Рисунок 2.1 – Використання методу switchInterface() для перемикавання на сотовий інтерфейс



Метод `switchInterface()` приймає ім'я інтерфейсу як аргумент й надає інформацію про успішне з'єднання або відмову. У разі збою видається повідомлення причини відмови.

Структура MultiNets модульна і складається із трьох основних компонентів – модуля комутації, модуля моніторингу та політики вибору (рис. 2.2). Ці компоненти ізолюють механізми з'єднання, політику вибору та завдання моніторингу системи та дозволяють розширення їх можливостей без будь-яких змін в архітектурі.

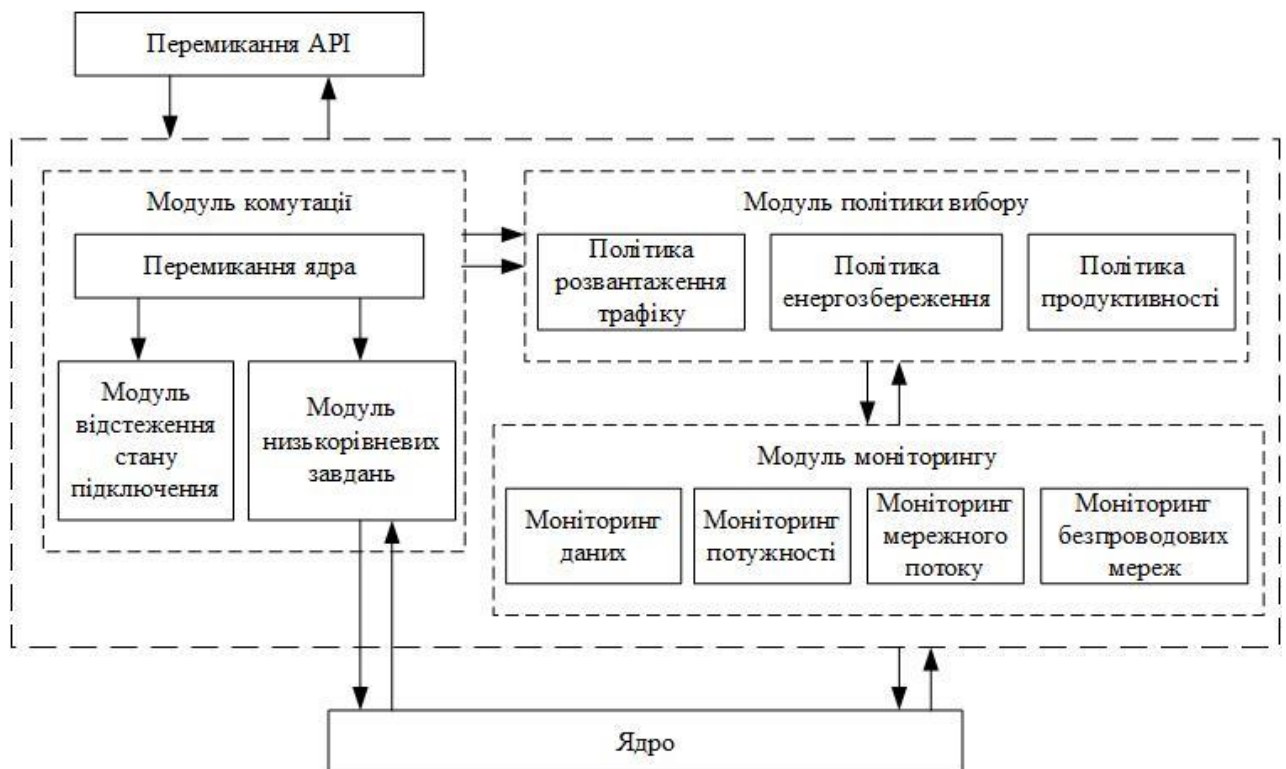


Рисунок 2.2 – Архітектура MultiNets

Модуль комутації виконує перемикання між стільниковим зв'язком та Wi-Fi. Він підтримує внутрішній кінцевий автомат для відстеження стану підключення. Він також має модуль низькорівневих завдань, який виконує деякі низькорівневі завдання, пов'язані з перемиканням. Модуль перемикання ядра координує ці два процеси.

Модуль низькорівневих завдань надає службові методи для перемикання. Він включає наступні завдання – підрахунок поточних TCP-сесій через певний мережний інтерфейс; оновлення таблиці маршрутизації для збереження існуючих сеансів TCP через певний інтерфейс; додавання та видалення маршрутів за умовчанням мережних інтерфейсів; підключення, повторне підключення або

розрив інтерфейсів. Ці методи викликаються основним модулем комутації до виконання перемикання.

Модуль моніторингу відповідає за моніторинг усіх необхідних явищ, пов'язаних із перемиканням. Він містить модулі, кожен з яких спостерігає за однією або декількома системними змінними та містить останнє значення цієї змінної.

Модуль моніторингу даних відстежує кількість переданих та отриманих даних по Wi-Fi та сотових інтерфейсів у байтах та пакетах з моменту вмикання інтерфейсу. Модуль безпроводового моніторингу відстежує стан підключення, потужність сигналу та інформацію про точки доступу. Модуль моніторингу мережного потоку контролює кількість та стан сеансів TCP та UDP, інформацію про маршрутизацію з таблиць маршрутизації. Модуль моніторингу потужності контролює стан батареї, її напругу, струм та ємність. Всі ці модулі є одноелементними, тобто в системі існує лише один екземпляр таких модулів. Вони мають спільний інтерфейс для відповіді на всі питання. Запит та його відповідь утворюють пару. Ці запити видає компонент політики вибору.

Політика вибору визначає політику перемикання інтерфейсів. При відокремленні політики вибору від решти системи можна додавати нові політики або змінювати існуючі, не вимагаючи будь-яких змін в інших частинах системи. Наприклад, при певному виборі Wi-Fi працює набагато швидше, ніж стільникова мережа. Але в майбутньому ця ситуація може змінитися, і стільникова передача даних може перевершити Wi-Fi, що вимагатиме зміни поточної політики або додавання нової політики. В роботі показано три політики вибору, але одночасно активна лише одна з цих політик.

Метою політики енергозбереження є мінімізація енергоспоживання. При цьому потребується знання майбутнього трафіку даних. Взагалі відповідно до цієї політики мобільний пристрій підключається до мережі, коли він знаходиться в режимі очікування, і починає підраховувати кількість байтів, відправлених по мережі, після того, як користувач запускає програму. Як тільки загальний обсяг даних в мережі перевищує порогове значення, то пристрій вирішує перемикатися на пристрій Wi-Fi. Мобільний пристрій знову перемикається на мережу, коли мережа Wi-Fi не використовується протягом певних секунд, що відбувається шляхом налаштування. При цьому потужність бездіяльності мережі Wi-Fi набагато вища, ніж потужність мережі стільникового зв'язку. Існують методи, в

яких заощаджено частину енергії, яка споживається, для сканування точок доступу Wi-Fi, що становить близько 40% енергії простою [38].

Метою політики розвантаження є розвантаження стільникового трафіку даних у будь-яку доступну мережу Wi-Fi. Відповідно до цієї політики, щоразу, коли пристрій Wi-Fi доступний, йде перемикавання на Wi-Fi. Це відбувається лише тоді, коли рівень сигналу Wi-Fi нижче порогового значення для плавного перемикавання. Перевага цієї політики полягає у зменшенні трафіку даних у стільникових мережах. Але недоліком є той факт, що, якщо мережа не використовується, підтримувати бездіяльний інтерфейс Wi-Fi більш витратно з точки зору енергії.

Метою політики продуктивності є максимізація пропускної здатності мережі. Це досягається за рахунок перемикавання на мережний інтерфейс із найбільшою пропускною здатністю.

Процес перемикавання між безпроводовими інтерфейсами на мобільних пристроях в режимі реального часу характеризується діаграмою станів. На рис. 2.3 показано діаграму станів.

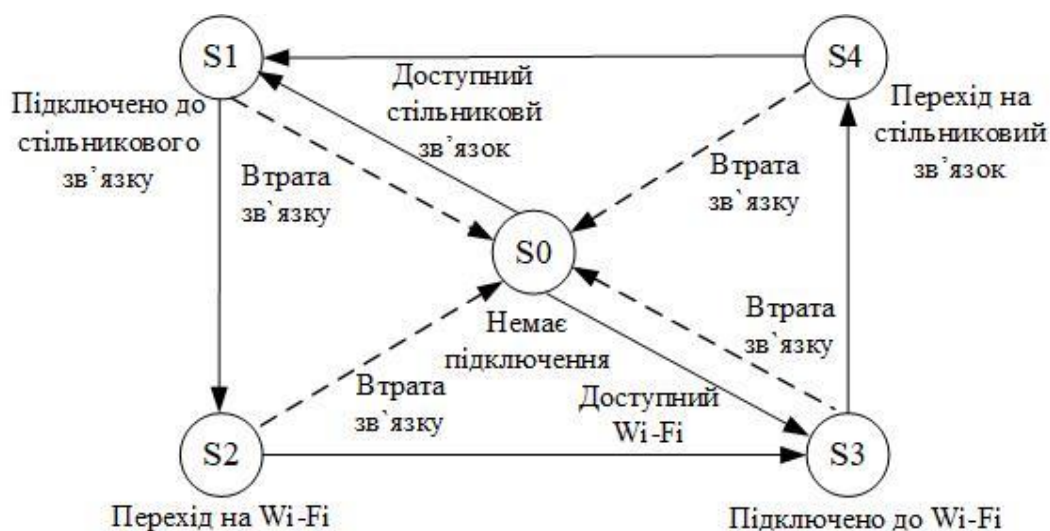


Рисунок 2.3 – Діаграма станів

Система залишається в стані «Немає підключення» (S0), коли ні стільниковий зв'язок, ні Wi-Fi недоступні, і продовжує шукати мережу для підключення. Стани «Підключено до стільникового зв'язку» (S1) та «Підключено до Wi-Fi» (S3) схожі. У цих станах пристрій використовує лише один безпроводовий інтерфейс і періодично перевіряє за допомогою політики вибору, чи потрібен комутатор. Стан «Перехід на Wi-Fi» (S2) і «Перехід на стільниковий

зв'язок» (S4) - це перехідні стани. Обидва інтерфейси активні в цих станах, але нові з'єднання починаються через новий інтерфейс, в той час як існуючі сеанси залишаються в попередньому інтерфейсі. Механізм залишається в цих станах, поки попередній інтерфейс має активні сеанси TCP або до закінчення часу очікування. У реальних умовах система переміщається у станах {S1, S2, S3, S4} за колом. Щоб упоратися з будь-якою втратою зв'язку, система виконує переходи, показані пунктирними стрілками. Втрата підключення Wi-Fi на S2 переводить систему на S3, але відразу починає перемикатися назад на стільниковий зв'язок при виявленні такого відключення.

## 2.2 Мережний сценарій

В роботі розглянуто мережний сценарій у припущенні, як щодо інфокомунікаційної мережі, так і щодо користувача трафіку. Розглянуто політику доступу користувачів до гетерогенної мережі. Головна увага приділяється міському району, який знаходиться у зоні покриття багаторівневої мережі 5G, що характеризується багатотехнологічним радіодоступом.

Для наочного аналізу та вибору мережного сценарію розглянуто два набори сот - макросоти та мікросоти, хоча модель може бути розширена до сценарію з більшим рівнем сот, від фемтосот до макросот. Макросоти обслуговуються PoA, такими як БС стільникового зв'язку, що працюють на відносно низьких частотах у ліцензованому спектрі (наприклад, сучасні частотні діапазони LTE), в той час як мікросоти обслуговуються PoA, що працюють на більш високих частотах та використовують технології Wi-Fi або mmWave. Таким чином, незалежно від технології та місця розташування, сотам виділяються окремі набори радіоресурсів низхідної лінії зв'язку таким чином, що між двома PoA немає міжсотової інтерференції.

Графічне представлення мережного сценарію показано на рис. 2.4.

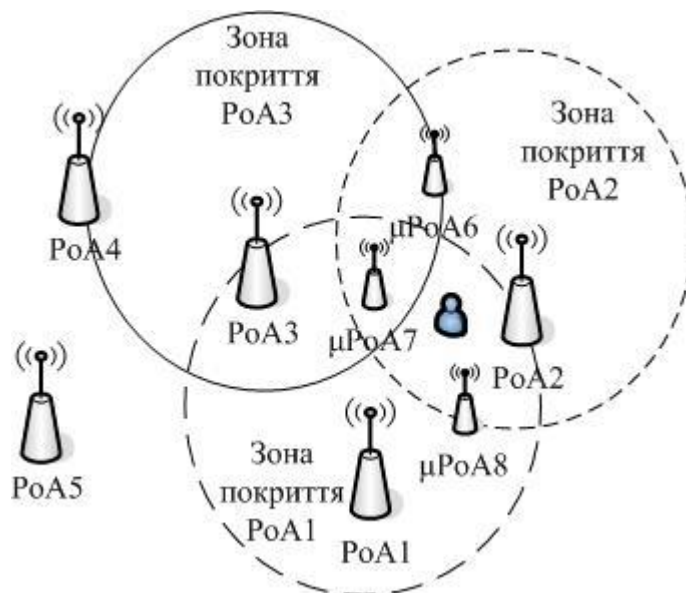


Рисунок 2.4 – Мережний сценарій: PoA, що охоплюють макросоти, і  $\mu$ PoA, що охоплюють мікросоти

Основні параметри мережі: кількість макросот  $N_M$ ; загальна макросота  $M_i$ , причому  $i = 0, \dots, N_M - 1$ ; зона покриття загальної макросоти  $M_i - A_i$ . Передбачається, що зона  $A_i$  включає мікросоту  $N_{mi}$ , кожна з яких позначається  $m_p$  і має зону покриття  $a_p$  (де  $p = 0, \dots, N_{mi} - 1$ ). Зони покриття сусідніх макросот та мікросот можуть бути перекрито.  $N_i$  - це безліч макросот, які є сусідніми для  $M_i$ , а  $h_p$  - безліч мікросот, які є сусідніми для  $m_p$ . Користувачі, що знаходяться в зоні  $A_i \cap A_j$ , можуть отримати доступ до  $M_i$  або до  $M_j$ ; аналогічно, користувачі в зоні  $a_p \cap a_q$  можуть отримати доступ до  $m_p$  або  $m_q$ .

Так як трафік даних в безпроводових мережах асиметричний [39], а це завантаження контенту або потокове відео, то дослідження проводиться на передачу даних по низхідній лінії (від PoA до користувача). Відповідно до гетерогенних радіоінтерфейсів 5G, кількість радіоресурсів  $N_w$ , доступних у кожній соті, можуть бути визначені в термінах частоти, часу, параметрів антен або потужностей передачі.

Користувачі, що знаходяться в зоні дії декількох PoA, можуть підключитися до будь-якої з них, однак, при цьому будуть спостерігатися різні показники якості зв'язку. Це залежить від того, від якої PoA вони отримують послуги. Таким чином, для всіх технологій якість зв'язку знижується в міру збільшення відстані

між користувачем і РоА, і чим краща якість зв'язку, тим вища швидкість передачі, на якій працюють кінцеві точки з'єднання.

У роботі приділено увагу дослідженню динаміки розвантаження трафіку між різними рівнями мережі, тому розглядаються пішохідні користувачі, які можуть обслуговуватися мікросотами чи макросотами в залежності від розташування. Таким чином, оскільки передача контенту триває лише кілька секунд, користувачі не будуть активно переміщатися під час передачі трафіку.

### 2.3 Сценарії вибору мережі

Макросоти та мікросоти використовують різні ділянки спектру і, навіть ліцензовані та неліцензовані частоти відповідно. Таким чином, доступ до макросоти РоА або мікросоти РоА передбачає різні грошові витрати для користувача. Наприклад, доступ до мікросоти Wi-Fi може мати невелику вартість або взагалі бути відсутнім, на відміну від доступу до мікросотового зв'язку mmWave або до макросоти, які, однак, можуть забезпечити гарантії пропускну здатності.

Визначено одну з таких політик, яка спрямована на те, щоб для кожної нової ініційованої передачі трафіку користувач вибирав технологічний рівень (їх може бути два або більше), що забезпечує досить високу пропускну здатність за умов незначної грошової вартості при доступі. Розглянуті сценарії повністю розподілені. Користувачі самостійно вирішують, яку технологію використовувати для завантаження контенту, і вони не можуть покладатися на докладну, апріорну інформацію про ту пропускну здатність, характерну для конкретного доступу. Вважається, що користувач перераховує доступні РоА, тобто ті РоА, від яких він отримує досить високий рівень прийнятого сигналу Received Signal Strength (RSS), причому від найсильнішого до найслабшого за рівнем.

У роботі розглянуті сценарії вибору, відповідно до яких користувачі отримують доступ до різних рівнів мережі.

Сценарій 1. Якщо в списку з'являється мікросота, користувач підключається до тієї мікросоти, від якої він отримує найсильніший за рівнем сигнал, це так звана локальна мікросота. У цьому випадку, якщо пропускну здатність нижче заданого порога  $\mu$  протягом досить тривалого часу, користувач перемикається або на доступну мікросоту, яка називається сусідньою мікросотою, або на локальну макросоту РоА, від якої він отримує більш якісні послуги.

Сценарій 2. Якщо в списку мереж з'являється макросота, то користувач підключається до макросоти, що називається локальною макросотою. Якщо користувач знаходиться в зоні покриття тільки РоА макросоти, то він підключається до своєї локальної макросоти, і перемикається на сусідню макросоту тільки у разі незадовільної пропускної здатності. А користувач, який отримує дані від сусідньої макросоти, періодично намагається перейти на свою місцеву макросоту.

Користувач може зробити вибір залежно від пропускної здатності, якщо продуктивність нижче за поріг  $\mu$  протягом часу гістерезису, а передачу трафіку ще не завершено. Характерно, що коли користувач обслуговується локальною макросотою, то він може мігрувати тільки у сусідню макросоту. Така політика вибору також може бути поширена у випадку, коли доступно більше рівнів мережі.

#### 2.4 Моделі взаємодій у гетерогенній системі

У роботі розроблено моделі взаємодій для представлення гетерогенної мережної системи та її параметрів, які відображають як багаторівневу комунікацію, так і попит на користувальницький трафік, який характерний для цієї області. Увага приділяється сценаріям із високою щільністю користувачів.

Користувачі класифіковані на основі можливостей доступних підключень та на основі попиту на трафік. Користувачі, що знаходяться в зоні покриття тільки макросоти, мають різні можливості підключення на відміну від тих, хто знаходиться під покриттям як макро-, так і мікросоти.

Модель станів, що характеризуються різними позиціями користувача, які моделюють покриття відповідного користувача, показано на рис. 2.5.

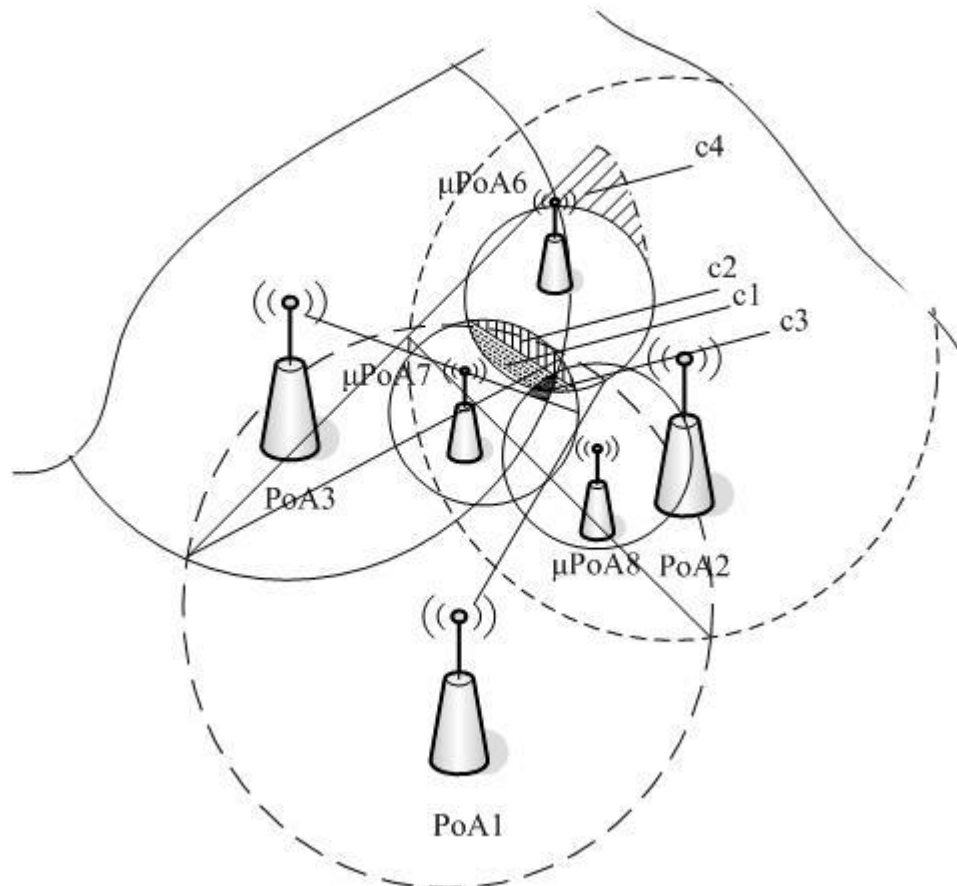


Рисунок 2.5 – Моделі станів, які враховують умови покриття користувачів у мережі

Користувач сценарію  $c1$  починає з'єднання з  $\mu PoA6$  і може переключитися на  $\mu PoA7$ , тоді як користувач сценарію  $c2$  спочатку підключається за допомогою  $\mu PoA7$ , а потім може переключитися на  $\mu PoA6$ . Обидва ці сценарії можуть обслуговуватися  $PoA1$ ,  $PoA2$  та  $PoA3$ , найбільш близьким з яких є  $PoA2$ . Користувачі в сценарії  $c3$  починають підключатися до  $\mu PoA8$ , а користувачі  $c4$  не можуть обслуговуватися жодною мікросотою.

Таким чином, користувач може підключитися до  $PoA$  різного типу в різних місцях та відповідно до заданої політики вибору мережі.

Модель станів для користувачів відповідно до кількості сусідніх станцій та доступних технологій показано на рис. 2.6.



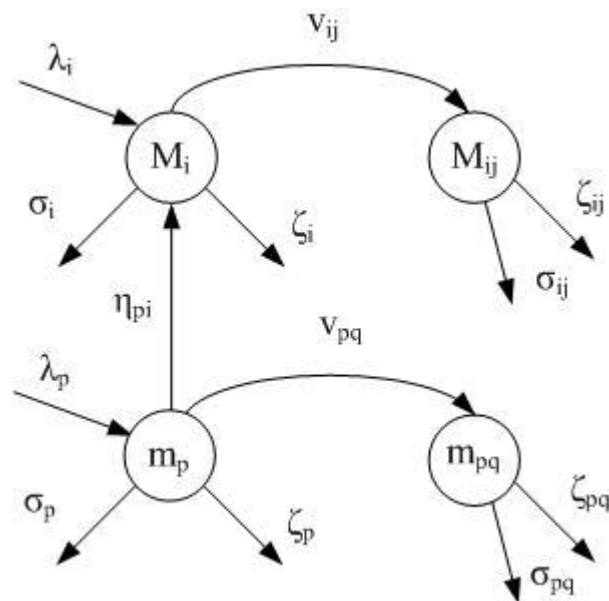


Рисунок 2.6 – Модель стану користувача

Стан користувача може бути наступним:

- $m_p$  - локальна мікросота;
- $M_i$  - стан локальної макросоти;
- $m_{pq}$  - сусідня мікросота;
- $h_p$  – набір мікросот, які є сусідніми для  $m_p$ ;
- $M_{ij}$  - стан сусідньої макросоти;
- $H_i$  – набір макросот, які є сусідніми для  $M_i$ .

Враховано локальні або сусідні мікросоти та макросоти, до яких може підключитися користувач, причому  $m_{pq} \in h_p$ ,  $M_{ij} \in H_i$ .

Отже, рис. 2.6 виділяє динаміку одного РоА: вхідні стрілки відповідають надходженню запитів користувачів на обслуговування, які мають бути задоволені. Вихідні стрілки представляють користувачів, що залишають РоА, тобто користувачів, які завершили завантаження або підключилися до іншого РоА.

## 2.5 Математичні моделі параметрів гетерогенної мережі

У роботі проведено аналіз розподілу користувачів з урахуванням їхнього стану відповідно до [40, 41].

Сценарій в мережі - це впорядкований набір РоА різних типів, розташованих у різних місцях, до яких користувач може підключитися відповідно

до заданої політики вибору мережі. Всі користувачі, що знаходяться в одній обмеженій області, працюють в одному сценарії, а користувачі конкретної РоА розподілені за кількома сценаріями. Форми цих обмежених областей приблизно відповідають перетину областей покриття РоА.

Середня кількість користувачів у будь-який момент часу в конкретному сценарії у будь-якій точці мережі оцінюється формулою:

$$n_j^{(c)}(t, v) = p_j^{(c)}(t, v) \cdot \rho^{(c)}(t, v), \quad (2.1)$$

де  $c$  – сценарій;

$j$ - стан користувачів;

$t$  - час;

$v$  - обсяг мережі, що знаходиться в зоні покриття багаторівневої мережі 5G, що характеризується багатотехнологічним радіодоступом;

$p_j$  - ймовірність стану  $j$ ;

$\rho$  - щільність користувачів у сценарії у будь-який момент часу у будь-якій точці мережі.

Враховується, що стан  $j$  визначається нерівністю  $1 \leq j \leq st_c$ , де  $st_c$  – кількість можливих станів у сценаріях.

Щільність користувачів у сценарії будь-якої миті часу в будь-якій точці мережі оцінюється формулою:

$$\rho^{(c)}(t, v) = \sum_j n_j^{(c)}(t, v). \quad (2.2)$$

Ймовірність стану  $j$  оцінюється формулою:

$$p_j^{(c)}(t, v) = \frac{n_j^{(c)}(t, v)}{\rho^{(c)}(t, v)}. \quad (2.3)$$

Загальний характер взаємодії практично враховує автономність станів користувачів, тобто станів, які викликані взаємодією інших користувачів чи стан, у якому користувач залишає мережу.

На початковому етапі необхідно врахувати початковий стан системи. Це початкова щільність користувачів сценарію  $c$  -  $\rho^{(c)}(0, v)$  і ймовірність початкового стану -  $p^{(c)}(0, v)$ , що охарактеризовано формулою:

$$n_j^{(c)}(0, v) = p_j^{(c)}(0, v) \cdot \rho^{(c)}(0, v). \quad (2.4)$$

Динаміка підключення користувачів представлена швидкістю переходу, яка залежить від кількості користувачів. Якщо RoA використовує свій радіоінтерфейс для обслуговування тільки одного користувача, то це охарактеризовано пропускнуою здатністю або швидкістю з'єднання:

$$S_x = \frac{\sigma_x \cdot (n_x + F_x \sum_{y \in \chi_x} n_{yx})}{N_{wx}}, \quad (2.5)$$

де  $N_{wx}$  - кількість доступних ресурсів;

$\sigma_x$  - пропускна здатність, пов'язана з поточним станом  $x$ , причому  $x = m_p \cdot M_i$ , тобто залежить від використаної технології.

Загальна кількість користувачів у стані  $x$ :

$$n_x = \sum_c n_x^{(c)}(t, v). \quad (2.6)$$

Формула (2.6) враховує загальну кількість користувачів, які використовують радіоресурси. Це локальні користувачі  $n_x$  і так звані віддалені користувачі  $n_{yx}$ , що мають доступ до соти з віддалених місць  $\chi_x = \kappa_x, h_x$ .

$F_x$  є константою, що дорівнює одиниці, коли  $x = M_i$ , і дорівнює або більше одиниці, коли  $x = m_p$ . Дійсно, коли сота являє собою мікросоту, цей коефіцієнт враховує зниження пропускнуої здатності, з яким можуть зіткнутися віддалені користувачі при доступі до мікросоти.

Наприклад, якщо мікросотовою технологією є Wi-Fi з інтерфейсом IEEE 802.11a/g, то  $F_x$  включає характерний для таких технологій ефект аномалії [42].

Швидкість горизонтального хендовера до стану  $y$ , де  $y = m_{pq}, M_{ij}$ , визначається виразом:

$$v_y = p_y r_x u(\mu_x - \sigma_x), \quad (2.7)$$

де  $\mu_x$  – мінімальний поріг пропускної здатності стану  $x$ .

Швидкість вертикального хендовера  $\eta_x$ :

$$\eta_x = (1 - p) r_x u(\mu_x - \sigma_x). \quad (2.8)$$

У цій моделі розглядається лише вертикальний хендовер від мікросот до макросот. Швидкості горизонтального та вертикального хендовера залежать від стратегії вибору мережі.

Якщо локальна пропускна здатність падає нижче за мінімальний поріг  $\mu_x$ , то користувач з ймовірністю  $p_y$  переключиться на інтерфейс сусідньої соти  $y$  (горизонтальний хендовер) або з ймовірністю  $(1 - p)$  переключиться в локальну макросоту (вертикальний хендовер):

$$p = \sum_{y \in \chi_x} p_y, \quad (2.9)$$

де  $r_x$  - системний параметр, що враховує швидкість перемикання з одного РоА на сусідній РоА;

$u(z)$  - індикаторна функція, що дорівнює одиниці, якщо аргумент позитивний, і дорівнює нулю, якщо аргумент негативний.

Швидкість перемикання залежить від стану системи, технологічної затримки та реалізованої політики перемикання.

Попит на трафік залежить як від положення користувача в мережі, так і від поточного сценарію підключення. Для врахування того факту, що запит трафіку користувача може не обслуговуватися будь-яким РоА, наприклад, через брак ресурсів або за поганих умов каналу, показано модель втрат  $L_x$  (рис. 2.7).

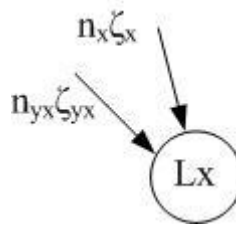


Рисунок 2.7 – Модель втрат

Втрати моделюються вихідними дугами  $\zeta_x$  та  $\zeta_{yx}$  у моделі PoA (рис. 2.6). Модель втрат визначена для балансування надлишкового трафіку, який не може бути обслужено:

$$\zeta_x = \sigma_x u \left( n_x + \sum_{y \in \chi_x} n_y \right) N_{Qx}, \quad (2.10)$$

$$\zeta_{xy} = \sigma_y u \left( n_y + \sum_{z \in \chi_y} n_z \right) N_{Qy}, \quad (2.11)$$

Таким чином, поки загальна кількість з'єднань PoA менше заданого порогу  $N_Q$ , то втрат немає, тобто всі вищеперелічені показники дорівнюють нулю. В іншому випадку кількість передач, що перевищує такий поріг, враховуються у відповідних станах втрат.

У моделі втрат  $L_x$  вхідні дуги підсумовують усі втрати для локальних користувачів та віддалених користувачів, які отримують доступ до PoAх і розташовані в різних сусідніх сотах. Їх швидкості відповідно  $n_x \zeta_x$  та  $\sum_y n_{yx} \zeta_{yx}$ , оскільки всі користувачі, які підключені до PoAх, мають однакові втрати.

## 2.6 Методика розрахунку показників продуктивності

У роботі використані рішення, викладені у [43, 44]. Розглянуто користувачі класу  $i$ , які моделюють зону покриття  $A_i$ . Якщо користувач класу  $i$  може

отримати доступ до  $j=1, \dots, N_T(A_i)$  технології, кожна з яких характеризується  $n_j(A_i)$  сусідніми сотами, то користувач буде описуватися станом:

$$j_x = \sum_{j=1}^{N_T(A_i)} (n_j(A_i) + 1). \quad (2.12)$$

При цьому "+1" представляє локальну соту кожної технології. Змінна  $n_x^{(i)}$  вважає число користувачів в стані  $x$ , а вектор-рядок  $n^{(i)} \left| n_x^i \right|$  збирає такі змінні, що відносяться до класу  $i$ .

З урахуванням кількості користувачів у заданому стані в зоні покриття  $A_i$  отримано показники, які використані для оцінки продуктивності системи.

Коефіцієнти переходів  $\zeta_x$  виражають частоти, при яких запити не виконуються через обмежені ресурси в кожній області, при цьому враховуються загальні втрати при відповідному PoA.

Кількість запитів, поставлених у чергу на передачу у кожному PoAx, оцінюється як:

$$\lambda_{M_i} = n_x + \sum_{y \in \chi_x} n_y. \quad (2.13)$$

Так само можна обчислити пропускну здатність, пов'язану із загальним PoAi, позначену як  $S_{X_i}$ . Враховуючи швидкість, з якою обслуговується кожен запит, а також кількість запитів, що обслуговуються, пропускну здатність визначено як:

$$S_{X_i} = n_i + \sigma_i + \sum_{j \in \chi_i} n_{ji} \sigma_{ji}. \quad (2.14)$$

У роботі проведено математичне моделювання та обрано мережний сценарій, в якому макросоти використовують технологію LTE, а мікросоти використовують Wi-Fi. При цьому розглядається лише вертикальний хендовер. Структурна схема алгоритму вибору технології показано на рис. 2.8.

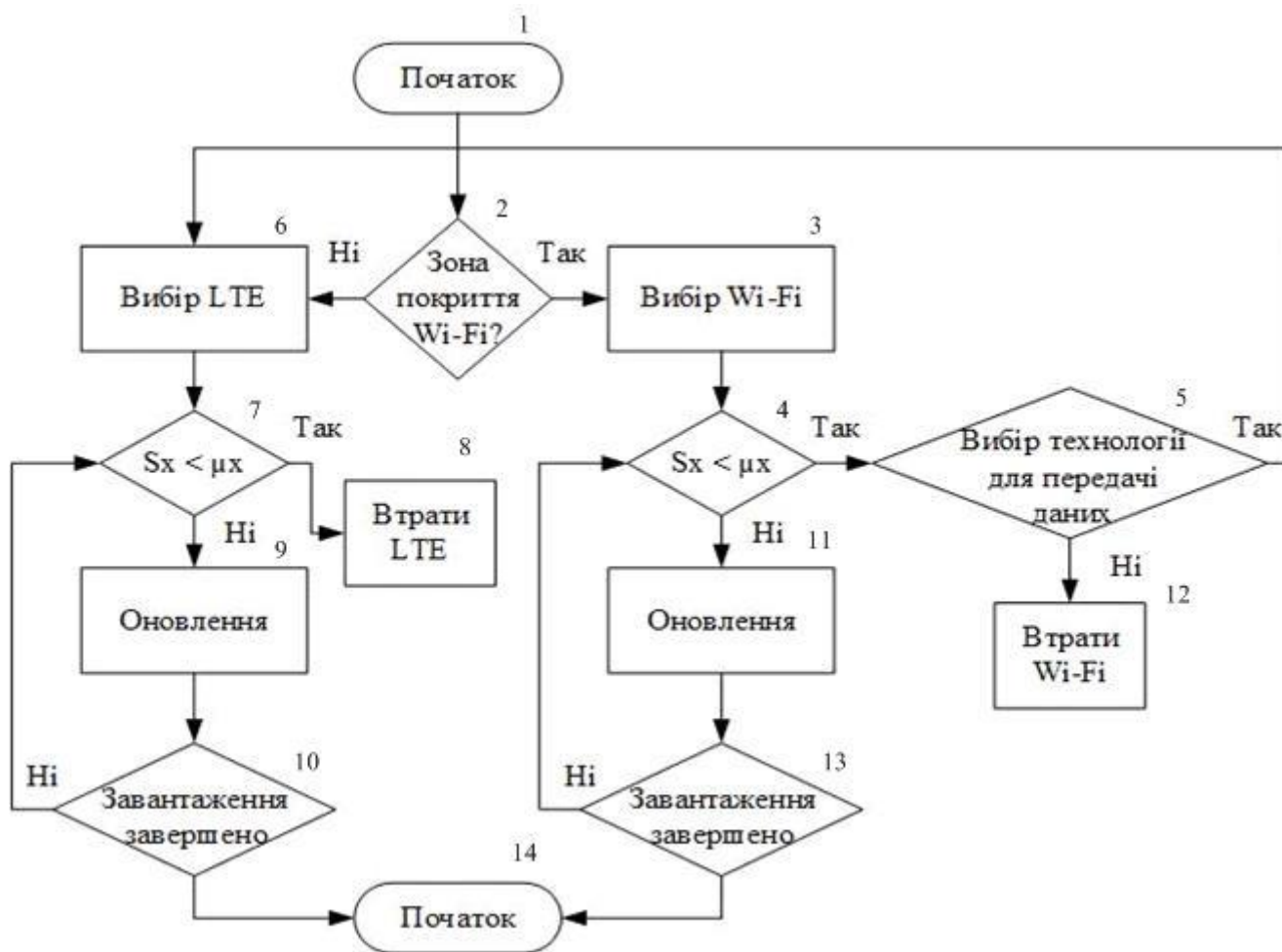


Рисунок 2.8 – Структурна схема алгоритму вибору технології

Користувачі, які охоплені обома технологіями, спочатку вибирають Wi-Fi, а потім виконується вертикальний хендвер у бік локальної БС LTE (eNB), якщо пропускна здатність Wi-Fi нижча за заданий поріг. З'єднання втрачається, якщо користувач не може виконати перемикання. Аналогічно, якщо поточна пропускна здатність дуже низька, відбувається збій передачі.

Параметри для кожної технології, а також загальні параметри мережі представлені у додатку А.

На рис. 2.9 порівнюється пропускна здатність, що отримана для LTE і Wi-Fi, а також показано сумарну пропускну здатність.

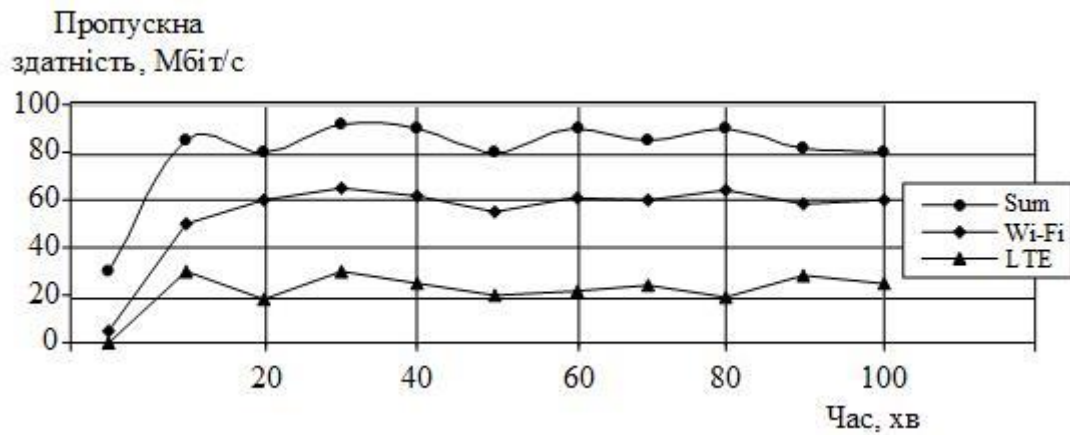


Рисунок 2.9 – Пропускна здатності для Wi-Fi та LTE

Алгоритм враховує доступ до ресурсів для кожної з технологій, передачу даних, хендовер, а також розрив з'єднання через брак ресурсів або вихід користувача з системи.

У роботі розглянуто сценарій мережі, отриманий шляхом аналізу даних, доступних у [45]. Вибрано показники мобільності користувачів та попит на трафік. Проаналізовано тригодинний період, що показує зміну транспортного навантаження у часі, причому припущено, що моделюються області із високою щільністю користувачів. Користувачі призначаються точкам доступу Wi-Fi та вузлам LTE eNB відповідно до їх позицій. Діапазон LTE eNB встановлено 150 м, радіус точки доступу встановлено рівним 40 м, щоб врахувати високу густину користувачів [46].

Такий сценарій мережі відповідає сценарію, представленою на рис. 2.4, а користувачів описано, як показано на рис. 2.5. Таким чином, досліджуваний сценарій характерний для великомасштабних мережних систем, що дозволяє оцінити середню поведінку користувачів, не вимагаючи громіздких симуляцій, а також подання кожного користувача незалежно.

## 2.7 Оцінка мережі

Для оцінки продуктивності мережі розглянуто ряд показників, отриманих за допомогою аналітичної моделі: пропускна здатність, навантаження трафіку на РоА, втрати даних та справедливість пропускної здатності.

Розподіл пропускної здатності по сотах LTE показано на рис. 2.10.



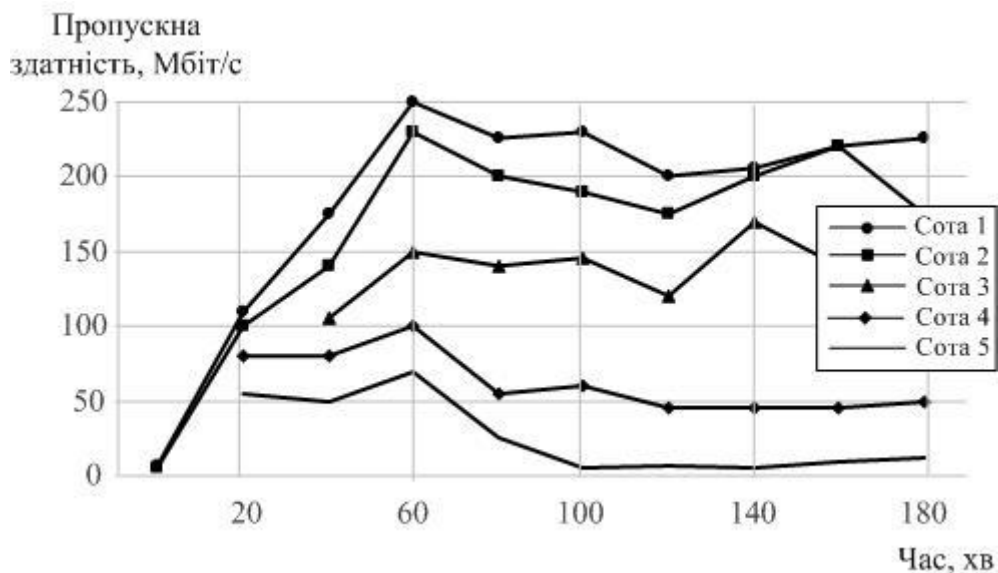


Рисунок 2.10 – Розподіл пропускної здатності по сотах LTE

Зона, охоплена сотою 3, є найбільш відвідуваною, що призводить до високої щільності користувачів і, отже, трафіку даних.

Наслідок такого розподілу трафіку з погляду навантаження трафіку на eNB можна спостерігати на рис. 2.11.

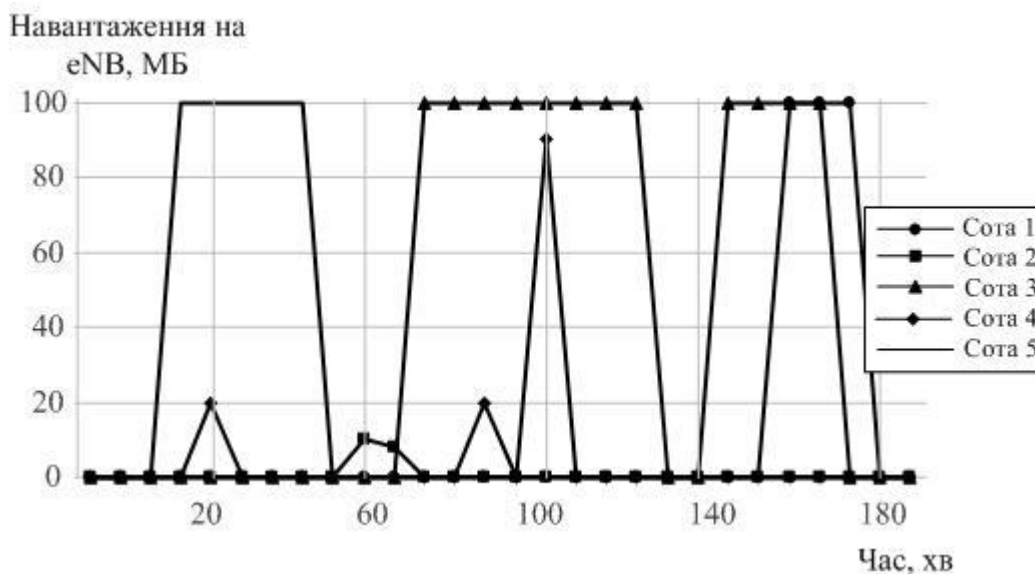


Рисунок 2.11 – Навантаження трафіку на eNB із розміром буфера, встановленим на 100 МБ

Cota 5 отримує найбільшу кількість відвідувань у першу годину, і, коли APs в ній не можуть забезпечити досить високу пропускну здатність, відбувається

кілька вертикальних хендоверів, що збільшує навантаження трафіку на eNB і, в кінцевому підсумку, викликає втрати трафіку (рис. 2.12).

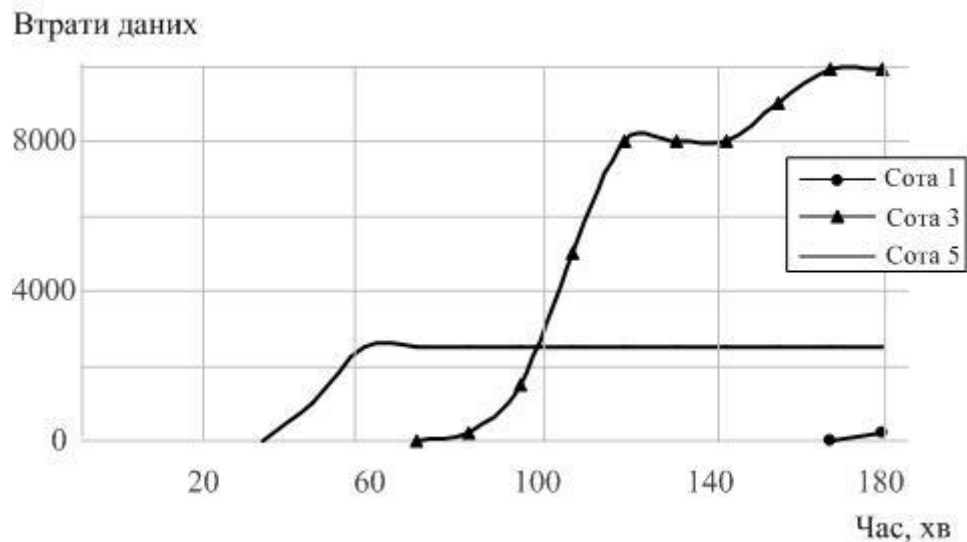


Рисунок 2.12 – Втрати даних

Рис. 2.12 показує, що аналогічна поведінка може спостерігатися для соти 3, де перевантаження трафіку спостерігається довше, що призводить до великих втрат. Нарешті, ближче до кінця часового інтервалу в соті 1 також спостерігаються втрати через пікову щільність користувачів. Для соти 2 та соти 4 втрати не реєструються, так як вони демонструють низьке навантаження на трафік.

Справедливість є важливим критерієм продуктивності у всіх схемах розподілу ресурсів, що часто уточнюється лише якісно. У роботі використано кількісний захід - індекс справедливості Index of Fairness [47]. Індекс застосовується до будь-якої проблеми спільного використання чи розподілу ресурсів. Це залежить від кількості ресурсу. Індекс справедливості завжди знаходиться між 0 та 1. Ця обмеженість допомагає інтуїтивному розумінню індексу справедливості. Наприклад, алгоритм розподілу із справедливістю 0,10 означає, що він несправедливий щодо 90% користувачів.

Рівень справедливості у розподіл ресурсів між користувачами у кожній соті LTE показано на рис. 2.13.

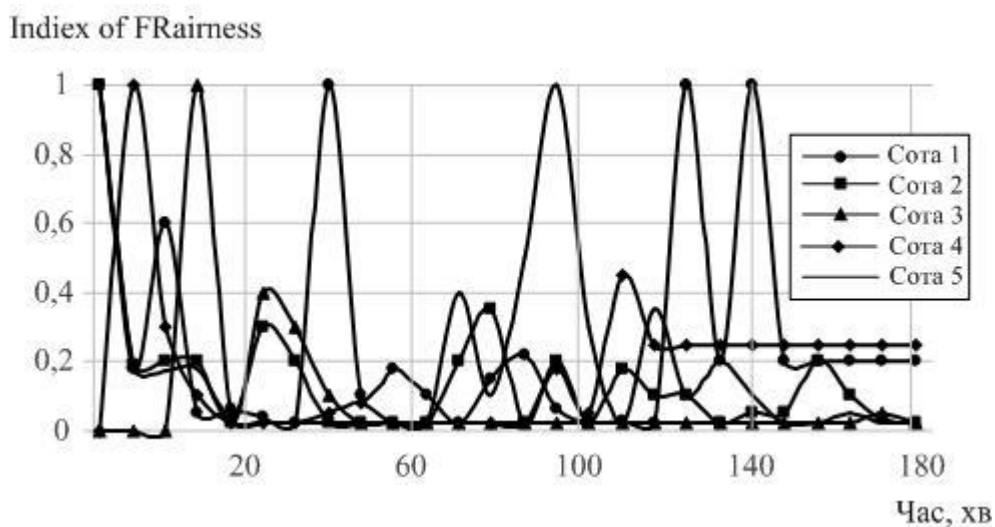


Рисунок 2.13 – Справедливість користувача з точки зору пропускної здатності в кожній соті LTE

Чим ближче до значення Index of FRairness, тим вище рівень справедливості мережних послуг. У середині кожної соті індекс варіюється в залежності від просторового розподілу користувачів, але можна відзначити, що в соті 3 він значно падає в міру того, як сота стає більш переповненою. Таким чином, передбачається, що сота 3 є найбільш критичною.

Надалі розглянуто соту 3 для порівняння технологій Wi-Fi та LTE. На рис. 2.14 показано пропускні здатності APs технології Wi-Fi та eNB технології LTE.

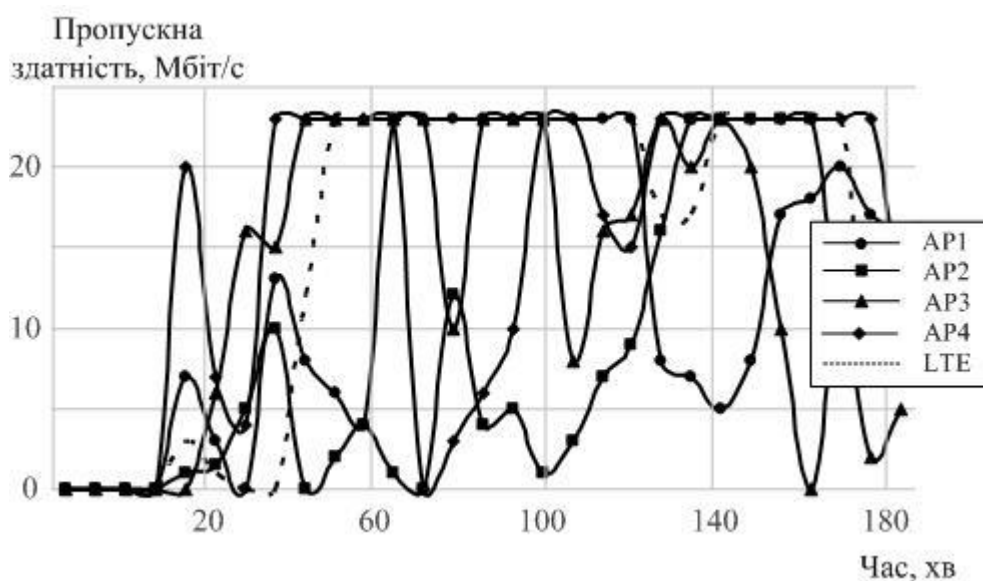


Рисунок 2.14 – Пропускні здатності APs технології Wi-Fi та eNB технології LTE

На рис. 2.15 показано розподіл пропускної здатності по APs.

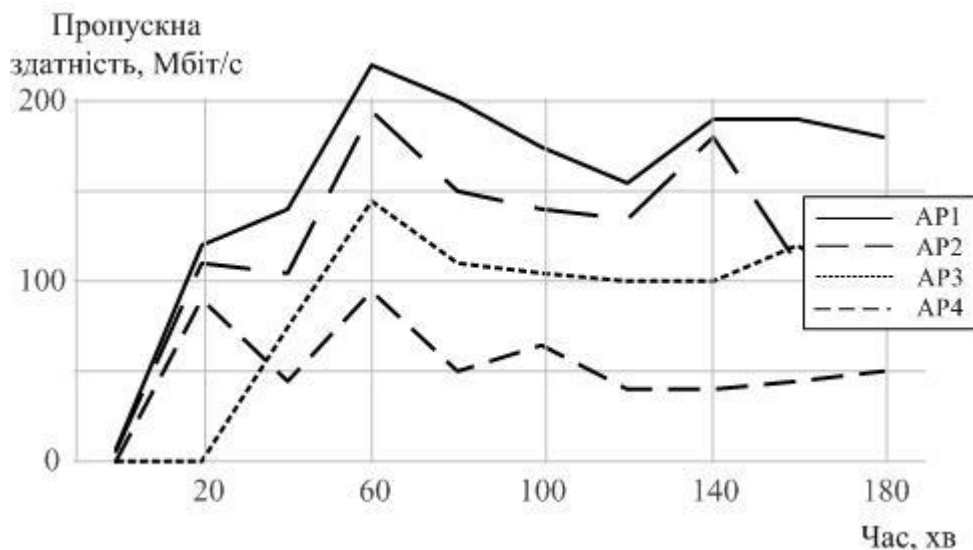


Рисунок 2.15 – Розподіл пропускну здатності по APs

У соті 3 першої APs, де пропускну здатність падає нижче за пороговий рівень, є AP4 (рис. 2.15, 2.16 - в районі 60-ї хвилини). Вертикальні хендовери від Wi-Fi до LTE викликають збільшення навантаження на eNB. У свою чергу, AP 3 стає перевантаженою (на 75-й хвилині) і більше потоків трафіку переміщається в бік LTE, eNB стає перевантаженою, і трафік даних починає скидатися, як показано на рис. 2.16.

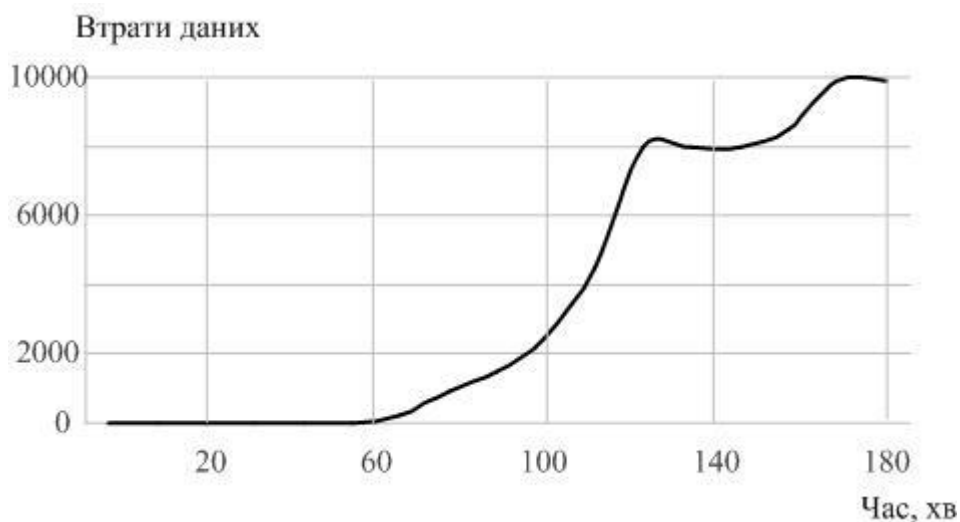


Рисунок 2.16 – Втрати даних LTE

Така поведінка спостерігається приблизно до 175 хвилини, коли закінчується період години пік і втрат більше не відбувається.

На рис. 2.17 показано рівень справедливості з погляду пропускну здатності для кожного PoA соти.

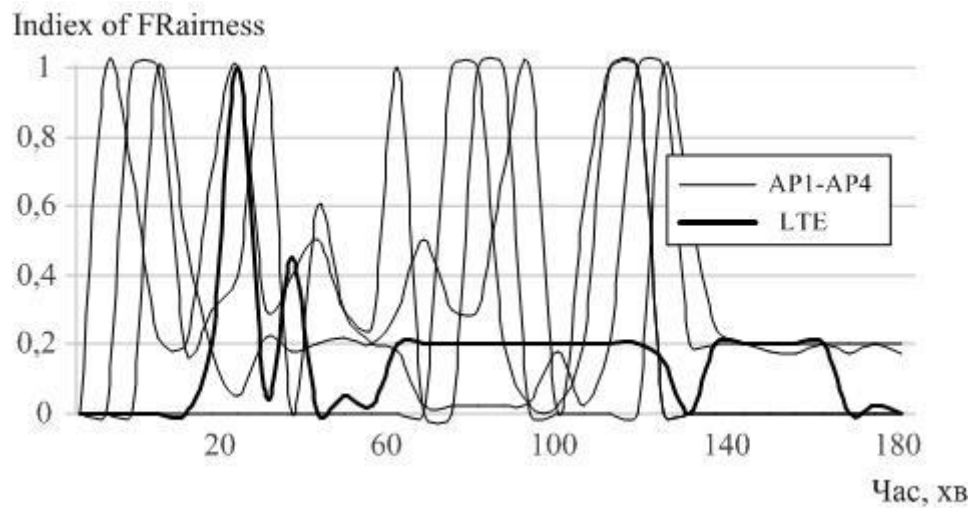


Рисунок 2.17 – Порівняння справедливості користувача з точки зору пропускної здатності Wi-Fi та LTE

Wi-Fi точки доступу можуть забезпечити кращу справедливість, ніж LTE eNB, причому зона покриття точки доступу менша, ніж у LTE. Користувачі Wi-Fi мають схожі умови поширення і, отже, майже однакову пропускну здатність.

## 3 АНАЛІЗ КЕРУВАННЯ ТРАФІКОМ У ГЕТЕРОГЕННІЙ МЕРЕЖІ

### 3.1 Рішення для керування трафіком

З метою підвищення продуктивності мережі оператори мають певний ступінь свободи у зміні розподілу користувачів по мережах, що виражається в керуванні трафіком, оскільки зона покриття кожної з цих мереж зазвичай перекривається.

У мережах HetNet обладнання UE може вибрати канал між різними мережними рівнями, оскільки зона покриття таких рівнів перекривається. Поняття керування трафіком Traffic Steering (TS) включає рішення, прийняті оператором для зміни розподілу користувачів за рівнями відповідно до політики або конкретних цілей.

З точки зору оператора, при керуванні з'єднанням користувача в мережах HetNet виникає безліч проблем [48, 49]:

1. Завдання вибору оптимальної мережі. Формулюється для досягнення будь-якої мети або комбінації цілей, наприклад, пов'язаних із вартістю або задоволеністю користувача, енергоспоживанням, покриттям, забезпеченням QoS для сервісу, що запитується [50].

2. TS може також застосовуватися в мережах HetNet для вирішення специфічних проблем, властивих безпроводовим мережам, наприклад, для балансування навантаження та мінімізації непотрібних перемикачів [51, 52].

3. Концепція організації HetNets значною мірою пов'язана з самоорганізованими мережами SON, які намагаються автоматизувати роботу безпроводових мереж наступного покоління з метою зниження експлуатаційних витрат і мінімізації непотрібних перемикачів та підвищення якості роботи мережі [53].

В такому контексті TS можна розглядати як будь-який механізм, який автоматично налаштовує параметри мережі для досягнення цілей політики TS.

### 3.2 Керування трафіком у режимі очікування

Насправді політика TS полягає у забезпеченні такого розподілу користувачів за рівнями, щоб використання ресурсів було оптимальним.

Оскільки в НО спостерігається режим сигналізації та передачі даних, то важливо домогтися оптимального розподілу користувачів в режимі очікування. Для цього необхідно забезпечити повне узгодження розподілів користувачів у режимі очікування та в режимі підключення, що дозволяє уникнути ефекту «пінг-понгу» між рівнями при зміні режиму.

У режимі очікування сота, до якої прикріплений користувач, називається виділеною сотою, а процедура вибору соти після включення UE називається вибором соти. Процедура вибору соти у зв'язку з мобільністю називається перевибом соти.

Розглянуто різні механізми, які дозволяють змінювати розподіл користувачів у режимі очікування [54]:

1. Ієрархічна структура сот дозволяє забезпечити різні пріоритети великим і дрібним сотам для їх повторного вибору. Однак ця функція призначена для того, щоб мобільні пристрої з високою мобільністю пріоритетно вибирали великі соти, щоб уникнути постійних перевибів соти. В результаті дана функція буде частково обмежена в більш гетерогенному середовищі, де рівень визначається не тільки розміром соти, але й може мати різні цілі, які пов'язані не лише з високошвидкісними користувачами.

Заборона соти - ще одна можливість, яка може бути використана операторами для заборони соти, на якій UE не може працювати. Таке жорстке рішення може спричинити неоптимальну продуктивність.

2. Відомий метод базового зміщення, який засновано на регулюванні певних зсувів, що беруть участь у процесі повторного вибору соти, щоб зробити соту більш менш привабливою для вибору.

Для внутрішньочастотного випадку це означає, що діапазон області, де сота буде обрана користувачем, що знаходиться на краю, може бути розширено або зменшено. Однак, у сучасних технологіях, таких як LTE, базове зміщення може бути застосоване тільки до сот, що належать до однієї і тієї ж RAT, що є обмеженням з точки зору TS.

У сценаріях HetNet зони покриття можуть повністю перекриватися, а також можуть існувати різні RAT. У цьому випадку технологія, відома як абсолютні пріоритети, стає потужним засобом для направлення користувачів до іншої RAT або частоти, незалежно від того, чи є вони користувачами на межі соти чи ні.

Зокрема, ця технологія заснована на розділенні пріоритетів між рівнями мережі таким чином, щоб розподіл користувачів у мережних рівнях у режимі очікування можна було ефективно змінити простою зміною пріоритетів рівнів.

### 3.3 Принцип повторного вибору сот на основі абсолютних пріоритетів

Як правило, UE самостійно вибирає нову соту, на якій працюватиме, якщо виконується одна або кілька умов. Традиційно при цьому оцінюються критерій ранжування сот R й критерій вибору сот S [55].

Критерій ранжування соти являє собою ранжування соти на основі значення або якості сигналу, або рівня сигналу. Критерій вибору сот знаходить соти-кандидати, якість (або рівень) сигналу яких вище мінімально необхідного значення.

Критерій вибору сот S виконується, коли:

$$S_r > 0 \text{ чи } S_q > 0$$

де

$$S_r = Q_r - (Q_{r \min} + Q_{r \min s}) - P_{\text{comp}}, \quad (3.1)$$

$$S_q = Q_q - (Q_{q \min} + Q_{q \min s}), \quad (3.2)$$

де  $S_r$  - рівень прийому, дБ;

$S_q$  - показник якості, дБ;

$Q_r$  - RSRP, дБ;

$Q_q$  - RSRQ, дБ;

$Q_{r \min}$  - мінімально необхідний рівень прийому в соті, дБм;

$Q_{q \min}$  - мінімально необхідний рівень якості в соті, дБ;

$Q_{r \min s}$  - зміщення сигналізованого  $Q_{r \min}$ , що враховується в  $S_r$  в результаті періодичного пошуку доступної мережі з вищим пріоритетом;



$Q_{q \min s}$  - зміщення сигналізованого значення  $Q_{q \min}$ , що враховується в  $S_q$  в результаті періодичного пошуку доступної мережі з вищим пріоритетом.

$$P_{\text{comp}} = \max(P_{E_{\text{max}}} - P_{P_{\text{max}}}),$$

де  $P_{E_{\text{max}}}$  - максимальний рівень потужності передачі, який UE може використовувати при передачі за висхідною лінією зв'язку в соті [дБм] у відповідності з TS 36.101;

$P_{P_{\text{max}}}$  - максимальна вихідна радіочастотна потужність UE згідно класу потужності UE [дБм] у відповідності з TS 36.101.

В умовах використання різних частот і RAT для UE може бути надано новий набір параметрів, відомих як абсолютні пріоритети Absolute Priorities (AP) для повторного вибору соти [55]. AP – це функція, що дозволяє оператору встановлювати пріоритети частотних та міжрейтингових мережних рівнів у процесі повторного вибору соти. Формально пристрій UE перемикається на соту з нижчим пріоритетом, коли потужність опорного сигналу RSRP, що приймається від вихідної соти, нижче певного порога, а RSRP від цільової соти вище іншого порога. І навпаки, пристрій UE перемикається на соту з вищим пріоритетом, якщо RSRP від рівня з вищим пріоритетом перевищує граничне значення.

Останній випадок, коли UE перемикається на більш високий пріоритет, є менш обмеженим, тому що при цьому має бути виконано лише одну умову (що відповідає цільовій соті). Це тим UE, яким бажано переходити на рівні з вищим пріоритетом. Крім того, коли кілька сот із різними пріоритетами підходять для повторного вибору шляхом виконання умов, описаних раніше, то соти з більш високим пріоритетом будуть мати пріоритет перед частотою або RAT з нижчим пріоритетом.

#### 3.4 Аналіз керування трафіком у режимі очікування

В алгоритмі повторного вибору сот на основі точки доступу враховуються обидва параметри мобільності (порогові значення та точки доступу) для реалізації стратегії TS.

Наприклад, поріг, що використовується для перевибору соти у напрямку більш високого пріоритету, може бути зменшено, щоб зробити цільову соту більш привабливою.

Однак, точки доступу можуть також змінювати розподіл користувачів за рівнями, не впливаючи на рівень сигналу користувачів, що направляються, що зазвичай є більш відповідним рішенням.

З іншого боку, при призначенні рівнів пріоритету мережним рівням є деякі обмеження відповідно до стандарту 3GPP [55]. Зокрема, рівні з однаковими RAT та частотою повинні мати однакову точку доступу, хоча вони мають різні розміри сот. Крім того, не допускається застосування одного й того ж рівня пріоритету для різних RAT, наприклад рівні High Speed Packet Access (HSPA) та LTE повинні мати різні точки доступу. В результаті оператор має меншу гнучкість при розподілі точок доступу за мережними рівнями, що також може вплинути на продуктивність мережі.

У роботі проведено аналіз мережі HetNet у режимі очікування, згідно зі сценарієм, показаним на рис. 3. 1.

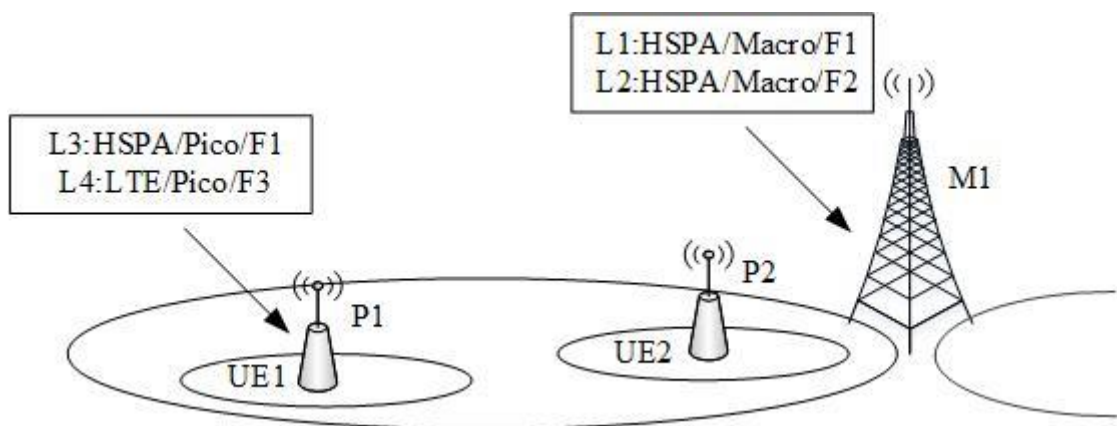


Рисунок 3.1 – Сценарій розгортання мережі HetNet, що складається із чотирьох мережних рівнів

Сценарій розгортання складається з чотирьох мережних рівнів: двох макрорівнів і двох пікорівнів, кожен з яких включає безліч сот з однаковими характеристиками.

Як видно, крім L1, в мережі є високошвидкісний пакетний доступ HSPA з носієм F2, що розгорнуто як ще один макрорівень L2, який вільний від завад з боку інших рівнів і зазвичай використовується операторами для надання додаткової ємності макрокористувачам [54].

Розглянуто, що рівні L1 та L2 поєднані, тобто БС розташовані в одному місці. Таку конфігурацію може бути використано на ранній стадії розгортання LTE, коли не розглядається можливість макропокриття LTE.

Для забезпечення більшої пропускну здатності у місцях великого скупчення користувачів у цих районах розгорнуто БС рівнів LTE та піко-HSPA, які також розміщені в одному місці.

За таких припущень точки доступу розміщено між мережними рівнями. Розумна стратегія TS полягатиме в тому, щоб використовувати всі переваги існуючих пікосот, розвантаживши якнайбільше трафіку від макросот. Однак необхідно враховувати і деякі обмеження:

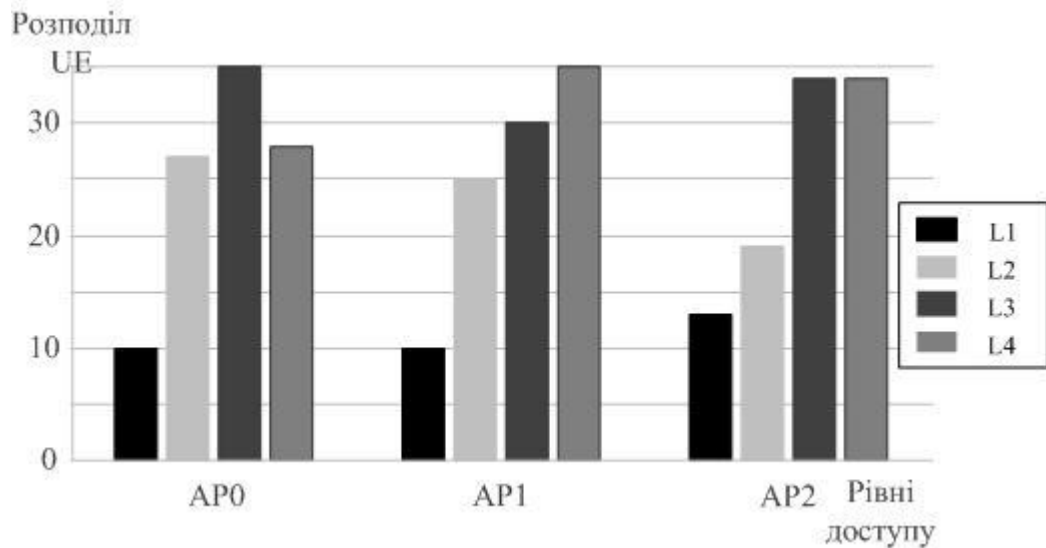
1) Згідно з 3GPP, L1 і L3 використовують одну і ту ж точку доступу, оскільки мають однакову частоту (F1) та RAT (HSPA).

2) Пікорівні не можуть мати однакового пріоритету, оскільки мають різні RAT.

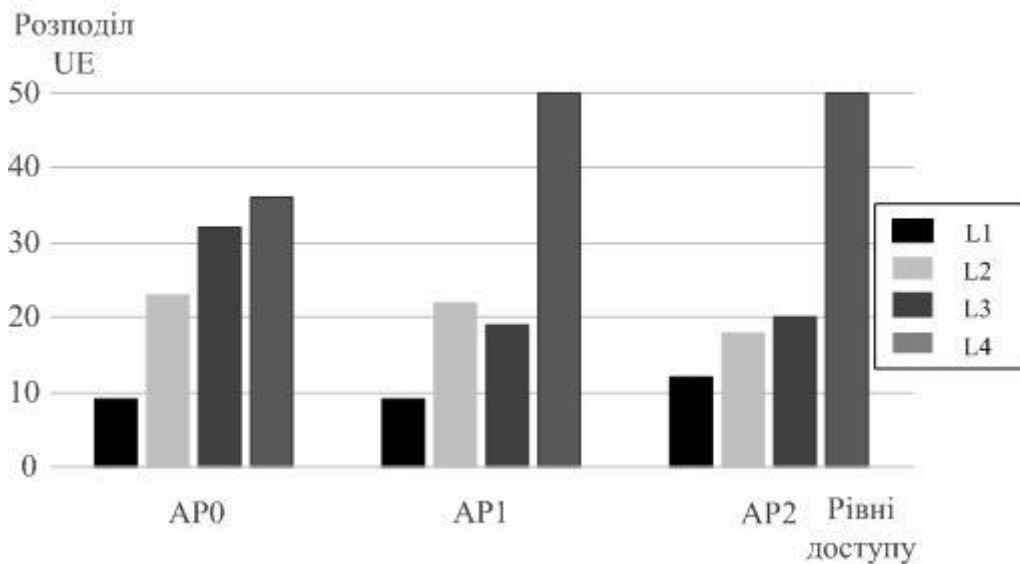
Оскільки L1 створює завади у поєднаному каналі з L3, правильним рішенням буде призначити найвищий пріоритет для L4, щоб розвантажити макросоти відповідно до політики TS. В результаті для такого сценарію розгортання існує тільки два набори точок доступу, різниця між якими полягає у відносному пріоритеті між рівнями L1 і L2, тобто в тому, чи макросота має пріоритет перед основною сотою (конфігурація AP1) або навпаки (конфігурація AP2) (рис. 3. 2).

У роботі проведено імітаційне моделювання з метою оцінки двох наборів точок доступу. Основні параметри моделювання наведено у додатку Б.

На рис. 3. 2 показано розподіл UE в режимі очікування для точок доступу AP1 та AP2: а) 50% проникнення LTE; б) 100% проникнення LTE, і для еталонної точки доступу AP0 у разі, якщо всі рівні мають пріоритет.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Розподіл UE за рівнями в режимі очікування для різних налаштувань точок доступу та рівнів проникнення LTE

Такі набори точок доступу також визначені умовами, де AP рівня  $X$  позначено  $AP_{LX}$ :

- для AP0:  $AP_{L1} = AP_{L2} = AP_{L3} = AP_{L4}$ ;
- для AP1:  $AP_{L1} = AP_{L3} < AP_{L2} < AP_{L4}$ ;
- для AP2:  $AP_{L2} < AP_{L1} = AP_{L3} < AP_{L4}$ .

У дослідженні розглядаються два рівні проникнення LTE у пристрої UE. При 50% проникненні LTE (50% пристроїв UE сумісні з LTE), спостерігається, що точки доступу дозволяють керувати розподілом користувачів у режимі очікування, оскільки при виділенні вищої точки доступу на цей рівень досягається

подальше розвантаження UE на L4 (~7% для налаштувань AP1 та AP2 у порівнянні з AP0).

Більшість трафіку, що перевантажується на L4, надходить з L3, що означає, що макророзвантаження дуже обмежено. З іншого боку AP2 призводить до зниження частки UE L2 в порівнянні з AP1.

У цілому в L1 кількість UE менше, ніж в L3, що обумовлено завадами, одержуваними від L3, яка використовує ту ж частоту, що і L1.

При 100% проникненні LTE макророзвантаження спочатку вище (~10%), оскільки у мережі більше LTE-пристроїв, крім того відсоткове співвідношення UE, переданих L4, для налаштувань AP1 і AP2 проти AP0 вище (11-14%) .

Таким чином, розподіл користувачів у режимі очікування між двома парами рівнів, зони покриття яких повністю перекриваються, може бути ефективно змінено шляхом виділення різних точок доступу. У цьому випадку точки доступу можуть бути використані, наприклад, для зниження інтерференції, що виникає на інших (внутрішньочастотних) шарах, шляхом зменшення частки пристроїв UE, де є завади, наприклад, в дослідженні це L1 і L3.

Крім того, макророзвантаження здійснюється за рахунок більш високого пріоритету малих сот, що є дуже обмеженим. При цьому середнього рівня проникнення LTE (50%) у пристроях UE вже достатньо, щоб спостерігати зміни в розподілі користувачів відповідно до стратегії TS.

### 3.5 Аналіз керування трафіком у режимі з'єднання

Коли UE перебуває в режимі з'єднання, TS може здійснюватися за допомогою таких механізмів: примусових НО, заборони сот або налаштування параметрів НО.

Серед цих методів останній є найбільш простим механізмом, оскільки він не вимагає прив'язки до конкретного користувача, як примусовий НО, і він не такий жорсткий, як заборона сот.

Тому параметри НО налаштовуються відповідно до конкретної політики TS. У роботі розглядаються параметри НО між RAT, що відповідають подіям B2/3A, визначеним 3GPP [56].

Зокрема, подія 3A характеризується умовою, що у сусідній соті сигнал краще, ніж у тій, де знаходиться пристрій UE. Вважається, що вхідну умову для цієї події виконано, якщо виконано умови A3-1 (3.3) чи A3-2 (3.4):

$$M_n + O_{fn} + O_{cn} - H_{ys} \rangle M_s + O_{fs} + O_{cs} - O_{ff}, \quad (3.3)$$

$$M_n + O_{fn} + O_{cn} - H_{ys} \langle M_s + O_{fs} + O_{cs} - O_{ff}. \quad (3.4)$$

де  $M_n$  - результат вимірювань сусідньої соти без урахування будь-яких зміщень;

$O_{fn}$  - зміщення частоти сусідньої соти;

$O_{cn}$  - специфічне для соти зміщення сусідньої соти, що відповідає частоті сусідньої соти і встановлюється в нуль, якщо не налаштований параметр зміщення;

$M_s$  - результат вимірювання обслуговуючої соти без урахування будь-яких зміщень;

$O_{fs}$  - зміщення частоти обслуговування;

$O_{cs}$  - зміщення обслуговуючої соти, специфічне для соти (що відповідає частоті обслуговування) і встановлюється на нуль, якщо не налаштований параметр зміщення.

$H_{ys}$  - параметр гістерезиса для даної події;

$O_{ff}$  - параметр усунення даної події;

$M_n$ ,  $M_s$  виражаються в дБм у разі RSRP або дБ у випадку RSRQ. Інші показники виражаються в дБ.

Подія B2 характеризується умовою, що обслуговування стає гіршим за поріг 1, і сусід між RAT стає кращим за поріг 2.

Вважається, що вхідну умову для цієї події виконано, якщо одну з умов B2-1 (3.5) та B2-2 (3.6) виконано:

$$M_s + H_{ys} \langle T1, \quad (3.5)$$

$$M_n + O_{fn} - H_{ys} \rangle T2. \quad (3.6)$$

Вважається, що умову виходу для цієї події виконано, якщо одну з умов B2-3 (3.7) та B2-4 (3.8) виконано:

$$M_s - H_{ys} \rangle T1, \quad (3.7)$$

$$M_n + O_{fn} + H_{ys} \langle T2. \quad (3.8)$$

де  $T1$  - пороговий параметр для даної події;

$T2$  - пороговий параметр для даної події.

Умова спрацьовування НО між RAT ґрунтується на порівнянні сигналу, що приймається з абсолютними порогами, оскільки рівні сигналів різних RAT не можуть порівнюватися один з одним.

Таке обмеження призводить до збільшення рівня свободи з точки зору TS під час налаштування параметрів НО.

Під хендовером між RAT розуміються ті хендовери, які здійснюються між сотами різних RAT. Стандарт 3GPP визначає події B2/3A для ініціювання НО від LTE та HSPA відповідно. НО з LTE на HSPA відбувається при настанні події B2, тобто потужність опорного сигналу RSRP обслуговуючої соти LTE стає гірше певного порога (B2\_1), а кодова потужність сигналу, що приймається Received Signal Code Power (RSCP) цільової соти HSPA стає краще іншого порога (B2\_2) [56].

Аналогічно, НО з HSPA LTE ініціюється при настанні події 3A [57].

У цьому випадку 3A\_1 та 3A\_2 позначають порогові значення, що використовуються для порівняння з рівнями сигналів, отриманих від обслуговуючої та цільової соти відповідно.

Для аналізу якості LTE та HSPA в сотах використовуються показники якості прийому опорного сигналу Reference Signal Received Quality (RSRQ) та загального пілотного сигналу Common Pilot Channel (CPICH).

Аналіз проведено за сценарієм мережі (рис. 3.1). Передбачається 100% проникнення LTE у пристрої UE. Вибрано стратегію TS, в якій розвантаження трафіку з макросот L1 та L2 на пікосоту LTE (L4) виконано в режимі з'єднання шляхом налаштування параметрів НО.

При цьому здійснюється коригування порогів подій B2 та 3A між RAT у мережах LTE та HSPA відповідно. Аналіз даного сценарію показує, що коригування порогових значень B2/3A не тільки впливає на НО між RAT у макросотах (L1, L2) HSPA, а також у пікосотах LTE (L4), а й між пікосотами різних RAT (L3, L4).

Останній випадок також можна розділити на два випадки: НО між RAT у несуміщених пікосотах і НО між RAT у суміщених пікосотах.

Вплив НО між RAT у несуміщених пікосотах залежить від концентрації пікосот в макрозоні, тобто масове розгортання пікосот приведе до значного впливу. З іншого боку, очікується, що кількість НО між RAT у суміщених пікосотах буде незначною через складність виконання обох умов для події НО між RAT.

У роботі розглянуто сценарій, коли обслуговуюча і цільова БС розташовані в тому самому місці, а користувач наближається або віддаляється від БС, тому рівні прийнятих сигналів з цих сот можуть збільшуватися або зменшуватися. В цьому випадку нелегко гарантувати, що рівень сигналу в обслуговуючій соті стане гірше порогового значення, а в цільовій соті - краще за порогове значення.

Це відрізняється від поширеної ситуації, для якої визначено умову спрацьовування НО, де користувач залишає соту, щоб увійти до сусідньої (несуміщеної) соти.

Таким чином, якщо припустити, що НО між RAT у пікорівнях незначно впливають на розподіл користувачів за рівнями. Тому розвантаження макросот буде визначатися в основному НО між RAT в макросотах і пікосотах L4.

Проблема, що виникає в такому сценарії, полягає в тому, що через те, що соти мають різний розмір і їх зони покриття перекриваються, встановлення порогів B2/3A для цілей TS є не простим завданням, особливо якщо умова спрацьовування НО заснована на рівні сигналу.

У роботі розглянуто сценарії поведінки користувачів залежно від його місцезнаходження та стратегії TS. Сценарій 1 показано на рис. 3.3.

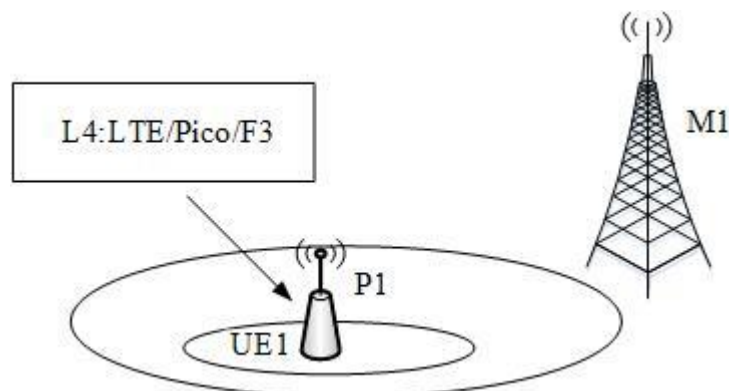


Рисунок 3.3 – Сценарій 1



Сценарій 1. Користувач UE1 підключений до макросоти M1 і знаходиться в точці доступу, що покривається пікосотою P1. Стратегія TS, що використовується оператором, полягає в розвантаженні трафіку з макросот на L4, так як він не отримує завад від інших рівнів. Таким чином, відповідно до політики TS, порогові значення  $3A\_1$  і  $3A\_2$  були попередньо встановлені таким чином, щоб UE1 переконався, що RSCP від M1 нижче, ніж  $3A\_1$ , а RSRP від P1 вище, ніж  $3A\_2$ . В результаті користувач UE1 передається до сусідньої LTE пікосоти P1.

Сценарій 2 показано на рис. 3.4.

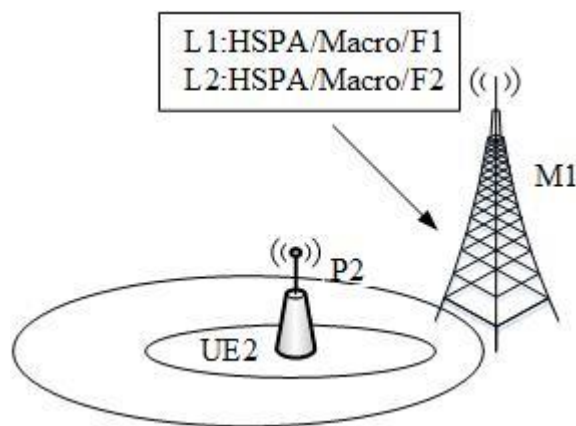


Рисунок 3.4 – Сценарій 2

Сценарій 2. Користувач UE2, який знаходиться в P2 (ближче до БС макросоти), спочатку підключений до макросоти M1. Цей користувач, ймовірно, не буде виконувати НО до найближчої пікосоти LTE, оскільки умову  $3A\_1$  не буде виконано (RSCP від макросоти M1 занадто високий). Така ситуація підкреслює, що налаштування  $3A\_1$  для розвантаження макросоти залежить від розташування пікосоти. Щоб уникнути залежності від відстані, встановлення дуже високого значення для  $3A\_1$  аналогічно видаленню умови, пов'язаної з обслуговуючою сотою (макросота завжди буде гірше, ніж  $3A\_1$ ). Тоді, регулюючи параметр  $3A\_2$ , що відноситься до пікосоти, можна керувати кількістю пристроїв UE, що вивантажуються на пікосоту.

Сценарій 3 показано на рис. 3.5.

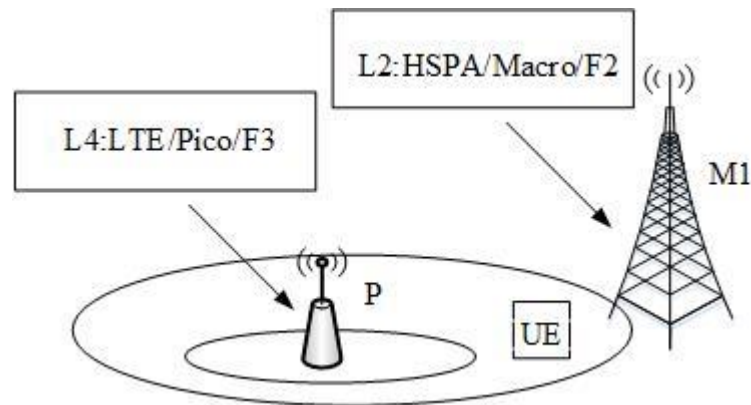


Рисунок 3.5 – Сценарій 3

Сценарій 3. Аналогічний підхід застосовується, коли користувач підключений до пікосоти LTE і залишає точку доступу. Для відправлення UE на HSPA-макросоту, необхідно виконати умову, пов'язану з цільовою сотою, яка включає B2\_2, незалежно від розташування пікосоти. У цьому випадку встановлення дуже низького значення B2\_2 усуває цю залежність, тому макросота завжди буде краще, ніж B2\_2. Але така конфігурація може бути небезпечною, оскільки UE може бути переданий макросоті з дуже низьким рівнем сигналу.

Такої ситуації можна уникнути, якщо визначити два різні набори порогових значень B2/3A. Це один набір для радіокерованих НО та для НО, керованих TS.

Якщо припустити, що параметри B2\_2 та 3A\_1 задані таким чином, що умови завжди виконуються, то B2\_1 та 3A\_2 можуть бути використані для визначення області, в якій пристрої UE повинні підключатися до пікосоти в обох напрямках (при переході з LTE на HSPA й навпаки).

Ці два параметри можуть мати однакове значення, але для того, щоб уникнути ефекту «пінг-понгу» між RAT може бути застосований певний гістерезис ( $\Delta$ ). В результаті завдання буде спрощено до оптимізації лише одного параметра (наприклад, B2\_1). Але це справедливо і в тому випадку, якщо для всієї мережі визначені ті самі порогові значення B2/3A. Інший підхід полягає у визначенні параметрів для кожної пари рівнів. Це означає, що необхідно оптимізувати два різні порогові значення: B2\_1, відповідний парі рівнів L1-L4, і B2\_1, відповідний парі рівнів L2-L4.

Для вибору значення B2\_1, що оптимізує використання ресурсу, проведено аналіз чутливості. Основні параметри моделювання наведено у додатку Б.

Умовою дослідження є 100% проникнення LTE у пристроях UE, а  $\Delta = 4$  дБ. Послуга, що надається UE пристроям, заснована на реалістичній моделі

потоків відео, яка генерує трафік відповідно до вихідного бітрейту, що дорівнює 1024 кбіт/с [58]. Якщо буфер на UE спустошується, то потрібна ребуферизація та відтворення відео переривається. Коли час переривання перевищує певний поріг, користувач відсівається. Швидкість надходження нових сполук має експонентний розподіл.

У роботі розглянуто лише низхідний канал зв'язку, оскільки є найбільш обмеженим каналом під час використання цього типу послуг у мережі HetNet.

На рис. 3.6 представлено результати аналізу чутливості за показниками загальної кількості НО в секунду в мережі для значень В2\_1, що відповідає парі рівнів L2-L4. Цей показник включає як радіокеровані НО, так і НО, керовані TS.

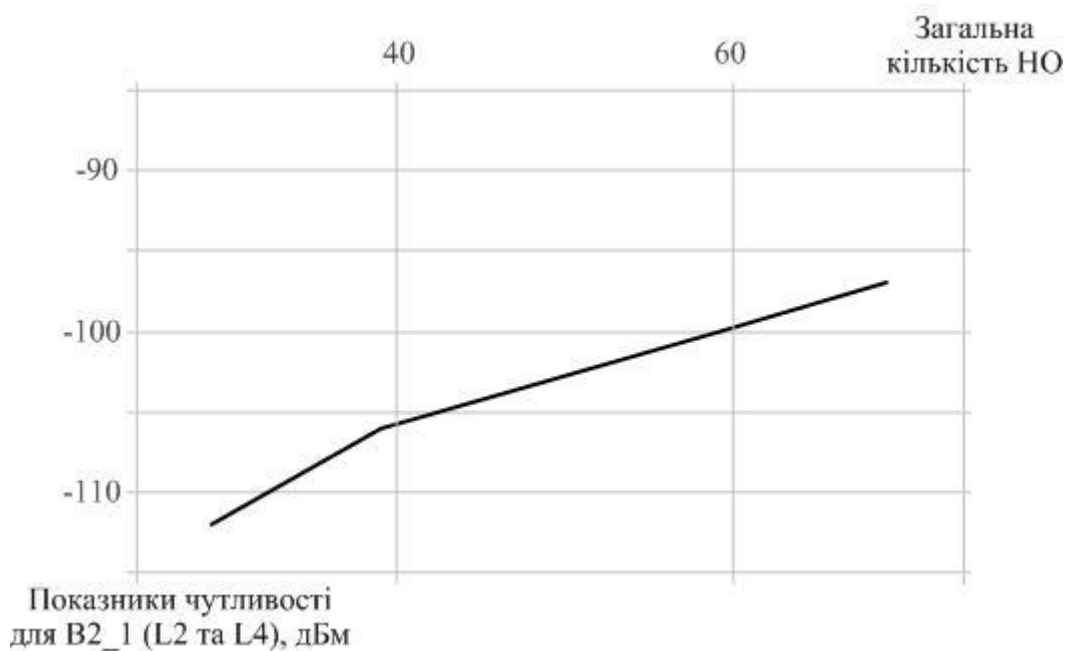


Рисунок 3.6 – Аналіз чутливості при зміні НО

На рис. 3.7 представлено результати аналізу чутливості за показниками загальної кількості НО в секунду в мережі для значень В2\_1, що відповідає парі рівнів L1-L4.

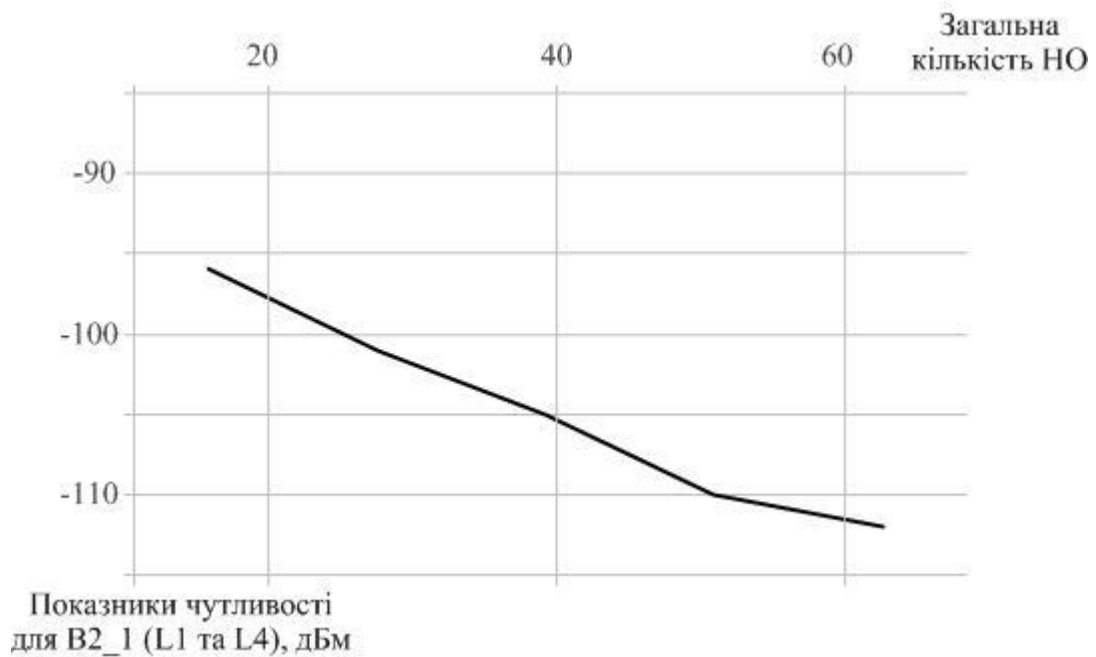


Рисунок 3.7 – Результати Аналіз чутливості при зміні НО

Значення, що виходять за межі представленого діапазону, призводять до небажаних значень показників, зважаючи на те, що метою політики TS є мінімізація втрат викликів. Високі значення показника значення B2\_1 збільшують коефіцієнт втрат, оскільки L4 передає менше трафіку (рис. 3.6).

З іншого боку, низькі значення B2\_1 також збільшують коефіцієнт втрат, оскільки більша кількість UE пристроїв, підключених до L4, залишається на межі соти, маючи при цьому дуже погану якість (рис. 3.7).

У загальному вигляді значення -112 дБм призводить до найбільших витрат на сигналізацію, так як пристрої UE передаються з L2 на L4, а потім переміщуються з L4 на L1, створюючи сильний ефект «пінг-понгу», що призводить до збільшення числа НО.

Різниця між двома обраними точками -103 дБм та -105 дБм полягає в тому, що перша дає зниження на 25% витрат на передачу сигналу. Тому оптимальним буде значення -104 дБм. Таким чином, можна стверджувати, що обидві пари рівнів мають однакове оптимальне значення  $B2\_1 = -104$  дБм, тому в цьому прикладі може бути використано лише один поріг B2\_1 (визначений для кожної мережі)

Таким чином, проблему розміщення малих сот в макросоті можна подолати шляхом ретельного налаштування параметрів НО для цілей TS.

Якщо припустити, що макрорівень LTE включено як п'ятий рівень, то в такому сценарію при розгортанні мережі для забезпечення повного покриття LTE

дослідження між рівнями НО буде більш складним. У цьому випадку існуватимуть міжрівневі НО між макрорівнями LTE/HSPA. Крім того, поріг B2 буде викликати не тільки НО від пікорівня LTE до макросот HSPA, але й НО від макрорівня LTE на пікосоти HSPA. У цій ситуації єдиний набір порогових значень B2/3A не може бути використано для подальшого розвантаження макросоти. Тому в такому сценарії HetNet слід розглядати різні налаштування для кожної пари рівнів, а також для однієї і тієї ж події (наприклад, радіокеровані НО та НО, керовані TS). В іншому випадку ефект «пінг-понгу» між рівнями призведе до того, що розподіл користувачів у мережі відрізнятиметься від оптимального. В результаті це негативно позначиться як на сигнальному навантаженні, так і на продуктивності користувачів.

## 4 РІШЕННЯ ЗАВДАНЬ У ГЕТЕРОГЕННІЙ СТРУКТУРІ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ВИБОРОМ МЕРЕЖІ

4.1 Способи вибору мережі на основі усередненої потужності сигналу, ймовірності збою та відстані

Для гетерогенних технологій доступу необхідно забезпечити глобальний повсюдний зв'язок зі структурою, в якій користувач може переміщатися кількома інтерфейсами доступу, зберігаючи при цьому безперервний зв'язок з передбачуваною якістю обслуговування. У зв'язку з цим як основне завдання важливо виділити вибір оптимальної мережі з безлічі мереж-кандидатів для задоволення вимог поточного сеансу. Вибір оптимальної мережі в такому гетерогенному середовищі зазвичай ґрунтується на умовах мережі та уподобаннях користувача.

Одним з цікавих рішень слід виділити алгоритм вибору мережі на основі усередненої потужності сигналу, що приймається, ймовірності збою й відстані. При цьому мережні умови є домінуючими під час вибору мережі. На першому етапі область, що перекривається, ідентифікується за допомогою оцінки відстані. На другому етапі запускається алгоритм вибору мережі, заснований на усередненому рівні прийнятого сигналу. Результати отримано у вигляді імітаційного моделювання мережі.

Для забезпечення безперебійного зв'язку на глобальному рівні необхідна розробка структури, де користувач може переміщатися в гетерогенному середовищі з необхідним QoS. Вибір найбільш підходящої безпроводової мережі є основним питанням у гетерогенному середовищі.

В роботі розглянуто гетерогенне середовище на прикладі Мережа 1 та Мережі 2, які співіснують одночасно для забезпечення безперебійної роботи. Вибір мережі може бути ініціалізовано мобільною станцією Mobile Station (MS) - UE або може бути засновано на вимірювання якості зв'язку мережі. Рівень сигналу Received Signal Strength (RSS) є одним з найбільш широко використовуваним параметром для вибору мережі.

Відомо, що ефект «пінг-понгу» виникає в результаті перевищення порога потужності сигналу, що приймається. При цьому супутніми є низька пропускна здатність мережі, тривала затримка перемикавання та висока ймовірність

відключення ефекту «пінг-понгу». Імовірність відключення електроенергії є ще одним важливим параметром вибору мережі в мультимедійних додатках, що визначається на основі чутливості приймача або мінімально допустимого рівня сигналу й визначається як ймовірність того, що миттєва потужність сигналу впаде нижче певного порога [59].

Гетерогенне середовище складається з безпроводових мереж  $n_i$ , де  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . Модель мережі показано на рис. 4.1.

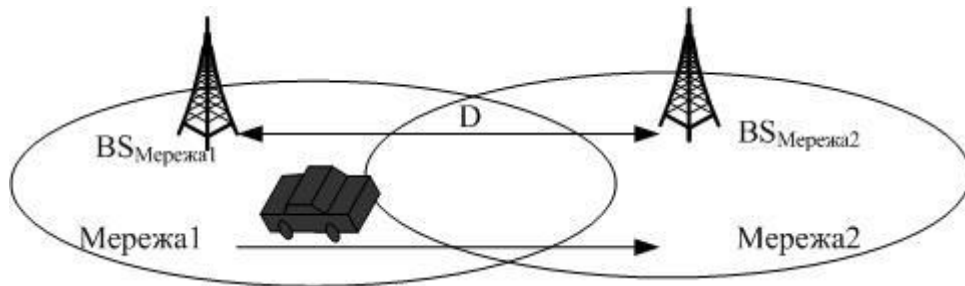


Рисунок 4.1 – Модель гетерогенної безпроводової мережі

UE рухається з постійною швидкістю по прямій від базової станції  $BS_{\text{Мережа1}}$  до базової станції  $BS_{\text{Мережа2}}$ , враховуючи відстань між ними –  $d$ , яка визначається, як показано в (4.1):

$$d = kd_s, \quad (4.1)$$

де  $k$  - ціле число  $k \in [0, d/d_s]$ ;

$d_s$  – відстань вибірки ( $d_s = 1$  м) [60].

Передбачається, що обидві BS працюють від центру відповідних сот.

Припустимо, що UE знаходиться в зоні дії області Мережі 1 або Мережі 2. Але за рахунок мобільності може переміщатися в соти, що перекриваються, тобто знаходитися одночасно в межах зони покриття, як у зоні  $BS_{\text{Мережа1}}$ , так і в зоні  $BS_{\text{Мережа2}}$ . Щоб знайти рішення, якій мережі слід віддати перевагу в сотах, що перекриваються, запропоновано алгоритм вибору мережі.

Першим параметром обрано усереднене значення RSS. RSS зумовлено швидким згасанням втрат на трасі в залежності від відстані. Ключовий компонент сигналу - це втрати на трасі, які можна оцінити шляхом поширення, використовуючи моделі втрат [61, 62]. Рівень пілот-сигналу, отриманий UE від  $BS_{\text{Мережа1}}$  і  $BS_{\text{Мережа2}}$  відповідно, може бути виражено в дБм, як:

$$S_1(k) = K_1 - 10_{\gamma_1} \cdot \log_{10}(kd_s) + \zeta_1, \quad (4.2)$$

$$S_2(k) = K_1 - 10_{\gamma_2} \cdot \log_{10}(D - kd_s) + \zeta_2, \quad (4.3)$$

де  $K_1$  - параметр втрат на трасі;

індекси 1 та 2 - показники втрат на трасі для Мережа 1 та Мережа 2.

Будівлі, пагорби, дерева та листя утворюють перешкоду на лінії прямого радіобачення між передавачем та приймачем, викликаючи затінення. Отже, переданий сигнал блокується через сильне загасання. Відносні положення передавача і приймача щодо великих перешкод за умов поширення викликає тіньове завмирання. Функція автокорекції тіньових замирань визначається як [63]:

$$E\{\zeta(k)\zeta(k+m)\} = \sigma_s^2 \alpha^{|m|}, \quad (4.4)$$

$$\alpha = \exp\left(\frac{-vT_m}{d_0}\right), \quad (4.5)$$

де  $\sigma_s$  - стандартне відхилення тіньового завмирання;

$m$  – ціле число. Передбачається однакове значення стандартного відхилення для обох сот;

$d_0$  - кореляційна відстань;

$T_m$  - час вибірки;

$v$  - швидкість UE.

Отже,  $d_s = vT_m$ . Для зменшення часу вибору мережі в один і той же момент часу і пом'якшення тіньових замирань навмисні та стандартизовані вибірки рівня сигналу усереднюються за прямокутним законом, перш ніж вони можуть бути використані для вибору мережі, яка задається таким чином [64]:

$$S_{ai}(k) = \frac{1}{N_w} \sum_{n=0}^{N-1} S_i(k-n)W_n, \quad i=1,2. \quad (4.6)$$



У цьому кожен  $k$ -ий параметр має вигляд  $S_{ai}(k)$ . Вибірка, взята наприкінці  $(k - n)$ -го інтервалу, дорівнює:

$$N_w = \sum_{n=0}^{N-1} W_n. \quad (4.7)$$

Швидкі завмирання обумовлені багатопроменевим поширенням такими об'єктами, як будинки, будівлі, природними об'єктами, що оточують UE. При виборі мережі ними нехтують, зважаючи на коротку кореляційну відстань порівняно з відстанню між тіншовими завмираннями.

Стандартне відхилення усереднених вибірок завмирання визначається, як [65]:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_s^2}{N} \left[ 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{N-1} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \rho^n \right]. \quad (4.8)$$

де  $\rho$  - коефіцієнт автокореляції тіншових замирань;

$\sigma$  - стандартне відхилення тіншових замирань до та після усереднення вимірювань рівня сигналу по  $N$  вибіркам.

Ще одним параметром визначення області перекриття для вибору мережі в гетерогенному середовищі використовується відстань. Для спрощення системи використано гаусову статистику для змінних вимірів відстані  $d_i$  ( $i=1, 2$ ). Отримані відстані UE від  $BS_{\text{Мережа1}}$  і  $BS_{\text{Мережа2}}$  визначаються, як:

$$d_1(k) = kd_s + \chi_1, \quad (4.9)$$

$$d_2(k) = D - kd_s + \chi_2, \quad (4.10)$$

де  $\chi_1$  та  $\chi_2$  - величини, що представляють помилки виміру відстані зі стандартним відхиленням  $\sigma_d$ . Середня помилка вимірювання відстані збільшується зі збільшенням  $\sigma_d$ . Передбачається, що максимальну помилку відстані визначено 50 м [66]. Відносна відстань UE від двох БС визначається як:

$$X(k) = d_1(k) - d_2(k). \quad (4.11)$$

Ще одним параметром для вибору мережі є ймовірність збою. Його розгляд пов'язаний з ймовірністю відключення в соті при певному збільшенні навантаження в мережі [67]. Вона визначається як ймовірність того, що усереднений рівень сигналу, що приймається, менший за певний поріг:

$$P_{out} = P[H < H_t], \quad (4.12)$$

де  $P$  - рівень сигналу безпроводової мережі в гетерогенному середовищі;

$H_t$  - пороговий рівень сигналу, що приймається. Порогове значення впливу для типів безпроводових мереж у гетерогенному середовищі показано в [68].

Параметри системи дослідження взяті з урахуванням усереднених значень, що наведено у додатку В [69]. Пороги RSS - це значення RSS, доступні в  $BS_{\text{Мережа1}}$  і  $BS_{\text{Мережа2}}$  на межі соти.

#### 4.2 Алгоритм вибору мережі в гетерогенному середовищі

В роботі запропоновано алгоритм, що визначає найкращу доступну безпроводову мережу з урахуванням QoS для мультимедійних послуг у гетерогенному безпроводовому середовищі. При цьому використано усереднені параметри RSS, відстані та ймовірності збою для вибору мережі. Якщо усереднений RSS однієї з мереж високий, а ймовірність збою менше порівняно з іншою мережею в області, що перекривається, оцінюваної по відстані в гетерогенному середовищі, то вважається, що ця мережа найбільш підходить для вибору. Умови вибору мережі:

$$\begin{aligned} NSF_{(i)} = & F(S_{a(i)}(k) > S_{a(i+1)}(k)) \text{ and } F(S_{a(i)}(k) > S_{th}(k)) \\ & F(P_{out(i)}(k) < F(P_{out(i+1)}(k))) \quad , \quad (4.13) \\ & F(P_{out(i)}(k) < P_{outh}(k)) \text{ and } F(d_{(i)}(k) > d_{th}(k)) \end{aligned}$$

де  $S_{a(i)}$  - усереднений RSS мереж доступу;

$S_{th}$  - граничне значення RSS;

$k = 1, 2, 3, \dots$ , Використовується для вибору усередненого RSS та ймовірності збою при різних відстанях між вибірками;

$P_{out}(i)$  - ймовірність збою безпроводової мережі в гетерогенному середовищі;

$P_{outh}$  - граничне значення ймовірності збою мультимедійних сервісів;

$d_{(i)}$  - відстань UE від відповідної BS;

$d_{th}$  - порогова відстань перекриття меж сот;

$i = 1, 2, \dots, N-1$  для безпроводової мережі в гетерогенному середовищі, як показано в (4.6);

функція  $F(.)$  – одинична ступінчаста функція (функція множення), це некогерентна функція, що дорівнює нулю для негативних значень і дорівнює одиниці для позитивних значень;

NSF - Network Selection Function - функція вибору мережі, що приймає нульове значення, якщо будь-яка з умов у рівнянні (4.13) не задоволена. Для гетерогенного середовища це  $NSF_{Мережа1}$  чи  $NSF_{Мережа2}$ .

У гетерогенній мережі, що складається з безлічі технологій доступу, вибір мережі може бути зроблений у будь-який момент часу та на будь-якій відстані відповідно до вимог умов мережі, якості обслуговування для програми та уподобань користувача.

Однак у роботі прийнято умови мережі (середнє значення RSS та ймовірність збою), які є визначальними при прийнятті рішення щодо вибору мережі в умовах динамічного поширення радіохвиль. Враховуючи, що умови мережі змінюються залежно від часу та відстані, розглянуто принцип вибору мережі біля меж покриття двох мереж. Ця область визначена рівнянням (4.11).

Структурна схема алгоритмів вибору мереж на основі усередненого RSS, відстані та ймовірності збою представлена на рис. 4.2 та 4.3.

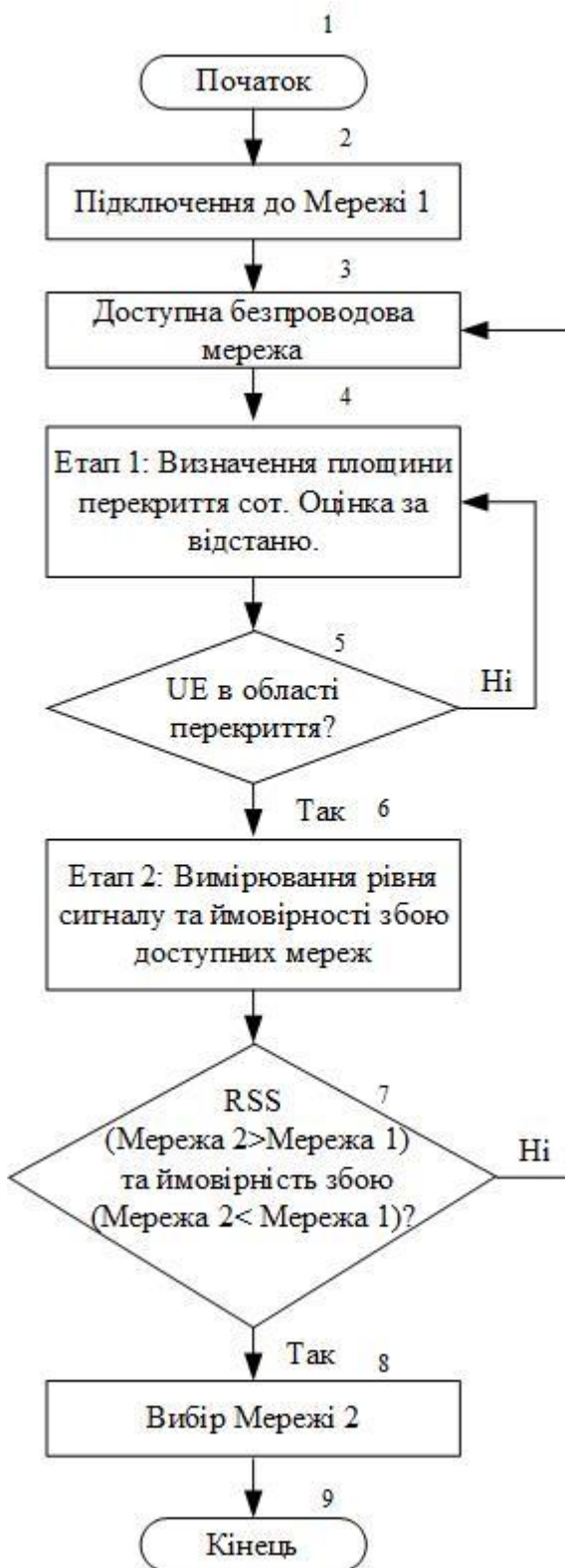


Рисунок 4.2 – Структурна схема алгоритму вибору мережі в гетерогенному середовищі для Мережі 1

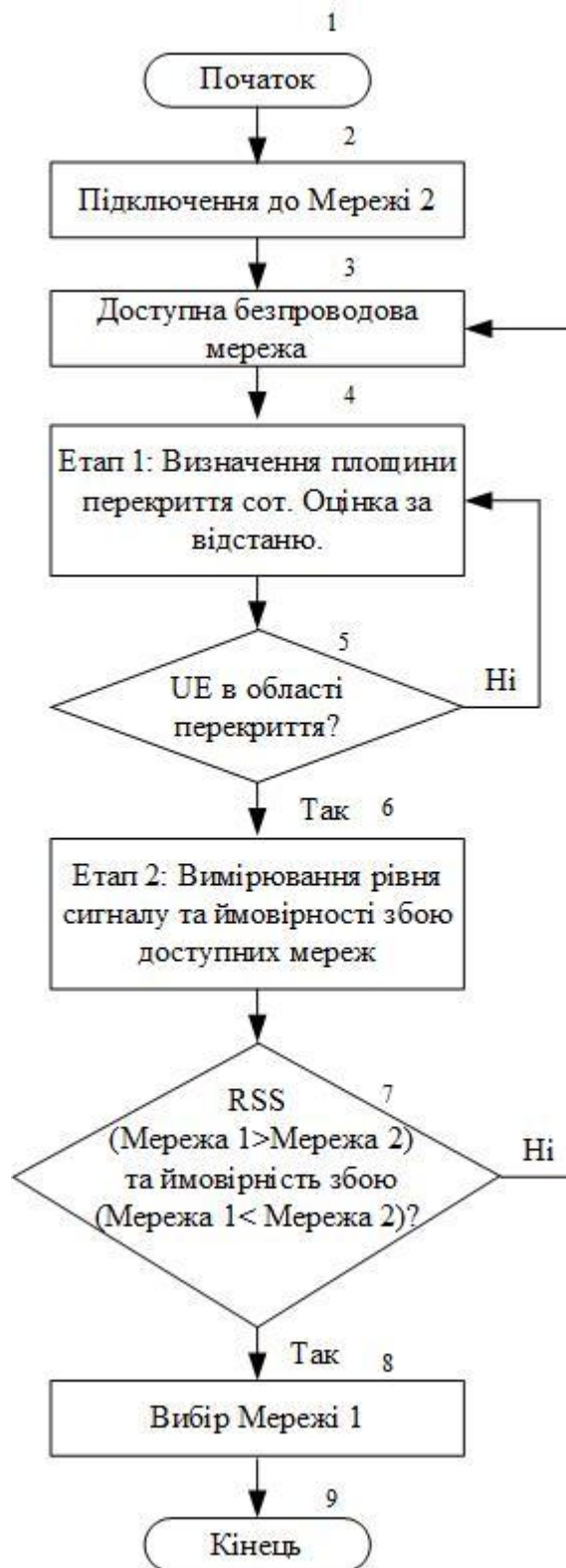


Рисунок 4.3 – Структурна схема алгоритму вибору мережі в гетерогенному середовищі для Мережі 2

Відповідно до алгоритма, критерій вибору мережі поділено на два етапи. На першому етапі визначається зона перекриття сот, на другому етапі розраховуються параметри каналу. UE має можливість враховувати кілька

безпроводових мереж разом завдяки багаторежимному мобільному пристрою UE [70]. Тобто передбачається використання двох інтерфейсів у UE, які можуть отримати доступ до Мережі 1 та Мережі 2. Крім того, вибір мережі також залежить від програм, що працюють на даний момент.

Таким чином, спочатку перевіряються мережі, присутні в гетерогенному середовищі багаторежимного UE, який відстежує якість радіоканалу.

Початковим етапом вибору мережі в цьому процесі є поєднання показників RSS й відстані. Спочатку використовується RSS для виявлення безпроводової мережі. Якщо UE відстежує лише одну безпроводову мережу, вона автоматично підключається. Але коли UE «ловить» більше однієї безпроводової мережі одночасно, виникає проблема вибору мережі для забезпечення найкращого QoS.

Далі параметр відстані використовується для пошуку області перекриття, щоб зменшити навантаження на UE при виборі мережі на всій відстані від BS.

Для вибору мережі між  $BS_{\text{Мережа1}}$  і  $BS_{\text{Мережа2}}$  на наступному етапі алгоритм використовує комбінацію усередненого рівня сигналу. Відповідно до алгоритму, спочатку визначається усереднений RSS обох мереж, присутніх у гетерогенному середовищі. Потім на основі усередненого RSS та його порогового значення визначається ймовірність збою. Мережа, що має більше усередненого значення RSS і меншу ймовірність збоїв, вибирається як найкраща мережа в даному гетерогенному середовищі.

### 4.3 Оцінка алгоритму вибору мережі

Оцінка алгоритму вибору мережі проводилася під час руху UE з постійною швидкістю по прямій траєкторії між двома БС. Рівень сигналу при переміщенні UE від БС1 до БС2 та БС 2 до БС 1 показано на рис. 4.4.

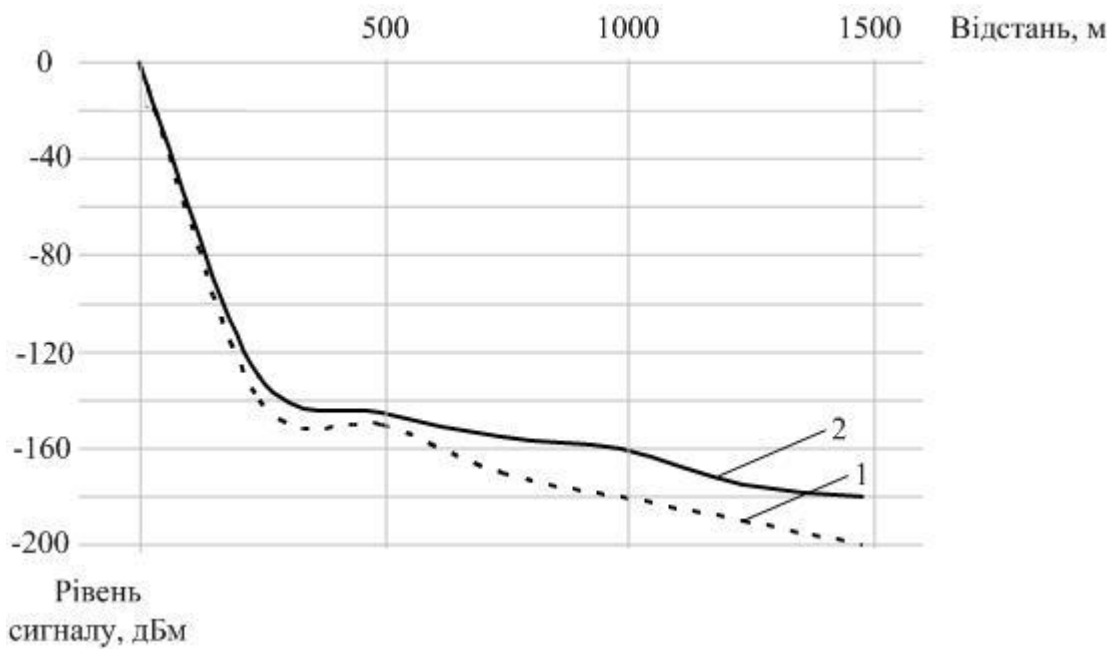


Рисунок 4.4 – Результати оцінки RSS (1 – рівень сигналу при переміщенні UE від  $BS_{\text{Мережа2}}$  до  $BS_{\text{Мережа1}}$ , 2 - рівень сигналу при переміщенні UE від  $BS_{\text{Мережа1}}$  до  $BS_{\text{Мережа2}}$ )

Оцінка рівня сигналу сусідньої БС при переміщенні UE від БС1 та БС2 показано на рис. 4.5.

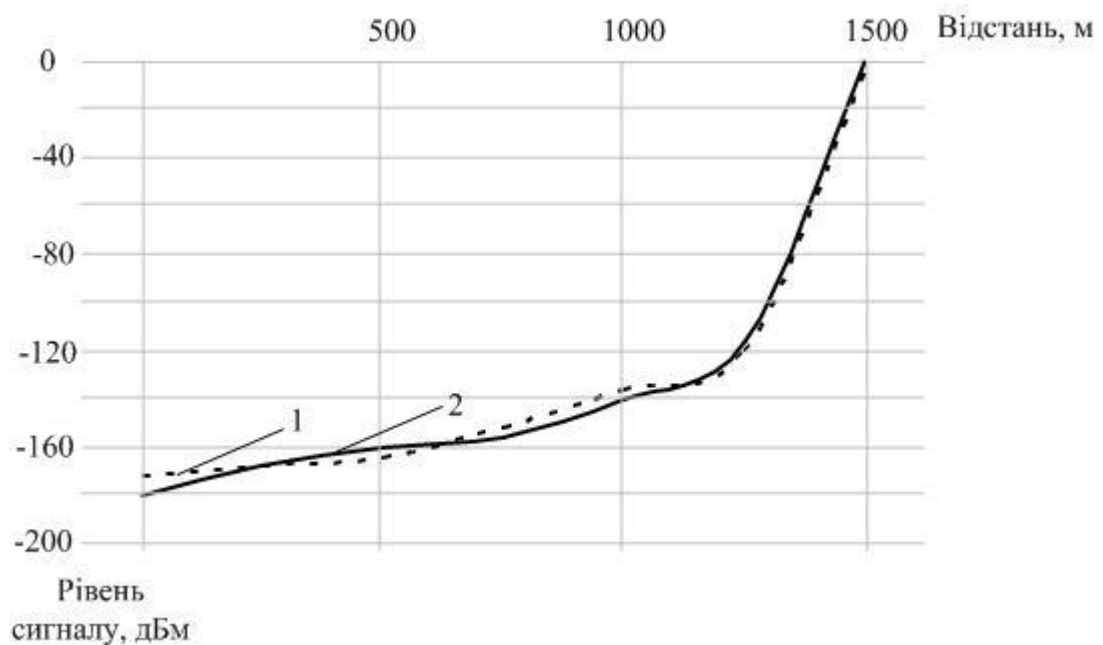


Рисунок 4.5 – Результати оцінки RSS сусідньої БС

Випадковий характер тіньових завмирань призводить до зміни RSS та збоїв у роботі мережі. Це в свою чергу призводить до ефекту "пінг-понгу", коли UE переміщається по області накладання гетерогенних безпроводових мереж. Ефект «пінг-понгу» призводить до непотрібного вибору мережі та викликає ряд недоліків, таких як низька пропускна здатність, велика затримка та висока ймовірність збою зв'язку.

Таким чином, спостерігається зменшення RSS через збільшення відстані в обох безпроводових мережах. Умова вибору мережі виникає, коли в UE потрапляє в зону перекриття безпроводових мереж. Вибір мережі від  $BS_{\text{Мережа1}}$  до  $BS_{\text{Мережа2}}$  може відбуватися приблизно на відстані, що перевищує або дорівнює приблизно 900 м від межі соти Мережі1, як показано на рис. 4.6.

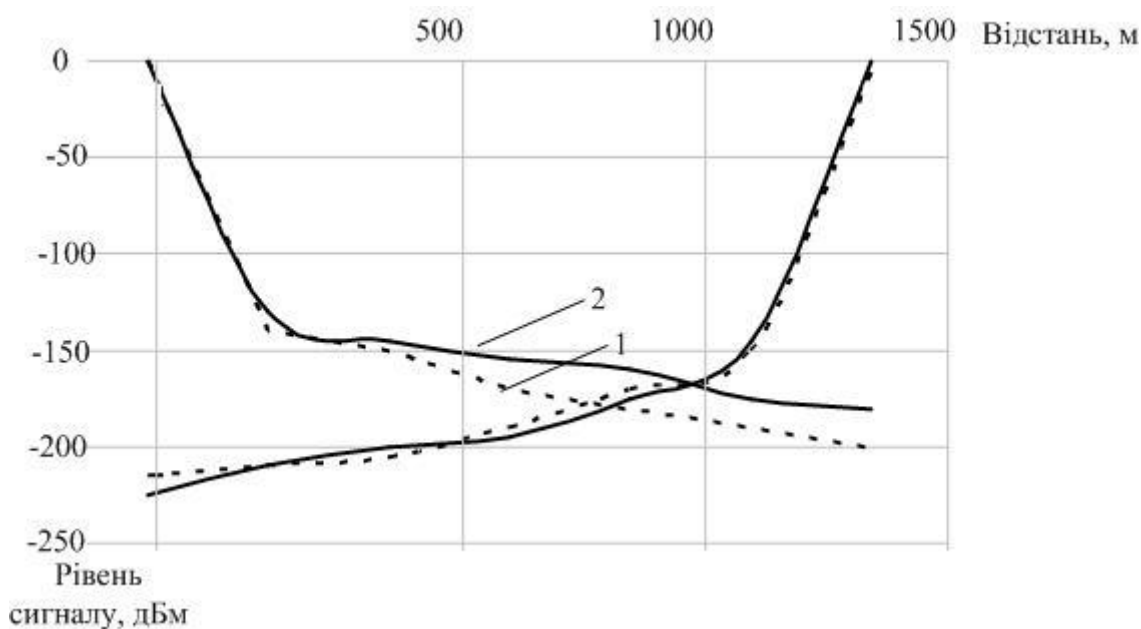


Рисунок 4.6 – Результати оцінки RSS при перекритті Мережі 1 та Мережі 2

Враховуючи, що  $R_{\text{Мережа1}}$  (радіус соти Мережі 1) дорівнює 1000 м і  $R_{\text{Мережа2}}$  (радіус соти Мережі 2) дорівнює 500 м, передбачається, що  $d_0 \geq 900$  м і  $d_1 < 600$  м, як зазначено в рівняннях (4.9) та (4.10), які дають відстань UE від  $BS_{\text{Мережа1}}$  до  $BS_{\text{Мережа2}}$ .

Отже, відповідно до рівняння (4.11), маємо  $X \geq 300$  м для вибору мережі від мережі  $BS1$  до мережі  $BS2$ . Аналогічно, для вибору мережі від  $BS_{\text{Мережа1}}$  до  $BS_{\text{Мережа2}}$  UE знаходиться в межах 100 м від межі соти в соті Мережі 2. З цього випливає, що вибір мережі може здійснюватися, коли UE знаходиться на відстані, що більше або дорівнює 400 м від  $BS_{\text{Мережа2}}$ . І в цій ситуації потрібна відстань  $d_1 \geq$



400 м від  $BS_{\text{Мережа2}}$ . У свою чергу, коли відстань від UE менше або дорівнює 1100 м від  $BS_{\text{Мережа1}}$  і, отже, умовна відстань  $X < 700$  м. Ці налаштування засновані на тому, що область  $\pm 100$  м є областю перекриття між двома сотами.

У традиційних методах рівень прийнятого сигналу є єдиним домінуючим параметром вибору мережі, внаслідок чого відбувається багаторазовий вибір мережі. Це дратує користувача та збільшує накладні витрати. Тому для ухвалення рішення про вибір оптимальної мережі в гетерогенному середовищі слід враховувати оцінку відстані для розрахунку області перекриття та параметр ймовірності збою.

На рис. 4.7 представлено графік залежності ймовірності збою від відстані в гетерогенному безпроводовому середовищі.

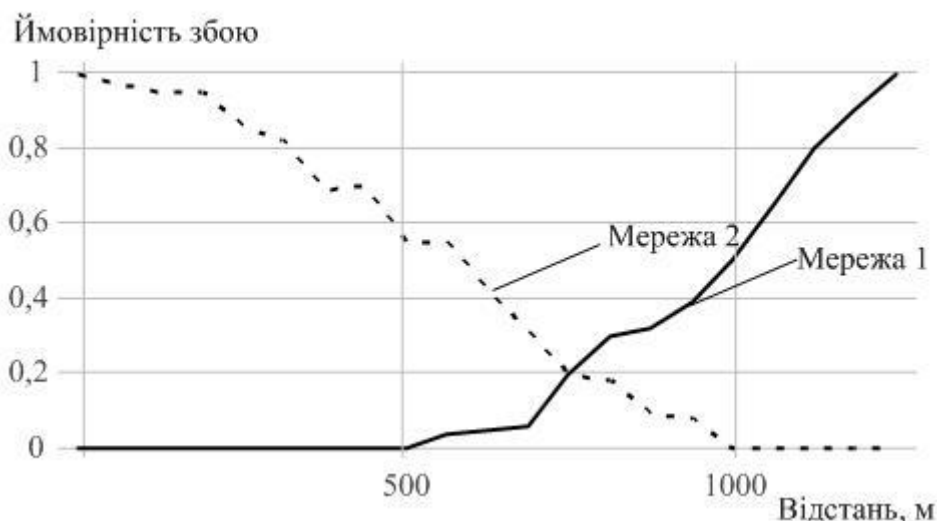


Рисунок 4.7 – Ймовірність збою

У міру віддалення UE від базової станції збільшується ймовірність відключення, яка варіюється від 0 до 1. Для UE, який отримує більше RSS і менше значення ймовірності збою, проводиться вибір найкращої мережі в гетерогенному середовищі. Таким чином, вибір мережі для мультимедійних послуг має мінімально необхідне значення можливості збою  $\sim 0,2$  [71]. Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує підвищення продуктивності на 68% з точки зору швидкості вибору мережі.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі основну увагу приділено оцінці продуктивності гетерогенних систем. Наведено моделі елементів мережі з урахуванням просторової та часової динамки користувальницького трафіку. Отримано ряд показників продуктивності в реальних сценаріях з підключенням мобільних користувачів в припущенні того, що зона обслуговування мережі покривається поруч із РоА, кожен із яких містить кілька інтерфейсів радіодоступу. Користувач може підключитись до будь-якого з таких інтерфейсів за умови, що він знаходиться під покриттям і достатністю радіоресурсів.

У першому розділі проведено аналіз багаторівневої мобільної мережної архітектури та передумови розвитку гетерогенних HetNet мереж.

Показано, що рішення потреб у пропускній здатності додатків полягає у розробці гетерогенних, щільних телекомунікаційних мереж. Для таких мереж характерна наявність великих сот та безлічі дрібних сот, які класифікуються як мікросоти, пікосоти або фемтосоти. Така багаторівнева мережна архітектура використовує кілька технологій радіодоступу RAT між користувачем та інфраструктурою.

Доведено, що передумовами виникнення мереж HetNet є наявність у телекомунікаційного оператора кількох мереж з різними технологіями, обмеженість частотного ресурсу, широке поширення багаторежимних, багатодіапазонних терміналів користувача та нерівномірність територіального розподілу абонентського трафіку в мережі.

У другому розділі проведено дослідження користувальницького радіодоступу в щільних гетерогенних мережах. Проведено аналіз архітектури інтерфейсів на UE з оглядом структури системи MultiNets в режимі реального часу. Розглянуто мережний сценарій та сценарії вибору мережі, розглянуто політику доступу користувачів до гетерогенної мережі.

Розроблено моделі взаємодій у гетерогенній системі: модель станів з урахуванням умов покриття користувачів у мережі, модель станів користувачів, модель втрат. Наведено математичні моделі параметрів гетерогенної мережі. У роботі проведено математичне моделювання та обрано мережний сценарій, в якому макросоти використовують технологію LTE, а мікросоти використовують технологію Wi-Fi, розроблено алгоритм вибору технології. Для оцінки

продуктивності мережі розглянуто ряд показників для LTE і Wi-Fi, отриманих за допомогою аналітичної моделі: пропускна здатність, навантаження трафіку на РоА, втрати даних та справедливість пропускної здатності.

У третьому розділі проведено аналіз та дослідження керування трафіком у гетерогенній мережі у режимах очікування та з'єднання. Наведено принцип повторного вибору сот на основі абсолютних пріоритетів. На прикладі мережі HetNet, що складається із чотирьох мережних рівнів, проведено дослідження в режимі очікування як для точок доступу з 50% проникненням LTE та 100% проникненням LTE, так і для еталонної точки доступу у разі однакового пріоритету усіх рівнів. У роботі розглянуто сценарії поведінки користувачів в режимі з'єднання залежно від його місцезнаходження та стратегії TS. Проведено аналіз чутливості за показниками загальної кількості НО в секунду в мережі для різних пар рівнів. У роботі розглядаються параметри НО, які обрано відповідно до конкретної політики TS між RAT, що відповідають подіям B2/3A, визначеним 3GPP.

У четвертому розділі наведено рішення завдань у гетерогенній структурі, пов'язаних з вибором мережі: способи вибору мережі на основі усередненої потужності сигналу, ймовірності збою та відстані. Для цього проведено аналіз та наведено математичні моделі параметрів, які характеризують процеси в гетерогенному середовищі, що складається з двох безпроводових мереж. У роботі запропоновано алгоритм, що визначає найкращу доступну безпроводову мережу з урахуванням QoS для мультимедійних послуг у гетерогенному безпроводовому середовищі. Проведено оцінку алгоритму для вибору мережі під час руху UE з постійною швидкістю по прямій траєкторії між двома БС: надано результати оцінки RSS з позначенням умовної відстані для вибору мережі, визначено мінімально необхідне значення ймовірності збою. Показано, що запропонований алгоритм забезпечує підвищення продуктивності на 68% з точки зору швидкості вибору мережі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mobile data traffic outlook. URL: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2019/mobile-data-traffic-outlook> (дата звернення 05.09.2023).
2. Busari S.A., Huq K.M.S., Mumtaz S., Dai L., Rodriguez J. Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20 (2). P. 836 – 869.
3. Zhu Q., Wang X., Qian Z. Energy-efficient small cell cooperation in ultra-dense heterogeneous networks. *IEEE Communications Letters*. 2019. Vol. 23 (9). P.1648 – 1651.
4. Olwal T. O., Djouani, K. & Kurien A. M. A Survey of Resource Management Toward 5G Radio Access Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18 (3). P.1656 – 1686.
5. Vannithamby R., Talwar S. Distributed resource allocation in 5G cellular networks. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8045143> (дата звернення: 04.09.2023).
6. Chen S.J., Zhao M. Ai, Liu D., Peng Y. Virtual RATs and a flexible and tailored radio access network evolving to 5G. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53 (6). P. 52 – 58.
7. Demydov I., Seliuchenko M., Beshley and Brych M. Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv. 2015. PP. 103 – 105.
8. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR. *Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 3-5 листопада. Чернівці, 2016. С. 35 – 36.*
9. Lomotey R. K., Deters R. Towards Knowledge Discovery in Big Data. *Service Oriented System Engineering*. 2014. PP. 181 – 91.
10. Климаш М.І., Бешлей О.А., Лаврів Б.М., Стрихалюк Г.В. Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A. *Проблеми телекомунікацій*. Харків, 2014. № 1 (13). С. 3 – 19.

11. Gu L. et al. Cost minimization for Big Data processing in Geodistributed data centers. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2014. Vol. 2 (3). P. 314 – 323.
12. Lei L. et al. Challenges on Wireless Heterogeneous Networks for Mobile Cloud Computing. *IEEE Wireless Communication*. 2013. Vol. 20. No. 3. P. 34 – 44.
13. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets. *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*. 2018. Vol. 3. P. 11 – 22.
14. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 81 – 86.
15. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. № 874. С. 110 – 121.
16. Pervez F., Jaber M., Qadir J., Younis S., Imran M.A. Memory-based user-centric backhaul-aware user cell association scheme. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 39595 – 39605.
17. Hasan M.M., Kwon S., Oh S. Frequent-handover mitigation in ultra-dense heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018. Vol. 68 (1). P.1035 – 1040.
18. Demarchou E., Psomas C., Krikidis I. Mobility management in ultra-dense networks: Handover skipping techniques. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 11921 – 11930.
19. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 21: Media Independent Handover. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 323 p.
20. Aryafar E., Keshavarz-Haddad M.W.A., Chiang M. RAT selection games in HetNets. *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. 2013. P. 998 – 1006.
21. Zhu K., Hossain E., Niyato D. Pricing, spectrum sharing, and service selection in two-tier small cell networks: A hierarchical dynamic game approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2014. Vol.13 (8). P. 1843 – 1856.
22. Alabdel Abass A.A., Kumbhkar R., Mandayam N.B., Gajic Z. WiFi/LTE-U coexistence: An evolutionary game approach. *IEEE Transactions Cognitive Communication and Networking*. 2019. Vol. 5 (1). P. 44 – 58.

23. Liu H., Maciocco C., Kesavan V., Low A. Energy efficient network selection and seamless handovers in mixed networks. *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks Workshops*. 2009. P. 1 – 9.
24. Petander H. Energy-aware network selection using traffic estimation. *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Mobile Internet through Cellular Networks - MICNET '09*. Beijing, China, 21 September. 2009. P. 55 – 60.
25. Gawlowicz P., Zubow A., Wolisz A. Enabling cross-technology communication between LTE unlicensed and WiFi. *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*. 2018. P. 144 – 152.
26. Gerasimenko M., Himayat N., Yeh S.-P., Talwar S., Andreev S., Koucheryavy Y. Characterizing performance of load-aware network selection in multi-radio (WiFi/LTE) heterogeneous networks. *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. 2013. P. 397 – 402.
27. Li Q. C. et al. 5G Network Capacity: Key Elements and Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2014. Vol. 9. No. 1. P. 71 – 78.
28. Khadraoui Y., Lagrange X., Gravey A. A survey of available features for mobile traffic offload. *20th European Wireless Conference*. Barcelona. 2014. P. 1 – 4.
29. Liu D., Wang L., Chen Y., El-kashlan M., Wong K., Schober R., Hanzo L. User association in 5G networks: A survey and an outlook. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18 (2). P. 1018 – 1044.
30. Ge X., Li X., Jin H., Cheng J., Leung V.C.M. Joint user association and user scheduling for load balancing in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018. Vol. 17 (5). P. 3211 – 3225.
31. Gures E., Shayea I., Sheikh M., Ergen M., El-Saleh A. A. Adaptive cell selection algorithm for balancing cell loads in 5G heterogeneous networks. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 72. P. 621 – 634.
32. Mismar F. B. & Evans B. L. Partially Blind Handovers for mmWave New Radio Aided by Sub-6 GHz LTE Signaling. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. 2018. P. 1 – 5.
33. Gures E., Shayea I., Ergen M., El-Saleh A.A. Fuzzy Logic-Based Load Balancing Algorithm in Heterogeneous Networks. *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. 2022. P. 210 – 215.
34. Lynch D., Fenton M., Fagan D., Kucera S., Claussen H. & O'Neill M. Automated self-optimization in heterogeneous wireless communications networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2019. Vol. 27. No. 1. P. 419 – 432.

35. 3GPP, Technical Specification Group Radio Access Network; NR and NG-RAN Overall Description. Stage 2 (Release 16). 3GPP TS 138.300 V16.2.0. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138300\\_138399/138300/16.02.00\\_6.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/16.02.00_6.pdf) (дата звернення: 18.09.2023).
36. Ohlsson O., Wallentin P., Persson C.-G. Reducing Mobility Interruption Time in 5G Networks. URL: <https://www.ericsson.com/en/blog/> (дата звернення: 21.09.2023).
37. Nirjon S., Nicoara A., Hsu C.-H., Singh J. P. & Stankovic J. A. MultiNets: A System for Real-Time Switching between Multiple Network Interfaces on Mobile Devices. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. 2014. Vol. 13 (4s). P. 121 – 143.
38. Tuysuz M. F. & Uçan M. Energy-aware network/interface selection and handover application for android-based mobile devices. *Computer Networks*. 2017. Vol. 113. P. 17 – 28.
39. Yang B., Guo W., Jin Y., Wang S. Smartphone data usage: downlink and uplink asymmetry. *Electronic Letters*. 2016. Vol. 52 (3). PP. 243 – 245.
40. Bobbio A., Gribaudo M., Telek M. Analysis of large scale interacting systems by mean field method. *5th International Conference on Quantitative Evaluation of Systems - QEST2008*. 2008. PP. 215 – 224.
41. Kurtz T.G. Solutions of ordinary differential equations as limits of pure jump Markov processes. *Journal of Applied Probability*. 1998. Vol. 7 (1). PP. 49 – 58.
42. Heusse M., Rousseau F., Berger-Sabbatel G., Duda A. Performance anomaly of 802.11b. *Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications - INFOCOM 2003*. 2003. Vol. 2. PP. 836 – 843.
43. Cordero F., Manini D., Gribaudo M. Modeling biological pathways: an object-oriented like methodology based on mean field analysis. *The Third International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences (ADVCOM)*. 2009. PP. 193 – 211.
44. Matsuno H., Fujita S., Doi A., Nagasaki M., Miyano S. Towards pathway modelling and simulation. Part of the Lecture Notes in Computer Science book series, Netherlands: Springer, 2003. PP. 3 – 22.
45. Jihwang Y., Kotz D., Henderson T. Crawdad - A community resource for archiving wireless data at dartmouth mirror provided by the school of computer science at the university of st andrews. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2006. Vol. 36. PP. 20 – 22.

46. All the networks. Found by Everyone. URL: <https://www.wigle.net> (дата звернення 15.09.2023).
47. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems, Technical Report – DEC-TR-301. URL: <https://www.cs.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf> (дата звернення 25.09.2023).
48. Furuskar A., Zander J. Multiservice Allocation for Multiaccess Wireless Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2005. Vol. 4. PP. 174 – 84.
49. Munoz P., Barco R., Laselva D. & Mogensen P. Mobility-based strategies for traffic steering in heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51 (5). PP. 54 – 62.
50. Turina D., Furuskar A. Traffic steering and service continuity in GSM-WCDMA seamless networks. *8th International Conference on Telecommunications – ConTEL*. 2005. PP. 77 – 82.
51. Nasri R., Samhat A. & Altman Z. A New Approach of UMTS-WLAN Load Balancing; Algorithm and its Dynamic Optimization. *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. 2007. PP. 1 – 6.
52. Horrich S., Jamaa S. B. & Godlewski P. Adaptive Vertical Mobility Decision in Heterogeneous Networks. *Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07)*. 2007. PP. 1 – 6.
53. Ramiro J., Hamied K. Self-Organizing Networks. Self-Planning, Self-Optimization and Self-Healing for GSM, UMTS and LTE. USA: Wiley, 2012. 320 p.
54. Hamalainen S., Sanneck H., Sartori C. LTE Self-Organizing Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. USA: Wiley, 2011. 432 p.
55. 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 (Release 13). URL: <https://www.picture.iczhiku.com/resource/convert/1a5922b791bc4.pdf> (дата звернення 20.09.2023).
56. 3GPP TS 36.331 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 8). URL: [https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v10\\_40/5\\_Appendix/Rel8/36/36331-8k0.pdf](https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v10_40/5_Appendix/Rel8/36/36331-8k0.pdf) (дата звернення 28.09.2023).



57. 3GPP TS 25.331 Technical Specification Group Radio Access Network; Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification. URL: <https://www.3gpp.org/DynaReport/25331.html> (дата звернення 22.10.2023).

58. Botta A., Dainotti A. & Pescapè A. A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. *Computer Networks*. 2012. Vol. 56 (15). P. 3531 – 3547.

59. He D., Chi C., Chan S., Chen C., Bu J., Yin M. A simple and robust vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless mobile networks. *Wireless Personal Communications*. 2011. Vol. 59. PP. 361 – 373.

60. Singh N.P., Singh B. Performance enhancement of cellular network using adaptive soft handover algorithm. *Wireless Personal Communications*. 2010. Vol. 62. PP. 41 – 53.

61. Prakash R., Veerawalli V.V. Adaptive hard handoff algorithms. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18. PP. 2456 – 2464.

62. Vijayan R., Holtzman J.M. A model for analyzing handoff algorithms. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1993. Vol. 42. PP. 351 – 356.

63. Gudmundson M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *Electronics Letters*. 1991. Vol. 27. PP. 2145 – 2146.

64. Corazza G.E., Giancristofaso D., Santucci F. Characterization of handover initiation in cellular mobile radio networks. *IEEE Conference on Vehicular Technology*. 1994. PP. 1869 – 1872.

65. Zhao W., Tafazolli R., Evans B.G. Internetwork handover performance analysis in a GSM-satellite integrated mobile communication system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1997. Vol. 15. PP. 1657 – 1671.

66. Chen J.-C., Wang Y.-C., Maa C.-S., Chen J.-T. Network-side mobile location using factor graphs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2006. Vol. 5. PP. 2696 – 2704.

67. Ni S., Liang Y., Haggman S.-G. Outage probability in GSM–GPRS cellular systems with and without frequency hopping. *Wireless Personal Communications*. 2000. Vol. 14 (3). PP. 215 – 234.

68. Grant S.J., Cavers J.K. Analytical calculation of outage probability for a general cellular mobile radio system. *IEEE Conference on Vehicular Technology*. 1999. Vol. 3. PP. 1372 – 1376.

69. Ahuja K. et al. Network selection algorithm based on link quality parameters for heterogeneous wireless networks. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 2014. Vol. 125 (14). PP. 3657 – 3662.

70. Gelabert X., Perez-Romero J., Sallent O., Agusti R. On the impact of multi-mode terminals in heterogeneous wireless access networks. *2nd International Symposium on Wireless Communication Systems*. September 2005. PP. 39 – 43.

71. Hole K.J., Oien G.E., Risløw B., Orten P. Adaptive coding and Modulation Scheme for Ka-band space Communications. *Journal of Astronomy & Space Sciences*. 2010. Vol. 27 (2). PP. 129 – 134.