

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку»

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ТКС-22м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

Бевз Д.В.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ  
Кичак В.М.

« 8 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС  
Семенов А.О.

« 11 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКЗТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет  
 Факультет інформаційних електронних систем  
 Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій  
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
 Галузь знань - 17– Електроніка та телекомунікації  
 (шифр і назва)  
 Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
 (шифр і назва)  
 Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**

**“19” 09 2023 року**

## **З А В Д А Н Н Я** **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Бевзу Дмитру Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, д.т.н, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року №247

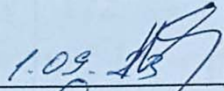
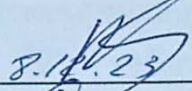
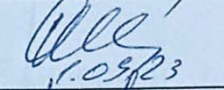
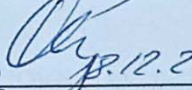
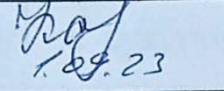
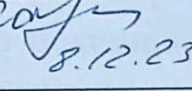
2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: тип вхідних сигналів – цифрові; режим зв'язку – дуплексний; смуга робочих частот – 900, 1800, 2600 МГц; тип модуляції – OFDM; тип мережі – мобільна стільникова.

4. Зміст текстової частини: розробка технічного завдання, аналіз особливостей побудови та основних параметрів стільникових мереж мобільного зв'язку, розглянути питання оптимізації стільникових мереж мобільного зв'язку, вибір оптимальних варіантів топології транспортної мережі, охорона праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): архітектура мережі мобільного зв'язку GSM; архітектура мережі мобільного зв'язку третього покоління (UMTS); сформована множина варіантів топологічних структур досліджуваної мережі мобільного зв'язку.

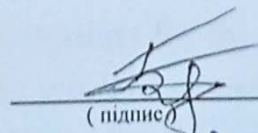
## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кичак В.М., професор кафедри ІКСТ	 1.09.23	 8.12.23
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 8.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В., доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 8.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

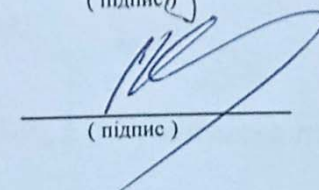
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	17.09.2023р.	
3.	Аналіз методів і засобів кодування сигналів	06.10.2023р.	
4.	Розробка структури та принципової схеми кодера	27.10.2023р.	
5.	Дослідження параметрів і характеристик кодера	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент

  
(підпис)

Бевз Д.В.

Керівник роботи

  
(підпис)

Кичак В.М.

**РЕФЕРАТ**  
УДК 621.396

Бевз Д.В. Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку – магістерська кваліфікаційна робота студента спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 110 стор., 12 – рис., 22 – табл., 35 – бібл. – українською мовою.

Метою роботи є проведення аналізу особливостей побудови мереж стільникового мобільного зв'язку та їх оптимізація за сукупністю показників якості. У процесі дослідження виконується аналіз особливостей побудови та основних параметрів стільникових мереж мобільного зв'язку. Відповідно до сформованого переліку параметрів розглядається можливість оптимізації мережі мобільного зв'язку. Також, проаналізувавши основні характеристики та оптимізувавши їх під сучасні сценарії використання проводиться вибір оптимальних варіантів топології транспортної мережі. На кінцевому етапі роботи проводиться дослідження питань охорони праці та необхідні розрахунки.

Ключові слова: GSM, UMTS, OFDM, LTE, безпроводна мережа.

**ABSTRACT**

Bevz D.V. Analysis and optimization of mobile communication networks - master's qualification work for speciality 172 – Telecommunications and Radio Engineering - Vinnytsia: VNTU 2023 110 pages, 12 - fig., 22 - table, 35 - bibl. – Ukrainian language.

The purpose of work is to analyze the features of the construction of cellular mobile communication networks and their optimization according to a set of quality indicators. In the process of research, the analysis of construction features and main parameters of mobile cellular networks is carried out. According to the formed list of parameters, the possibility of optimizing the mobile communication network is considered. Also, after analyzing the main characteristics and optimizing them for modern usage scenarios, the optimal options for the topology of the transport network are selected. At the final stage of the work, a study of labor protection issues and the necessary calculations are carried out.

Keywords: GSM, UMTS, OFDM, LTE, wireless network.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	12
1.1 Постановка задачі дослідження в галузі побудови стільникових мереж мобільного зв'язку .....	12
1.2 Аналіз сучасного стану в галузі побудови стільникових мереж мобільного зв'язку .....	15
1.3 Аналіз та оцінювання основних параметрів стільникових мереж мобільного зв'язку .....	23
2 ОПТИМІЗАЦІЯ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	31
2.1 Побудова математичної моделі мережі в задачах оптимізації пропускної здатності каналу з метою мінімізації середнього часу затримки.....	31
2.2 Вибір оптимальних варіантів мережі передавання інформації з урахуванням показників якості.....	39
3 ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ВАРІАНТІВ ТОПОЛОГІЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	43
3.1 Планування транспортної мережі стільникового мобільного зв'язку.....	43
3.2 Особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при плануванні транспортної мережі мобільного зв'язку .....	48
3.2.1 Вибір показників якості та формування множини допустимих варіантів транспортних мереж .....	52
3.2.2 Знаходження Парето- оптимальних варіантів і вибору оптимального проектного варіанту топології транспортної мережі .....	54

3.3 Вибір оптимальних варіантів топології транспортної мережі по сукупності показників неготовності і вартості .....	54
3.3.1 Оцінка показників якості транспортної мережі .....	55
3.3.2 Формування множини варіантів топології транспортної мережі .....	57
3.4 Практичні рекомендації по багатокритеріальному вибору транспортних мереж мобільного зв'язку .....	60
3.5 Вибір оптимальної топології мережі мобільного зв'язку 4 покоління .....	63
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	68
4.1 Оцінювання наукового ефекту .....	67
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	71
4.3 Оцінка важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	85
4.4 Висновок до розділу 4 .....	86
5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	88
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	88
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	91
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів НС .....	96
5.4 Розробка превентивних заходів по підвищенню стійкості роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій .....	98
ВИСНОВКИ.....	99
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	101
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина .....	105
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	110

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
- ВК – вузли комутації
- ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку
- ГДК – гранично допустима концентрація
- КЗ – канали зв'язку
- КПО – коефіцієнт природної освітленості
- РЕА – радіоелектронна апаратура
- СМЗ – стільникова мережа зв'язку
- СММЗ – стільникова мережа мобільного зв'язку
- СФ – смуговий фільтр
- ФНЧ – фільтр нижніх частот
- ФЧХ – фазо-частотна характеристика
- ЧМ – частотна модуляція
- ШР – шкідливі речовини
- BER (Bit Error Rate) – коефіцієнт бітових помилок
- BS (Base Station) – базова станція
- BSC (Base Station Controller) – контролер базової станції
- BSS (Base Station System) – система базових станцій
- BTS (Base Transceiver Station) – базова приймально-передавальна станція
- CDMA (Code Division Multiple Access) – множинний доступ з кодовим розділенням
- CN (Core Network) – ядро мережі
- FDM (Frequency Division Multiplexing) – мультиплексування з поділом по частоті
- FSK (Frequency Shift Keying) – частотна маніпуляція

HSPA (High Speed Packet Access) – технологія безпроводного широкосмугового зв'язку

MS (Mobile Station) – мобільна станція

MSC (Mobile Switching Center) – центр комутації мобільної мережі

NMC (Network Management Center) – центр управління мережею

PDN (Packet Data Network) – мережа пакетної передачі даних

PLMN (Public Land Mobile Network) – публічна мобільна наземна мережа

PSTN (Public Switched Telephone Network) – публічна телефонна комутована мережа

QoS (Quality Of Service) – якість обслуговування

RAN (Radio Access Network) – мережа радіодоступу

RNC (Radio Network Controller) – контролер радіомережі

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) – універсальна система мобільного зв'язку

UTRAN (UMTS Terrestrial RAN) – наземна радіомережа UMTS

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) – широкосмуговий доступ з кодовим розділенням каналів

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – технологія бездротового доступу з мікрохвильовими інтерфейсами



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасні мобільні мережі стали найбільш важливою складовою інформаційної інфраструктури і грають ключову роль у багатьох аспектах суспільного життя. Вони використовуються для управління банківськими рахунками та проведення переговорів на рівні вищих посадових осіб в урядових структурах та міжнародних організаціях.

У наш час світове суспільство характеризується широким поширенням мобільного зв'язку. Наразі в більшості країн кількість абонентів мобільного зв'язку значно перевершує кількість абонентів стаціонарних мереж. Зрештою, багато абонентів відмовляться від стаціонарних з'єднань. Попри те, що стаціонарний зв'язок має свої переваги у надійності та якості послуг, особливо в сфері широкопasmових мереж і мультимедійних сервісів.

В даний час експерти та технічні спеціалісти у сфері телекомунікаційних компаній, операторів зв'язку та провайдерів послуг стикаються з складними завданнями, пов'язаними із безперебійним переходом на нові технології. Цей процес вимагає впровадження нових технологій та співіснування зі старими, з метою раціонального використання обох типів технологій в інтересах як операторів, так і користувачів [1,2].

У зв'язку з цим набуває важливості огляд і детальний аналіз поточного стану сучасних систем і стандартів мобільного зв'язку як у світі загалом, так і в Україні зокрема.

В Україні на даний момент понад 50 мільйонів абонентів різних мобільних операторів. За останні десять років кількість абонентів збільшилася в 1000 разів. Мобільні телефони стали необхідною складовою нашого повсякденного життя і основним засобом зв'язку.

Для забезпечення роботи мобільного зв'язку використовується розгалужена

мережа базових станцій з фіксованими антенами, які передають інформацію до комутаційних центрів за допомогою радіочастотних сигналів. Усього в світі діє близько 1,4 мільйонів базових станцій, і понад 20 тисяч з них розташовано в Україні.

Засоби телекомунікацій є важливими компонентами сучасних систем та мереж інфокомунікацій. Тому при проектуванні систем і мереж мобільного зв'язку виникає необхідність вибору оптимального варіанту з деякої допустимої множини варіантів засобів телекомунікацій з урахуванням сукупності суперечливих техніко-економічних вимог, які характеризуються зниженням відповідних показників якості. Це викликає необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації при виборі оптимального рішення із множини допустимих проектних варіантів.

*Аналіз останніх досліджень.* Аналіз літератури в області застосування методів багатокритеріальної оптимізації при побудові стільникових мереж мобільного зв'язку показав, що ці питання детально розглядаються як у зарубіжній, так і у українській літературі [3,4,5,6].

Питання багатокритеріальної оптимізації широко використовуються при побудові та оптимізації мереж зв'язку [7,8] та стратегічного керування телекомунікаційними мережами [9,10].

Результатом розвитку телекомунікаційних технологій є поява мереж п'ятого покоління (5G). Вважається, що мережі четвертого покоління (4G) будуть домінуючими в усьому світі і після 2023 року, через що можна говорити не про заміну існуючих технологій на 5G, а про їх розвиток і доповнення новими технологіями радіодоступу, призначеними для конкретних сценаріїв і певних цілей.

Аналіз стану в області планування і оптимізації мереж мобільного зв'язку показує, що процес оптимізації проводиться, як правило, після етапу планування та в більшості випадків в процесі експлуатації. Крім того, при плануванні не

враховується сукупність суперечливих показників якості [11].

Очевидно, що поява мереж нового покоління по ряду причин має найбільшу актуальність в великих містах. Це пов'язано з високими запитами по швидкості передачі даних, пропускну здатності, місткості мережі, а також з вимогами до малого часу відгуку і низькому енергоспоживанню мобільних пристроїв. Також, з появою мереж нового покоління виникає необхідність розв'язання актуальної задачі багатокритеріальної оптимізації і проектних рішень при плануванні стільникових мереж мобільного зв'язку. Врахування показників якості дозволяє визначити найбільш неоптимальні варіанти побудови та зменшити кількість проблем в процесі експлуатації.

*Метою даної кваліфікаційної роботи є проведення аналізу особливостей побудови мереж стільникового мобільного зв'язку та їх оптимізація за сукупністю показників якості.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *задачі*:

- провести аналіз особливостей побудови та основні параметри мереж стільникового мобільного зв'язку;
- провести аналіз параметрів та методології розрахунку параметрів мереж стільникового мобільного зв'язку;
- провести оптимізацію мереж стільникового мобільного зв'язку за сукупністю показників затримки та вартості;
- вибрати оптимальні варіанти мережі з урахуванням сукупності показників якості;
- синтезувати оптимальні варіанти топології транспортної мережі мобільного зв'язку.

*Об'єктом дослідження є процеси проходження інформаційних сигналів в стільникових мережах мобільного зв'язку.*

*Предметом дослідження у даній роботі є стільникові мережі мобільного зв'язку.*

*Методи досліджень* базуються на використанні теорії багатокритеріальної оптимізації, методах знаходження Парето-оптимальних проектних рішень, теорії мереж та систем мобільного зв'язку.

*Новизна одержаних результатів* полягає в наступному:

- проведено аналіз методів побудови стільникових мереж мобільного зв'язку.
- Запропоновано алгоритм оцінки основних показників якості стільникових мереж мобільного зв'язку.
- Запропоновано методику вибору оптимальних варіантів мережі передавання даних з врахуванням сукупності показників якості.
- проаналізовано методи вибору оптимальної топології транспортної мережі за сукупністю показників неготовності та вартості.

*Практичне значення* роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень можна зробити висновок про відповідність описаних методів побудови мереж стільникового мобільного зв'язку вимогам сучасних користувачів. У результаті проведеного аналізу буде зроблено усі необхідні висновки, що дозволять оцінити стан галузі мобільних стільникових комунікацій та запропонувати обґрунтовані покращення для процесів побудови нових та модернізації існуючих мереж.

*Апробація результатів роботи.* Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ЛІІ науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

*Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи.* Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлено у 2-х тезах науково-технічних конференцій.

# 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ ТА ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Постановка задачі дослідження в галузі побудови стільникових мереж мобільного зв'язку

На основі аналізу літератури у галузі планування стільникових мереж мобільного зв'язку (СММЗ) можна зазначити, що дослідження з оптимізації цього процесу детально описані головним чином у зарубіжних джерелах. Деякі аспекти оптимізації при плануванні СММЗ також розглядаються в україномовних джерелах, але часто це відбувається за допомогою перекладів з іноземних публікацій [11].

Методи оптимізації широко використовуються при створенні та управлінні телекомунікаційними системами. У галузі телекомунікацій відомі випадки використання багатокритеріальної оптимізації, зокрема, при стратегічному управлінні телекомунікаційними мережами та передачі даних [5]. Однак поки що відсутні дані про використання методів багатокритеріальної оптимізації в процесі планування стільникових мереж мобільного зв'язку.

Важливо враховувати, що результати номінального планування СММЗ мають значущий вплив на результати наступного етапу детального планування, на основі яких приймаються рішення щодо реалізації діючих стільникових мереж мобільного зв'язку [12].

Важливо зазначити, що в процесі експлуатації стільникових мереж мобільного зв'язку постійно проводиться моніторинг з метою контролю за відповідністю якості роботи мережі встановленим техніко-економічним вимогам. У випадку, якщо виявляються невідповідності, здійснюється перепланування мережі, відоме як «післяпускова оптимізація». Кількість таких

перепланувань суттєво залежить від якості проектних рішень, отриманих під час номінального та детального планування СММЗ.

Необхідно зауважити, що завдання номінального та детального планування СММЗ не було спрямоване на оптимізацію, і це було виконано без врахування сукупності показників якості. Це призвело до того, що потенційно оптимальні характеристики проектних рішень не були досягнуті [13].

Математично задача багатокритеріальної оптимізації формулюється таким чином:

$$\begin{aligned} \min \{ & f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x}) \}, \\ \bar{x} = & (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \end{aligned} \quad (1.1)$$

Задача багатокритеріальної оптимізації полягає у пошуку вектора цільових змінних, який задовольняє накладеним обмеженням та оптимізує векторну функцію, елементи якої відповідають цільовим функціям. Ці функції утворюють математичне описання критерію задовільності та, зазвичай, взаємно конфліктують. Звідси, «оптимізувати» означає знайти такий розв'язок, за якого значення цільових функцій були б прийнятними для постановника задачі.

Для вирішення даної задачі використовують методи ідеальної точки та метод послідовних поступок.

Метод ідеальної точки використовує множину Парето, яка у даному випадку складається з допустимих точок завдання, які не можуть бути «зрушені» в межах допустимої множини з поліпшенням відразу за обома критеріями.

Принцип методу полягає в тому, що оптимальна альтернатива повинна мати найкоротшу відстань від найкращого ідеального рішення і найвіддаленішу відстань від найгіршого. Найкраще і найгірше ідеальні рішення досягаються на штучних альтернативах, які висуваються ОПР на основі гіпотетично найкращих

і найгірших значень всіх критеріїв. Підраховує результати, порівнюючи евклідові відстані між фактичними альтернативами та гіпотетичними.

Метод ідеальної точки полягає у знаходженні на границі Парето точки, найближчої до точки утопії, що задається об'єктом, що приймає рішення (ОПР). Зазвичай ОПР формулює мету у вигляді бажаних значення показників, і часто як координати цільової точки вибирається поєднання найкращих значень всіх критеріїв (зазвичай ця точка не реалізується при заданих обмеженнях, тому її і називають точкою утопії).

Ідеальна точка визначається як вектор  $y^I = (y_1^I, \dots, y_p^I)$ , кожна з координат якого має оптимальне значення відповідної складової цільової функції:

$$y_k^I = \min_{x \in X} f_k(x) = \min_{y \in X} y_k. \quad (1.2)$$

Утопічну точку  $y^U$  обчислюють на основі ідеальної:

$$y^U = y^I - \epsilon U \quad (1.3)$$

$\epsilon > 0, U$  - одиничний вектор.

Процедура розв'язування багатокритеріальної задачі *методом послідовних поступок* полягає у тому, що часткові критерії нумерують у порядку їхньої відносної важливості. Максимізують перший, найважливіший критерій; потім призначають величину припустимого зниження значення цього критерію і максимізують другий за важливістю частковий критерій за умови, що значення першого критерію не повинно відрізнятись від максимального більш ніж величину встановленого зниження (поступки).

Після цього, знову призначають величину поступки, але вже другому

критерію і знаходять максимум третього за важливістю критерію за умови, щоб значення у перших двох критеріїв не відрізнялися від раніше знайдених максимальних значень більш як на величини відповідних поступок.

Далі аналогічним чином по черзі використовуються й інші часткові критерії; оптимальною зазвичай вважають будь-яку стратегію, яка отримана під час розв'язування задачі пошуку умовного максимуму останнього за важливістю критерію. Отже, під час використання методу послідовних поступок багатокритеріальну задачу зводять до почергової максимізації часткових критеріїв і вибору величин поступок. Величини поступок характеризують відхилення пріоритету перших приватних критеріїв над іншими від лексикографічного: чим менші поступки, тим жорсткіший пріоритет.

Дана інформація підкреслює актуальність вирішення завдання планування і оптимізації мереж з урахуванням цієї сукупності показників якості, зокрема на етапах номінального планування і планування транспортних мереж мобільного зв'язку.

## 1.2 Аналіз сучасного стану в галузі побудови стільникових мереж мобільного зв'язку

Звіти провідних операторів зв'язку, які користуються мережами 4G (LTE), свідчать про те, що в абонентському трафіку переважають послуги відеозв'язку. Це також вказує на те, що у мережах п'ятого покоління 5G ці послуги також стануть основною складовою частиною передаваного трафіку [1,2].

Наразі обсяг трафіку відеопослуг, згідно з оцінками операторів, складає від 70% до 80% від загального трафіку у мережах 4G (LTE). Серед цих показників близько 35% трафіку припадає на мережу YouTube, а приблизно 40% - на чисте відео та відеоспостереження в мережах M2M.

Крім того, до 2025 року кількість підключень M2M в мережах мобільних



операторів очікується зростати за показником CAGR = 45%, досягаючи 3,1 млрд з'єднань. З урахуванням зростаючої масовості (Massive M2M) послуги M2M також превалюватимуть над основними голосовими послугами в мережах 4G та 5G.

Стратегія розвитку 5G в Європі має за мету надати абонентам можливість обирати, що підключати до свого телевізора до 2025 року: чи то модем 5G, чи ефірну антену з DVB-T2. Це вимагатиме впровадження відповідних механізмів керування якістю. Таким чином, розробники зосередяться на вдосконаленні механізмів керування якістю, зокрема, щодо відеотрафіку і M2M-сервісів, удосконаленні алгоритмів контролю та розробці нових методів оцінки якості.

Розвиток мереж 5G спрямований на створення ультращільних мереж (UDN) безпроводного доступу з гетерогенною структурою стільників радіусом не більше 50 метрів. Це буде забезпечено новими видами сигнально-кодових конструкцій радіосигналів, які значно підвищують спектральну ефективність порівняно з мережами 4G і забезпечують передачу даних зі швидкістю до 10 Гбіт/с.

Для досягнення таких швидкостей передачі даних потрібно використовувати широкі смуги каналів як в прямому (DL), так і в зворотному (UL) каналах з неперервним спектром шириною від 500 до 1000 МГц, що в 25-50 разів перевищує ширину каналів, що використовуються в 4G.

Виділення таких смуг для каналів 5G можливе лише на верхній межі сантиметрового і міліметрового діапазонів частот, що призводить до істотного зменшення зон покриття базових станцій 5G через зменшення радіуса стільників до 50-100 метрів [1].

Підвищення спектральної ефективності у стільнику мережі 5G можливе за допомогою застосування неортогональних методів доступу (NOMA) у мережах КАМ і використання неортогональних сигналів, таких як FTN, F-OFDM-сигнали та інші. Порівняння цих вимог з аналогічними вимогами до мереж 4G показує зростання спектральної ефективності в 3-5 разів.

Характеристики вимог до спектральної ефективності в стільнику мережі 5G для різних каналів передачі наведено на рис. 1.1.

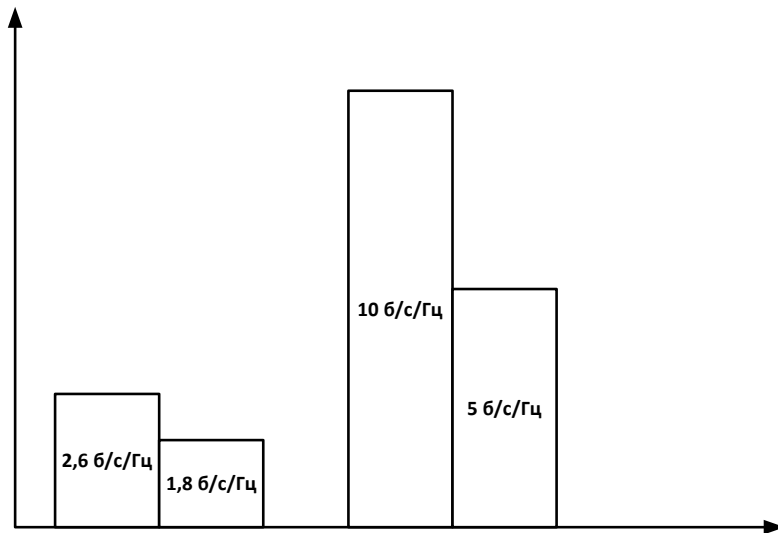


Рисунок 1.1 – Спектральна ефективність у стільнику мереж 5G

Інфраструктура мереж 5G буде заснована на хмарних технологіях як у мережах радіодоступу (CloudRAN) з програмно-обумовленою мережею SDR, так і в базовій (опорній) мережі (CloudCN) з програмно-обумовленою інфраструктурою SDN. У мережах 5G з'являться нові рішення в галузі інфраструктури, такі як рухомі вузли (базові станції) зв'язку (Moving 5G Node) і рухомі транспортні мережі (Moving 5G Backhaul). Це обумовлено необхідністю впровадження 5G для створення інтелектуальних транспортних мереж, які сприятимуть оснащенню міжнародних автомобільних магістралей рухомими мережами зв'язку 5G для автомобілів зі швидкістю більше 200 км/год. Побудовані на базі застосувань і пристроїв M2M для сценарію V2V (Vehicle-to-Vehicle), вони забезпечать безпечний рух і мультимедійний обмін даними, використовуючи автомобільні пристрої 5G, об'єднані в mesh-мережі [1,3].

Мережі 5G будуть орієнтовані на значне поліпшення характеристик, включаючи якість обслуговування. Оскільки принципи керування QoS

залишаться незмінними при переході від 4G до 5G, основні зусилля розробників 5G будуть спрямовані на віртуалізацію мережних функцій, що відповідають за керування та контроль QoS у мережі. Ще одним напрямком розвитку мереж 5G будуть алгоритми класифікації трафіку, які забезпечать підтримку вимог ринку щодо динаміки зміни попиту на послуги та потреб абонентів. У перспективі це стосуватиметься групування навколо відеопослуг і послуг, що базуються на масовому застосуванні пристроїв M2M в різних сферах промисловості та серед споживачів [1].

На даний момент загалом прийнято виділяти чотири покоління мереж мобільного зв'язку, які були впроваджені на практиці. Кожне наступне покоління вирішує проблеми та обмеження попереднього, використовуючи абсолютно нові технологічні можливості та пропонуючи вищу якість обслуговування, більш високі швидкості передачі голосу та цифрових даних [8].

До першого покоління мереж мобільного зв'язку відносяться аналогові системи. Мережі цього покоління використовували метод FDMA (Frequency Division Multiple Access), і надавали базові послуги, такі як встановлення зв'язку, реєстрація вартості дзвінків, організація спілкування між рухомими абонентами та абонентами стаціонарної телефонної мережі загального користування тощо. Ефективність використання аналогових систем мобільного зв'язку оцінювалася за такими параметрами, як кількість викликів на стільник за годину в піковий час, середнє навантаження на стільник та інші.

Більшість цих систем використовували метод TDMA (Time Division Multiple Access) для поділу каналів. Проте, до перших систем, таких як IS-95, також належали системи, що базувалися на технології шумоподібних сигналів та методі CDMA (Code Division Multiple Access), що передбачав множинний доступ з кодовим розділенням каналів [12].

В порівнянні з аналоговими системами, цифрові системи 2G надають користувачам розширений набір послуг та покращену якість зв'язку. Вони також

взаємодіють з цифровими мережами, інтегруючи служби, такі як ISDN (інтегрована служба цифрової мережі), передача даних у пакетному режимі (PDN) та телефонні мережі загального користування (PSTN).

Основні стандарти другого покоління включають GSM, D-AMPS (ADC), JDC і IS-95. Стандарт GSM є найпопулярнішим та найбільш поширеним стандартом мобільного зв'язку у світі, який виділяється як за обсягом покриття, так і кількістю абонентів. Сучасні системи GPRS та EDGE розглядаються як покоління 2,1G та 2,75G. GPRS (General Packet Radio Service - пакетний радіозв'язок загального користування) є доповненням до технології мобільного зв'язку GSM, яка надає пакетну передачу даних [1].

EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) – цифрова технологія мобільного зв'язку, яка функціонує як розвиток GPRS мереж. Для підтримки EDGE у мережі GSM потрібні певні модифікації та удосконалення.

Наступним кроком у розвитку мобільної телефонії та передачі даних є мережі третього покоління (3G).

Мережі 3G відрізняються від мереж 2G значно вищою швидкістю передачі даних та надають більш широкий спектр послуг високої якості. Ці мережі дозволяють як симетричну, так і асиметричну передачу даних, підтримують як каналну, так і пакетну комутацію, мають високу ефективність використання частотного спектру, можливість глобального роумінгу та надають послуги, які були недоступні в мережах другого покоління (наприклад, потокове мовлення, передачу мультимедійних даних, високошвидкісний інтернет і багато інших).

Розвиток мереж третього покоління поділяється на два основних напрями:

1. WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) – це технологія, яка використовує широкосмуговий множинний доступ з кодовим поділом каналів. Ця технологія сумісна з мережами стандарту GSM і більш відома як UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Важливо відзначити, що стандарт UMTS є одним із найбільш розповсюджених в Україні.

2. CDMA 2000 – це американська технологія, яка також використовує принцип розширення спектру, але, на відміну від WCDMA, не підтримує міжмережну взаємодію з мережами другого покоління [18].

На даний момент велика частина ринку послуг мобільного зв'язку все ще використовує технології 2G і 3G. Саме тому було проведено дослідження для мереж мобільного зв'язку другого і третього поколінь.

Структурні схеми мереж для другого покоління на прикладі стандарту GSM та для третього покоління на прикладі стандарту UMTS наведені на рис. 1.2 та рис. 1.3 відповідно.

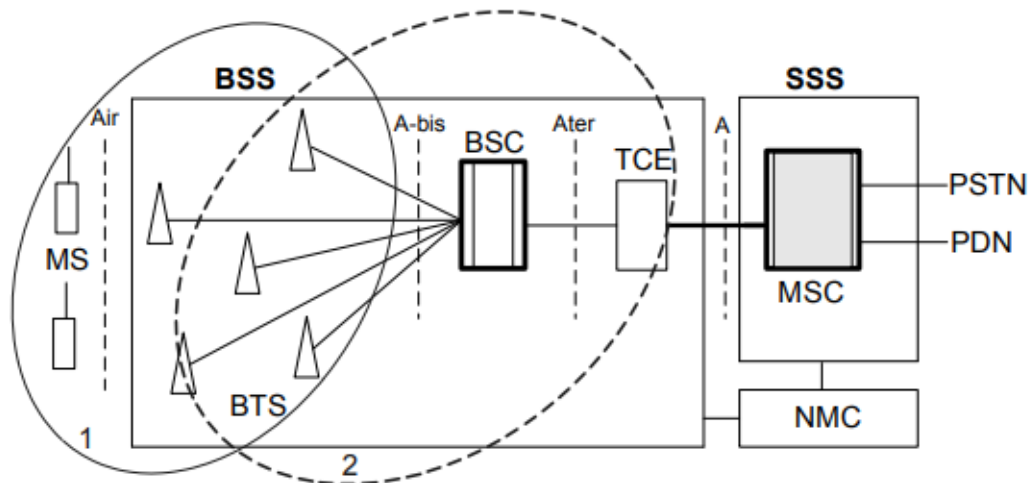


Рисунок 1.2 – Структура мережі мобільного зв'язку другого покоління (GSM)

BTS Base Transceiver Station  
 BSC Base Station Controller  
 BSS Base Station System  
 MSC Mobile Switching Center  
 NMC Network Management Center  
 PDN Packet Data Network  
 PSTN Public Switched Telephone Network  
 SS Switching Subsystem

Базова станція  
 Контролер базових станцій  
 Система базових станцій  
 Мобільний центр комутації  
 Центр управління мережею  
 Мережа з комутацією пакетів  
 Тлф. мережа загального користування  
 Система комутації

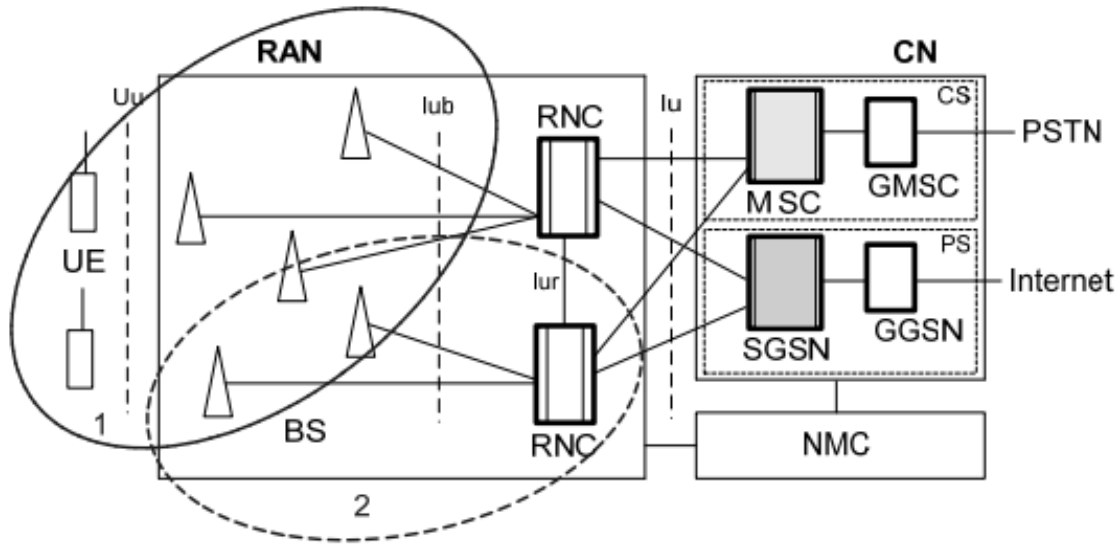


Рисунок 1.3 – Структура мережі мобільного зв'язку третього покоління (UMTS)

BS Base Station	Базова станція
RNC Radio Network Controller	Контролер радіомережі
CN Core Network	Ядро мережі
GGSN Gateway GPRS Support Node	Шлюз обміну пакетного трафіку
GMSC Gateway Mobile Switching Center	Шлюзовий центр комутації
SGSN Serving GPRS Support Node	Сервісний вузол пакетного трафіку
UE User Equipment	Обладнання абонента
NMC Network Management Center	Центр управління мережею
PSTN Public Switched Telephone Network	Тлф. мережа загального користування

Радіомережа (BSS) є важливою частиною мережі мобільного зв'язку, що включає в себе базові станції, мобільні станції та зв'язок між ними. Ця складова мережі має особливе значення, оскільки вона безпосередньо пов'язана з мобільними користувачами. Радіомережа повинна забезпечувати належне покриття, рівень потужності та якість зв'язку для користувачів [1].

Транспортна мережа включає базові станції, базові контролери, центри комутації і забезпечує взаємодію між усіма цими вузлами мережі.

Наступним кроком у розвитку глобальних телекомунікаційних технологій у сфері мобільного зв'язку було створення та впровадження стандартів четвертого покоління (4G). Ці стандарти спрямовані на підвищення швидкості передачі даних та поліпшення якості послуг для користувачів, при цьому знижуються витрати на експлуатацію телекомунікаційного обладнання.

Системи 4G вирізняються високою пропускнуою здатністю, повною інтеграцією з провідними IP-мережами, адаптивним управлінням частотним спектром та високою якістю обслуговування мультимедійного трафіку. До стандартів 4G входить технологія LTE (Long Term Evolution), яку досі активно експлуатують та оновлюють провідні телекомунікаційні компанії та науково-дослідні центри.

Основними цілями розробки технології LTE є зниження витрат та збільшення швидкості передачі даних, надання більшого спектру послуг за менші кошти та підвищення гнучкості використання існуючих систем.

Найбільш новітньою на даний час є технологія зв'язку п'ятого покоління (5G), що відзначається основними перевагами:

- значно підвищена швидкість передачі даних: 5G здатний надавати швидкості, що в декілька разів перевищують ті, які можливі з 4G. Це відкриває нові можливості для завантаження та передачі великих файлів, стрімінгу високоякісного відео та інших вимогливих застосунків;

- знижена затримка: 5G забезпечує значно меншу затримку, що має критичне значення для онлайн-ігор, автономних транспортних засобів та Інтернету речей (IoT);

- підвищена щільність підключень: 5G здатний підключати значно більше пристроїв на одиницю площі в порівнянні з 4G, що стає ключовим фактором для розвитку IoT та смарт-міст.

### 1.3 Аналіз та оцінювання основних параметрів стільникових мереж мобільного зв'язку

При проектуванні СММЗ для розробки номінального плану мережі, частина параметрів (вихідні дані) задаються замовниками, а інші розраховуються відповідно до використовуваної методики розрахунку.

На етапі номінального планування необхідно використати наступні вихідні дані:

- $h_{BTS}$  – висота підвісу антени базової станції, м;
- $G_{BTS}$  – коефіцієнт посилення антени базової станції, дБ;
- $P_{BTS}$  – потужність передавача базової станції, Вт;
- $S_0$  – площа території, що обслуговується, км<sup>2</sup>;
- $\beta$  – активність одного абонента за ГНН, Ерл;
- $N_a$  – число абонентів, що обслуговуються;
- $\Delta F_C$  – смуга частот базових станцій на передачу, МГц;
- $P_l$  – допустима ймовірність блокування виклику;
- $p_t$  – відсоток часу, протягом якого допускається, щоб відношення сигнал/шум на вході приймача MS було менше встановленого;
- $k$  – параметр загасання радіохвиль.

До параметрів, що розраховуються, відносяться наступні:

- $C$  – розмірність кластера (для мереж другого покоління);
- $N_k$  – загальна кількість частотних каналів у мережі;
- $n_s$  – кількість каналів в одному секторі стільника;
- $R$  – радіус стільника;
- $A$  – допустиме телефонне навантаження;
- $N_{a\ BTS}$  – число абонентів, що обслуговуються однією BTS;
- $N_{BTS}$  – необхідна кількість базових станцій;



- $P_{ош}$  – ймовірність помилки;
- $\gamma$  – ефективність використання радіочастотного спектру.

Під час визначення основних технічних параметрів і показників якості стільникових мереж мобільного зв'язку рекомендується розумно застосовувати метод, який передбачає використання відповідних співвідношень від (1.4) до (1.27).

1. Величина допустимого телефонного навантаження на одному секторі одного стільника або сектору (для базових станцій з антенами, які мають кругову діаграму спрямованості), визначається з використанням одного із таких співвідношень:

$$A = n_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( p_{\text{бл.}} \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right] \text{ для } p_{\text{бл.}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (1.4)$$

та

$$A = n_0 + \sqrt{\left[ \frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left( p_{\text{бл.}} \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right) \right]} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ для } p_{\text{бл.}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}. \quad (1.5)$$

У виразах (1.4) і (1.5)  $n_0$  – допустима кількість абонентів, які можуть одночасно працювати в одному секторі кожного стільника, при заданій якості прийому сигналів будь-якої MS ( $\rho_0$ ) та заданій надійності прийому ( $p_t$ ).

Для мереж другого та третього покоління параметр  $n_0$  розраховується по-різному, оскільки мережі другого покоління використовують технологію FDMA/TDMA, а мережі третього покоління CDMA.

Таким чином, для розрахунку параметра  $n_0$  СММЗ другого покоління необхідно використовувати вирази (1.6) – (1.14).

$$n_0 = n_s \cdot n_a, \quad (1.6)$$

де  $n_s$  - кількість абонентів, яка одночасно може використовувати один частотний канал (визначається стандартом);

$n_a$  - число радіочастот.

Число радіочастот, необхідне обслуговування абонентів в одному секторі кожної стільниці, визначається виразом [12]:

$$n_s = \text{int}(N_k / C \cdot M), \quad (1.7)$$

де  $N_k$  – кількість частотних каналів.

Загальна кількість частотних каналів, що виділяються для розгортання СММЗ на певній території, визначається виразом [12]:

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (1.8)$$

де  $\text{int}(x)$  – ціла частина числа  $x$ ;

$F_k$  - смуга частот, що займає один частотний канал системи стільникового зв'язку (визначається стандартом).

Для знаходження необхідної розмірності кластера  $C$  при заданих значеннях  $p_0$  і  $p_t$  використаємо співвідношення [5]

:

$$p(C) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp(-x^2 / 2) dx \right] \cdot 100, \quad (1.9)$$

де  $p(C)$  - відсоток часу коли відношення сигнал/шум буде знаходитися

нижче захисного інтервалу  $p_0$ .

Інтеграл в 1.6 є табульованою Q-функцією:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp(-x^2 / 2) dx. \quad (1.10)$$

Нижня межа даного інтегралу має наступний вигляд:

$$x_1 = \frac{10 \lg(1 / \beta_e) - p_0}{\alpha_p}, \quad (1.11)$$

де

$$\beta_e = \left( \sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left[ \frac{\gamma^2 (\sigma^2 - \alpha_e^2)}{2} \right], \quad (1.12)$$

$$\alpha_p^2 = \sigma^2 + \alpha_e^2, \quad (1.13)$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp(\gamma^2 \sigma^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}{\sum_{i=1}^l \beta_i} \right\}, \quad (1.14)$$

$\sigma$  - параметр, що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня сигналу прийому; коефіцієнт  $\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23$ .

Коефіцієнти  $\beta_i$  (1.11) представляють собою медіанне значення втрат радіохвиль у напрямку поширення перешкоди на  $i$ -му напрямку. Ці коефіцієнти зворотно пропорційні четвертій ступені відстані до джерела перешкоди. Змінна  $l$  вказує на кількість базових станцій, які можуть впливати на сусідні кластери.

Значення  $l$  і  $\beta_i$  (4.11) залежать від типу використовуваних антен на базових трансиверах (BTS), які можуть бути неспрямованими або секторними. Існують

три можливі варіанти:

а) якщо  $\varphi = 360^\circ$  і  $M=1$ ,  $l=6$  і  $\beta_1 \beta_2 = (q-1)^{-4}$ ,  $\beta_2 = \beta_3 = q^{-4}$ ,  $\beta_5 = \beta_6 = (q+1)^{-4}$ ;

б) якщо  $\varphi = 120^\circ$  і  $M=3$ ,  $l=2$  і  $\beta_1 = (q + 0,7)^{-4}$ ,  $\beta_2 = q^{-4}$ ;

в) якщо  $\varphi = 60^\circ$  і  $M=6$ ,  $l=1$  і  $\beta_1 = (q + 1)^{-4}$ .

Тут  $M$  – число секторів, а значення  $q = D/R = (3 \cdot C)^{-2}$ . При заданих значеннях  $\rho_0$ ,  $\sigma$  та  $M$  для кількох значень  $C$  проводять розрахунки відсотка часу зриву зв'язку  $p(C)$ . Після знаходження величини  $\lambda l$  за таблицями визначають відсоток часу  $p(C)$ . Якщо виконується умова  $p(C) \leq p_t$ , то обране значення розмірності кластера відповідає заданим умовам проектування, і якщо  $p(C) > p_t$ , то необхідно виконати розрахунки при великих значеннях  $C$ .

Для розрахунку параметра  $n_0$  СММЗ третього покоління необхідно використовувати вирази від (1.15) до (1.20).

Зазвичай у системах з CDMA прийнятною вважається якість прийому інформації, при якому ймовірність помилкового прийому одного інформаційного знаку становить  $10^{-3}$ , причому  $\rho_0 = 5$  (7 дБ).

При цьому величина  $n_0$  визначається виразом:

$$n_0 = \left( \frac{1 - \lambda}{\alpha p_0} \right) \frac{(B_r / B_{\text{inf}})}{2 + \exp[m_0 + K_T \sigma_0]}, \quad (1.15)$$

де  $\lambda = 0,2$  – потужність передавача, що іде на передачу пілот-сигналу;

$B_r$  - смуга частотного сигналу, ГЦ;

$B_{\text{inf}}$  - швидкість передачі інформації, біт/с;

$m_0$  - параметр;

$K_T$  - коефіцієнт, пов'язаний з допустимим відсотком часу зменшення відношення сигнал/перешкода щодо  $\rho_0$ .

Коефіцієнт  $K_T$  пов'язаний із параметром  $p_t$  співвідношенням:

$$p_T = 100 \int_{K_T}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}. \quad (1.16)$$

Відповідно до значення  $p_T = 10\%$  відповідає величина  $K_T = 1,29$ .

Величина параметра  $m_0$  визначається співвідношенням:

$$m_0 = \ln \left[ \frac{\xi_1 \exp\left(\frac{\gamma^2 \sigma^2}{2}\right)}{\sqrt{(1-\xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2)}} \right] - \frac{3\gamma}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sigma, \quad (1.17)$$

де  $\sigma$  – дисперсія флуктуації сигналу в точці прийому ( для стільникових систем  $\sigma = 4 \dots 10$  дБ,  $\gamma = 0,1 \ln(10) = 0,23$ ,

$$\begin{aligned} \xi_1 &= 3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2}, \\ \xi_2 &= \left[ 3(M+1)^2 \cdot 2^{-2(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k} \right] \cdot \left[ 3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2} \right], \end{aligned} \quad (1.18)$$

$k = 3 \dots 4$  – параметр загасання радіохвиль.

Параметр  $\sigma_0$ , що визначає дисперсію гаусової випадкової величини  $z_0$ , середнє значення якої дорівнює нулю, визначається для мереж третього покоління наступним співвідношенням:

$$\sigma_0 = \sqrt{\ln \left[ (1 - \xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2) \right] + 0,03 \cdot \sigma^2}. \quad (1.19)$$

2. Кількість користувачів, які можуть бути обслуговані однією базовою

станцією, визначається шляхом оцінки числа секторів, допустимого навантаження на телефонну мережу і активності користувачів. Ця кількість визначається відповідним співвідношенням:

$$N_{a\text{ BTS}} = M \text{ int}(A / \beta). \quad (1.20)$$

3. Кількість базових станцій, яка потрібна для задовільного обслуговування визначеної абонентської кількості, дорівнює:

$$N_{\text{ BTS}} = \text{int}(N_a / N_{a\text{ BTS}}), \quad (1.21)$$

де  $N_a$  = задана кількість абонентів, які має обслуговувати стільникова мережа мобільного зв'язку.

4. Під час розрахунку радіусу стільника припускаємо, що навантаження розподілено по всій зоні рівномірно. Тоді радіус визначаємо за наступним виразом:

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{\text{ BTS}}}}. \quad (1.22)$$

Один із ключових показників ефективності бездротової стільникової мережі зв'язку – це ймовірність помилки, що виникає під час передачі даних під час сеансу зв'язку. Зазвичай розрахунки ймовірності помилки проводяться для найгіршого сценарію, коли мобільний пристрій перебуває на межі зони обслуговування.

Щодо ймовірності помилки в мережах другого покоління, при значенні  $C \geq 3$ , можна використовувати наступну формулу для розрахунку [12]:

$$P_{out} \approx \frac{1}{(\sqrt{3}C - 1)^{2k}}. \quad (1.23)$$

Ефективність використання радіоспектру в мережах другого покоління визначається кількістю активних абонентів, які припадають на одиницю доступної смуги частот для передачі або прийому:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C}, \quad (1.24)$$

а для мереж третього покоління:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k}. \quad (1.23)$$

Коли всі основні параметри розраховані, проводиться розробка номінального (попереднього) плану мережі.

Отже, було проведено аналіз особливостей побудови мереж стільникового мобільного зв'язку та визначено основні параметри та особливості побудови та планування мережі, а також розглянуто методику розрахунку основних параметрів СММЗ.

## 2 ОПТИМІЗАЦІЯ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Під час розробки стільникової мережі мобільного зв'язку (СММЗ), основними завданнями є:

1. Забезпечення належного охоплення радіосигналом території, де повинні надаватися послуги мобільного зв'язку користувачам.

2. Створення СММЗ, яка здатна витримувати обсяг трафіку, генерований абонентами, і забезпечити прийнятний рівень завантаження.

3. Оптимізація вирішення цих завдань протягом усього життєвого циклу СММЗ, використовуючи мінімальну кількість мережевих компонентів.

Важливо враховувати, що протягом життєвого циклу СММЗ кількість абонентів, трафіковий обсяг та їх розподіл на території постійно змінюються, і можуть відбуватися сезонні зміни у трафіку та його розподілі. Тому конфігурація мережі повинна адаптуватися до цих змін, і проектування стільникової мережі є неперервним процесом. Під час проектування СММЗ необхідно виконати такі основні дії: оцінити вартість мережі, визначити потрібну ємність мережі, розглянути радіопокриття та розташування елементів стільникової мережі, визначити максимально прийнятну щільність обслуговуваних абонентів, оцінити кількість дзвінків та розглянути майбутні розвиток мережі.

2.1 Побудова математичної моделі мережі зв'язку в задачах оптимізації пропускної здатності каналу з метою мінімізації середнього часу затримки

Комунікаційні мережі складаються з кінцевих вузлів та вузлів комутації, а також каналів зв'язку, які з'єднують їх між собою. Це складні системи, в яких для передачі інформації практично використовуються одноканальні чи багатоканальні системи передачі даних. Крім процесів передачі даних у каналах



зв'язку, в мережах зв'язку також існують процеси розподілу інформації в вузлах комутації. Таким чином, важливо враховувати показники якості, які стосуються як процесів передачі інформації, так і розподілу інформації.

Розглянемо конкретну задачу мінімізації середнього часу затримки в стільниковій мережі з комутацією повідомлень та фіксованою процедурою вибору маршрутів під час проектування мережі зв'язку.

В цьому контексті надається рішення для багатокритеріальної оптимізації з двома показниками якості: середнім часом затримки повідомлень у мережі зв'язку та вартістю орендної плати за користування мережею. У цьому випадку мінімізується один із показників якості (середній час затримки повідомлень у мережі), при умові, що другий показник (орендна плата) фіксується як обмеження, тобто має фіксоване значення. Цю оптимізаційну задачу можна розв'язати, вибираючи оптимальні пропускні здатності каналів зв'язку. Давайте розглянемо основні кроки розв'язання цієї задачі [15].

Розглянемо математичну модель мережі зв'язку з погляду її використання під час вирішення зазначеної оптимізаційної завдання. Модель мережі зв'язку з комутацією повідомлень має  $V$  каналів зв'язку (КЗ) та  $W$  вузлів комутації (ВК). Вважається, що у КЗ відсутні помилки та апаратні відмови, а пропускна здатність  $i$ -го КЗ дорівнює  $c_i$  (біт/с). Тривалість обробки повідомлень у всіх ВК є постійною та дорівнює  $t_{обр}$ . Як правило, величина  $t_{обр}$  є значно меншою по відношенню до тривалості передачі повідомлень по КЗ.

З точки зору математичної моделі масового обслуговування, кожен КЗ розглядається як обслуговуючий прилад і може мати чергу заявок на обслуговування (передачу повідомлень), через що можливі затримки при передачі повідомлень від відправника до одержувача мережі. Вважається, що трафік, який надходить від джерел повідомлень, утворює пуасонівський потік із середнім значенням  $\gamma_{ik}$ . Ця кількість повідомлень за секунду, які виникають у ВК  $w_j$  і призначені для передачі в ВК  $w_k$ . Повний зовнішній трафік, що надходить у

мережу, визначається співвідношенням [16]:

$$\gamma = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W \gamma_{jk}. \quad (2.1)$$

Довжини повідомлень є незалежними величинами та мають розподіл, який можна описати за допомогою показового закону з середнім значенням  $1/\infty$  біт. У вузлах комутації (ВК) існує буферна пам'ять необмеженого розміру для розміщення цих повідомлень. Припускається, що розмір буферної пам'яті настільки великий, що ймовірність одночасного доступу різних користувачів до цього ресурсу менше  $10^{-3}$ . При таких умовах припущення про необмежений обсяг буферної пам'яті вважається прийнятним.

Повідомлення передаються по мережі від вузла-джерела до вузла-отримувача відповідно до фіксованої процедури вибору маршрутів. Якщо довжина повідомлення складає  $n$  біт, то час, який воно займає на  $i$ -му каналі, розраховується як  $n/c_i$ . Якщо позначити  $\lambda_i$  середню кількість повідомлень в секунду, які проходять по  $i$ -му каналу, то загальний внутрішній трафік в мережі визначається наступним співвідношенням [16]:

$$\lambda = \sum_{i=1}^V \lambda_i. \quad (2.2)$$

Вартість оренди  $i$ -го КЗ із пропускнуою здатністю  $c_i$  задається деякою функцією  $d_i(c_i)$ , яка залежить від номера та пропускнуої здатності КЗ. Позначимо через  $D$  вартість всієї мережі зв'язку, що визначається переважно вартістю побудови (чи оренди) КЗ. При цьому вартість КК можна включити у вартість каналів. Тоді вартість усієї мережі зв'язку дорівнює

$$D = \sum_{i=1}^V d_i(c_i). \quad (2.3)$$

Найбільшу цікавість складає середній час затримки сигнальних та інформаційних повідомлень у мережі зв'язку  $T$ , яке є однією з основних характеристик мережі зв'язку. Якщо позначити через  $Z_{jk}$  величину затримки повідомлення, яка виникла в ВК  $w_j$ , та передається в ВК  $w_k$ . Тоді отримаємо наступну рівність [16]:

$$T = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W (\gamma_{jk} / \gamma) Z_{jk}, \quad (2.4)$$

де  $\gamma_{jk} / \gamma$  - частина повного вхідного трафіку, яка має затримку  $Z_{jk}$ .

Формула (2.4) представляє розкладання мережі на пари "джерело-одержувач".

Отже, можемо визначити метрику якості мережі зв'язку – середній час затримки повідомлень  $T$  в мережі, і спробувати його зменшити, вибираючи оптимальні значення пропускної здатності комунікаційних серверів (КЗ) при врахуванні обмежень на вартість мережі, визначені у 2.3. Таким чином, у цьому завданні оптимізації ми розглядаємо основну технічну характеристику мережі зв'язку – середній час затримки повідомлень  $T$ , а також обмеження на вартість мережі  $D$  та топологію і параметри мережі. У цьому контексті, параметрами, які можуть змінюватися, є пропускні здатності КЗ.

Ми розглядаємо середній час затримки  $T$ , визначений виразом (2.10), щоб з'ясувати його випадковий характер. У такому випадку інтенсивність потоку заявок  $\lambda_i$  для  $i$ -го КЗ повинна дорівнювати сумі інтенсивностей потоків заявок по всіх шляхах, що проходять через цей КЗ:

$$\gamma = \sum_j \sum_k \gamma_{jk}. \quad (2.5)$$

Оскільки  $Z_{jk}$  сумою середніх часів затримки, які отримало повідомлення при передачі по різних КЗ шляху  $l_{jk}$ , то

$$Z_{jk} = \sum_i T_i. \quad (2.6)$$

З врахуванням виразів 2.4 та 2.5 отримуємо наступний вираз для середнього часу затримки:

$$T = \sum_{i=1}^v (\gamma_i / \gamma) T_i. \quad (2.7)$$

Ми можемо виразити середній час, який повідомлення проводить в мережі, враховуючи характеристики КЗ. У розглянутій моделі мережі зв'язку інтервали між моментами надходження повідомлень залежать від часу обслуговування в КЗ. Це означає, що час обслуговування для даного повідомлення в різних КЗ пов'язаний з довжиною повідомлення  $n$  та фіксованими параметрами каналів, такими як: довжина ліній передачі  $l_{ij}$  та час поширення сигналу  $t_i$ .

Якщо  $v$  – це швидкість поширення енергії сигналу одного бітового символу повідомлення в каналі, то  $t$  визначається як  $l_{ij} / v$ .

Якщо повідомлення складається з  $n$  бітових символів, то час, протягом якого воно займає  $i$ -й КЗ, визначається як  $t_i = n / c_i$ . Враховуючи значення  $t_i$  – це особливо важливо для географічно великих мереж зв'язку.

Важливо також відзначити, що ми припускаємо, що КЗ має помилок та є надійними. У мережах з високим рівнем зв'язності кожен КЗ може мати більше

одного вхідного та вихідного каналу. Використовуючи припущення про незалежність КЗ, окремий КЗ можна розглядати як систему масового обслуговування із пуассонівським потоком  $\lambda_i$  на вході та експоненційним часом обслуговування. Для такої системи середній час затримки, який визначається часом очікування та часом обслуговування, можна представити у наступному вигляді  $T = n_c / (\mu c_i) + 1 / (\mu c_i)$ .

Використовуючи вираз для середньої кількості повідомлень, які очікують обслуговування в  $i$ -му каналі зв'язку:

$$T_i = 1 / (\mu c_i - \lambda_i). \quad (2.8)$$

Підстановкою даного виразу в (2.7) можемо вивести остаточний вираз для визначення параметру середньої затримки повідомлення у мережі зв'язку.

$$T = \sum_{i=1}^v (\lambda_i / \gamma) [1 / (\mu c_i - \lambda_i)]. \quad (2.9)$$

Аналізуючи вираз (2.9), можна зробити певні висновки щодо середнього часу затримки повідомлень в мережі. У випадку, коли пропускні здатності КЗ розподілені відносно рівномірно, при збільшенні навантаження на мережу ніякий додаток до виразу для середнього часу затримки повідомлень в мережі не буде переважаючим, до тих пір, поки потік повідомлень до одного з КЗ (наприклад,  $i$ -го) не досягне пропускної здатності цього КЗ. У такий момент цей КЗ стає «обмежуючим» фактором в мережі, і тоді значення  $T$  різко збільшується.

Після аналізу причин затримки повідомлень під час їх передачі через мережу, ми можемо перейти до розгляду завдання мінімізації  $T$ , вибираючи відповідні оптимальні пропускні здатності КЗ, позначені як  $\{C_i\}$ .

Таким чином, завдання вибору оптимальних пропускних здатностей КЗ в

мережі зв'язку формулюється наступним чином. Задані потоки  $\{\lambda_i\}$  та топологія мережі. Наша мета полягає в тому, щоб мінімізувати  $T$  шляхом зміни  $\{c_i\}$  з урахуванням обмежень, визначених у (2.3). Розглянемо випадок, коли вартісні функції щодо пропускних здатностей КЗ є лінійними.

$$d_i(c_i) = d_i c_i, \quad (2.10)$$

де  $d_i$  - вартість одиниці пропускної здатності для  $i$ -го КЗ.

Вартісний коефіцієнт  $d_i$  може вільно змінюватися в залежності від певного параметра каналу зв'язку, але він повинен мати лінійну залежність від пропускної здатності. Наприклад, часто  $d_i$  обирається пропорційно до фізичної довжини каналу. Отже, в разі лінійної залежності збереження загальної вартості на фіксованому рівні еквівалентне підтримці загальної пропускної здатності мережі на певному сталому рівні.

З (2.9) видно, що будь-яке рішення завдання визначення величини пропускної здатності КЗ має враховувати умову: пропускна здатність  $i$ -го КЗ повинна бути більшою, ніж  $c_i > \lambda_i / \mu$ . З точки зору затримки повідомлень в мережі зв'язку, розподіл надмірної вартості між вхідним трафіком та пропускними здатностями КЗ не має великого значення, важливо лише виконання цієї умови.

При вказаному виразі для головного показника якості мережі зв'язку (2.9) можна знайти його мінімальне значення за введення інших обмежень, визначених у (2.3). Для розв'язання такої двокритеріальної оптимізаційної задачі можна використовувати метод невизначених множників Лагранжа. При цьому будується функціонал Лагранжа [19]:

$$G = T + \beta \left[ \sum_{i=1}^V d_i c_i - D \right], \quad (2.11)$$

де  $\beta$  - множник Лагранжа. Якщо знайти мінімальне значення цього функціоналу шляхом варіації пропускних здатностей  $\{c_i\}$ , то цим буде вирішено сформульовану вище оптимізаційну задачу. У цьому визначаються оптимальні пропускні здатності КЗ, у яких досягається мінімальне значення середнього часу затримки повідомлень у мережі. Оптимальні пропускні здатності визначаються виразами [16]:

$$c_{i\text{opt}} = \lambda_i / \mu + D_e \sqrt{\lambda_i d_i} / d_i \sum_{j=1}^V \sqrt{\lambda_j d_j}, \quad (2.12)$$

Підставивши вирази, (2.10) (2.12) отримаємо вираз для мінімального середнього часу затримки повідомлень СММЗ, яке досягається при виборі оптимальних пропускних здатностей КЗ.

$$T_{\min} = [l / (\mu D_e)] \left[ \sum_{i=1}^V \sqrt{\lambda_i d_i / \lambda} \right]^2, \quad (2.13)$$

де  $l$  – середня довжина КЗ.

Вираз (2.13) визначає мінімальний середній час затримки в мережі для випадку коли пропускні здатності є оптимальними. У випадку  $D_e \rightarrow 0$  середня затримка повідомлення зростає нескінченно. Якщо  $D_e > 0$ , то задача має розв'язок, який реалізується на практиці при  $T < \infty$ . Якщо  $D_e \leq 0$ , то задача не має реалізованого розв'язку.

Отже, співвідношення (2.11) і (2.13) забезпечують повний розв'язок сформульованої задачі оптимізації у випадку лінійної функції витрат від витрат.

Аналізуючи вираз (2.13), можна зробити багато корисних висновків. По-перше,  $T$  є строго зростаючою функцією середньої довжини  $l$ . Тому топологію

мережі слід вибрати так, щоб значення  $l$  було мінімізоване. Природно, це досягається за допомогою повністю зв'язаної мережі. Але на практиці це часто непрактично з точки зору витрат. Тому метод Краскала часто використовується для вибору найкращого шляху для передачі повідомлення в мережі.

При проектуванні складних СММЗ необхідно вирішувати приватні задачі оптимізації. Зокрема, при аналізі та синтезі комунікаційних систем необхідно вирішити проблему пошуку набору шляхів, які існують між заданою парою комунікуючих вузлів. Усі методи пошуку шляхів мережі поділяються на дві категорії: матричні та мережеві. Матричні методи засновані на перетвореннях різних матриць – топологічних або матричних характеристик, що описують ребра графа мережі.

Мережеві методи є графічним еквівалентом матричних методів. Інші приватні задачі оптимізації, які виникають під час проектування складних комунікаційних мереж, це задачі розподілу каналів та інформаційних потоків з урахуванням різних критеріїв властивостей ваги шляху. Найпоширенішим методом розподілу каналів є метод із використанням найкоротшого шляху [20].

Існує багато способів спростити процес визначення довжини рангу або інших характеристик шляху. Загалом ці методи можна розділити на дві категорії: матриці та мережі. Матричні методи включають алгоритм Флойда, який отримує матрицю довжини найкоротшої відстані, і матрицю маршруту, яка визначає вершини графа, що складають шлях.

## 2.2 Вибір оптимальних варіантів мережі передавання інформації з урахуванням показників якості

Розглянемо приклад багатокритеріального вибору оптимальних варіантів конструкції мережі передачі даних з комутацією пакетів з урахуванням набору показників якості. Вибрані метрики якості, які визначаються часом доставки та



ймовірністю втрати пакетів у передачі даних повідомлення. Ці показники якості взаємопов'язані і суперечать один одному, тобто при зростанні значення одного показника погіршується інший показник якості. Завдання вибору найкращого проектного варіанту мережі передачі даних є актуальним для практичних застосувань, де час доставки повідомлення є критичним, зокрема в системах передачі відео та голосових повідомлень, системах банківських терміналів, системах усунення несправностей у мережах зв'язку [18].

У ході досліджень була створена математична модель топології мережі передачі даних. У рамках цієї математичної моделі було включено імітацію джерел повідомлень, процесів упаковки повідомлень у пакети та їх передачі через КЗ. У цій моделі були симульовані джерела повідомлень з розподілом Пуассона та різними інтенсивностями. Також було передбачено моделювання різних затримок, пов'язаних з кінцевою швидкістю поширення сигналів у каналах зв'язку, фіксованою пропускнуою здатністю каналів зв'язку та часом очікування пакетів в черзі для передачі через КЗ.

У розглянутому вище випадку, було досліджено 36 різних способів функціонування мережі передачі даних. Під час статистичного моделювання для кожного з цих варіантів мережі були отримані оцінки показників якості, таких як середній час доставки пакетів  $K_1 = T$  та середня ймовірність втрати повідомлень  $K_2 = P$ .

Важливо відзначити, що у цьому контексті було розглянуто численні можливі варіанти функціонування мережі передачі даних, і всі вони були представлені у формі критеріального простору. На рисунку 2.1 наведено значення показників якості для різних варіантів мережі, які були нормалізовані до максимальних значень.

У цьому випадку було відібрано підмножину Парето-оптимальних оцінок для різних варіантів мережі, виключаючи однозначно найгірші варіанти за Парето-критерієм. Ліва нижня межа відповідає безлічі можливих варіантів

Парето-оптимальних варіантів мережі, включаючи варіанти під номерами 1, 10, 11, 13, 17, 20 [14].

Серед Парето-оптимальних варіантів мережі був обраний єдиний варіант з використанням умовного критерію переваги, використовуючи умову мінімізації функції якості у вигляді  $k_p = C_1 k_1 + C_2 k_2$ . Для випадку, коли  $C_1 = 0.4$  і  $C_2 = 0.6$ , обраний варіант роботи мережі під номером 11, в якому були встановлені наступні параметри: дисципліна обслуговування заявок – у випадковому порядку, метод маршрутизації – рівномірний за вагами, розмір "вікна" передачі – рівний 8.

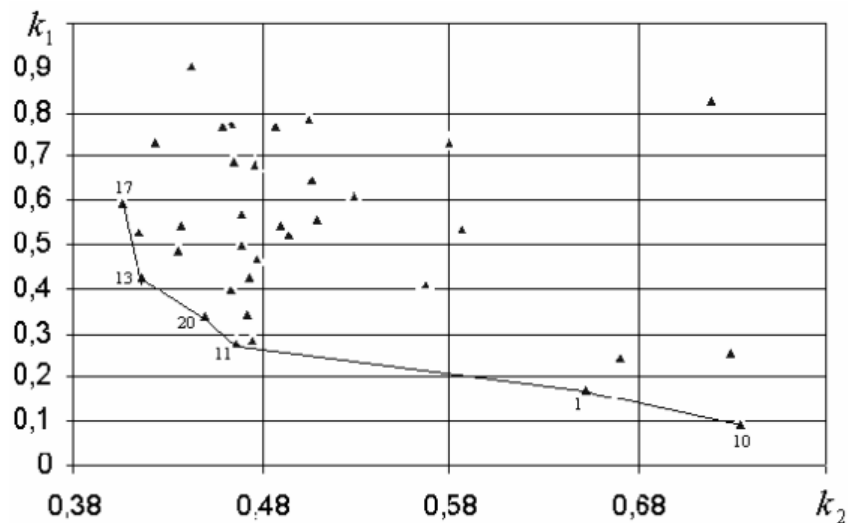


Рисунок 2.1 – Вибір Парето-оптимальних варіантів мережі передачі даних в критеріальному просторі.

Висновки. Було наведено математичну модель для оптимізації мереж зв'язку з метою покращення їх ефективності та якості обслуговування.

Дана математична модель дозволяє проводити систематичний аналіз та оптимізацію пропускну здатності каналів у мережі з метою досягнення найменшого середнього часу затримки передачі повідомлень. Це має вирішальне

значення в сферах, де швидкість та надійність передачі даних є критичними факторами, таких як мультимедійні додатки, медичні системи та фінансові установи.

Отримані результати чітко показують, що ретельний вибір пропускових здатностей каналів може істотно покращити якість обслуговування та значно скоротити середній час затримки. Модель також надає можливість враховувати різноманітні фактори, такі як інтенсивність потоку даних, характеристики каналів та обмеження вартості мережі.

Крім того, наші дослідження визначили підмножину Парето-оптимальних варіантів мережі, які надають можливість вибору найкращого варіанту роботи мережі відповідно до заданих критеріїв. Це значущий крок у процесі планування та управління мережами зв'язку з метою підвищення їх продуктивності та задоволення потреб користувачів.

### **3 ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ВАРІАНТІВ ТОПОЛОГІЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Важливим етапом планування СММЗ є планування транспортної мережі (СТНР – Cellular Transmission Network Planning). У даному розділі розглянуто процес планування транспортної мережі СММЗ і практичні особливості оптимізації транспортної мережі. Наведені результати рішення задачі вибору оптимальної топології транспортної мережі з урахуванням сукупності показників якості на основі методів багатокритеріальної оптимізації.

Основною метою планування транспортної мережі є забезпечення зв'язку між базовими станціями (BTS) та контролерами радіомережі (BSS) та базовою мережею. Лінії передачі можуть бути мідними, коаксіальними, радіорелейними або волоконно-оптичними. Радіорелейні з'єднання відрізняються гнучкістю, оскільки обладнання легко розміщується на базових станціях. Проводові лінії вимагають більше інженерних робіт під час прокладання та реконфігурації мережі. Волоконно-оптичні лінії використовуються там, де необхідно забезпечити велику пропускну здатність.

Крім того, досліджені практичні особливості короткострокового і довгострокового прогнозування трафіку з використанням реальних даних.

#### **3.1 Планування транспортної мережі стільникового мобільного зв'язку**

Графічне зображення області транспортної мережі для структури стільникової мережі мобільного зв'язку було представлено на рисунку 1.1 для СММЗ другого покоління і на рисунку 1.2 для СММЗ третього покоління.

В контексті мобільного зв'язку, транспортна мережа – це мережа, яка забезпечує зв'язок між опорною мережею оператора та базовими станціями.

Основною метою при плануванні транспортної мережі є розробка її структури (топології), яка забезпечуватиме взаємодію між всіма вузлами мережі, такими як базові станції, базові контролери та центр комутації. В результаті цього планування потрібно отримати наступне:

- схематичне зображення топології мережі;
- повний перелік вузлів, ліній і цифрових крос-конекторів;
- загальний обсяг запланованого завантаження ліній.

Структура транспортних мереж стикається з суперечливими техніко-економічними вимогами, що потребує використання методів багатокритеріальної оптимізації під час планування. Аналіз літератури, яка присвячена плануванню транспортних мереж, свідчить про недостатню увагу до питань оптимізації транспортних мереж. Крім того, у процесі планування транспортних мереж не враховувалась багатокритеріальна оптимізація з урахуванням різних показників якості [21,22].

Перед початком процесу планування транспортної мережі мобільного зв'язку необхідно збирати всю необхідну інформацію та використовувати результати попередніх етапів планування загальної мережі. Перелік вихідних даних для планування транспортної мережі включає в себе наступне:

- географічні карти та бази даних;
- географічне розташування базових станцій;
- пряма видимість між складовими елементами транспортної мережі;
- наявність існуючих ліній, транспортних мереж та їх топологія;
- вимоги до продуктивності та надійності;
- вимоги до сигналізації та синхронізації;
- прогнози трафіку та перспективи розвитку мережі;
- можливості та вартість обладнання;
- фінансові можливості оператора;
- принципи корпоративної стратегії та управління тощо.

Головна відмінність між плануванням радіомережі та транспортної мережі полягає в тому, що транспортна мережа повинна повністю задовольняти навантаження з обслуговування мобільних користувачів у радіомережі на протязі всього її існування.

Під час розробки транспортної мережі, важливо створити схему, яка забезпечуватиме якість обслуговування та високу резервну ємність при мінімальних витратах. Фактично, проектувальник повинен узгодити три ключові параметри: вартість, якість та ємність.

Процес планування транспортної мережі включає п'ять послідовних етапів, які відображені на рис. 3.1. Потрібно враховувати, що цей процес досить складний, оскільки кожен з етапів включає багато ітерацій та вимагає великих зусиль, перш ніж остаточна структура транспортної мережі буде готова до реалізації.

Планування розпочинається зі збору даних, включаючи вимоги до ємності та якості обслуговування. Оброблюються основні відомості про наявне обладнання та інструменти для планування, а також розрахунок бюджету на підключення. Визначається топологія, яка буде використовуватися, та інші важливі аспекти.

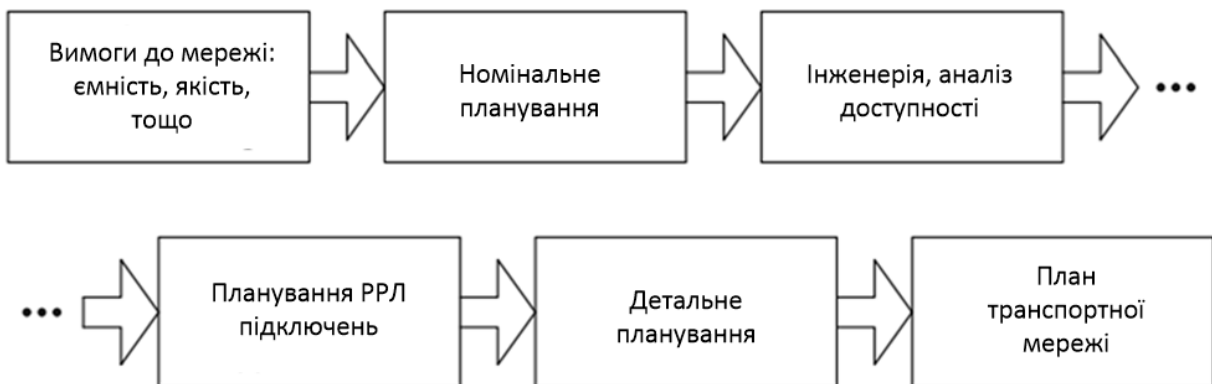


Рисунок 3.1 – Етапи планування транспортної мережі

Етап номінального планування приділяє увагу аспектам, пов'язаним з визначенням розмірів та структури транспортної мережі зв'язку. Цей етап розпочинається після отримання інформації, що стосується результатів попереднього планування радіомережі.

Коли відома кількість базових станцій та навантаження на мережу, проводиться аналіз якісних характеристик їх розташування, можливостей ліній прямої видимості між сайтами та можливостей підключення. На основі цих аспектів формується концептуальна топологія мережі або визначаються вимоги до неї.

Етап детального планування включає розподіл частот (частотне планування), визначення маршрутизації сигналів, принципів синхронізації та планування управління мережею зв'язку. Кожен з етапів планування може вплинути на попередній, оскільки планувальники намагаються досягти балансу між пропускнуою здатністю мережі, якістю та витратами. На цьому етапі також конкретизується бюджет та використовуються спеціальні програмні пакети, наприклад, Nokia NetAct Link Planner.

Під час планування топології транспортної мережі визначаються параметри та властивості мережі, такі як період, продуктивність, гнучкість, норми, можливість оптимізації та керування.

Період визначає тривалість прогнозу пропускнуої здатності. Наприклад, якщо трафік передбачається на тривалий термін, то проект мережі розробляється на цей самий період.

Продуктивність включає критерії надійності, пропускнуої здатності, схему захисту та наявність резервних каналів.

Гнучкість визначається ступенем точності прогнозування питомого навантаження на мережу. Чим точніше прогнози, тим більшою вважається гнучкість мережі.

Норми (рекомендації) – загальні вказівки та правила для побудови мережі,

які спрямовані на збереження архітектури та топології мережі.

Можливість проведення оптимізації залежить від точності прогнозування навантаження. Якщо прогнози є надійними, то мережу можна оптимізувати.

Здійснення управління передбачає визначення та стандартизацію процесів управління з метою забезпечення їх простоти, ефективності та надійності.

На етапі планування визначається кількість та розміщення вузлів зв'язку, ліній та цифрових крос-конекторів. У випадку орендованої мережі встановлюються обов'язкові вимоги щодо пропускної здатності орендованих ліній.

Під час планування також визначаються загальні вимоги до пропускної здатності кожного вузла в основній мережі. Ці дані отримують із матриці телефонного навантаження, яка створюється під час розрахунку комутаційної мережі.

Після цього формується матриця всіх вузлів навантаження, яка ідентифікує вимоги до пропускної здатності (зазвичай виражені у кількості необхідних трактів E1) між вузлами. У разі мережі доступу матриця відображає навантаження від кожної базової станції до контролера базових станцій, до якого вона відноситься.

З використанням інформації про топологію та транспортну матрицю створюється матриця з'єднань. Ця матриця включає всі точки розгалужень передачі, визначаючи вимоги до пропускної здатності між цими точками розгалужень та відображаючи вибрану топологію, ідентифікуючи фактичні ланки передачі.

Далі визначається мережа передачі, яка відповідає транспортній матриці, гнучкості та топології. Основна ідея полягає в обранні мережі, яка відповідає правилам архітектури, які встановлені. Якщо використовуються орендовані канали, то вибір мережі керується тарифом та відстанню до пункту підключення.

В заключних етапах, використовуючи матрицю з'єднань, визначається тип



та кількість необхідного обладнання. За такими даними проводиться оцінка приблизної вартості мережі. Необхідно також відзначити, що ефективність планування транспортної мережі мобільного зв'язку значно залежить від високої якості прогнозування трафіку. З огляду на швидкий розвиток цієї галузі, побудова мережі з можливістю адаптації до змінних умов можлива лише за наявності надійного прогнозу. Точний прогноз зміни числа абонентів та обсягу трафіку дозволить зробити мережу більш гнучкою та водночас економити суттєві ресурси.

Для реалізації запланованих дій прогнозування дозволить забезпечити безперервний розвиток мережі на основі аналізу трафіку в діючих мережах та аналізу майбутніх потреб у послугах зв'язку, які надаються мережею. Фактично прогнозування вдосконалює процес планування мережі.

### 3.2 Особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при плануванні транспортної мережі мобільного зв'язку

При плануванні мережі передачі основними завданнями є створення оптимального сценарію топології мережі та вибір типів ліній зв'язку, що використовуються в мережі.

Можуть створюватися мережі з топологією «зірка», «ланцюг» і «дерево». При цьому можливо встановлювати власні радіорелейні лінії зв'язку, прокладати волоконно-оптичні лінії зв'язку або орендувати існуючі радіорелейні лінії зв'язку, здійснювати запис за місцем і умовами стійкого радіозв'язку в мережі стільникового зв'язку, що розвивається. Крім того, можна використовувати гібридні топології, які включають елементи всіх перерахованих вище топологій. Можливі варіації топології мережі показано на рис. 3.2

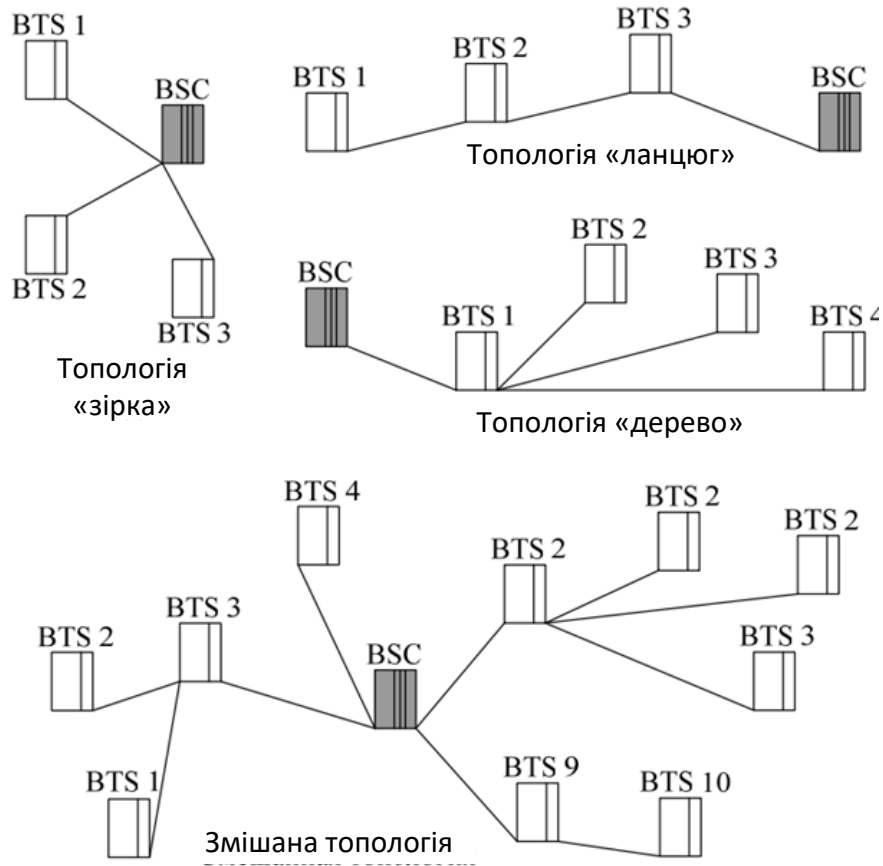


Рисунок 3.2 – Можливі варіанти топологічних структур мережі

Кожна базова станція повинна бути підключена до контролера базової станції. Це з'єднання може бути організоване в одному напрямку і проходити через інші базові станції, оскільки обладнання BTS має гнучкі мережеві можливості для передачі різних конфігурацій.

При плануванні мережі на цьому етапі необхідно брати участь у питаннях підключення та координації різних великих інформаційних потоків, а також вибирати високонадійні широкосмугові канали для забезпечення надійного зв'язку між BTS і BSC.

Серед відомих методів планування мережі передачі, коли топологія мережі передачі оптимізується за тим чи іншим показником (наприклад, за довжиною або вартістю), використовуються алгоритми пошуку найкоротшого дерева або

визначення максимального потоку, таких як алгоритми Пріма, Крускала, Ісау-Вільямса, Фогеля та ін. При дослідженні двох і більше показників якості виникають певні труднощі, оскільки багато показників залежать не тільки від інших показників, а й від результуючої топології мережі, зокрема пропускна здатність залежить від способу підключення BTS до BSC (пряме підключення або через інші підключення BSC). базова станція).

Тому важливим завданням на цьому етапі планування є багатокритеріальна оптимізація топології мережі на основі набору показників якості. Щоб вирішити цю проблему планування на практиці, на попередніх етапах планування необхідно отримати детальну інформацію про структуру радіомережі, формулювання проблеми та вимоги до її якості обслуговування.

З метою оптимізації топології мережі передачі в цьому розділі рекомендовано використовувати показники якості, що враховують:

- довжину радіорелейного польоту;
- загальну довжину ланцюга (мережі);
- кількість ланок;
- вартісні характеристики (вартість будівельних робіт, вартість оренди існуючої лінії, вартість обладнання);
- використовувану та зарезервовану смугу пропускання;
- показники якості зв'язку (швидкість передачі, частота бітових помилок BER, секунди, серйозні помилки SES).

Оскільки всі ці показники якості мають взаємні зв'язки і протилежності, тому є необхідність використовувати методи багатокритеріальної оптимізації при розв'язанні складних взаємопов'язаних завдань. Ці завдання включають в себе оптимізацію пропускної здатності каналів зв'язку, вибір маршрутів, оптимізацію топологічної структури, вибір методів управління потоками та визначення параметрів управління, а також аналіз обсягів буферної пам'яті вузлів комутації та маршрутизації і інші аспекти.

У загальному вигляді така задача оптимізації топології мережі зводиться до забезпечення мінімальної функціональності наведеної вартості:

$$C(U, \Omega, Y) \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

при наявності певних часово-ймовірнісних обмежень на структурні характеристики мережі

$$V(U, \Omega, Y) \leq V_{10}, \quad (3.2)$$

та вимог належності до множини варіантів архітектури мережі  $Q(U, \Omega, Y)$ , що задовольняють обмеження 3.2, до області рішень, що є технічно можливими

$$Q(U, \Omega, Y) \in Q_0. \quad (3.3)$$

У даних закономірностях  $U$  – векторна величина, що відображає параметри якості та ефективності мережі;  $\Omega$  – векторна величина, що представляє собою сукупність технічних параметрів, включаючи продуктивність вузлів і апаратури, надійність технічних засобів, достовірність передачі інформації тощо;  $Y$  – векторна величина, що відображає параметри логічної структури мережі.

Зазвичай при проектуванні мережі передачі в якості основного показника якості часто вибирають широкий економічний критерій – орієнтовну вартість, включаючи вартість оренди ліній зв'язку та орієнтовану вартість вузлів мережі. Інші показники якості (середня затримка, надійність тощо) використовуються як обмеження при вирішенні проектних завдань.

У цьому контексті задачу оптимізації топології сегмента мережі передачі пропонується розв'язувати у три етапи:

- 1) завдання початкової дозволеної множини варіантів структури мережі;
- 2) вибір підмножини оптимальних за Парето варіантів структури мережі. структура мережі передачі;
- 3) вибір єдиного варіанту топології мережі.

Вихідними даними для вирішення поставленої оптимізаційної задачі є:

- планування розміщення базових станцій, контролерів базових станцій і центрів комутації;
- набір показників якості, за якими слід оцінювати прийнятні варіанти топології мережі передачі;
- можливі довжини польотів (розташування між вузлами мережі).

При визначенні обмежень відкидаються пролети між вузлами мережі, де немає прямої радіовидимості або існують які-небудь причини, що перешкоджають можливості побудови такої лінії зв'язку.

### 3.2.1 Вибір показників якості та формування множини допустимих варіантів транспортних мереж

При вдосконаленні транспортних мереж мобільного зв'язку можна враховувати різноманітні показники якості, такі як: довжину РРЛ загальну довжину мережі, кількість зв'язків у ланцюжку, фінансові аспекти, такі як вартість будівництва, вартість оренди існуючих ліній, вартість обладнання тощо, використовувану та резервну пропускну здатність, надійність радіорелейного з'єднання, швидкість передачі даних, ширина смуги частот, ймовірність помилкового прийому бітів (BER) та інші параметри.

Важливо зазначити, що при врахуванні двох або більше показників якості виникають складнощі, оскільки багато з цих показників залежать одне від одного і від конкретної топології мережі.

Множина припустимих конфігурацій мереж  $\Phi_4$  – охоплює всі можливі варіанти з

урахуванням обмежень щодо радіорелейних зв'язків, де можуть відсутні радіовидимість або існувати обставини, які перешкоджають побудові зв'язку на певній ділянці.

Важливо враховувати, що кожен РРЛ та загальна транспортна мережа визначаються набором показників якості:

$$\vec{k}(\varphi) = (k_1(\varphi), k_2(\varphi), \dots, k_B(\varphi)). \quad (3.4)$$

При формуванні вихідного допустимого безлічі варіантів структур мережі спочатку може бути використана скорочена сукупність показників якості

$$\vec{k}(\varphi) = (k_1(\varphi), k_2(\varphi), \dots, k_n(\varphi)) \quad (n \leq m). \quad (3.5)$$

Зокрема, при цьому можуть бути обрані такі показники якості кожного прольоту, як довжина і вартість прольоту  $\vec{k} = (k_1(l), k_2(s))$ . Пропонується ввести узагальнений показник якості кожного прольоту у вигляді зіркової суми вибраних показників якості згідно 3.6:

$$k_{\text{узг}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot k_i, \quad (3.6)$$

де  $c_i$  – деякі вагові коефіцієнти, що характеризують важливість кожного показника;  $n$  – кількість показників якості.

Далі, у припущенні, що кожен проліт характеризується тепер скалярним показником якості (3.6), за допомогою одного з відомих алгоритмів (Прима, Краскала) є найкоротшим деревом для транспортної мережі. Вибираючи різні допустимі комбінації вагових коефіцієнтів, можна знайти деяку множину інших

варіантів, які визначають різні топології транспортної мережі.

### 3.2.2 Знаходження Парето- оптимальних варіантів і вибору оптимального проектного варіанту топології транспортної мережі

Для кожного можливого варіанту структури транспортної мережі загально оцінюються всі показники якості цієї мережі. Кожен варіант структури мережі представляє собою точку в критеріальному просторі, яка відображає оцінку всіх показників якості. Використовуючи один з методів, що були описані раніше, можна виділити численну множину Парето-оптимальних варіантів побудови мережі. При застосуванні критерію Парето безліч вигідних рішень представлено Парето-оптимальними оцінками, які відповідають недомінованим варіантам мережі.

Важливо зазначити, що при формуванні підмножини Парето-оптимальних варіантів структури мережі можуть враховуватися показники якості мережі, які залежать від конкретної структури мережі. Такі параметри як швидкість передачі даних, ймовірність помилкового прийому, пропускна здатність і інші, включаючи зазначену сукупність показників якості, можуть бути враховані  $\vec{k} = (k_1(P_{out}), k_2(C), k_3(R_{nep}))$ . Показники якості транспортної мережі для певної структури визначаються на основі показників якості кожного радіорелейного пролету мережі.

### 3.3 Вибір оптимальних варіантів топології транспортної мережі по сукупності показників неготовності і вартості

Топологія транспортної мережі, яка проектується в рамках встановлених правил і рекомендацій, впливає на готовність (доступність) кожного вузла.

Рекомендації ITU -T G .821 та ITU -T G .826 описують параметри готовності.

### 3.3.1 Оцінка показників якості транспортної мережі

Неготовність апаратури вказує на такий стан мережевого сегмента, в якому впродовж 10 секундних інтервалів поспіль спостерігається втрата сигналу (втрата синхронізації) або збільшення коефіцієнта помилок понад норму. Можливими причинами неготовності апаратури можуть бути наступні фактори:

- неправильна робота самої апаратури;
- помилки в обслуговуванні персоналу;
- вплив перешкод під час поширення сигналу (субрефракція);
- вплив гідрометеорологічних умов;
- вплив промислових атмосферних факторів.

Для зв'язків між базовими станціями (BTS) та контролером BSC застосовуються 2-й та 3-й класи якості уявних моделей для коротких ділянок мережі. Відповідно до рекомендацій ITU-T G.821, для 2-го та 3-го класів якості коефіцієнт неготовності не повинен перевищувати 0,05% щорічно. Ця величина відноситься до всієї мережі, тобто, якщо мережа має ділянку з 10 базових станцій, які підключені до контролера, то для кожного з'єднання між ними, значення коефіцієнта неготовності не повинно перевищувати 0,005%.

У реальних ділянках кількість елементів, що з'єднують BTS з BSC, може бути менше ніж 10, але оператори мережі, для забезпечення надійності, зазвичай встановлюють значення коефіцієнта неготовності на рівні 0,005% для кожного з'єднання. Готовність BTS залежить від кількості ділянок. Якщо тракт складається з послідовно з'єднаних ділянок, то неготовність BTS визначається.

$$N = \sum N_i, \quad (3.7)$$

для паралельно з'єднаних ділянок:



$$N = \Pi N_i, \quad (3.8)$$

де  $i$  – кількість ділянок.

Готовність у будь-якому сценарії використання дорівнює  $D=1-N$ .

На рис. 3.3 показані приклади простих зв'язків між базовими станціями (BTS), а також неготовність кожної BTS та загальний процент неготовності в тракті в залежності від кількості з'єднань.

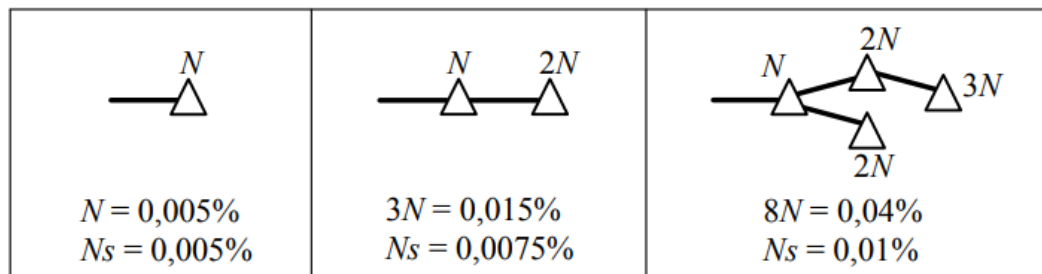


Рисунок 3.3 – Неготовність кожної BTS і сумарний відсоток в ЛЗ в залежності від з'єднання

Основним методом захисту від збільшення коефіцієнта неготовності є побудова кільцевої топології. На рис. 3.4 показано зменшення коефіцієнта неготовності BTS при використанні кільцевих топологій мереж.

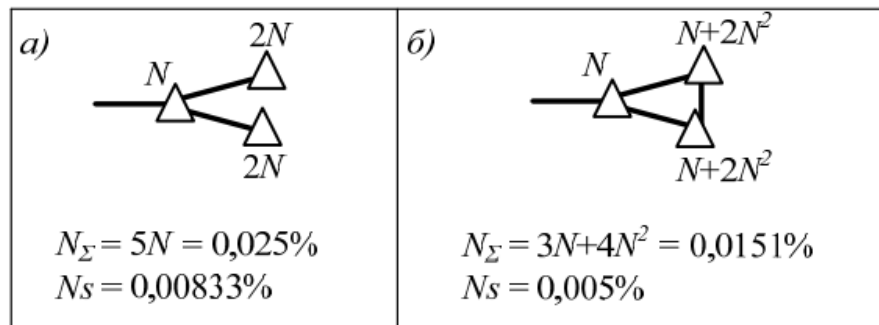


Рисунок 3.4 – Зменшення коефіцієнта неготовності BTS за рахунок використання кільцевої топології

Очевидно, що використання кільцевої топології (б) сприяє майже удвічі зниженню коефіцієнта неготовності порівняно з варіантом (а). Проте важливо врахувати, що для кільцевої топології необхідне додаткове обладнання та з'єднувальні лінії, що призводить до значного зростання вартості мережі. Тому розумно проводити оптимізацію з урахуванням двох факторів: коефіцієнта неготовності (готовності) та вартості.

### 3.3.2 Формування множини варіантів топології транспортної мережі

Розглянемо ситуацію, коли було розроблено докладний план розміщення 26 базових станцій та контролера мережі (рис. 3.5). Крім того, у нас є інформація про можливості встановлення зв'язку між всіма базовими станціями (BTS). Наше завдання полягає в пошуку найкращої конфігурації топології мережі, при цьому враховуючи два критерії якості: коефіцієнта неготовності і відносної вартості.

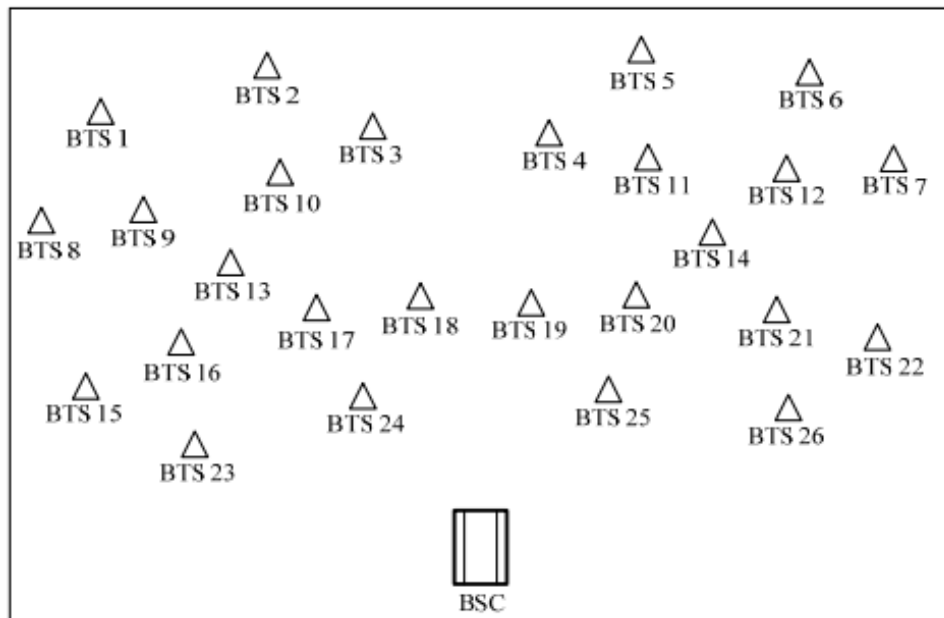


Рисунок 3.5 – План розташування елементів мережі

Для даної мережі було згенеровано певну множину варіантів топологій. На рис. 3.6 - 3.8 представлено різноманітні варіанти топологій транспортної мережі.

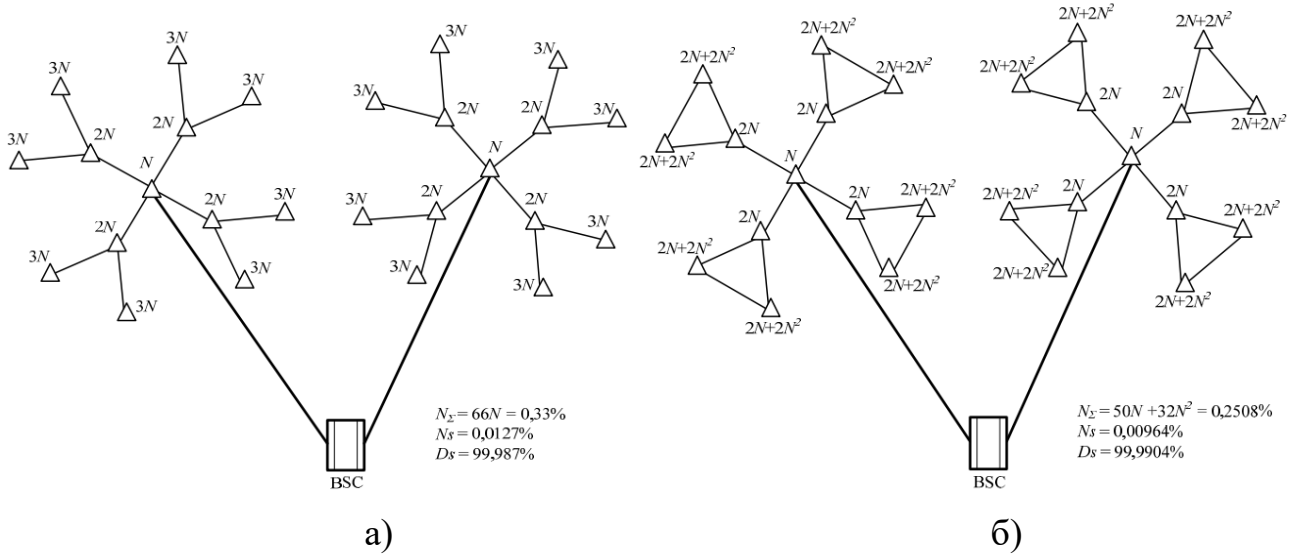


Рисунок 3.6 – Варіанти 1 (а) та 2 (б) транспортної мережі

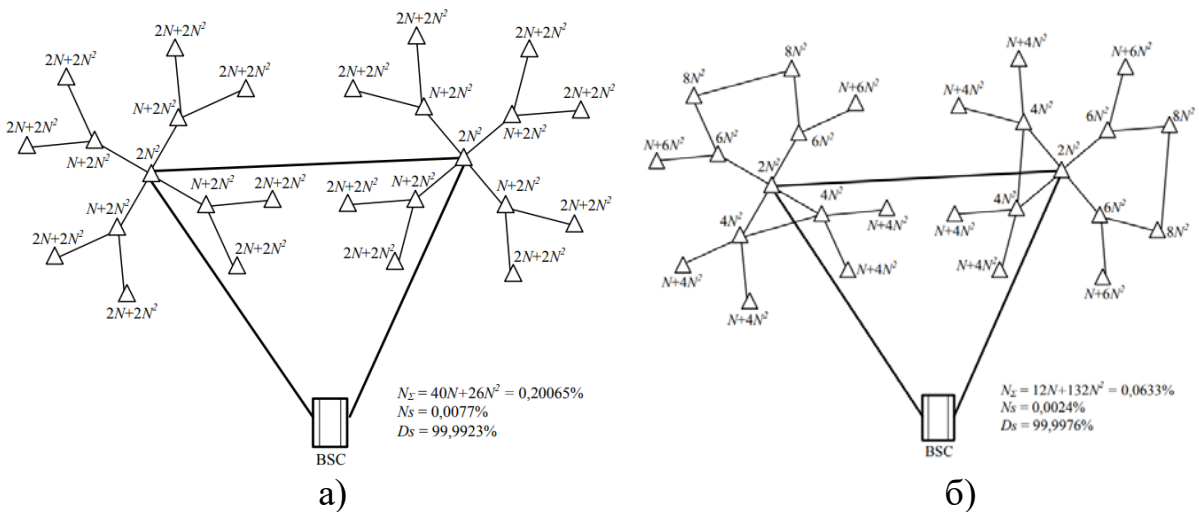


Рисунок 3.7 – Варіанти 3 (а) та 4 (б) транспортної мережі

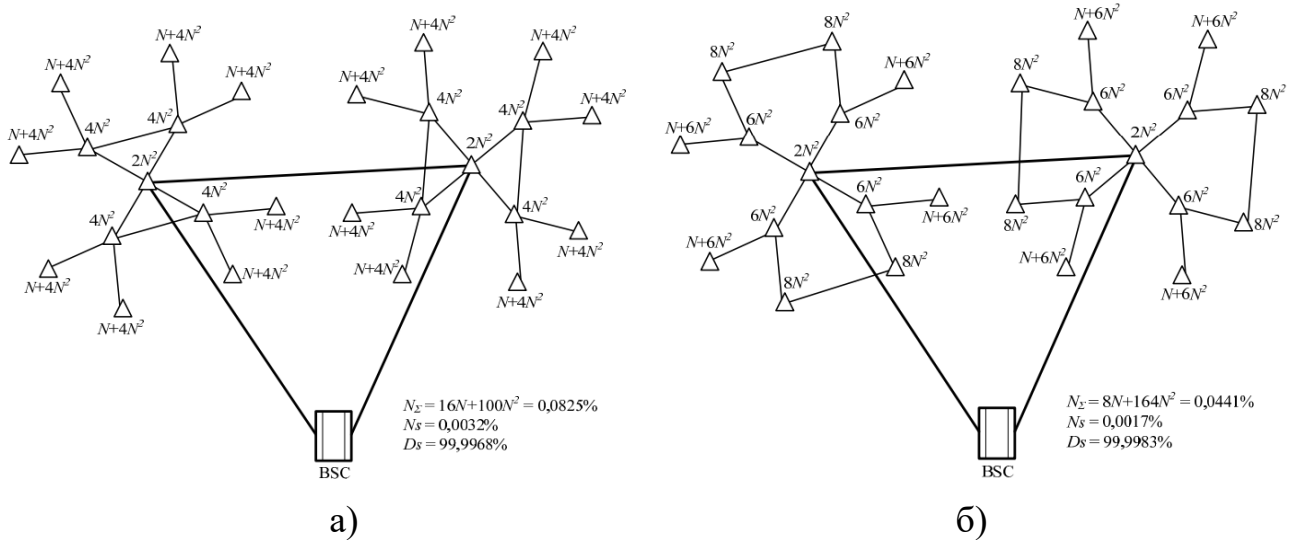


Рисунок 3.8 – Варіанти 5 (а) та 6 (б) транспортної мережі

Як видно, топологія з найнижчим коефіцієнтом неготовності має саму високу вартість, а топологія, яка має саму низьку вартість, характеризується дуже високим коефіцієнтом неготовності. Таким чином, вказані показники якості пов'язані між собою і є суперечливими. Описаний вище підхід оптимізації топології ґрунтується на порівнянні відносної неготовності BTS в мережі. фактично, конфігурація залежить від бажаної середньої неготовності для кожного BTS і збалансованої вартості для досягнення високого рівня готовності.

У результаті проведеного аналізу вказаних варіантів транспортної мережі можна зробити наступні висновки:

- використання кільцевих з'єднань (варіанти 2–6) значно зменшує коефіцієнт неготовності порівняно з використанням деревовидної топології (варіант 1);
- набагато ефективніше з'єднання в кільці (варіант 3), ніж невелика кількість базових станцій на кінцях мережі (варіант 2);
- конфігурації 4–6 дають найбільші показники готовності, але при цьому мають найбільшу вартість.

При цьому при відносно рівній вартості варіант 6 має найнижчий показник неготовності. Тому необхідно розглянути всі варіанти топології з точки зору багатокритеріальної оптимізації.

#### 3.4 Практичні рекомендації по багатокритеріальному вибору транспортних мереж мобільного зв'язку

Мережі третього покоління відрізняються від СММЗ другого покоління тим, що для надання сучасних послуг зв'язку, таких як передача мультимедійних даних, вони потребують значно більше пропускної здатності в транспортній мережі. Для СММЗ третього покоління характерно, що структура середовища передачі та топологія мережі змінюються в залежності від необхідної пропускної здатності, наявних технічних ресурсів, зон радіопокриття і так далі. В мережевому доступі може бути використана будь-яка топологія, така як дерево, зірка, ланцюг, кільце або комбінована, яка може функціонувати як за схемою логічної зірки, хоча на вищому рівні, ближче до базової мережі, часто використовується топологія кільця з логічним вузлом.

В мережах UMTS абонентський трафік обробляється на різних ієрархічних рівнях, починаючи від вузла В і закінчуючи базовою мережею. Незалежно від конкретної ієрархічної структури, важливо, що чим вище рівень ієрархії, тим більше трафіку накопичується в ньому. Тому пропускна здатність системи передачі (транспортної мережі) повинна відповідати потребам ієрархії мережі. На верхніх рівнях необхідні засоби передачі з високою пропускною здатністю, такі як оптоволоконні системи передачі, тоді як на межах мережі можуть використовуватися більш гнучкі та економічно ефективні засоби для збільшення пропускної здатності, такі як радіорелейні системи.

При розробці радіоінтерфейсу широкопasmового багатостанційного доступу з кодовим розподілом каналів передбачається, що більшість послуг буде

пакетними, при цьому одночасно будуть використовуватися традиційні методи передачі даних. Це надає мережі UMTS гнучку структуру радіодоступу та дозволяє використовувати переваги системи, але вимагає від транспортної мережі більш гнучких транспортних засобів, ніж потік E1. Тому для мереж третього покоління використовують технології, такі як Asynchronous Transfer Mode (Асинхронний режим передачі даних) і IP-протокол.

Витрати на створення мобільної транспортної мережі є однією з ключових складових вартості та експлуатації стільникових мереж. Враховуючи великий вплив підключення базових станцій як на початкові інвестиції, так і на експлуатаційні витрати, операторам мобільного зв'язку важливо ретельно розглянути свою стратегію в цьому питанні, перш ніж вкладати кошти у розширення або створення мережі.

Ця задача ускладнюється тим, що потрібно одночасно враховувати суперечливі вимоги існуючих мереж 2G/2.5G та новостворених мереж 3G. Перехід від мереж 2G, які базуються на каналах комутації (TDM), до мереж 3G, які використовують технології комутації пакетів (ATM, Gigabit Ethernet, IP і MPLS), створює нові виклики.

На сьогодні не існує єдиного загальноприйнятого шаблону або готового рішення для міжстанційних зв'язків у стільникових мережах. Планування, спрямоване на майбутню стратегію, повинно враховувати нові вимоги щодо голосу та обмеженого обсягу даних, мінімізуючи витрати на побудову та експлуатацію мережі. З іншого боку, інфраструктура повинна бути готовою приймати навантаження від найновіших широкосмугових додатків і послуг, включаючи передачу мультимедійних даних. Незважаючи на ці суперечливі вимоги, у стільникових операторів завжди є великий вибір варіантів, таких як оренда або будівництво власної транспортної мережі, максимальне використання існуючої інфраструктури 2G, побудова мережі доступу "з нуля" та одночасна підтримка трафіку 2G і 3G.

У цьому контексті вирішальним фактором є вибір рішень та обладнання, яке володіє достатньою гнучкістю та оптимальним співвідношенням між ціною та якістю. Це дозволяє оператору вибрати ті варіанти, які найбільше відповідають технічним та економічним вимогам.

Процес планування транспортної мережі для мобільного зв'язку третього покоління в основному подібний до планування мережі другого покоління, за винятком використання технології АТМ. Планування складається з двох основних етапів: номінальне планування та детальне планування. У порівнянні зі мережами 2G, для мереж 3G на етапі детального планування необхідно розрахувати параметри АТМ. Інші аспекти планування подібні до описаних для мереж другого покоління.

Номінальне планування включає в себе визначення розмірів, розрахунок бюджету зв'язків, проектування топології, оцінку та вибір обладнання та інше. Основна відмінність полягає в плануванні обсягу передачі даних транспортної мережі, оскільки в мережах 3G передається більше обсягів даних, на відміну від голосу.

Планування радіорелейних ліній однакове для мереж другого і третього поколінь, за винятком більших вимог до якості передачі в мережах 3G.

Також важливо відзначити, що більш бажаною топологією для мереж 3G є топологія типу «зірка». Це обумовлено тим, що більше обсяги трафіку можуть призвести до затримок при використанні «петель» або більших «ділянок».

Незважаючи на те, що процес планування транспортної мережі для мобільного зв'язку третього покоління більш складний, в порівнянні з мережами другого покоління, завдяки використанню технології АТМ, всі основні аспекти планування залишаються однаковими. Відповідно, методологія оптимізації з урахуванням сукупності показників якості може бути застосована аналогічно.

### 3.5 Вибір оптимальної топології мережі мобільного зв'язку 4-го покоління

Для порівняльного аналізу були обрані наступні технології мобільного зв'язку 4-го покоління: HSPA, WiMAX і LTE.

Розвиток мобільних зв'язків призвів до виникнення HSPA+ (HSPA реліз 7 та додаткові покращення в релізі 8). У нижньому каналі використовується 64-QAM модуляція в режимі SIMO (1x2) або 64-QAM в режимі SIMO (2x2). У верхньому каналі додана 64-QAM модуляція та покращені можливості для VoIP. В релізі 8 також впроваджено покращення, які дозволяють використовувати режим MIMO (2x2) з 64-QAM модуляцією в нижньому каналі, а також розглядається можливість використання MIMO вищих порядків в нижньому каналі і MIMO (2x2) в верхньому каналі.

Мережі мобільного зв'язку з технологією WiMAX призначені для надання послуг як стаціонарним, так і рухомим користувачам. Мобільний WiMAX (реліз 1.5) має схожу пікову швидкість з HSPA+ (реліз 8) в нижньому каналі при однаковій модуляції, швидкості кодування та ширині каналу. Проте в мобільного WiMAX пікова швидкість у верхньому каналі вища в 2–3 рази. Мобільний WiMAX підтримує ширину каналу до 20 МГц, як для частотного, так і для часового дуплексування. Частотні діапазони мобільного WiMAX охоплюють 700, 1700, 2300, 2500 та 3500 МГц. Мобільний WiMAX також надає послугу «приємної IP-мережі» з кінця в кінець.

Наступним етапом розвитку системи 3GPP є впровадження технології Long-Term Evolution (LTE). Системи LTE представляють собою революційне вдосконалення 3G. Вони включають перехід від систем CDMA до систем OFDMA та перехід до повноцінних IP-мереж з пакетною комутацією. Отже, впровадження цієї технології в існуючих мобільних мережах передбачає необхідність надходження додаткових радіочастотних ресурсів для використання переваг широкопasmового каналу. Для забезпечення сумісності необхідні



багатомодові абонентські пристрої.

Показники якості обох розглянутих технологій мобільного зв'язку вирізняються конкурентними характеристиками. Тому для вибору бажаного варіанту технології мобільного зв'язку необхідно застосовувати методи багатокритеріальної оптимізації. У табл. 3.1 подані вихідні значення показників якості для різних стандартів стільникових мереж зв'язку, включаючи  $K_1$  – спектральну ефективність нижнього каналу,  $K_2$  – радіус дії та  $K_3$  – швидкість передачі даних.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для аналізу мереж 4-го покоління

Показники якості	HSPA		WiMAX	LTE
	Rel.7	Rel.8	Rel.1,5	
Спектральна ефект, біт/Гц/с	0,87	1,75	1,59	1,57
Радіус дії, км	30	40	50	5
Швидкість передачі, Мбіт/с	21	35	48	75

Дані параметри приведено до стандартного вигляду показників якості (нормовані до максимальних значень) та представлено у табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Перетворені значення параметрів якості

Показники якості	HSPA		WiMAX	LTE
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$K_1$	0,497	1	0,909	0,897
$K_2$	0,6	0,8	1	0,1
$K_3$	0,28	0,467	0,64	1

У табл. 3.3 представлені матриці порівнянь показників якості і обчислені оцінки головних власних векторів та векторів пріоритетів, відповідно до розрахунків представлених у попередньому розділі. Після цього були проведені порівняння варіантів технологій на третьому рівні ієрархії, зокрема, порівняння технологій з врахуванням вибраних показників якості. Як результат обробки отриманих матриць порівнянь, були розраховані відповідні головні власні вектори та вектори пріоритетів.

Таблиця 3.3 – Матриця парних порівнянь показників якості

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$V_i$	$P_j$
$K_1$	1	3	1/3	1	0,2584
$K_2$	1/3	1	1/5	0,4058	0,1049
$K_3$	3	5	1	2,464	0,6367

У таблицях 3.4, 3.5 та 3.6 наведені матриці порівнянь різних стандартів мобільного зв'язку відносно показників якості, таких як спектральна ефективність, радіус дії і швидкість передачі даних. Також представлені вибрані компоненти відповідних основних власних векторів і векторів пріоритетів.

Таблиця 3.4 – Матриця парних порівнянь варіантів технологій СМЗ по відношенню до спектральної ефективності

	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$V_1$	$P_{1j}$
$N_1$	1	1/5	1/5	1/5	0,299	0,057
$N_2$	5	1	3	3	2,59	0,4935
$N_3$	5	1/3	1	3	1,495	0,2849
$N_4$	5	1/3	1/3	1	0,863	0,1645

Таблиця 3.5 – Матриця парних порівнянь варіантів технологій СМЗ по відношенню до радіусу дії

	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$V_2$	$P_{2j}$
$N_1$	1	1/3	1/5	5	0,76	0,1301
$N_2$	3	1	1/3	7	1,627	0,2785
$N_3$	5	3	1	7	3,201	0,5481
$N_4$	1/5	1/7	1/7	1	0,253	0,0433

Таблиця 3.6 – Матриця парних порівнянь варіантів технологій СМЗ по відношенню до швидкості передачі даних

	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$V_3$	$P_{3j}$
$N_1$	1	1/3	1/5	1/7	0,31	0,0433
$N_2$	3	1	1/3	1/5	0,67	0,0928
$N_3$	5	3	1	3	2,59	0,3593
$N_4$	7	5	5	1	3,64	0,546

У таблиці 3.7 подані результати розрахунку вектора глобальних пріоритетів.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку компонент глобального вектору пріоритетів технології СМЗ 4-го покоління

СМЗ	$P_{1j}$	$P_{2j}$	$P_{3j}$	$C$
$N_1$	0,058	0,130	0,043	0,0553
$N_2$	0,495	0,279	0,093	0,2158
$N_3$	0,286	0,548	0,359	0,3586
$N_4$	0,166	0,043	0,505	0,3704
$P_j$	0,270	0,100	0,640	

Очевидно, що оптимальним варіантом технології мобільного зв'язку є варіант  $N_4$ , який включає в себе технологію LTE із швидкістю передачі даних 75 Мбіт/с, спектральною ефективністю 1,57 біт/Гц/с та радіусом дії БС – 5 км.

Висновки. У результаті проведеного аналізу вказаних варіантів транспортної мережі можна зробити наступні висновки: використання кільцевих з'єднань (варіанти 2-6) значно зменшує коефіцієнт неготовності порівняно з використанням деревовидної топології.

При цьому, набагато ефективніше з'єднання в кільці, ніж невелика кількість базових станцій на кінцях мережі. Конфігурації 4-6 дають найбільші показники готовності, але при цьому мають найбільшу вартість. При цьому при відносно рівній вартості варіант 6 має найнижчий показник неготовності. Тому, робимо висновок, що необхідно розглянути всі варіанти топології з точки зору багатокритеріальної оптимізації. Також було розраховано параметри якості мережі мобільного зв'язку та за результатами розрахунків побудовано матриці порівнянь різних стандартів мобільного зв'язку відносно показників якості, таких як спектральна ефективність, радіус дії і швидкість передачі даних.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на

тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПШБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	-	-	-
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	-	57	53
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	40	-	-

Продовження табл. 4.1.

Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	-	-	-
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	-	-	-
<b>Середнє значення балів експертів</b>		<b>50,0</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено вдосконалення, доповнення і уточнення досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	-	-	-
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	61	60
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	-	-	-
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	-	-	-
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	-	-	-
<b>Середнє значення балів експертів</b>	<b>60,3</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [25]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де  $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{\text{нов}} = 50,0, k_{\text{теор}} = 60,3$  балів;  $0,6$  та  $0,4$  – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 50,0 + 0,4 \cdot 60,33 = 54,13 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{\text{нау}}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку», даний



рівень становить 54,13 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

#### 4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

##### 4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників.

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [25]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=21$  дні.

$Z_o = 15000,00 \cdot 21 / 21 = 15000,00$  грн.

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи з аналізу і оптимізації мереж мобільного зв'язку	15000,00	714,29	21	15000,00
Науковий співробітник	14500,00	690,48	21	14500,00
Технік	8300,00	395,24	11	4347,62
Всього				33847,62

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [25];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_l = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 59,22 \cdot 8,00 = 473,79 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обладнання для проведення досліджень	8,00	2	1,10	59,22	473,79
Підготовка робочого місця дослідника	3,00	2	1,10	59,22	177,67
Встановлення програмного забезпечення ведення аналітичних досліджень	5,60	4	1,50	80,76	452,25
Підготовка бази даних	14,00	3	1,35	72,68	1017,56
Всього					2121,27

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (33847,62 + 2121,27) \cdot 10 / 100\% = 3596,89 \text{ грн.}$$

#### 4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (4.6)$$

де  $H_{zn}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (33847,62 + 2121,27 + 3596,89) \cdot 22 / 100\% = 8704,47 \text{ грн.}$$

#### 4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення

експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 1,0 \cdot 1120,00 \cdot 1,06 - 0 \cdot 0 = 1187,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Картридж для принтера	1120,00	1,0	0	0	1187,20
Набір офісний	199,00	3,0	0	0	632,82
Органайзер офісний	210,00	4,0	0	0	890,40
Папір для записів 70 А5-500	96,00	3,0	0	0	305,28

Продовження табл. 4.6.

Папір офісний багатofункціональний	183,00	2,0	0	0	387,96
Інші матеріали	260,00	1,0	0	0	275,60
Всього					3679,26

#### 4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_e = 2 \cdot 1250,00 \cdot 1,06 = 2650,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Телефон мобільного зв'язку стандарту GSM LENOVO S860E CDMA+GSM	2	1250,00	2650,00
Всього			2650,00

#### 4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;  
 $C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );  $B_{\text{спец}} = 6800,00 \cdot 1 \cdot 1,06 = 7208,00$  грн.

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Функціональна модель базової станції	1	6800,00	7208,00
Функціональна модель приймача	1	5600,00	5936,00
Функціональна модель передавача	1	8600,00	9116,00
Функціональна модель комутуючого устаткування	1	9200,00	9752,00
Модель антенного комплексу	2	1820,00	3858,40
Всього			35870,40

#### 4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прз}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инпрз}} \cdot C_{\text{прз.}i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де  $C_{\text{инпрз}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прз.}i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прз}} = 7646,00 \cdot 1 \cdot 1,04 = 7951,84 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab	1	7646,00	7951,84
Всього			7951,84



#### 4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_е} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $Ц_б$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_е$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (45389,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 2521,61 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс аналітичної системи ПК DELL OPTIPLEX 7010 MFF / I5-13500T (N007O7010MFF)	45389,00	3	2	2521,61

Продовження табл. 4.10.

Персональний комп'ютер HP PRODESK 405 G6 SFF / RYZEN3 4300G (294D5EA)	19699,00	3	2	1094,39
Спеціалізоване робоче місце дослідника	8699,00	5	2	289,97
Пристрій виводу текстової інформації	6899,00	5	2	229,97
Оргтехніка	8400,00	5	2	280,00
Приміщення лабораторії досліджень	399000,00	25	2	2660,00
ОС Windows 11	6500,00	3	2	361,11
Прикладний пакет Microsoft Office 2021	6540,00	3	2	363,33
Всього				7800,38

#### 4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  грн;

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,32 \cdot 150,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 360,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс аналітичної системи ПК DELL OPTIPLEX 7010 MFF / I5-13500T (N007O7010MFF)	0,32	150,0	360,00
Персональний комп'ютер HP PRODESK 405 G6 SFF / RYZEN3 4300G (294D5EA)	0,25	150,0	281,25
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,08	150,0	90,00
Пристрій виводу текстової інформації	0,25	4,5	8,44
Оргтехніка	0,50	2,0	7,50
Функціональна модель базової станції	0,08	100,0	60,00
Функціональна модель приймача	0,06	100,0	45,00
Функціональна модель передавача	0,06	100,0	45,00
Функціональна модель комутуючого устаткування	0,02	100,0	15,00
Модель антенного комплексу	0,01	100,0	7,50
Всього			919,69

#### 4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за ст. «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 20\%$ .

$$B_{cv} = (33847,62 + 2121,27) \cdot 20 / 100\% = 7193,78 \text{ грн.}$$

#### 4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{сп}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{сп} = 30\%$ .

$$B_{сп} = (33847,62 + 2121,27) \cdot 30 / 100\% = 10790,67 \text{ грн.}$$

#### 4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (33847,62 + 2121,27) \cdot 50 / 100\% = 17984,44 \text{ грн.}$$

#### 4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 110\%$ .

$$B_{нзв} = (33847,62 + 2121,27) \cdot 110 / 100\% = 39565,78 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_{г} + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сн} + I_{г} + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 33847,62 + 2121,27 + 3596,89 + 8704,47 + 3679,26 + 2650,00 + 35870,40 + 7951,84 + 7800,38 + 919,69 + 7193,78 + 10790,67 + 17984 + 39565,78 = 182676 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ЗВ$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ЗВ = 182676,47 / 0,9 = 202973,86 \text{ грн.}$$

### 4.3 Оцінка важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 3$ ;

$T_c$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_c = 2$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 202973,86$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_C$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [25].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 203,0 \cdot 0,17 = 15,13.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» складають 202973,86 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.



## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку відбувалася в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника, згідно [26], могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

### 5.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Головними елементами робочого місця дослідника є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до [27].

Згідно із [28] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа - не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Під час безпосередньої роботи з монітором, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

1. Верхній край екрану монітора повинен знаходитися на одному рівні з

очима користувача.

2. Під час роботи потрібно звертати особливу увагу на положення шиї, хребта, ліктів, кистей, стегон і ступень.

3. Клавіатура повинна знаходитися під тим же кутом, що і передпліччя.

4. Слід систематично робити перерви. Фахівці рекомендують кожну годину робити перерву на п'ять-десять хвилин.

5. Кожні десять-п'ятнадцять хвилин роботи за комп'ютером необхідно дати відпочинок очам, закриваючи їх на якусь мить.

6. Слід встановити монітор так, щоб від нього не відбивалося світло.

7. Читання паперових документів вимагає сильнішого освітлення, ніж читання з екрану монітора. Якщо працівник одночасно працює за комп'ютером і з паперовими документами, слід скористатися настільною лампою.

8. Екран монітора й інші поверхні комп'ютера необхідно регулярно протирати.

Приміщення із робочими місцями користувачів комп'ютерів для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби захисту відповідно до [29].

Категорія приміщення з електробезпеки – без підвищеної небезпеки, згідно [30].

ПК, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПУЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з

легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- увімкнути систему кондиціонування в приміщенні;
- перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран - під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має бути трохи нахиленим, нижній його край ближче до оператора;

- перевірити загальний стан апаратури, перевірити справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана;

- відрегулювати освітленість робочого місця;

- відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, зручний для користувача нахил його спинки;

- приєднати до системного блоку необхідну апаратуру. Усі кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід вставляти та виймати при вимкненому комп'ютері;

- ввімкнути апаратуру комп'ютера вимикачами на корпусах в послідовності: монітор, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування);

- відрегулювати яскравість свічення монітора, мінімальний розмір світної точки, фокусування, контрастність. Не слід робити зображення надто яскравим, щоб не втомлювати очей.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

- необхідно стійко розташовувати клавіатуру на робочому столі, не опускати її хитання. Під час роботи на клавіатурі сидіти прямо, не напружуватися;

- для уникнення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу «миша» належить забезпечувати вільну велику поверхню столу для переміщення миші і зручного упору ліктьового суглоба;
- не дозволяються сторонні розмови, подразнюючі шуми;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою порох з поверхонь апаратури.

## 5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1. Мікроклімат

Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє підсиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі при випаровуванні поту.

При підвищенні температури повітря мають місце зворотні явища. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати. За такої високої температури та вологості практично все тепло, що виділяється, віддається у навколишнє середовище при випаровуванні поту. При підвищенні вологості піт не випаровується, а стікає краплинами з поверхні шкіри.

Недостатня вологість призводить до інтенсивного випаровування вологи зі слизових оболонок, їх пересихання та розтріскування, забруднення хвороботворними мікробами.

Робота, яка виконується під час аналізу і оптимізації мереж мобільного зв'язку, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [31]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1 (відповідно до [32]).

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

### 5.2.2. Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup>	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

### 5.2.3. Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці.

Рівень освітлення на робочих місцях впливає на гостроту зору, тривалість ясного бачення, контрастну чутливість і здатність бачити на далекій і близькій відстані. Нормальна гострота зору, тобто здатність розрізняти дрібні предмети, у працівників, що не страждають на дефекти зору, досягається лише при освітленні 50-70 лк. Для максимальної здатності ока розрізняти такі предмети необхідна освітленість 600-1000 лк.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 5.4 (відповідно [8]):

Таблиця 5.4 – Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

#### 5.2.4. Виробничий шум

Шумом прийнято вважати звуки, які негативно впливають на організм людини і заважають його роботі та відпочинку. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в [34]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

#### 5.2.5. Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи із використанням ПК на працівника діє підвищений рівень електромагнітного поля. Випромінювання ПК можуть бути небезпечними для здоров'я. Низькочастотні поля при тривалому опроміненні сидять біля ПК людей можуть привести до порушень фізіологічних процесів.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.6.

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.



Таблиця 5.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів	20кВ / м
для дітей дошкільних установ і що вчать середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	15кВ / м

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів НС

#### 5.3.1 Дія землетрусу на виробничі приміщення

Землетрус є найбільш небезпечне стихійне лихо і являє собою підземні удари (поштовхи) і коливання земної поверхні, викликані природними причинами. При землетрусі величезної сили енергія поширюється у вигляді пружних природних хвиль. Землетрус може тривати від кількох секунд до кількох діб.

Критерієм стійкості виробничих приміщень в умовах дії землетрусу є його інтенсивність, яка вимірюється в балах за шкалою МСК, в залежності від якої можна визначити ступінь руйнування споруд.

Область виникнення підземного поштовху є осередком землетрусу, в межах якого здійснюється процес виділення накопиченої енергії у вигляді

повздожніх і поперечних пружних сейсмічних хвиль. Наслідки сильних землетрусів по ступені зруйнувань будинків, споруд і ураженню людей можна зрівняти з наслідками ядерного вибуху. Тому дуже велике значення надається заходам по прогнозуванню землетрусів.

5.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії землетрусу

Вихідні дані:  $M = 5$  балів;  $h = 10$  км;  $R = 390$  км;  $V_{np} = 7$  км/с;  $V_{нов} = 1$  км/с.

Визначаємо енергію землетрусу за формулою

$$E = 10^{5,24+1,44M} \text{ [Дж];} \quad (5.1)$$

$$E = 10^{5,24 + 1,44 \cdot 5} = 2754228703338,2 \text{ (Дж)}.$$

Знаходимо інтенсивність землетрусу

$$I_R = 1,5M - 3,51g\sqrt{R^2 + h^2} + 3 \text{ [бала];} \quad (5.2)$$

$$I_R = 1,5 \cdot 5 - 3,51g\sqrt{390^2 + 10^2} + 3 = 1,4 \text{ (бала)}.$$

Оскільки  $I_R = 1,4$  бала, то виробниче приміщення не отримає руйнувань.

Визначимо час приходу повздожніх хвиль

$$t_{II} = \frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{V_{II}} \text{ [с];} \quad (5.3)$$

$$t_{II} = \frac{\sqrt{390^2 + 10^2}}{7} = 55,73 \text{ (с)}.$$

Знайдемо час приходу поверхневих сейсмічних хвиль

$$t_{\tau} = \frac{h}{V_{PP}} + \frac{R}{V_{ПОВ}} \text{ [с];} \quad (5.4)$$

$$t_{\tau} = \frac{10}{7} + \frac{390}{1} = 391,43 \text{ (с).}$$

5.4 Розробка превентивних заходів по підвищенню стійкості роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій

Прогнозування землетрусів може бути довгостроковим і короткостроковим. Воно здійснюється мережею сейсмічних станцій. Предвісниками землетрусів є ріст малих поштовхів, підйом води в свердловинах, підвищення рівня радіації (за рахунок радону), незвичайна (неспокійна) поведінка тварин і птахів.

Попередні заходи захисту від землетрусу включають:

- сейсмостійке будівництво;
- підготовку служб спасіння і ліквідації наслідків;
- нейтралізація джерел підвищеної небезпеки;
- навчання населення правилам поведінки під час землетрусу;

З початку землетрусу люди, люди що перебувають в будинку до 2-х поверхів, повинні негайно залишити приміщення і вийти на відкрите місце (за 25 – 30 с.). Після припинення підземних поштовхів покинути приміщення (ліфтом користуватись заборонено). Далі треба приступити до рятування людей.

Було досліджено стійкість роботи в умовах впливу загрозливих факторів НС. З дослідження впливу землетрусу на стійкість роботи виробничого приміщення можна зробити висновок, що виробниче приміщення отримає руйнувань. Тому розроблено превентивні заходи по підвищенню безпеки.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз особливостей побудови мереж стільникового мобільного зв'язку. Визначено основні характеристики, що описують сучасні мобільні мережі, визначено їх переваги та недоліки та підкреслено необхідність розробки покращених алгоритмів роботи вузлів мережі. У процесі дослідження було проаналізовано основні параметри та особливості побудови та планування мережі, а також проведено розрахунок основних параметрів СММЗ та встановлено, що можливо переходити до наступних кроків дослідження.

Запропоновано математичну модель для оптимізації мереж зв'язку з метою покращення їх ефективності та якості обслуговування. Ці дані є ключовими для усвідомлення та впровадження оптимальних рішень в галузі мереж зв'язку.

Запропонована математична модель дозволяє проводити систематичний аналіз та оптимізацію пропускну здатності каналів у мережі з метою досягнення найменшого середнього часу затримки передачі повідомлень. Це має вирішальне значення в сферах, де швидкість та надійність передачі даних є критичними факторами, таких як мультимедійні додатки, медичні системи та фінансові установи.

Основною метою даного дослідження було створення аналітичної моделі, яка сприятиме вирішенню завдань оптимізації пропускну здатності каналів у мережі. Отримані результати показують, що ретельний вибір пропускну здатностей каналів може істотно покращити якість обслуговування та значно скоротити середній час затримки.

Крім того, наведені вище дослідження визначили підмножину Парето-оптимальних варіантів мережі, які надають можливість вибору найкращого варіанту роботи мережі відповідно до заданих критеріїв.

Також, було проведено вибір оптимальних варіантів топології транспортної

мережі мобільного зв'язку. Було визначено, що на першому етапі потрібно провести планування транспортної мережі стільникового мобільного зв'язку. Отже, було складено схему (рис. 3.1), що описує етапи планування транспортної мережі.

Проведено вибір показників якості та сформовано множину допустимих варіантів транспортних мереж, а також знайдено Парето-оптимальних варіанти та здійснено обґрунтований вибір оптимального проектного варіанту топології транспортної мережі.

Також, було запропоновано 6 варіантів топологічної структури мереж та проаналізовано сильні та слабкі сторони кожного з таких включень.

Визначено оптимальну топологію мережі мобільного зв'язку 4-го покоління. Для порівняльного аналізу були обрані наступні технології мобільного зв'язку 4-го покоління: HSPA , WiMAX і LTE . В результаті аналізу було встановлено, що мережі LTE є найбільш оптимальним варіантом для більшості сценаріїв розгортання та користувацької поведінки, оскільки має найкращу адаптивність з мережами попередніх поколінь мобільного зв'язку.

Мережі LTE мають переважно найкращі показники якості обслуговування. Тому, було зроблено висновок, що найбільш оптимальним варіантом технології мобільного зв'язку є варіант  $N_4$ , який включає в себе технологію LTE із швидкістю передачі даних 75 Мбіт/с, спектральною ефективністю 1,57 біт/Гц/с та радіусом дії базових станцій 5 км.

Проведено економічне планування витрат на проведення наукових досліджень та здійснено розрахунок рівня важливості наукового дослідження, перспективності та ефективності наукових досліджень. Також у роботі було проведено дослідження параметрів з охорони праці для заданих умов та параметрів навколишнього середовища.

Отже, можемо зробити висновок, що усі поставлені завдання до даної роботи були виконані у повному обсязі, а результати представлені у тексті роботи.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук Телекомунікаційні системи // НАН України, Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», НДІ телекомунікацій. – Київ : Наук. думка, 2017. – 734, с.
2. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. – Хмельницький : Видавництво НАДГІСУ, 2016. – 424 с.
3. Bob Watson. FSK Demodulation. Part 1, 2. [Електронний ресурс]// The Communication Edge. – 2011. – Режим доступу до журналу: <http://www.wj.com>.
4. Falconer, D.D., Gitlin, R.D. Optimum Reception of Digital Data Signals in the Presence of Timing-Phase Hits. Manuscript received March 29, 1978. – 28 p.
5. Оптимізація та математичне моделювання мереж зв'язку [Текст] : навч. посіб. / В. М. Безрук, О. М. Буханько, Д. В. Чеботарьова ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків : Компанія СМІТ, 2014. – 192 с.
6. Захарченко М.В. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем / М.В. Захарченко, С.М. Горохов, М.М. Балан, М.М. Гаджиев, В.В. Корчинский, А.Г. Ложковский. – Одеса: ОНАЗ, 2010. – 240с.
7. Турупалов В.В. Метод удосконалення структури транспортної телекомунікаційної мережі на основі багатокритеріальної оптимізації/ Л.О. Шибанова, В.В. Турупалов // Автоматика, телемеханіка, зв'язок. Збірник наукових праць ДонІЗТ.– 2011. – № 25. – С. 5–9.
8. Довгий С.О., Воробієнко П.П., Гуляєв К.Д. Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, управління. – К.: Азимут-Україна, 2013. – 608 с.
9. Holma N. WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE / Н. Holma, А. Toskala. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 574 pp

10. Рибалко Д.В. Планування мереж стільникового зв'язку при векторному критерії оптимальності / Д.В. Рибалко // Зб. матеріалів 11-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.». – Харків: ХНУРЕ, 2007. – Ч. 1. – 148 с.
11. Безрук В.М. Багатокритеріальний аналізі і вибір засобів телекомунікацій // В.М. Безрук, Д.В. Чеботарьова, Ю.В. Скорик. – Харків, – 2017 – 268 с.
12. Рибалко Д.В. Парето-оптимізація при плануванні мереж стільникового зв'язку / Д.В. Рибалко, В.М. Безрук // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів». – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С.153–155.
13. Безрук, В. М. Багатокритеріальна оптимізація проектних рішень при плануванні стільникових мереж мобільного зв'язку / Безрук В. М., Чеботарьова Д. В. // Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах : монографія. – Харків – 2019 . – 148 с.
14. Mishra Ajay R. Cellular Technologies for Emerging Markets: 2G, 3G And Beyond. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 330 pp.
15. Барсов В.І., Краснобаєв В.А., Барсов В.А. і ін. Теорія інформації та кодування/ Під загальною редакцією В.І. Барсова: Підручник для студентів ВНЗ – Х.: УПА, 2011. – 320 с.
16. Бортник Г. Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів [Текст] : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. - Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с. - ISBN 978-966-641-678-3.
17. Andreson J. B. Digital Phase Modulation / J. B. Andreson, T. Aulin, C. Sundberg. – Нью-Йорк, 1986. - 507 с.
18. Батаєв О.П., Ковтун І.В., Корольова Н.А. Теорія електричного зв'язку: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2010.– 630 с.

19. Уривський Л.О., Мошинська А.В., Прокопенко К.А. Співвідношення між пропускною здатністю та продуктивністю систем передачі на прикладі технології UMTS.

20. Mishra, A.R. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G. /Edited by Ajay R. Mishra. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 542 pp.

21. Wiley J. LTE and the Evolution to 4G Wireless. Design and Measurement Challenges / Edited by Moray Rumney. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 457 pp.

22. Kappler C. UMTS Networks and Beyond / C. Kappler. – UK: John Wiley Ltd, 2009. – 363 pp.

23. Рибалко Д.В. Оцінювання ефективності варіантів мереж мобільного зв'язку з урахуванням сукупності показників якості / Д.В. Рибалко // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених „Молодь та сучасні 258 проблеми радіотехніки (РТ–2006)” – Севастополь: СевНТУ, 2006. – 50 с.

24. Кичак В. М. Основи радіоелектроніки [Текст] : навчальний посібник / В. М. Кичак, Ю. В. Крушевський, Д. В. Гаврілов. - Вінниця : ВНТУ, 2010. - 368 с.

25. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

26. ДСТУ-НБА 3.2-1:2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>.

27. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: [http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id\\_doc=71028](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)



28. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: [http://sop.zp.ua/norm\\_praop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php)

29. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

30. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

31. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

32. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

33. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

34. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

35. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ  
(назва магістерської кваліфікаційної роботи)

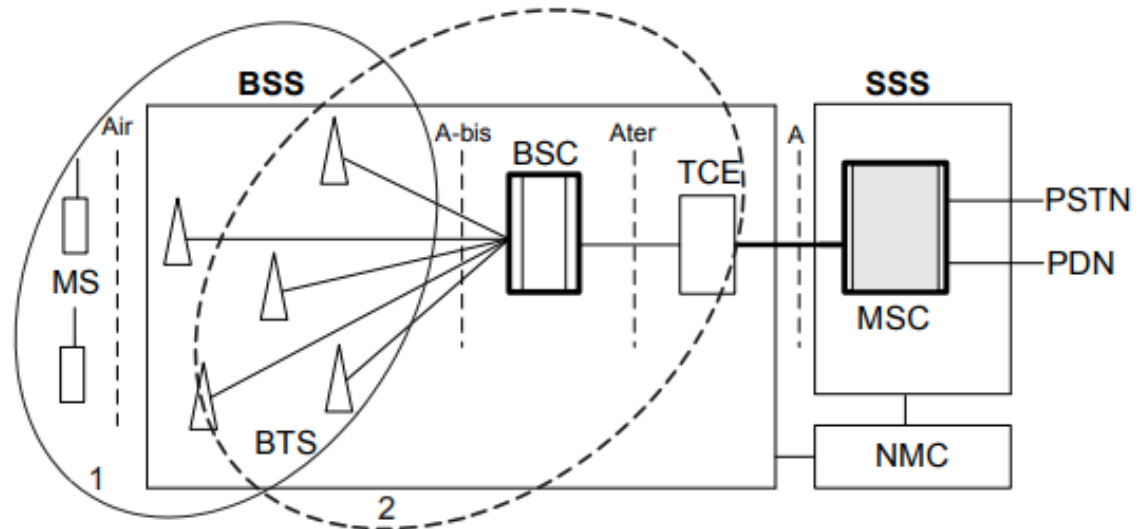


Рисунок А.1 – Архітектура мережі мобільного зв'язку другого покоління (GSM)

BTS Base Transceiver Station  
 BSC Base Station Controller  
 BSS Base Station System  
 MSC Mobile Switching Center  
 NMC Network Management Center  
 PDN Packet Data Network  
 PSTN Public Switched Telephone Network  
 SS Switching Subsystem

Базова станція  
 Контролер базових станцій  
 Система базових станцій  
 Мобільний центр комутації  
 Центр управління мережею  
 Мережа з комутацією пакетів  
 Тлф. мережа загального користування  
 Система комутації

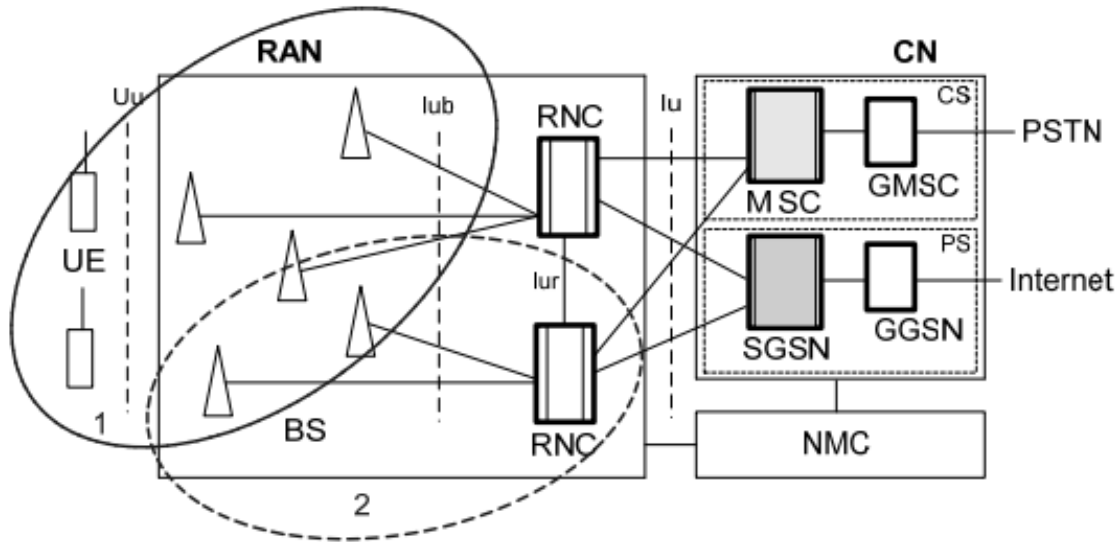


Рисунок А.2 – Структура мережі мобільного зв'язку третього покоління (UMTS)

BS Base Station  
 RNC Radio Network Controller  
 CN Core Network  
 GGSN Gateway GPRS Support Node  
 GMSC Gateway Mobile Switching Center  
 SGSN Serving GPRS Support Node  
 UE User Equipment  
 NMC Network Management Center  
 PSTN Public Switched Telephone Network

Базова станція  
 Контролер радіомережі  
 Ядро мережі  
 Шлюз обміну пакетного трафіку  
 Шлюзовий центр комутації  
 Сервісний вузол пакетного трафіку  
 Обладнання абонента  
 Центр управління мережею  
 Тлф. мережа загального користування

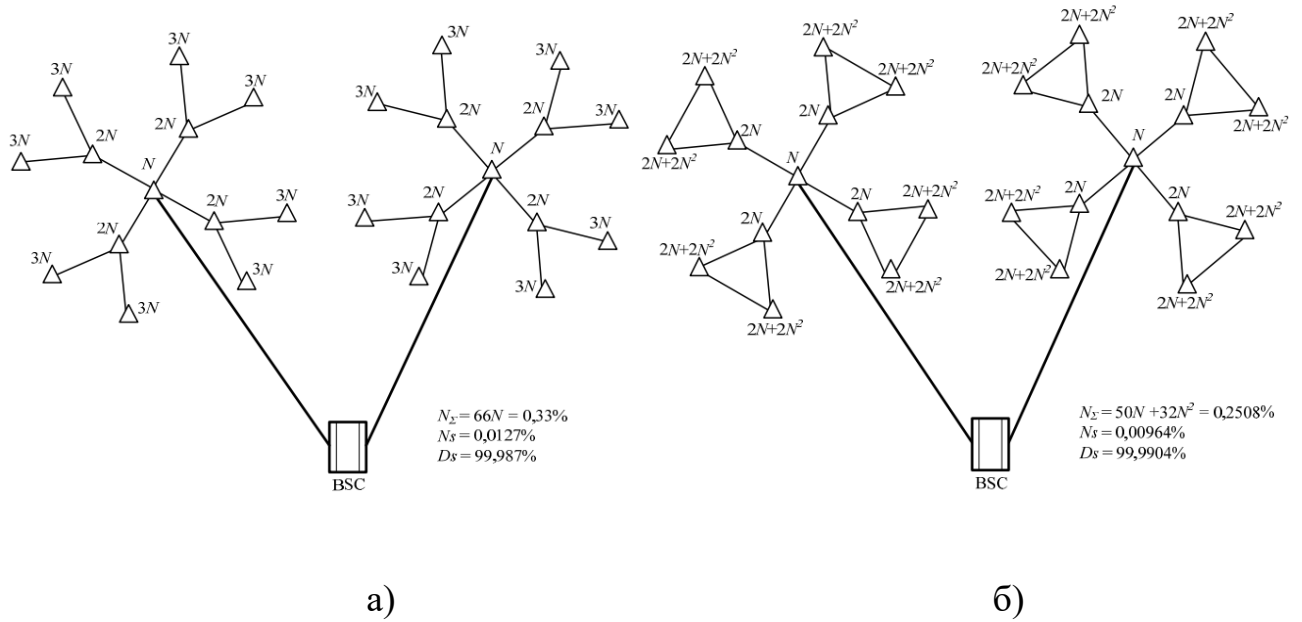


Рисунок А.3 – Варіанти 1 (а) та 2 (б) транспортної мережі

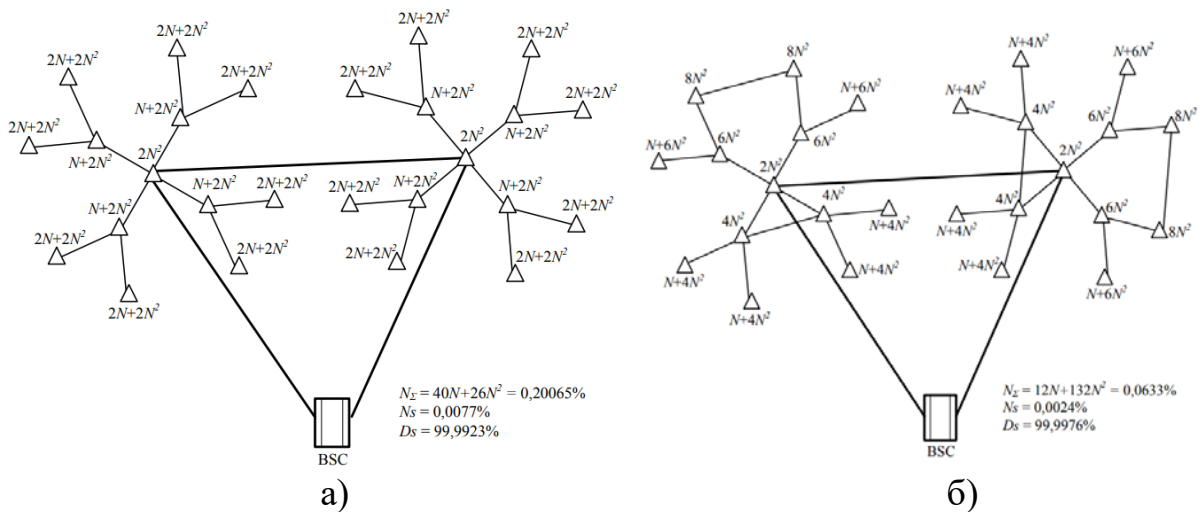


Рисунок А.4 – Варіанти 3 (а) та 4 (б) транспортної мережі

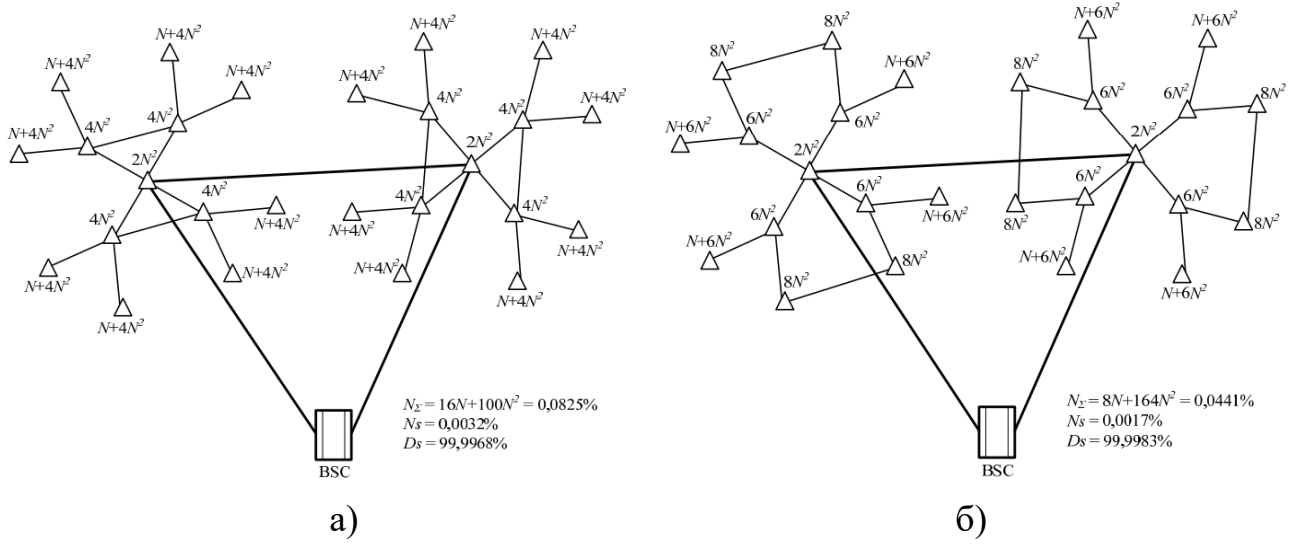


Рисунок А.5 – Варіанти 5 (а) та 6 (б) транспортної мережі

## Додаток Б

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Аналіз і оптимізація мереж мобільного зв'язку»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет  
інформаційних електронних систем  
(кафедра, факультет)

## Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 100% Схожість 0%

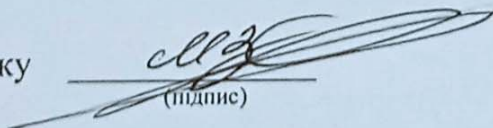
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

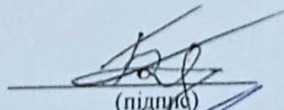
Особа відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Васильківський М.В.  
(прізвище, ініціали)

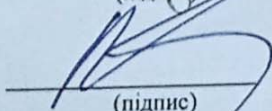
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

++Бевз Д.В.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Кичак В.М.  
(прізвище, ініціали)