

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Аналіз безпроводових технологій для побудови гетерогенної
телекомунікаційної мережі»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-21

Сулло Нікола

Керівник:

Асистент кафедри ТК НН ІТС,

Сушин Ігор Олексійович, д-р філософії

Рецензент:

Старший викладач кафедри ЕКІР НН ІТС, д-р філософії,

Шмігель Богдан Олегович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Сулло Ніколи

1. Тема роботи «Аналіз безпроводових технологій для побудови гетерогенної телекомунікаційної мережі», керівник роботи Сушин Ігор Олексійович, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Goldsmith A. Wireless Communications; Andrews J.G. Fundamentals of Wireless Communication; Molisch A.F. Wireless Communications; рекомендації 3GPP щодо мереж 5G NR; стандарти IEEE 802.11ax та IEEE 802.11be; документація LoRa Alliance та NB-IoT; наукові статті та нормативно-технічна документація з проєктування гетерогенних телекомунікаційних мереж.
4. Зміст роботи Аналіз гетерогенних телекомунікаційних мереж, дослідження сучасних безпроводових технологій передачі даних, аналіз технологій Інтернету речей та сенсорних мереж, проєктування гетерогенної телекомунікаційної мережі, оцінка ефективності її функціонування та розробка рекомендацій щодо оптимізації мережевої інфраструктури.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій

тощо):

Слайд №1. Назва

Слайд №2. Вступ. Мета роботи, об'єкт та предмет дослідження

Слайд №3. Сучасні безпроводові технології

Слайд №4. Критерії вибору технологій для гетерогенної мережі

Слайд №5. Структурна схема запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі

Слайд №6. Організація міжмережевої взаємодії та маршрутизації

Слайд №7. Оцінка ефективності та напрями оптимізації мережі

Слайд №8. Висновки

6. Дата видачі завдання 30 березня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз концепції та принципів побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж	30.03.2026-04.04.2026	Виконано
2	Порівняння та вибір безпроводових технологій для побудови телекомунікаційної мережі	05.04.2026-24.04.2026	Виконано
3	Проектування структури гетерогенної телекомунікаційної мережі та вибір обладнання	25.04.2026-9.05.2026	Виконано
4	Розробка схем маршрутизації та міжмережевої взаємодії	10.05.2026-19.05.2026	Виконано
5	Оцінка параметрів ефективності мережі та аналіз впливу антенних систем	20.05.2026-24.05.2026	Виконано
6	Розробка рекомендацій щодо оптимізації мережі	25.05.2026-31.05.2026	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки, підготовка презентації та матеріалів до захисту	01.06.2026-05.06.2026	Виконано

Студент

Нікола СУЛЛО

Керівник

Ігор СУШИН

РЕФЕРАТ

Робота містить 52 сторінок, 3 рисунки та 3 таблиці. Було використано 29 джерел.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування гетерогенних телекомунікаційних мереж шляхом обґрунтування їхньої структурно-технічної організації, інтеграції сучасних безпроводових технологій та оптимізації параметрів радіоканалів.

У дипломній роботі розглянуто особливості побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж та виконано порівняльну оцінку сучасних безпроводових технологій 4G, 5G, Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, NB-IoT, LoRaWAN і ZigBee з точки зору їх застосування в єдиній мережевій інфраструктурі. Визначено основні переваги, обмеження та сфери доцільного використання кожної технології під час побудови мереж із підтримкою користувацького трафіку та сервісів Інтернету речей.

Розроблено структурну схему сучасної гетерогенної телекомунікаційної мережі університету, обґрунтовано вибір апаратного забезпечення та визначено принципи міжмережевої взаємодії, маршрутизації й сегментації трафіку. Проведено оцінювання основних параметрів функціонування мережі, проаналізовано вплив антенних систем на характеристики радіоканалів та сформовано рекомендації щодо оптимізації мережевої інфраструктури.

Ключові слова: гетерогенна мережа, безпроводові технології, 4G, 5G, Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, NB-IOT, LoRAWAN, IoT, БСМ, маршрутизація, телекомунікаційна мережа.

ABSTRACT

The thesis consists of 52 pages, 3 figures, 3 tables, and 29 references.

The purpose of the thesis is to improve the efficiency of heterogeneous telecommunication networks through the justification of their structural and technical organization, the integration of modern wireless technologies, and the optimization of radio channel parameters.

The thesis examines the features of heterogeneous telecommunication network design and provides a comparative evaluation of modern wireless technologies, including 4G, 5G, Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, NB-IoT, LoRaWAN, and ZigBee, in terms of their application within a unified network infrastructure. The main advantages, limitations, and areas of appropriate application of each technology for supporting user traffic and Internet of Things services are identified.

A structural model of a modern heterogeneous telecommunication network for a university environment has been developed. The selection of network equipment has been justified, and the principles of inter-network interaction, routing, and traffic segmentation have been defined. The main operational parameters of the network have been evaluated, the impact of antenna systems on radio channel characteristics has been analyzed, and recommendations for network infrastructure optimization have been formulated.

Keywords: heterogeneous network, wireless technologies, 4G, 5G, Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, NB-IoT, LoRaWAN, IoT, WSN, routing, telecommunication network.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ	10
1.1 Концепція та принципи побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж	11
1.2 Характеристики та стандарти сучасних широкосмугових технологій ..	12
1.3 Специфіка застосування технологій Інтернету речей та безпроводових сенсорних мереж	13
1.4 Порівняльна оцінка та критерії вибору технологій для інтеграції	15
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА СТРУКТУРНО-ТЕХНІЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ	19
2.1 Формування вимог до мережі та обґрунтування сценарію її застосування	19
2.2 Розробка структурної схеми та вибір апаратного забезпечення.....	22
2.3 Обґрунтування механізмів міжмережевої взаємодії та принципів маршрутизації.....	26
Висновки	30
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕРЕЖІ	32
3.1 Оцінка ключових параметрів функціонування мережі.....	32
3.1.1. Пропускна здатність мережі	33
3.1.2. Затримка передавання даних	34
3.1.3. Спектральна ефективність	34
3.1.4. Щільність підключених пристроїв.....	35
3.1.5. Енергоефективність мережі	36
3.2 Аналіз впливу антенних систем на ефективність радіоканалів	37
3.3 Практичні рекомендації щодо розгортання та оптимізації мережі	41
Висновки	46
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BCM	безпроводова сенсорна мережа
IoT	Інтернет речей
LPWAN	низькопотужна глобальна мережа передачі даних
NB-IoT	вузькосмугова технологія Інтернету речей
LoRaWAN	мережа далекого радіусу дії для пристроїв Інтернету речей
LTE	стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління
5G	мобільний зв'язок п'ятого покоління
Wi-Fi	технологія безпроводового локального доступу
QoS	якість обслуговування мережевого трафіку
VLAN	віртуальна локальна мережа
OSPF	протокол динамічної маршрутизації
BGP	протокол міждоменної маршрутизації
STP	протокол запобігання петлям у мережі
HSRP	протокол резервування маршрутизаторів
VRRP	протокол резервування віртуального маршрутизатора
OFDM	ортогональне мультиплексування з частотним поділом
OFDMA	множинний доступ на основі OFDM
MIMO	технологія використання множинних антен для передавання та приймання сигналів
MU-MIMO	багатокористувацька технологія MIMO
eMBB	розширений мобільний широкосмуговий доступ
URLLC	наднадійний зв'язок із наднизькою затримкою
mMTC	масовий машинний зв'язок
IP	протокол міжмережевої взаємодії
VPN	віртуальна приватна мережа
WPA3	протокол захисту безпроводових мереж
L3	мережевий рівень моделі OSI

ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується стрімким зростанням обсягів переданої інформації, підвищенням вимог до швидкості, надійності та енергоефективності мереж, а також розширенням спектру сервісів, що надаються користувачам. Особливої актуальності набуває інтеграція різнорідних технологій зв'язку в межах єдиної інфраструктури, що дозволяє забезпечити гнучкість, масштабованість та ефективне використання ресурсів мережі.

У зв'язку з активним розвитком мобільних мереж, технологій Інтернету речей та безпроводових сенсорних мереж виникає необхідність побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж, які об'єднують різні стандарти та типи доступу. Такі мережі дозволяють поєднувати широкосмугові технології, наприклад LTE та Wi-Fi, із малопотужними технологіями передачі даних, такими як LoRa або NB-IoT, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю передачі, енергоспоживанням і зоною покриття. Зростання кількості підключених пристроїв, розвиток концепції «розумного міста» та автоматизації виробничих процесів вимагають створення ефективних рішень для організації мережевої інфраструктури, здатної забезпечити стабільну роботу в умовах високого навантаження. Необхідність аналізу сучасних безпроводових технологій та визначення оптимальних підходів до їх інтеграції в рамках єдиної системи визначає актуальність та спрямованість роботи.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування гетерогенних телекомунікаційних мереж шляхом обґрунтування їхньої структурно-технічної організації, інтеграції сучасних безпроводових технологій та оптимізації параметрів радіоканалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати принципи побудови гетерогенних мереж та специфіку поєднання широкосмугових технологій з мережами IoT;
- визначити критерії порівняння безпроводових технологій для їх інтеграції;

- розробити структурну схему гетерогенної мережі та обґрунтувати вибір обладнання й протоколів маршрутизації;
- оцінити ключові параметри ефективності запропонованого рішення;
- дослідити вплив характеристик антенних систем на ефективність радіоканалів;
- сформулювати практичні рекомендації щодо розгортання та оптимізації запропонованої мережі.

Об’єктом дослідження є гетерогенні безпроводові телекомунікаційні мережі та процеси їх функціонування.

Предметом дослідження є методи та технології інтеграції різномірних безпроводових стандартів зв'язку в єдину мережеву інфраструктуру.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих підходів при проектуванні сучасних телекомунікаційних мереж, зокрема для задач Інтернету речей, розумних систем моніторингу та автоматизації.

РОЗДІЛ 1.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ

Сучасні телекомунікаційні системи стрімко розвиваються під впливом зростаючих потреб у передачі великих обсягів даних, забезпеченні мобільності користувачів та інтеграції різноманітних пристроїв у єдину інформаційну інфраструктуру. Одним із ключових напрямів цього розвитку є широке впровадження безпроводових технологій, які забезпечують гнучкість розгортання мереж, зменшення витрат на інфраструктуру та можливість швидкого масштабування [1].

Безпроводові мережі стали невід'ємною частиною сучасного інформаційного суспільства, забезпечуючи функціонування мобільного зв'язку, бездротового доступу до мережі Інтернет, систем Інтернету речей та різноманітних сенсорних мереж. Їх використання дозволяє реалізувати ефективну передачу даних у середовищах, де прокладання кабельної інфраструктури є складним або економічно недоцільним [4,9].

Основою функціонування безпроводових мереж є передача інформації за допомогою електромагнітних хвиль у відкритому середовищі. Такий підхід має як переваги, так і ряд обмежень, пов'язаних із впливом перешкод, затухання сигналу, обмеженістю частотного ресурсу та необхідністю ефективного управління радіоресурсами. У зв'язку з цим особливого значення набувають питання вибору технологій, методів доступу до середовища передачі, а також оптимізації параметрів мережі [9-11].

Важливою тенденцією розвитку сучасних телекомунікацій є перехід до гетерогенних мереж, які поєднують різні типи безпроводових технологій у межах єдиної системи. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальне використання ресурсів, підвищити якість обслуговування користувачів та адаптувати мережу до різноманітних сценаріїв застосування – від високошвидкісної передачі мультимедійного контенту до обслуговування великої кількості малопотужних пристроїв.

У даному розділі розглядаються основні технологічні аспекти побудови безпроводових мереж, принципи організації гетерогенних телекомунікаційних систем, характеристики сучасних стандартів зв'язку, а також особливості застосування технологій Інтернету речей і сенсорних мереж. Окрема увага приділяється порівняльному аналізу технологій та визначенню критеріїв їх вибору для інтеграції в єдину мережеву інфраструктуру.

1.1 Концепція та принципи побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж

Гетерогенна телекомунікаційна мережа являє собою багаторівневу інфраструктуру, що об'єднує різні безпроводові технології доступу в єдину систему з метою забезпечення безперервного, надійного та ефективного обміну даними між користувачами та пристроями. Основною особливістю таких мереж є одночасне використання різних стандартів зв'язку, які відрізняються за швидкістю передачі даних, радіусом дії, енергоспоживанням та спектральною ефективністю [2,3,8].

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем спрямований на інтеграцію стільникових мереж (4G/5G), безпроводових локальних мереж (Wi-Fi), а також низькоенергетичних технологій для Інтернету речей (LoRa, NB-IoT, ZigBee). Такий підхід дозволяє забезпечити гнучке управління трафіком та оптимальне використання радіоресурсів залежно від типу передаваних даних і вимог до якості обслуговування [2,3,7,8].

Основним принципом побудови гетерогенних мереж є адаптивний вибір технології доступу, який базується на характеристиках трафіку, стані мережі та вимогах користувача. Наприклад, високошвидкісний мультимедійний трафік передається через 5G або Wi-Fi 6, тоді як сенсорні дані з IoT-пристроїв передаються через LPWAN-технології, такі як LoRaWAN або NB-IoT [2,7].

Іншим важливим принципом є сумісність мережевих технологій, яка забезпечує взаємодію між різними технологіями доступу через єдину

архітектуру ядра мережі [2,3]. Це досягається за рахунок використання програмно-визначених мереж та мережових функцій віртуалізації, які дозволяють централізовано керувати ресурсами мережі [8].

Також важливим є принцип масштабованості, який дозволяє збільшувати кількість підключених пристроїв без суттєвого зниження продуктивності мережі. Це особливо актуально для сценаріїв Інтернету речей, де кількість вузлів може досягати тисяч і мільйонів [2,6]. Крім того, у гетерогенних мережах активно використовується концепція QoS, яка дозволяє пріоритезувати трафік залежно від його типу, забезпечуючи стабільну роботу критично важливих сервісів [17].

Таким чином, гетерогенні телекомунікаційні мережі є ключовим напрямом розвитку сучасних комунікаційних систем, оскільки дозволяють об'єднати переваги різних технологій та забезпечити ефективну передачу даних у різноманітних умовах експлуатації.

1.2 Характеристики та стандарти сучасних широкосмугових технологій

Сучасні широкосмугові технології забезпечують високошвидкісну передачу даних, низькі затримки та підтримку великої кількості користувачів.

Технологія LTE стала важливим етапом розвитку мобільного зв'язку, оскільки забезпечила значне підвищення швидкості передачі даних та ефективності використання спектру. Вона використовує такі технології, як OFDM та MIMO, які дозволяють передавати дані одночасно по кількох каналах [2-5].

Наступним етапом розвитку є технологія 5G, яка забезпечує значно кращі характеристики порівняно з LTE. Вона підтримує три основні сценарії використання: широкосмуговий доступ (eMBB), зв'язок із наднизькою затримкою (URLLC) та масові підключення пристроїв (mMTC). Це дозволяє використовувати її у різних сферах, включаючи автономний транспорт, телемедицину та промислову автоматизацію [1-3].

Перспективна технологія 6G передбачає використання нових частотних діапазонів, включаючи терагерцовий спектр, а також інтеграцію штучного інтелекту для оптимізації роботи мережі. Очікується, що вона забезпечить ще вищі швидкості передачі даних та мінімальні затримки [1].

Безпроводові локальні мережі представлені стандартами [4,5,27]:

- Wi-Fi 6 (802.11ax) – підвищена ефективність у багатокористувацьких середовищах;
- Wi-Fi 7 (802.11be) – ще більша пропускна здатність та зменшена затримка.

Широкосмугові технології, такі як LTE, 5G та Wi-Fi 6,7, орієнтовані насамперед на забезпечення високої швидкості передавання даних, низьких затримок і підтримку мультимедійних сервісів. Водночас розвиток сучасних телекомунікаційних систем пов'язаний не лише зі зростанням обсягів трафіку, але й зі збільшенням кількості підключених пристроїв, значна частина яких передає невеликі обсяги даних та працює в умовах обмеженого енергоспоживання [1–3, 7].

1.3 Специфіка застосування технологій Інтернету речей та безпроводових сенсорних мереж

Розвиток сучасних телекомунікаційних систем супроводжується постійним збільшенням кількості пристроїв, підключених до мережі, що зумовлює активне впровадження технологій Інтернету речей. Такі технології забезпечують взаємодію сенсорів, контролерів, виконавчих механізмів та інших пристроїв, які здійснюють збір, передавання й обробку даних у межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Використання IoT створює передумови для автоматизації процесів, організації систем моніторингу та реалізації концепцій інтелектуального керування різними об'єктами й середовищами.

Основною особливістю IoT-систем є функціонування в умовах великої кількості вузлів, які передають невеликі обсяги даних із певною періодичністю

або у реальному часі. У зв'язку з цим особливого значення набувають питання енергоефективності, масштабованості та забезпечення стабільного зв'язку між пристроями [6].

Однією з ключових вимог до IoT-мереж є енергоефективність, оскільки значна частина пристроїв працює автономно. У зв'язку з цим застосовуються спеціалізовані технології зв'язку класу LPWAN, які забезпечують передачу даних на великі відстані при низькому енергоспоживанні [7].

Серед найбільш поширених LPWAN-технологій виділяють NB-IoT та LoRaWAN. Технологія NB-IoT інтегрована в інфраструктуру мобільних мереж та функціонує у виділених частотних діапазонах операторів зв'язку, що забезпечує високу надійність передавання даних, стійкість до завад і можливість підтримки великої кількості підключених пристроїв [2].

У свою чергу, технологія LoRaWAN працює в неліцензованих частотних діапазонах і забезпечує передачу даних на значні відстані при дуже низькому енергоспоживанні. Це робить її ефективною для застосувань у системах моніторингу, «розумних» містах та сільському господарстві [7].

Важливим компонентом IoT є безпроводові сенсорні мережі, які складаються з великої кількості вузлів, що взаємодіють між собою для збору інформації про навколишнє середовище. Такі мережі широко використовуються у системах екологічного моніторингу, промислової автоматизації та транспортних системах [6].

Сенсорні мережі характеризуються здатністю до самоорганізації, що дозволяє їм адаптуватися до змін у топології мережі, а також високою масштабованістю та енергоефективністю. Для організації передачі даних використовуються спеціалізовані протоколи маршрутизації, які оптимізують використання ресурсів мережі.

Практичне застосування IoT є надзвичайно широким. Такі системи використовуються у концепціях «розумного міста», в аграрному секторі, у промисловості, а також у сфері охорони здоров'я для дистанційного моніторингу стану пацієнтів [26].

Таким чином, технології Інтернету речей та безпроводові сенсорні мережі відіграють важливу роль у розвитку сучасних телекомунікаційних систем. Їх інтеграція у гетерогенні мережі дозволяє забезпечити ефективну взаємодію великої кількості пристроїв і створює основу для розвитку інтелектуальних інформаційних систем.

1.4 Порівняльна оцінка та критерії вибору технологій для інтеграції

Проектування сучасних телекомунікаційних мереж передбачає необхідність обґрунтованого вибору технологій безпроводового доступу. Такий вибір здійснюється на основі порівняльного аналізу їх технічних характеристик, експлуатаційних параметрів та умов застосування.

Складність вибору обумовлена тим, що різні технології мають суттєві відмінності за своїми характеристиками. Зокрема, вони відрізняються швидкістю передавання даних, затримкою, радіусом покриття, енергоспоживанням, щільністю підтримуваних пристроїв та вартістю розгортання мережевої інфраструктури. Наприклад, технології 5G та Wi-Fi 6 забезпечують високі швидкості передавання даних і низькі затримки, тоді як NB-IoT та LoRaWAN орієнтовані на підтримку великої кількості пристроїв при мінімальному енергоспоживанні. Саме тому жодна з технологій не є універсальною, а ефективне функціонування мережі досягається шляхом їх комбінування у межах єдиної гетерогенної інфраструктури.

До основних критеріїв вибору технологій належать [1-7]:

1. *Швидкість передачі* даних визначає максимальний обсяг інформації, який може бути переданий за одиницю часу. Високошвидкісні технології, такі як 5G та Wi-Fi 6,7, забезпечують передачу мультимедійного трафіку та роботу ресурсоемних додатків.

2. *Затримка передачі* є критично важливою для застосувань реального часу, таких як відеозв'язок, автономний транспорт та промислова автоматизація. Технології 5G забезпечують наднизькі затримки (менше 1 мс), тоді як у LPWAN вони можуть досягати кількох секунд.

3.Радіус покриття.

Цей критерій визначає відстань, на якій можливе стабільне передавання сигналу. Наприклад, LoRaWAN забезпечує покриття до десятків кілометрів, тоді як Wi-Fi обмежений кількома десятками метрів.

4. Енергоспоживання.

Для пристроїв Інтернету речей цей параметр є одним із ключових. LPWAN-технології забезпечують мінімальне енергоспоживання, що дозволяє пристроям працювати автономно протягом тривалого часу.

5. Щільність підключених пристроїв.

Сучасні мережі повинні підтримувати одночасне підключення великої кількості пристроїв. Технології 5G і NB-IoT орієнтовані на роботу в умовах високої щільності вузлів.

6. Вартість розгортання та експлуатації.

Цей критерій включає витрати на обладнання, ліцензування частотного спектру та обслуговування мережі. Наприклад, Wi-Fi є відносно дешевим у розгортанні, тоді як мобільні мережі потребують значних інвестицій.

У таблиці 1.1 наведено порівняння основних безпроводових технологій за ключовими технічними характеристиками.

Таблиця 1.1

Порівняння характеристик сучасних безпроводових технологій

Технологія	Швидкість передачі	Затримка	Радіус покриття	Основне застосування
5G	до 10 Гбіт/с	< 1 мс	до 1–10 км	мультимедіа, smart city
LTE	до 300 Мбіт/с	10–50 мс	до 15 км	мобільний інтернет
Wi-Fi 6	до 9 Гбіт/с	1–10 мс	до 100 м	локальні мережі
Wi-Fi 7	до 30 Гбіт/с	< 5 мс	до 100 м	високошвидкісні локальні мережі
NB-IoT	до 250 Кбіт/с	до 10 с	до 15 км	IoT
LoRaWAN	до 50 Кбіт/с	> 1 с	до 20 км	сенсорні мережі
ZigBee	до 250 Кбіт/с	< 100 мс	до 100 м	WSN

Порівняльний аналіз показує, що широкосмугові технології 5G, LTE, Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 забезпечують високі швидкості передавання даних і невеликі затримки, що робить їх придатними для підтримки мультимедійних сервісів, хмарних застосунків та сервісів реального часу. При цьому технологія 5G забезпечує широку зону покриття та підтримку великої кількості підключених пристроїв, тоді як Wi-Fi 6 і Wi-Fi 7 є ефективними рішеннями для організації високошвидкісного локального доступу.

Технології NB-IoT, LoRaWAN та ZigBee орієнтовані насамперед на підключення пристроїв Інтернету речей і безпроводових сенсорних мереж. Незважаючи на нижчі швидкості передавання даних, вони характеризуються високою енергоефективністю, підтримкою значної кількості пристроїв та можливістю функціонування в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

Результати порівняння свідчать, що кожна з розглянутих технологій має власні переваги та обмеження, які визначають доцільність її використання залежно від вимог конкретного сценарію застосування. Широкосмугові технології 5G, LTE, Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 забезпечують високі швидкості передавання даних і підтримку сервісів реального часу, тоді як NB-IoT, LoRaWAN та ZigBee є ефективними рішеннями для підключення пристроїв Інтернету речей і безпроводових сенсорних мереж. Таким чином, найбільш доцільним підходом до побудови сучасних телекомунікаційних мереж є інтеграція різних технологій у межах гетерогенної інфраструктури, що дозволяє поєднати їх переваги та забезпечити ефективне обслуговування різноманітного трафіку.

Висновки

У першому розділі досліджено теоретичні засади побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж та виконано аналіз сучасних безпроводових технологій, що можуть використовуватися в їх складі. Розглянуто принципи інтеграції різних технологій доступу в межах єдиної мережевої інфраструктури та визначено основні вимоги до сучасних мереж,

серед яких висока пропускна здатність, масштабованість, енергоефективність, підтримка значної кількості підключених пристроїв і забезпечення необхідної якості обслуговування.

Проведено аналіз широкосмугових технологій LTE, 5G, Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7, а також технологій Інтернету речей і безпроводових сенсорних мереж, зокрема NB-IoT, LoRaWAN та ZigBee. Визначено їх основні переваги, обмеження та особливості застосування для підтримки користувацького трафіку, сервісів Інтернету речей і систем моніторингу.

На основі порівняльного аналізу встановлено, що жодна з розглянутих технологій не може повністю задовольнити всі вимоги сучасних телекомунікаційних систем. У зв'язку з цим найбільш доцільним підходом є їх інтеграція в межах гетерогенної мережі, що дозволяє поєднати переваги різних технологій залежно від функціонального призначення окремих сегментів мережі. Також сформовано основні критерії вибору технологій, серед яких швидкість передавання даних, затримка, радіус покриття, енергоефективність, щільність підключених пристроїв та складність розгортання.

Отримані результати є теоретичною основою для проєктування структури гетерогенної телекомунікаційної мережі та обґрунтування вибору технологій і обладнання, що розглядаються в наступному розділі.

РОЗДІЛ 2.

ПРОЄКТУВАННЯ ТА СТРУКТУРНО-ТЕХНІЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Формування вимог до мережі та обґрунтування сценарію її застосування

Проектування сучасної гетерогенної телекомунікаційної мережі потребує попереднього визначення вимог до її функціонування, а також формування сценарію практичного застосування. Це дозволяє обґрунтувати вибір технологій безпроводового доступу, структуру мережі та принципи взаємодії її компонентів [8,12].

Сучасні телекомунікаційні системи функціонують в умовах постійного збільшення кількості підключених пристроїв, зростання обсягів переданого трафіку та необхідності підтримки сервісів із різними вимогами до якості обслуговування. У зв'язку з цим традиційні однорідні мережі вже не здатні забезпечити необхідну гнучкість та ефективність використання ресурсів, що обумовлює доцільність застосування гетерогенних мережевих архітектур [1,8,16].

У межах даної дипломної роботи розглядається сценарій побудови гетерогенної телекомунікаційної мережі для інфраструктури типу «розумний кампус». Такий сценарій є актуальним для сучасних університетських комплексів, бізнес-центрів або адміністративних територій, де одночасно функціонують [12,29]:

- мобільні користувачі;
- локальні безпроводові мережі;
- системи відеоспостереження;
- сенсорні мережі;
- IoT-пристрої;
- системи моніторингу та автоматизації.

Особливістю такого середовища є наявність різнорідного трафіку, який має різні вимоги до швидкості передачі даних, затримки, надійності та енергоспоживання. Наприклад, мультимедійні сервіси та відеоконференції потребують високої пропускної здатності та низької затримки, тоді як IoT-пристрої передають невеликі обсяги даних, але вимагають енергоефективності та стабільного з'єднання [2,7,18].

У процесі формування вимог до мережі необхідно враховувати такі основні критерії:

1. Висока пропускна здатність мережі.

Запропонована мережа повинна забезпечувати одночасне функціонування значної кількості користувачів, хмарних сервісів, мультимедійних застосунків та систем дистанційного навчання. У зв'язку з цим мережна інфраструктура має підтримувати передавання великих обсягів даних без виникнення перевантажень. Для реалізації таких вимог доцільним є використання технологій 5G та Wi-Fi 6, які забезпечують високі швидкості передавання даних і ефективне використання радіочастотного ресурсу [2–5].

2. Низька затримка передавання даних.

Для сервісів відеоконференцзв'язку, IP-телефонії, систем відеоспостереження та інших застосувань реального часу критично важливим є швидкий обмін інформацією між мережевими вузлами. Збільшення затримки може призводити до погіршення якості зв'язку та зниження ефективності роботи окремих сервісів, тому архітектура мережі повинна забезпечувати мінімальний час передавання пакетів даних [1, 18].

3. Підтримка великої кількості пристроїв.

Особливістю середовища типу «розумний кампус» є одночасне функціонування великої кількості користувацьких пристроїв, датчиків, контролерів та інших елементів Інтернету речей. Тому мережева інфраструктура повинна підтримувати високу щільність підключень без істотного зниження продуктивності та якості обслуговування [1, 2].

4. Масштабованість мережі.

Під час проєктування необхідно враховувати можливість подальшого розширення мережевої інфраструктури. Модульний принцип побудови мережі дозволяє збільшувати кількість користувачів, мережевих сервісів та IoT-пристроїв без суттєвої модернізації існуючих технічних засобів і зміни архітектури мережі [8, 12].

5. Енергоефективність.

Значна частина пристроїв Інтернету речей працює автономно та використовує обмежені джерела живлення. Тому важливо забезпечити мінімальне енергоспоживання під час передавання даних. Для цього доцільно використовувати технології NB-IoT та LoRaWAN, які дозволяють підтримувати тривалий термін автономної роботи пристроїв при збереженні необхідного рівня зв'язку та покриття [7, 28].

6. Надійність та безпека мережі.

Оскільки мережева інфраструктура забезпечує передавання службової, навчальної та технологічної інформації, важливо гарантувати безперервність її функціонування та захист від несанкціонованого доступу. Це передбачає використання механізмів резервування, сегментації мережі, аутентифікації користувачів, контролю доступу та сучасних засобів криптографічного захисту інформації [18, 26].

Для реалізації зазначених вимог у межах даної роботи пропонується використання багаторівневої гетерогенної архітектури, у якій [2,3,7,28]:

- технологія 5G використовується для забезпечення мобільного широкосмугового доступу;
- Wi-Fi 6 застосовується для локального високошвидкісного покриття всередині приміщень;
- NB-IoT та LoRaWAN використовуються для підключення сенсорних пристроїв та систем моніторингу;
- маршрутизація та керування трафіком здійснюються через централізовану мережеву інфраструктуру.

Подібний підхід дозволяє забезпечити ефективний розподіл навантаження між різними технологіями доступу та оптимізувати використання мережевих ресурсів.

Для підвищення ефективності функціонування мережі також передбачається використання механізмів QoS, які дозволяють пріоритезувати критично важливий трафік та забезпечувати стабільну роботу сервісів реального часу [17].

Таким чином, формування вимог до гетерогенної телекомунікаційної мережі та вибір сценарію її застосування є важливим етапом проєктування мережевої інфраструктури. Проведений аналіз показує, що використання комбінованого підходу із застосуванням різних безпроводових технологій дозволяє забезпечити високу ефективність, масштабованість та адаптивність мережі до сучасних умов експлуатації.

2.2 Розробка структурної схеми та вибір апаратного забезпечення

Після визначення основних вимог до гетерогенної телекомунікаційної мережі наступним етапом є розробка її структурної схеми та вибір апаратного забезпечення, необхідного для реалізації поставлених функціональних завдань. Від правильності побудови архітектури мережі залежить ефективність використання мережевих ресурсів, рівень масштабованості, надійності та безпеки функціонування всієї інфраструктури [12].

Відповідно до визначених вимог було сформовано структурну схему гетерогенної телекомунікаційної мережі, яка враховує особливості організації доступу, передавання даних та взаємодії між окремими сегментами мережі. Запропонована архітектура спрямована на забезпечення необхідних показників продуктивності, надійності та масштабованості, а також створює основу для подальшої реалізації механізмів маршрутизації, сегментації трафіку та централізованого керування мережевими ресурсами.

Архітектура мережі побудована за багаторівневим принципом. Центральним елементом запропонованої архітектури є ядро мережі, яке

забезпечує обробку та маршрутизацію трафіку, координацію роботи окремих сегментів мережі, а також підтримку мережевих сервісів і засобів централізованого керування. Завдяки цьому забезпечується взаємодія між різними функціональними сегментами мережі та доступ до зовнішніх інформаційних ресурсів.

Рівень широкосмугового доступу забезпечує підключення користувацьких пристроїв до мережевих сервісів та інформаційних ресурсів телекомунікаційної інфраструктури. Для реалізації цього рівня передбачено використання мережі 5G і точок доступу Wi-Fi 6, що дозволяє організувати безперервний доступ як у межах території кампусу, так і всередині навчальних корпусів. Поєднання зазначених технологій забезпечує розподіл навантаження між мобільним і локальним сегментами мережі, підвищує ефективність використання радіоресурсу та створює умови для підтримки різних категорій користувацького трафіку [19,22].

Функціонування систем моніторингу, збору телеметричної інформації та інших сервісів Інтернету речей забезпечується окремим IoT-сегментом мережі. Для його реалізації використано технології NB-IoT та LoRaWAN, які орієнтовані на обслуговування великої кількості пристроїв із різними вимогами до покриття, енергоспоживання та інтенсивності обміну даними. Застосування двох технологій дозволяє адаптувати мережеву інфраструктуру до різних сценаріїв використання: від стаціонарних систем контролю інженерних об'єктів до розподілених сенсорних вузлів екологічного моніторингу. Такий підхід забезпечує гнучкість побудови IoT-підсистеми та створює передумови для її подальшого масштабування без істотної модернізації мережевої архітектури [7,24,28].

На рівні кінцевих користувачів функціонують мобільні пристрої, ноутбуки, IP-камери, сенсорні вузли, контролери автоматизованих систем та інші мережеві пристрої. Усі вони взаємодіють із відповідними сегментами доступу залежно від власних вимог до швидкості передачі даних, затримки та енергоефективності.

На рисунку 2.1 представлено структурну схему гетерогенної телекомунікаційної мережі, яка поєднує декілька технологій безпроводового доступу в межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Основу мережі становить ядро, яке забезпечує централізоване керування ресурсами, маршрутизацію трафіку та взаємодію між окремими сегментами мережі. До ядра підключаються широкосмугові сегменти доступу на базі технологій 5G та Wi-Fi 6, а також підсистема Інтернету речей, реалізована із застосуванням технологій NB-IoT та LoRaWAN [12,29].

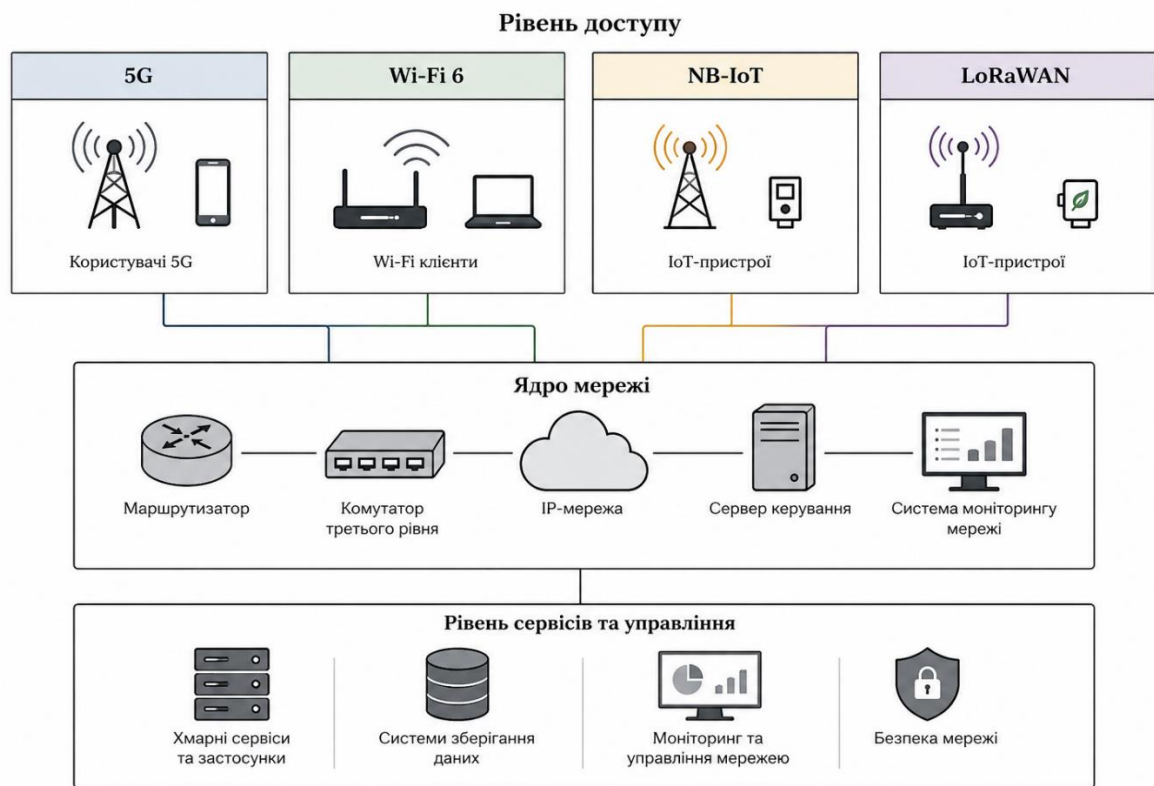


Рис. 2.1. Структурна схема гетерогенної телекомунікаційної мережі

Запропонована архітектура забезпечує розподіл мережевого навантаження відповідно до характеристик і вимог різних типів трафіку. Високошвидкісна передача мультимедійних даних здійснюється через сегменти 5G та Wi-Fi 6, тоді як передача телеметричної інформації від сенсорних вузлів реалізується за допомогою енергоефективних технологій NB-IoT і LoRaWAN. Такий підхід дозволяє забезпечити високу

продуктивність мережі, ефективне використання радіоресурсів та підтримку великої кількості підключених пристроїв [2,3,7].

Вибір обладнання здійснювався з урахуванням технічних характеристик, можливостей подальшого розширення мережі та підтримки сучасних протоколів передачі даних. Зокрема, маршрутизатори та комутатори Cisco забезпечують високу продуктивність, підтримку динамічної маршрутизації та механізмів забезпечення якості обслуговування. Точки доступу Wi-Fi 6 підтримують технології OFDMA та MU-MIMO, що дозволяє ефективно працювати в умовах високої щільності користувачів. Базові станції 5G забезпечують підтримку широкосмугового доступу та можливість подальшого розвитку мережі відповідно до вимог перспективних сервісів [21-23].

Таблиця. 2.2

Апаратне забезпечення гетерогенної телекомунікаційної мережі

Тип обладнання	Призначення	Приклад обладнання
Маршрутизатор	Маршрутизація трафіку	Cisco ISR 4000
Комутатор L3	Керування сегментами мережі	Cisco Catalyst 9300
Точка доступу Wi-Fi 6	Локальний безпроводовий доступ	Cisco Catalyst 9130AX
Базова станція 5G	Мобільний доступ	Ericsson Radio 4408
LoRaWAN Gateway	Підключення IoT-пристроїв	Kerlink Wirnet
Сервер моніторингу	Аналіз та керування мережею	Dell PowerEdge
IoT-сенсори	Збір даних	Arduino / ESP32

Використання LoRaWAN-шлюзів дозволяє організувати централізований збір телеметричної інформації від великої кількості сенсорних пристроїв при мінімальних витратах енергії. Для збору даних та

керування елементами Інтернету речей доцільно використовувати мікроконтролери сімейств Arduino та ESP32, які широко застосовуються в сучасних IoT-рішеннях завдяки низькій вартості та простоті інтеграції [24, 25].

Запропонована архітектура забезпечує розподіл навантаження між різними технологіями доступу. Високошвидкісний трафік передається через мережі 5G та Wi-Fi 6, тоді як телеметричні дані від датчиків та сенсорних вузлів обслуговуються через NB-IoT та LoRaWAN. Додатково використовуються механізми QoS, що дозволяють пріоритезувати критично важливий трафік і забезпечувати стабільну роботу сервісів реального часу [17].

Таким чином, розроблена структурна схема та обране апаратне забезпечення забезпечують можливість побудови масштабованої, надійної та ефективної гетерогенної телекомунікаційної мережі, здатної підтримувати як високошвидкісний користувацький трафік, так і роботу великої кількості IoT-пристроїв.

2.3 Обґрунтування механізмів міжмережевої взаємодії та принципів маршрутизації

Ефективне функціонування гетерогенної телекомунікаційної мережі значною мірою залежить від правильної організації міжмережевої взаємодії, а також від обраних механізмів маршрутизації та керування трафіком. Оскільки запропонована мережа поєднує декілька різнорідних технологій безпроводового доступу, виникає необхідність забезпечення їх узгодженої роботи в межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури [8,12].

Основною метою міжмережевої взаємодії є забезпечення безперервного обміну даними між мобільними користувачами, локальними Wi-Fi-сегментами, пристроями Інтернету речей, сенсорними мережами та серверною інфраструктурою. Для реалізації взаємодії між окремими сегментами мережі запропоновано багаторівневу IP-архітектуру, у межах якої обмін даними між різними технологіями доступу здійснюється через вузли маршрутизації та

комутації. Такий підхід забезпечує централізоване керування трафіком, спрощує інтеграцію нових мережевих сегментів і створює умови для подальшого масштабування телекомунікаційної інфраструктури [12,21].

Особливістю гетерогенних мереж є те, що окремі сегменти можуть суттєво відрізнятися за швидкістю передачі даних, рівнем затримки, принципами доступу до середовища передачі та вимогами до якості обслуговування. Наприклад, мережі 5G та Wi-Fi 6 орієнтовані на високошвидкісну передачу великих обсягів інформації, тоді як NB-IoT та LoRaWAN використовуються переважно для передачі невеликих пакетів телеметричних даних. Саме тому важливим завданням є забезпечення сумісності та узгодженої взаємодії між усіма компонентами мережі в межах єдиного інформаційного простору [2,3,7].

Для логічного розмежування мережевих ресурсів у запропонованій архітектурі використовується технологія VLAN. Сегментація мережі дозволяє ізолювати трафік різних функціональних підсистем, зокрема користувацького доступу, IoT-пристроїв, серверної інфраструктури та адміністративних сервісів. Такий підхід сприяє підвищенню інформаційної безпеки, зменшенню обсягів широкомовного трафіку та спрощенню процесів керування мережею. Додатково сегментація позитивно впливає на продуктивність мережі за рахунок локалізації потоків даних у межах окремих логічних доменів [13].

Схему міжмережевої взаємодії та маршрутизації в запропонованій гетерогенній мережі наведено на рисунку 2.3.

Представлена схема на рисунку 2.2 демонструє організацію гетерогенної телекомунікаційної мережі з використанням сучасних механізмів сегментації, маршрутизації та захисту трафіку, що забезпечує високу масштабованість, безпеку та ефективність функціонування мережевої інфраструктури [12,13].

Для реалізації внутрішньої маршрутизації між сегментами мережі доцільно використовувати протокол OSPF. Цей протокол є одним із найбільш поширених рішень для корпоративних мереж завдяки високій швидкості адаптації до змін топології та можливості автоматичного визначення

оптимальних маршрутів. Принцип роботи OSPF базується на алгоритмі Дейкстри, який забезпечує побудову найкоротших маршрутів між вузлами мережі. Застосування OSPF дозволяє підвищити масштабованість мережі та забезпечити ефективне використання доступних каналів зв'язку [14].

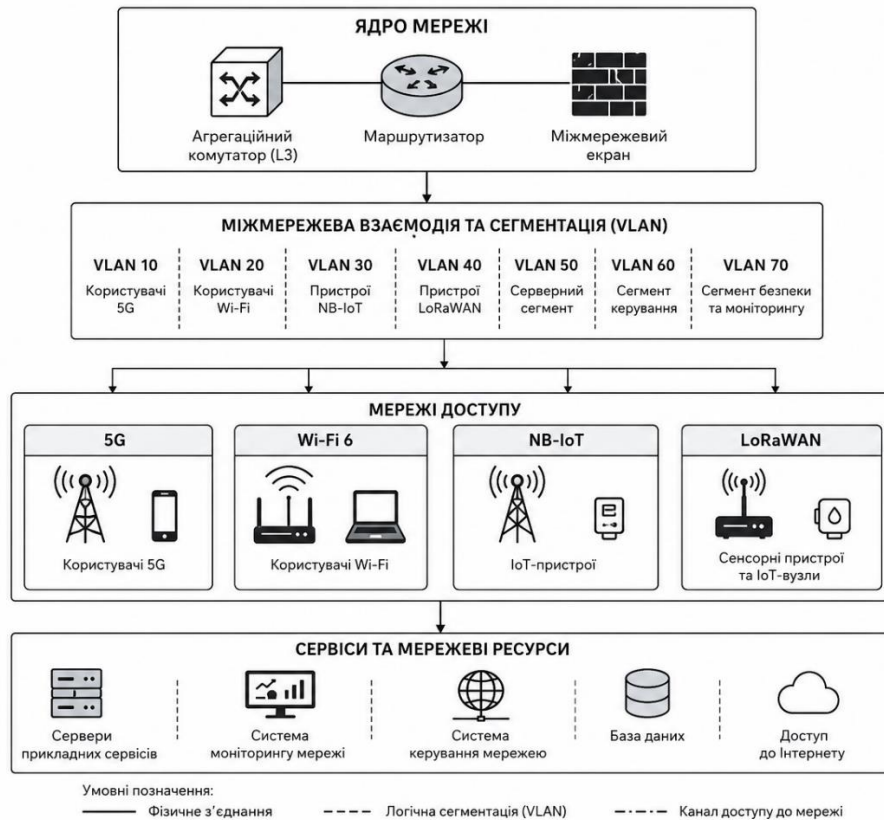


Рис. 2.2. Схема міжмережевої взаємодії та маршрутизації в гетерогенній мережі

Для реалізації внутрішньої маршрутизації між сегментами мережі доцільно використовувати протокол OSPF. Цей протокол є одним із найбільш поширених рішень для корпоративних мереж завдяки високій швидкості адаптації до змін топології та можливості автоматичного визначення оптимальних маршрутів. Принцип роботи OSPF базується на алгоритмі Дейкстри, який забезпечує побудову найкоротших маршрутів між вузлами мережі. Застосування OSPF дозволяє підвищити масштабованість мережі та забезпечити ефективне використання доступних каналів зв'язку [14].

Для взаємодії із зовнішніми мережами та мережею Інтернет можуть використовуватися як статичні маршрути, так і протокол BGP у випадку розгортання більш масштабної інфраструктури. Вибір конкретного підходу залежить від розміру мережі та кількості зовнішніх підключень [15].

Важливим елементом функціонування запропонованої гетерогенної мережі є використання механізмів QoS (Quality of Service). Необхідність їх впровадження обумовлена тим, що в межах мережі одночасно передаються різні типи трафіку, які мають неоднакові вимоги до затримки, пропускну здатності та надійності доставки даних. Зокрема, сервіси відеоконференцзв'язку, IP-телефонії та системи відеоспостереження потребують мінімальних затримок і стабільної передачі даних, тоді як телеметрична інформація від IoT-пристроїв є менш чутливою до часових затримок. Тому використання механізмів QoS дозволяє раціонально розподіляти мережеві ресурси та підтримувати необхідний рівень якості обслуговування для критично важливих сервісів без перевантаження мережевої інфраструктури [17,18].

Для мережі типу «розумний кампус» важливим є забезпечення безперервного функціонування інформаційних сервісів навіть у випадку відмови окремих елементів інфраструктури. З цією метою в архітектурі мережі передбачено використання механізмів резервування та підвищення відмовостійкості. Реалізація резервних каналів зв'язку, дублювання критично важливих мережевих вузлів і використання альтернативних маршрутів передавання даних дозволяють мінімізувати вплив можливих відмов обладнання на роботу користувачів і сервісів. Для автоматичного перемикання між доступними маршрутами можуть застосовуватися протоколи STP, HSRP та VRRP, що забезпечують збереження працездатності мережі у випадку виникнення аварійних ситуацій [12].

Окремим напрямом проектування є забезпечення інформаційної безпеки мережі. Актуальність цього питання пов'язана з наявністю великої кількості користувацьких пристроїв, безпроводових сегментів та IoT-вузлів, які можуть

виступати потенційними точками реалізації кіберзагроз. Для зниження відповідних ризиків передбачено використання міжмережевого екранування, сегментації мережі засобами VLAN, списків контролю доступу, VPN-технологій та механізмів шифрування даних. Для безпроводового доступу доцільним є застосування стандарту WPA3, який забезпечує підвищений рівень захисту порівняно з попередніми версіями протоколу. Особлива увага приділяється захисту IoT-пристроїв, оскільки обмежені обчислювальні ресурси таких вузлів часто ускладнюють використання складних механізмів безпеки та підвищують ризик несанкціонованого доступу до мережі [26].

Таким чином, використання VLAN-сегментації, протоколу OSPF, механізмів QoS, засобів резервування та сучасних інструментів захисту інформації дозволяє забезпечити ефективне, масштабоване та безпечне функціонування гетерогенної телекомунікаційної мережі. Запропонований підхід створює умови для стабільної роботи різномірних сервісів, оптимального розподілу навантаження та подальшого розвитку мережевої інфраструктури.

Висновки

У другому розділі було сформовано основні вимоги до гетерогенної телекомунікаційної мережі з урахуванням особливостей її функціонування в середовищі типу «розумний кампус». Визначено ключові критерії проєктування, серед яких пропускна здатність, затримка передавання даних, підтримка великої кількості пристроїв, масштабованість, енергоефективність, надійність та інформаційна безпека.

На основі сформованих вимог розроблено структурну схему запропонованої мережі та визначено принципи організації її функціональних сегментів. Запропонована архітектура передбачає інтеграцію технологій 5G, Wi-Fi 6, NB-IoT та LoRaWAN у межах єдиної мережевої інфраструктури. Також обґрунтовано вибір основних компонентів мережі та їх роль у забезпеченні взаємодії між різними категоріями користувачів і пристроїв.

У процесі проектування визначено підходи до організації міжмережевої взаємодії та маршрутизації трафіку. Для цього запропоновано використання багаторівневої IP-архітектури, VLAN-сегментації, механізмів динамічної маршрутизації та засобів забезпечення якості обслуговування. Крім того, розглянуто заходи щодо підвищення надійності та безпеки мережі, зокрема резервування мережевих ресурсів, контроль доступу та захист інформації.

Отримані результати дозволили сформувати цілісну модель гетерогенної телекомунікаційної мережі, яка відповідає поставленим вимогам та може бути використана як основа для подальшої оцінки ефективності її функціонування й розроблення рекомендацій щодо оптимізації мережевої інфраструктури.

РОЗДІЛ 3.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕРЕЖІ

Після розроблення структури гетерогенної телекомунікаційної мережі та обґрунтування принципів її побудови необхідно здійснити оцінку основних параметрів функціонування запропонованої архітектури. Це дозволяє визначити відповідність мережі встановленим вимогам щодо пропускну здатності, затримки передавання даних, спектральної ефективності, щільності підключених пристроїв та енергоефективності.

Особливістю запропонованої мережі є поєднання декількох технологій безпроводового доступу, зокрема 5G, Wi-Fi 6, NB-IoT та LoRaWAN. Кожна з них характеризується власними технічними параметрами та орієнтована на обслуговування різних категорій користувачів і типів трафіку. У зв'язку з цим оцінювання функціонування мережі повинно враховувати не лише характеристики окремих технологій, а й особливості їх спільного використання в межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури [2,7,9].

У цьому розділі виконано оцінку основних параметрів запропонованої мережі, розглянуто вплив антенних систем на характеристики радіоканалів та сформовано рекомендації щодо оптимізації мережевої інфраструктури. Основна увага приділяється узгодженню параметрів різних технологій доступу та підвищенню ефективності їх спільного функціонування в межах гетерогенної телекомунікаційної системи.

3.1 Оцінка ключових параметрів функціонування мережі

Для оцінювання ефективності запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі необхідно визначити основні показники, які характеризують її здатність забезпечувати якісне обслуговування користувачів та функціонування сервісів Інтернету речей. До таких показників належать пропускна здатність, затримка передавання даних, спектральна

ефективність, щільність підключених пристроїв та енергоефективність мережевої інфраструктури.

Особливістю запропонованої мережі є інтеграція технологій 5G, Wi-Fi 6, NB-IoT та LoRaWAN у межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Кожна з цих технологій орієнтована на виконання окремих функціональних завдань, тому оцінювання ефективності повинно враховувати специфіку їх застосування та взаємодії між собою. Аналіз наведених показників дозволяє визначити відповідність мережі вимогам, сформованим у другому розділі роботи, а також оцінити можливості її практичного використання для реалізації концепції «розумного кампусу».

3.1.1. Пропускна здатність мережі

Пропускна здатність є одним із ключових параметрів телекомунікаційної мережі та визначає максимальний обсяг інформації, який може бути переданий через канал зв'язку за одиницю часу. Для її оцінювання використовується залежність [5]:

$$R = B \cdot \eta \dots\dots\dots(3.1)$$

де:

R – швидкість передавання даних, Мбіт/с;

B – ширина смуги частот, МГц;

η – спектральна ефективність, біт/(с·Гц).

Для мережі Wi-Fi 6 при ширині каналу 80 МГц та середній спектральній ефективності 8 біт/(с·Гц) отримаємо:

$$R = 80 \cdot 8 = 640 \text{ Мбіт/с} \dots\dots\dots(3.2)$$

Отриманий результат свідчить про можливість забезпечення високошвидкісного доступу до мережевих ресурсів для великої кількості користувачів у межах навчальних корпусів та адміністративних приміщень.

Для мережі 5G значення пропускної здатності може перевищувати декілька гігабіт за секунду залежно від використовуваного частотного діапазону, ширини смуги частот та кількості просторових потоків MIMO.

Таким чином, поєднання технологій 5G та Wi-Fi 6 дозволяє забезпечити необхідний рівень продуктивності для мультимедійних сервісів, хмарних застосунків і систем дистанційного навчання. Архітектура мережі забезпечує достатній запас пропускної здатності для підтримки користувацького трафіку та подальшого збільшення навантаження.

3.1.2. Затримка передавання даних

Затримка передавання даних характеризує час, необхідний для доставки інформації від джерела до отримувача. Для сервісів реального часу цей параметр є одним із найбільш критичних.

Сумарна затримка визначається як [18]:

$$T = T_{\text{обр}} + T_{\text{черг}} + T_{\text{пер}} + T_{\text{пош}} \dots\dots\dots(3.3)$$

де:

T —загальна затримка передавання даних, мс;

$T_{\text{обр}}$ — затримка обробки пакетів мережевим обладнанням, мс;

$T_{\text{черг}}$ — затримка в чергах комутаторів і маршрутизаторів, мс;

$T_{\text{пер}}$ — час передавання пакета через канал зв'язку, мс;

$T_{\text{пош}}$ — час поширення сигналу середовищем передавання, мс.

Для мережі 5G типові значення сумарної затримки становлять 1–10 мс, що дозволяє використовувати її для застосувань із підвищеними вимогами до швидкодії [1-3].

3.1.3. Спектральна ефективність

Рациональне використання радіочастотного ресурсу характеризується спектральною ефективністю. Даний показник визначається співвідношенням між швидкістю передавання даних та займаною смугою частот [9,10]:

$$\eta = \frac{R}{B} \dots\dots\dots(3.4)$$

де:

η – спектральна ефективність, біт/(с·Гц);

R – швидкість передавання даних, Мбіт/с;

B – ширина смуги частот, МГц.

Для сучасних мереж 5G спектральна ефективність може перевищувати 10 біт/(с·Гц) завдяки використанню технологій Massive MIMO, адаптивної модуляції та Beamforming. У мережах Wi-Fi 6 використання OFDMA та MU-MIMO також забезпечує суттєве підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу порівняно з попередніми поколіннями безпроводових мереж. Високі значення спектральної ефективності є особливо важливими в умовах обмеженого частотного ресурсу та значної концентрації користувачів [3,20].

3.1.4. Щільність підключених пристроїв

Однією з особливостей сучасних гетерогенних мереж є необхідність підтримки великої кількості користувацьких пристроїв і вузлів Інтернету речей.

Щільність підключення визначається співвідношенням [2]:

$$D = \frac{N}{S} \dots\dots\dots(3.5)$$

де:

D – щільність підключених пристроїв, пристроїв/км²;

N – кількість пристроїв;

S – площа покриття, км².

Для прикладу розглянемо територію кампусу площею 0,5 км², на якій функціонують приблизно 5000 пристроїв.

Тоді:

$$D = \frac{5000}{0.5} = 10000 \text{ пристроїв/км}^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

Отримане значення суттєво менше за граничні можливості технології 5G, яка відповідно до специфікацій mMTC здатна підтримувати до 10^6 пристроїв на квадратний кілометр.

Отже, запропонована мережа має достатній резерв масштабованості та може забезпечувати подальше збільшення кількості підключених пристроїв без критичного погіршення продуктивності.

3.1.5. Енергоефективність мережі

Для сегментів Інтернету речей одним із ключових показників ефективності є енергоефективність мережі. Даний параметр характеризує обсяг інформації, який може бути переданий на одиницю витраченої енергії, та має особливе значення для автономних сенсорних пристроїв, що працюють від батарейних джерел живлення протягом тривалого часу без технічного обслуговування.

Енергоефективність визначається співвідношенням [9]:

$$E = \frac{R}{P} \dots\dots\dots(3.7)$$

де:

E – енергоефективність мережі, біт/Дж;

R – швидкість передавання даних, біт/с;

P – споживана потужність, Вт.

Для оцінювання енергоефективності розглянемо типовий IoT-пристрій, який передає телеметричні дані зі швидкістю 10 кбіт/с та споживає потужність 0,05 Вт.

У такому випадку:

$$E = \frac{10000}{0.05} = 200000 \text{ біт/Дж} \dots\dots\dots(3.8)$$

Отримане значення свідчить про високу ефективність використання енергетичних ресурсів під час передавання даних. Для більшості IoT-застосувань визначальним фактором є не максимальна швидкість передавання інформації, а можливість тривалої автономної роботи пристроїв при мінімальному енергоспоживанні.

У запропонованій гетерогенній мережі для підключення сенсорних вузлів використовуються технології NB-IoT та LoRaWAN, які належать до класу LPWAN. Їх застосування дозволяє забезпечити передавання невеликих обсягів даних на значні відстані при мінімальних витратах енергії. Додатковому підвищенню енергоефективності сприяє використання режимів енергозбереження та періодичного обміну даними, за яких більшу частину часу пристрої перебувають у режимі низького енергоспоживання [7,28].

Завдяки зазначеним особливостям автономна робота сенсорних пристроїв у мережах NB-IoT та LoRaWAN може становити декілька років без заміни елементів живлення. Це робить такі технології доцільними для використання в системах моніторингу навколишнього середовища, контролю інженерної інфраструктури, обліку ресурсів та інших застосуваннях Інтернету речей.

Таким чином, використання технологій NB-IoT та LoRaWAN забезпечує необхідний рівень енергоефективності для функціонування IoT-сегментів запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі та дозволяє суттєво зменшити експлуатаційні витрати під час її використання.

3.2 Аналіз впливу антенних систем на ефективність радіоканалів

Одним із важливих чинників, що впливають на якість функціонування безпроводових сегментів запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі, є характеристики антенних систем. Від параметрів антен залежить

рівень прийнятого сигналу, зона покриття, стійкість до завад та ефективність використання радіочастотного ресурсу. Оскільки в межах мережі використовуються технології 5G, Wi-Fi 6, NB-IoT та LoRaWAN, до антенних систем висуваються різні вимоги щодо дальності зв'язку, пропускної здатності та умов поширення сигналу.

Таблиця. 3.1

Вплив характеристик антенних систем на параметри радіоканалів

Характеристика антенної системи	Вплив на радіоканал	Вплив на мережу
Коефіцієнт підсилення антени	Підвищення рівня прийнятого сигналу	Збільшення дальності зв'язку та покращення якості покриття
Діаграма спрямованості	Концентрація або розподіл енергії випромінювання	Оптимізація зони обслуговування користувачів
Ширина променя	Визначає площу покриття та щільність сигналу	Баланс між радіусом дії та пропускною здатністю
Поляризація сигналу	Зменшення втрат під час передавання	Підвищення завадостійкості та стабільності зв'язку
Технологія MIMO	Передавання кількох потоків даних одночасно	Збільшення пропускної здатності мережі
Технологія Beamforming	Формування спрямованого променя до користувача	Покращення рівня сигналу та ефективності використання спектра
Розташування антени	Впливає на умови поширення радіохвиль	Зменшення зон із нестабільним покриттям
Робочий частотний діапазон	Визначає особливості поширення сигналу	Компроміс між дальністю зв'язку та швидкістю передавання даних
Кількість антенних елементів	Впливає на можливості просторового мультиплексування	Підвищення продуктивності мережі при великій кількості користувачів

Під час проєктування мережі вибір антенних систем здійснювався з урахуванням функціонального призначення окремих сегментів інфраструктури. Для широкосмугових сервісів пріоритетними є висока пропускна здатність та ефективне обслуговування великої кількості користувачів, тоді як для IoT-сегментів визначальними факторами є розширена зона покриття та енергоефективність передавання даних. У зв'язку

з цим аналіз характеристик антенних систем дозволяє оцінити їх вплив на параметри радіоканалів та обґрунтувати доцільність використання обраних технічних рішень у запропонованій гетерогенній мережі [9–11].

Дані таблиці 3.1 демонструють, що ефективність функціонування безпроводових сегментів мережі визначається сукупністю характеристик антенної системи. Найбільший вплив на параметри радіоканалів мають коефіцієнт підсилення, форма діаграми спрямованості та можливість використання сучасних технологій просторового оброблення сигналів. Саме ці параметри безпосередньо впливають на рівень прийнятого сигналу, якість покриття території та стійкість мережі до зовнішніх завад.

Особливого значення для сучасних широкосмугових мереж набувають технології MIMO та Beamforming. Використання декількох антенних елементів дозволяє реалізувати просторове мультиплексування потоків даних, що сприяє підвищенню пропускної здатності мережі без збільшення займаного частотного ресурсу. Технологія Beamforming забезпечує формування спрямованого радіопроменя в напрямку користувача, що дозволяє підвищити рівень корисного сигналу, зменшити вплив міжканальних завад та покращити спектральну ефективність системи [20].

Не менш важливим фактором є правильне розташування антен та вибір їх робочого частотного діапазону. Під час проєктування мережі необхідно враховувати особливості поширення радіохвиль у межах навчальних корпусів, відкритих територій кампусу та зон із підвищеною щільністю користувачів. Раціональне розміщення антенних систем дозволяє зменшити кількість зон із нестабільним покриттям, забезпечити більш рівномірний розподіл навантаження між сегментами мережі та підвищити загальну ефективність використання мережевої інфраструктури [9–11].

Таким чином, результати аналізу свідчать про те, що забезпечення необхідних показників пропускної здатності, якості покриття та надійності радіозв'язку залежить не від окремої характеристики антени, а від комплексного врахування її параметрів під час проєктування мережі. Це

підтверджує важливість обґрунтованого вибору антенних систем для різних сегментів запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі.

Для сегментів LoRaWAN важливе значення має вибір антенних систем із достатнім коефіцієнтом підсилення та відповідним робочим частотним діапазоном. Збільшення коефіцієнта підсилення антени сприяє розширенню зони покриття та підвищенню стійкості приймання сигналу, що є особливо важливим для розподілених сенсорних мереж і систем моніторингу [7,24].

Для оцінювання впливу параметрів антенних систем на характеристики радіоканалів доцільно враховувати втрати сигналу під час його поширення у середовищі передавання.

Однією з найпоширеніших моделей є модель втрат сигналу у вільному просторі, яка дозволяє оцінити залежність рівня сигналу від робочої частоти та відстані між передавачем і приймачем [9, 10]:

$$L = 20\log^{10}(f) + 20\log^{10}(d) + 32.44 \dots \dots \dots (3.9)$$

де:

L – втрати сигналу під час поширення, дБ;

f – частота сигналу, МГц;

d – відстань між передавачем і приймачем, км.

Аналіз виразу (3.8) показує, що зі збільшенням частоти сигналу та відстані між вузлами мережі втрати під час поширення радіохвиль зростають. Саме тому під час проєктування безпроводових сегментів необхідно враховувати компроміс між швидкістю передавання даних і площею покриття. Для мереж 5G характерне використання різних частотних діапазонів, кожен з яких має власні особливості поширення сигналу. Низькі частоти забезпечують більшу площу покриття та кращу проникність через перешкоди, тоді як середні та високі діапазони дозволяють досягати вищих швидкостей передавання даних [3,19].

У безпроводових локальних мережах Wi-Fi якість покриття також значною мірою залежить від характеристик антенних систем і особливостей розміщення точок доступу. Використання сучасних технологій MU-MIMO та

OFDMA дозволяє ефективніше використовувати доступні радіоресурси та підтримувати стабільну роботу мережі навіть за високої щільності підключених користувачів [5, 27].

Для сегментів NB-IoT та LoRaWAN пріоритетними є забезпечення стабільного покриття та підтримка великої кількості пристроїв із мінімальним енергоспоживанням. У таких системах вибір антенних рішень безпосередньо впливає на дальність зв'язку, надійність передавання телеметричних даних та загальну ефективність функціонування IoT-інфраструктури [7,24,28].

3.3 Практичні рекомендації щодо розгортання та оптимізації мережі

Після виконання оцінювання основних параметрів ефективності та аналізу впливу антенних систем на характеристики радіоканалів доцільно розглянути практичні аспекти розгортання й оптимізації запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі. Реальна ефективність мережевої інфраструктури визначається не лише технічними характеристиками використовуваного обладнання, а й правильністю його налаштування, розміщення та подальшого адміністрування [12,17].

На основі результатів, отриманих під час проєктування мережі та оцінювання її основних параметрів, сформовано рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі. Основну увагу приділено питанням організації безпроводового доступу, оптимізації радіопокриття, забезпечення якості обслуговування, масштабованості та інформаційної безпеки мережевої інфраструктури.

Одним із ключових етапів побудови мережевої інфраструктури є правильне розміщення базових станцій та точок доступу. Від цього безпосередньо залежать якість покриття, рівень сигналу, пропускна здатність та стабільність роботи мережі. Для мереж 5G рекомендується використовувати різні підходи залежно від частотного діапазону. У разі застосування mmWave-діапазонів необхідне більш щільне розташування

базових станцій через значні втрати сигналу під час поширення. Водночас низькочастотні діапазони забезпечують значно більшу площу покриття та можуть використовуватися для обслуговування територій із меншою щільністю користувачів. Середньочастотні діапазони дозволяють досягти компромісу між пропускною здатністю та радіусом покриття і є найбільш доцільними для більшості практичних сценаріїв розгортання мереж п'ятого покоління. Для запропонованої мережі типу «розумний кампус» найбільш доцільним є використання середньочастотного діапазону 5G, який забезпечує раціональне співвідношення між площею покриття, пропускною здатністю та витратами на розгортання інфраструктури [3,19].

Під час організації локального безпроводового доступу рекомендується використовувати точки доступу стандарту Wi-Fi 6. Вибір саме цієї технології обумовлений її високою пропускною здатністю, підтримкою OFDMA та MU-MIMO, а також можливістю ефективної роботи в умовах великої кількості одночасно підключених користувачів. У запропонованій мережі точки доступу доцільно розміщувати в центральних частинах приміщень на висоті приблизно 2,5–3 м із мінімальною кількістю фізичних перешкод між передавачем і користувачем. Такий підхід дозволяє забезпечити більш рівномірне покриття та підвищити якість безпроводового зв'язку [5,22].

Незважаючи на появу стандарту Wi-Fi 7, для запропонованої мережі обрано технологію Wi-Fi 6, оскільки вона забезпечує достатній рівень продуктивності, має широку підтримку обладнання та характеризується нижчою вартістю впровадження. Крім того, Wi-Fi 6 є більш поширеним рішенням для корпоративних і змішаних мереж, що спрощує його інтеграцію з існуючою телекомунікаційною інфраструктурою [5,27].

Важливим напрямом оптимізації є мінімізація міжканальних завад та інтерференції сигналів. Для цього рекомендується використовувати автоматичний вибір каналів, секторні антени, технологію Beamforming та адаптивне регулювання потужності передавачів. Особливо актуальною ця проблема є для Wi-Fi-мереж, де велика кількість точок доступу може

працювати в одному частотному діапазоні. Саме тому в діапазоні 2,4 ГГц доцільно використовувати неперекривні канали 1, 6 та 11. Використання таких каналів дозволяє мінімізувати взаємні завади між сусідніми точками доступу, зменшити кількість повторних передавань кадрів та підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу. Для діапазону 5 ГГц ефективним рішенням є використання DFS-канали, що забезпечують більшу кількість доступних частотних ресурсів та сприяють зниженню рівня перевантаження мережі [17,22].

Для забезпечення стабільної роботи сервісів реального часу необхідно використовувати механізми QoS. Їх застосування дозволяє надавати пріоритет трафіку IP-телефонії, відеоконференцій, систем відеоспостереження та службових мережевих сервісів. Завдяки цьому критично важливі застосунки отримують необхідну пропускну здатність навіть в умовах високого навантаження мережі. Менш чутливий до затримок трафік, зокрема телеметричні дані IoT-пристроїв або фонові оновлення програмного забезпечення, може обслуговуватися з нижчим пріоритетом. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільну роботу навчальних сервісів, систем відеоконференцій зв'язку та адміністративних інформаційних ресурсів навіть за умов пікового навантаження мережі. [17,18].

Для підвищення рівня безпеки та керованості мережі ефективним рішенням є використання механізми сегментації трафіку на основі технології VLAN. Розподіл користувацького, службового та IoT-трафіку між окремими логічними сегментами дозволяє зменшити рівень широкомовного навантаження, підвищити безпеку мережі та спростити її адміністрування. Крім того, використання VLAN дозволяє реалізувати більш ефективну політику контролю доступу до мережевих ресурсів. У межах запропонованої архітектури окремі VLAN можуть використовуватися для користувацького трафіку, IoT-пристроїв, систем відеоспостереження та адміністративного сегмента мережі. [13].

Окрему увагу необхідно приділити оптимізації енергоспоживання пристроїв Інтернету речей. Для цього варто застосовувати режими енергозбереження, зменшувати частоту передавання даних та застосовувати спеціалізовані LPWAN-технології. Використання NB-IoT та LoRaWAN дозволяє забезпечити автономну роботу сенсорних вузлів протягом декількох років без необхідності заміни елементів живлення, що є важливою перевагою для систем моніторингу та віддаленого збору даних [7,28].

Під час розгортання мереж LoRaWAN особливу увагу необхідно приділяти вибору місця встановлення шлюзів. Рекомендується розміщувати їх на дахах будівель або інших підвищеннях, що дозволяє максимально збільшити радіус покриття та забезпечити надійний зв'язок із великою кількістю сенсорних пристроїв. Використання антен із підвищеним коефіцієнтом підсилення додатково сприяє покращенню якості приймання сигналу та розширенню зони обслуговування [24].

Важливим напрямом оптимізації функціонування мережі є контроль та балансування навантаження між окремими сегментами інфраструктури. У гетерогенній мережі різні технології доступу обслуговують різні категорії користувачів і типи трафіку, тому нерівномірний розподіл навантаження може призводити до погіршення якості обслуговування. Аналіз інтенсивності трафіку та завантаженості мережевих сегментів дозволяє своєчасно виявляти перевантажені ділянки та забезпечувати більш ефективне використання наявних ресурсів мережі [16].

Окремим напрямом оптимізації є вдосконалення радіопокриття безпроводових сегментів мережі. Для цього необхідно здійснювати періодичний контроль рівня сигналу, аналіз параметрів радіоканалів та виявлення зон із нестабільним покриттям. За результатами такого аналізу можуть коригуватися параметри роботи точок доступу, базових станцій та антенних систем, що сприяє підвищенню якості зв'язку та ефективності використання радіочастотного ресурсу [17,22].

Ще одним напрямом оптимізації є підвищення ефективності використання мережевих ресурсів шляхом постійного контролю параметрів функціонування мережі. Регулярний аналіз продуктивності обладнання, завантаження каналів зв'язку та якості обслуговування користувачів дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми та приймати обґрунтовані рішення щодо вдосконалення роботи мережевої інфраструктури [16].

Для підвищення ефективності функціонування запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі доцільно реалізувати комплекс заходів, спрямованих на вдосконалення параметрів радіопокриття, раціональне використання мережевих ресурсів та підтримання необхідної якості обслуговування користувачів. Основні напрями оптимізації наведено на рисунку 3.2.



Рис. 3.2. Основні напрями оптимізації гетерогенної телекомунікаційної мережі

Рисунок 3.2 відображає основні напрями оптимізації функціонування запропонованої мережі. Найбільший вплив на її ефективність мають якість радіопокриття, рівень міжканальних завад, розподіл навантаження між сегментами мережі та забезпечення необхідного рівня якості обслуговування. Окрему увагу приділено питанням енергоефективності IoT-сегментів і моніторингу параметрів функціонування мережі, що дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки та підтримувати стабільну роботу інфраструктури.

Таким чином, сформовані рекомендації охоплюють ключові напрями вдосконалення гетерогенної телекомунікаційної мережі та спрямовані на підвищення ефективності використання мережевих ресурсів, покращення якості надання послуг і забезпечення стабільного функціонування мережі в умовах зростання кількості користувачів та підключених пристроїв.

Висновки

У третьому розділі виконано оцінювання основних параметрів функціонування запропонованої гетерогенної телекомунікаційної мережі. Проведений аналіз дозволив оцінити характеристики мережі за показниками пропускної здатності, затримки передавання даних, спектральної ефективності, щільності підключених пристроїв та енергоефективності окремих сегментів інфраструктури.

У процесі дослідження встановлено, що поєднання технологій 5G та Wi-Fi 6 забезпечує підтримку високошвидкісного передавання даних і сервісів реального часу, тоді як використання NB-IoT та LoRaWAN є доцільним для організації енергоефективного сегмента Інтернету речей із великою кількістю підключених пристроїв.

Окрему увагу приділено аналізу впливу антенних систем на характеристики радіоканалів. Показано, що параметри антен, особливості радіопокриття та застосування технологій MIMO і Beamforming суттєво

впливають на рівень сигналу, якість зв'язку та ефективність використання радіочастотного ресурсу.

На основі отриманих результатів сформовано рекомендації щодо оптимізації функціонування мережі. Основними напрямками вдосконалення визначено оптимізацію радіопокриття, мінімізацію міжканальних завад, забезпечення необхідної якості обслуговування, підвищення енергоефективності IoT-сегментів, балансування навантаження та організацію моніторингу параметрів функціонування мережі.

Проведене дослідження підтвердило доцільність використання гетерогенної архітектури під час побудови сучасних телекомунікаційних систем. Запропоноване рішення забезпечує ефективне поєднання різних технологій безпроводового доступу та може бути використане під час проєктування мереж типу «розумний кампус», систем Інтернету речей та інших інформаційно-комунікаційних середовищ із підвищеними вимогами до продуктивності та надійності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дипломній роботі досліджено сучасні безпроводові технології та особливості їх застосування для побудови гетерогенних телекомунікаційних мереж. Проведений аналіз показав, що зростання обсягів трафіку, кількості підключених пристроїв та вимог до якості телекомунікаційних послуг обумовлює необхідність використання комплексних мережових рішень, здатних ефективно поєднувати різні технології доступу.

У результаті дослідження встановлено, що перспективним підходом до побудови сучасної телекомунікаційної інфраструктури є використання гетерогенної архітектури, яка інтегрує технології 5G, Wi-Fi 6, NB-IoT та LoRaWAN. Поєднання зазначених технологій дозволяє забезпечити підтримку різних типів трафіку, ефективно використовувати мережеві ресурси та адаптувати інфраструктуру до широкого спектра практичних сценаріїв застосування.

У роботі сформовано вимоги до гетерогенної телекомунікаційної мережі та розроблено її структурну модель для середовища типу «розумний кампус». Запропонована архітектура передбачає інтеграцію ширококутового мобільного доступу, локальних безпроводових мереж та сегментів Інтернету речей у межах єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури.

Проведене оцінювання основних параметрів функціонування мережі підтвердило можливість забезпечення необхідного рівня пропускну здатності, підтримки значної кількості підключених пристроїв, ефективного використання радіочастотного ресурсу та енергоефективної роботи IoT-сегментів. Встановлено, що використання технологій NB-IoT і LoRaWAN є доцільним для організації масштабних сенсорних мереж, тоді як 5G і Wi-Fi 6 забезпечують підтримку високошвидкісних сервісів та сервісів реального часу.

У межах дослідження проаналізовано вплив антенних систем на характеристики радіоканалів. Визначено, що параметри антен, особливості радіопокриття та використання технологій MIMO і Beamforming суттєво

впливають на рівень сигналу, якість зв'язку та ефективність використання спектрального ресурсу мережі.

На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо розгортання та оптимізації гетерогенної телекомунікаційної мережі. Основними напрямками вдосконалення визначено оптимізацію радіопокриття, мінімізацію міжканальних завад, забезпечення необхідної якості обслуговування, підвищення енергоефективності IoT-сегментів, балансування навантаження та моніторинг параметрів функціонування мережі.

Отримані результати підтверджують доцільність використання гетерогенних телекомунікаційних мереж під час побудови сучасних інформаційно-комунікаційних систем. Запропоновані рішення можуть бути використані під час проєктування мереж типу «розумний кампус», систем Інтернету речей, інтелектуальних систем моніторингу та інших телекомунікаційних інфраструктур, що потребують ефективного поєднання різних технологій безпроводового доступу.

Таким чином, поставлену мету дипломної роботи досягнуто, а визначені завдання виконано в повному обсязі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Geneva : International Telecommunication Union, 2015. 21 p.
2. 3GPP TS 23.501. System Architecture for the 5G System (5GS). Release 17. Sophia Antipolis : 3GPP, 2023. 874 p.
3. 3GPP TS 38.300. NR and NG-RAN Overall Description. Release 17. Sophia Antipolis : 3GPP, 2023. 192 p.
4. IEEE Std 802.11-2020. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements for Wireless LAN. New York : IEEE, 2020. 4374 p.
5. IEEE Std 802.11ax-2021. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. New York : IEEE, 2021. 767 p.
6. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey. Computer Networks. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 393–422.
7. LoRa Alliance. LoRaWAN Specification Version 1.0.4. Fremont : LoRa Alliance, 2020. 90 p.
8. Cisco Systems. Heterogeneous Network (HetNet) Architectures : Technical White Paper. San Jose : Cisco Systems, 2021.
9. Stallings W. Wireless Communications and Networks. 3rd ed. Harlow : Pearson Education, 2020. 624 p.
10. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 960 p.
11. Molisch A. F. Wireless Communications. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2023. 912 p.
12. Cisco Systems. Campus Network for High Availability Design Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/enterprise/campus-design/214805-campus-network-for-high-availability.html>

13. Cisco Systems. VLAN Design Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/vlan/10023-3.html>
14. Moy J. OSPF Version 2. RFC 2328. Fremont : Internet Engineering Task Force (IETF), 1998. 244 p.
15. Rekhter Y., Li T., Hares S. Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 4271. Fremont : Internet Engineering Task Force (IETF), 2006. 104 p.
16. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report>
17. Cisco Systems. Quality of Service Networking Design Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com>
18. ITU-T Y.1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services. Geneva : International Telecommunication Union, 2011. 68 p.
19. Ericsson White Paper. 5G Radio Access Network Architecture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers>
20. Ericsson White Paper. Massive MIMO and Beamforming for 5G Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers>
21. Cisco Catalyst 9300 Series Switches Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-9300-series-switches/nb-06-cat9300-ser-data-sheet-cte-en.html>
22. Cisco Catalyst 9130AX Series Access Point Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9100ax-access-points/nb-06-cat-9130-ser-ap-ds-cte-en.html>

23. Ericsson Radio 4408 Product Description [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
https://www.winncom.com/docs/ericsson/Ericsson_Radio_4408_Datasheet.pdf
24. Kerlink Wirnet iStation Gateway Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kerlink.com/product/wirnet-istation>
25. Dell Technologies. PowerEdge Server Portfolio Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dell.com/en-us/dt/servers/index.htm>
26. Stallings W. Network Security Essentials: Applications and Standards. 7th ed. Harlow : Pearson Education, 2021. 816 p.
27. Wi-Fi Alliance. Wi-Fi CERTIFIED 7™ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-7>
28. Nokia. NB-IoT Deployment Guidelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nokia.com/networks/portfolio/nb-iot/>
29. Cisco Systems. Smart Campus Architecture Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/education/smart-campus.html>