

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки

«Затверджую»
Зав. кафедри теоретичної та
прикладної системотехніки
_____ д.т.н., проф. С. І. Шматов
«__» _____ 2024 р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
бакалавра

на тему: «Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління»

Захищено на засіданні
Атестаційної комісії № 44
протокол № __ від __.06.2024 р.
Оцінка _____ / _____
Голова Атестаційної комісії
_____ **СКОБ Ю. О.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Виконав:
студент 4 курсу, групи КУ-41
Галузь знань: 15 – Автоматизація та
приладобудування
Спеціальність: 151 – Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
ГОЛОЦВАН Данііл Ігорович

Керівник: к.е.н, доцент кафедри ТПС
ЧУБ Ольга Ігорівна

Рецензент: д.т.н., професор, професор
кафедри теоретичної та прикладної
інформатики
ФРОЛОВ В'ячеслав Вікторович

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 66 сторінок, із яких 47 сторінок основної частини з 36 рисунками, 1 таблицею, 28 найменувань списку використаних джерел та додатки.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення функціональної ефективності телекомунікаційної мережі зв'язку п'ятого покоління за рахунок визначення оптимального маршруту передавання інформації та реструктуризації трафіку.

Об'єктом дослідження є оптимізація процесів відмовостійкої маршрутизації потоків даних в мережах зв'язку п'ятого покоління.

Предметом дослідження є методи оптимізації потоків та маршрутів даних в мережі зв'язку п'ятого покоління.

Проблема, яка вирішується у кваліфікаційній роботі, полягає в розробці нового методу маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління. Розробка нового методу оптимізації маршрутизації базуватиметься на комбінуванні кількох підходів, таких як адаптивні алгоритми, що враховують поточний стан мережі, і прогностичні моделі, здатні передбачати зміни навантаження.

Область застосування – інфраструктура забезпечення високошвидкісного та надійного зв'язку у мережі 5G.

Ключові слова: ЗВ'ЯЗОК 5G, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МАРШРУТИЗАЦІЯ ТРАФІКУ, ВСЕПРОНИКНА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, MESH-МЕРЕЖА, D2D-КОМУНІКАЦІЇ.

ABSTRACT

The explanatory note for the bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the work is 66 pages, of which 47 pages are the main part, including 36 figures, 1 table, 28 references, and appendices.

The purpose of the qualification work is to enhance the functional efficiency of a fifth-generation telecommunications network by determining the optimal route for information transmission and restructuring traffic.

The object of the research is the optimization of fault-tolerant data flow routing processes in fifth-generation communication networks.

The subject of the research is the methods of optimizing data flows and routes in a fifth-generation communication network.

The problem addressed in the qualification work involves the development of a new routing method for fifth-generation communication networks. The development of the new routing optimization method will be based on combining several approaches, such as adaptive algorithms that consider the current network state and predictive models capable of forecasting load changes.

The application area is the infrastructure that provides high-speed and reliable communication in the 5G network.

Keywords: 5G TECHNOLOGY, INTERNET OF THINGS, TRAFFIC ROUTING, UBIQUITOUS SENSOR NETWORK, MESH NETWORK, D2D COMMUNICATIONS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ.....	9
1.1 Класифікація основних характеристик мереж зв'язку п'ятого покоління.....	9
1.2 Дослідження методів впровадження всепроникних сенсорних мереж.....	12
1.3 Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління.....	18
Висновки за розділом 1.....	21
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ	22
2.1 Маршрутизація трафіку в мережі бездротового зв'язку.....	22
2.2 Організація та проведення чисельного моделювання.....	29
2.3 Аналіз та вибір алгоритму маршрутизації потоків.....	32
Висновки за розділом 2.....	38
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	39
3.1 Обґрунтування середовища проєктування та програмної реалізації методу оптимізації маршрутизації.....	39
3.2 Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі.....	41
3.3 Аналіз результатів чисельного моделювання.....	49
3.4 Практичні рекомендації щодо використання методу оптимізації маршрутизації.....	50

Висновки за розділом 3.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	58

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

5G (fifth generation)	- мережа зв'язку п'ятого покоління;
IoT (Internet of Things)	- Інтернет речей;
LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy)	- протокол маршрутизації, заснований на структурі кластеризації;
USN (Ubiquitous Sensor Networks)	- всепроникна сенсорна мережа;
D2D (Device-to-device)	- тип зв'язку між пристроями;
SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)	- параметр якості каналу комунікації «відношення сигналу до шуму та інтерференції».

ВСТУП

Актуальність дослідження. У сучасному світі, де інформаційні технології та комунікаційні системи швидко розвиваються, мережі зв'язку п'ятого покоління (5G) стають ключовим елементом інфраструктури для забезпечення високошвидкісного та надійного зв'язку. 5G мережі відкривають нові можливості для інтернету речей (IoT), автономних транспортних засобів, розумних міст, телемедицини та багатьох інших галузей, що потребують надшвидких та низьколатентних комунікацій.

Однак, зростання кількості підключених пристроїв та обсягів переданих даних створює серйозні виклики для ефективного управління мережевими ресурсами. Одним із ключових завдань для забезпечення надійної роботи 5G мереж є оптимізація маршрутизації трафіку. Це дозволяє мінімізувати затримки, збільшити пропускну здатність та забезпечити якість обслуговування (QoS) для різних типів трафіку.

Оптимізація маршрутизації у мережах 5G потребує врахування багатьох факторів, таких як топологія мережі, навантаження на канали зв'язку, вимоги до якості обслуговування та динамічність мережеских умов. Врахування динамічних змін у мережеских умовах, таких як змінні навантаження та мобільність користувачів, є важливим аспектом для досягнення оптимальної продуктивності.

Сучасні методи маршрутизації не завжди можуть забезпечити необхідну продуктивність у таких умовах. Розробка та впровадження ефективних алгоритмів маршрутизації, які можуть адаптуватися до поточних умов мережі, дозволить значно покращити використання ресурсів та мінімізувати затримки. У цьому контексті дослідження та розробка методу оптимізації маршрутизації у мережах 5G має значну актуальність, оскільки сприяє розв'язанню однієї з ключових проблем сучасних комунікаційних систем, забезпечуючи високий рівень якості обслуговування та надійності зв'язку.

Результати роботи з розробки нового методу маршрутизації можуть мати значний вплив на розвиток технологій оптимізації маршрутизації в мережах п'ятого покоління. Вони сприятимуть підвищенню ефективності використання мережевих ресурсів, покращенню якості обслуговування та задоволенню потреб користувачів, що постійно зростають, у високошвидкісному та надійному зв'язку.

Мета – підвищення функціональної ефективності телекомунікаційної мережі зв'язку п'ятого покоління за рахунок визначення оптимального маршруту передавання інформації та реструктуризації трафіку.

Предмет – методи оптимізації потоків та маршрутів даних в мережі зв'язку п'ятого покоління.

Об'єкт – оптимізація процесів відмовостійкої маршрутизації потоків даних в мережах зв'язку п'ятого покоління.

Відповідно до мети дослідження були визначені наступні **завдання**:

1. Огляд сучасних методів маршрутизації в мережах зв'язку п'ятого покоління.
2. Обґрунтування вибору алгоритму маршрутизації для впровадження у мережі.
3. Моделювання архітектури маршрутизації для мереж зв'язку п'ятого покоління.
4. Аналіз ефективності запропонованих методів на основі чисельного моделювання.
5. Розробка програмної системи оптимізації маршрутизації в мережах зв'язку п'ятого покоління.
6. Підготовка практичних рекомендації щодо впровадження та використання оптимізованих методів маршрутизації у реальних умовах.

Для розв'язання поставлених завдань нами були використані такі **методи дослідження**: теоретико-критичний аналіз літератури з теми дослідження; зіставлення, узагальнення і синтезування здобутої інформації.

РОЗДІЛ 1.

СИСТЕМОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1. Класифікація основних характеристик мереж зв'язку п'ятого покоління

Мережа зв'язку 5G – стандарт п'ятого покоління мобільної мережі, заснований на стандартах 5G/IMT-2020 для радіоінтерфейсів у сфері телекомунікацій, наступник мережі 4G. Це технологія стільникової мережі, в якій зона обслуговування поділяється на невеликі географічні райони – стільники або соти. Усі бездротові пристрої 5G у соті підключені до Інтернету і мобільного зв'язку за допомогою радіохвиль через локальну антену. Основною перевагою нової мережі є більша пропускна здатність, що забезпечує вищу швидкість завантаження. Згодом планується збільшення швидкості до 10 Гбіт/с.

Станом на 2019 рік було заплановано завершення стандартизації мереж і систем п'ятого покоління 5G, а на 2020 рік – початок їх широкого впровадження. Мережі 5G мають інтегрувати всі досягнення мобільних і фіксованих мереж зв'язку, забезпечити швидкість доступу 10 Гбіт/с і вище, наблизити можливості хмарних обчислень безпосередньо до користувача і, найважливіше, стати основою цифрової економіки. Відповідний напрям робіт у Міжнародному Союзі Електрозв'язку отримав назву IMT 2020 (International Mobile Telecommunication system) [11].

Мережі 5G розглядаються як основа цифрової економіки, і перехід до них є еволюційним чи революційним етапом розвитку, що вимагає нових підходів до реалізації мереж 5G та послуг, що ними надаються. Мережі п'ятого покоління є гетерогенними, об'єднуючи різні типи мереж: від традиційних мобільних і фіксованих до сенсорних і літаючих мереж. В англійській літературі такі мережі

називаються HetNet (Heterogeneous Networks). Гетерогенність виявили при дослідженні взаємодії сенсорних мереж з системами тривалої еволюції. Виявилось, що гетерогенність може покращити якість обслуговування користувачів або пристроїв, що знаходяться на межі зони обслуговування базової станції, за рахунок застосування пристроїв інших мереж як ретрансляторів. Це привело до розвитку кооперативної передачі або кооперативних мереж, що стало першим кроком до перетворення радіального принципу побудови зони покриття базової станції в mesh-мережу. Mesh-мережа є принципово більш надійною структурою, ніж радіальна мережа.

Другою важливою особливістю мережі п'ятого покоління є концепція Інтернету речей (IoT). Вона пов'язана з принципово більшим числом потенційних пристроїв, які можуть бути підключені до мережі, у порівнянні з традиційними уявленнями про клієнтську базу мереж зв'язку. Відповідно до прогнозів, граничне число інтернет речей оцінюється на рівні 50 трильйонів. Це значно збільшує щільність пристроїв у мережі. Тому мережі 5G називають мережами з високою щільністю (High Dense) або навіть суперщільними мережами (Super High Dense). Відповідно, новою концепцією є взаємодія прилеглих пристроїв без участі базової станції або маршрутизаторів, що називається пристрій-пристрій (D2D). Масштабне впровадження D2D призведе до значної економії енергії в мережі в цілому, перетворюючи зону базової станції спочатку в повноцінну mesh-мережу, а згодом у рій пристроїв [18].

Ще однією особливістю мереж п'ятого покоління, яка принципово змінює їхню структуру та вплив на суспільний розвиток, є можливість надання послуг так званого тактильного Інтернету, для якого вимога щодо затримки становить 1 мс, що в 100 разів менше, ніж у традиційних пакетних мережах загального користування, побудованих відповідно до концепції мереж зв'язку наступного покоління NGN (Next Generation Networks). Це призвело до ще однієї назви мереж п'ятого покоління – мережі зв'язку з ультранизькими затримками.

Серед недоліків 5G слід зазначити, що найкраща передача сигналу відбувається між пристроями, розташованими в зоні прямої видимості на відстані до 250 м, інакше якість сигналу різко знижується (міліметрові хвилі, які є найкоротшими, швидко згасають, але забезпечують високу швидкість передачі даних у кілька Гбіт/с). Хоча ця проблема може бути вирішена шляхом розвитку інфраструктури (значне збільшення кількості передавачів), це не усуває питань безпеки, збереження і конфіденційності передачі даних. Водночас актуальними стають інші виклики: збільшення енергоспоживання (у кілька разів), багаторазове зростання споживання сировини та утворення електронних відходів, які збільшують техногенне навантаження; недостатнє вивчення впливу на здоров'я людини; негативний вплив на локальні екосистеми тощо.

Сьогодні використання 5G планується в різних спектрах радіочастот. Окрім діапазону 3,4-3,8 ГГц, який став найпопулярнішим у світі (це найнижчий із вільних діапазонів, де можливо виділяти широкі спектри), використовуватимуться частоти як 700 МГц (для роботи безпілотних автомобілів, роботів та автоматизованого промислового обладнання), так і в діапазоні від 24 ГГц і вище. Основна причина переходу на нові діапазони – нестача частот у сегменті нижче 6 ГГц. Щоб надати операторам зв'язку нові частоти і більш широкі смуги для передачі великих обсягів даних, виділяються два діапазони: FR1 (Frequency Range 1) та FR2 (Frequency Range 2). Перший включає традиційні частоти нижче 6 ГГц, другий – нові частоти міліметрового діапазону (від 24 до 100 ГГц) залежно від країни оператора [17].

Ще однією важливою відмітною рисою 5G є масштабна віртуалізація – використання технологій, що виходять за рамки виключно апаратних рішень. Більшість функцій реалізуються програмним способом, а не на рівні фізичної інфраструктури та апаратних рішень. Тому для 5G зазвичай використовують терміни «система» та «платформа», а не «мережа». Платформа 5G будується на базі програмних рішень, зокрема програмно-конфігурованих мереж SDN

(Software Defined Network) та віртуалізації мережевих функцій NFV (Network Function Virtualization). Функції 5G реалізуються у віртуальних програмних функціях VNF (Virtual Network Function), що працюють в інфраструктурі NFV. Різниця між цими двома поняттями полягає в тому, що VNF – це функція, а NFV – технологія, яка реалізується у фізичній інфраструктурі датацентрів (data centers) на базі стандартного комерційного обладнання COTS (Commercial Off-The-Shelf). Обладнання COTS включає три види стандартних пристроїв: сервери (обчислювальні пристрої), комутатори (мережеві пристрої) та системи збереження даних. Таким чином, обладнання традиційних мереж мобільного зв'язку змінюється на програмні сутності, що працюють у датацентрах на стандартних серверах і віртуальних машинах (Virtual Machines, VM). Важливу роль у розвитку 5G відіграватимуть «граничні хмари» (Edge Cloud), зокрема технологія MEC (Mobile Edge Cloud) та «туманні хмари» (Fog Cloud).

1.2. Дослідження методів впровадження всепроникних сенсорних мереж

Впродовж кількох років розвиток мереж і систем зв'язку відбувається під визначальним впливом концепції Інтернету речей. Сформульована в рекомендації Y.2060 Сектора стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т) на початку другого десятиліття 21 століття, концепція Інтернету речей суттєво змінила уявлення про розвиток мереж і систем зв'язку.

Основною ідеєю концепції Інтернету речей є положення про те, що саме речі, а не людина, є центральною ланкою клієнтської бази мереж зв'язку. Відповідно до цього положення, архітектура мережі, надані послуги, класи та параметри якості обслуговування, методи забезпечення мережевої безпеки повинні враховувати той факт, що речей у мережі буде значно більше, ніж людей,

і мережа повинна бути побудована з урахуванням цього нового явища. Відповідно до прогнозів World Wireless Research Forum, кількість Інтернет-речей до 2025 року має скласти 7 трильйонів [10].

Для мереж зв'язку найважливішим параметром є трафік, створюваний клієнтською базою. Хоча речей може бути дуже багато, визначальним для мережі є створюваний трафік і його характеристики. За оцінками агентства Mason Ltd, кількість повідомлень від Інтернет-речей становитиме від 1000 до 10000 на жителя планети в день. Порівняємо ці значення з сучасними технологіями телекомунікацій. Середнє число повідомлень у сучасних мобільних мережах становить 3,3 на користувача в день. У Facebook середній користувач створює 70 повідомлень на місяць і має 130 друзів. Ці сучасні технології за кількістю повідомлень на день на жителя планети суттєво поступаються навіть нижній оцінці прогнозованого числа повідомлень для Інтернету речей. Більш близькими до нижньої межі прогнозу є Twitter і електронна пошта. У Twitter щодня створюється 60 мільйонів повідомлень, що становить 344 повідомлення на день на користувача, а не на жителя планети. Електронна пошта генерує 247 мільярдів повідомлень на день, що становить 176 повідомлень на день на жителя планети, але 81% цієї інформації є спамом. Таким чином, впровадження концепції Інтернету речей призведе до виникнення надзвичайно великого обсягу повідомлень, які треба передати по мережі, і поки ще маловивченого характеру потоків цих повідомлень [18].

Інтернет речей включає як фізичні, так і інформаційні речі. Еволюція цієї концепції призвела до створення багатьох додатків для фізичних речей. Мережі, що забезпечують послуги для фізичних інтернет-речей, називають машина-машина (M2M, Machine-to-Machine). Прикладами мереж M2M є всепроникні сенсорні мережі USN (Ubiquitous Sensor Networks), цільові мережі для транспортних засобів VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), мобільні цільові мережі MANET (Mobile Ad Hoc Networks).

Бездротові сенсорні мережі часто називають технологічною основою реалізації концепції Інтернету речей, враховуючи їхній всепроникний характер і широке впровадження. В Україні дослідження бездротових сенсорних мереж на мережах загального користування широко проводяться з 2005 року. Було досягнуто значного прогресу в створенні алгоритмів для функціонування цих мереж, вивченні моделей трафіку, і ці результати отримали міжнародне визнання. Однак у сфері мережевої безпеки бездротових сенсорних мереж масштабні дослідження поки не проводилися, а наукові роботи здебільшого зосереджувалися на традиційних проблемах забезпечення інформаційної безпеки щодо бездротових сенсорних мереж [9].

Бездротові сенсорні мережі є самоорганізуючими мережами з великою кількістю сенсорних вузлів, які виконують різні завдання з моніторингу зовнішнього середовища, процесів, подій тощо. Часто розташовані на площині сенсорні вузли називають сенсорним полем. Як приклад, можна навести пуассонівське сенсорне поле, де сенсорні вузли розподілені випадковим чином відповідно до рівномірного розподілу (рис. 1.1).

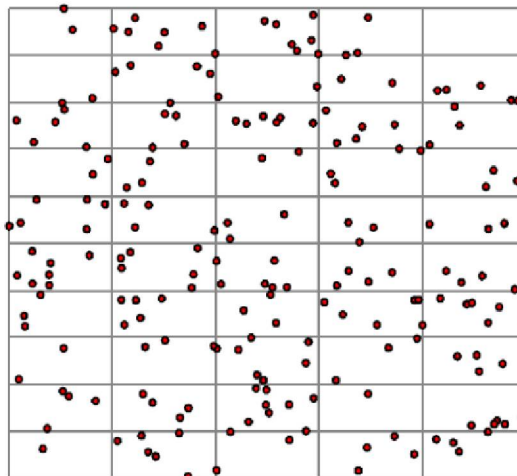


Рисунок 1.1 – Пуассонівське сенсорне поле

Кількість сенсорних вузлів в одному сенсорному полі може бути дуже великою. Наприклад, при використанні поширеного протоколу ZigBee для бездротових сенсорних мереж число вузлів в одному полі може перевищувати 64000. Звідси випливає прагнення до самоорганізації мережі, адже важко уявити неієрархічну мережу з 64000 постійно взаємопов'язаних вузлів. Ще складніше уявити таку ж ієрархічну мережу з постійними вузлами різного ступеня ієрархії, оскільки всі сенсорні вузли зазвичай однакові. У таких випадках говорять про однорідну або гомогенну сенсорну мережу [21].

Самоорганізація сенсорної мережі полягає в тому, що взаємозв'язки між вузлами є випадковими і утворюються лише для передачі інформації між ними про події або результати моніторингу. При цьому більшу частину часу сенсорні вузли перебувають у сплячому режимі, що дозволяє зменшити споживання енергії. Найчастіше сенсорний вузол не може відновити енергетичні характеристики шляхом підключення до стаціонарної електромережі або заміни елементу живлення під час виконання завдань. Тому одними з найважливіших дослідницьких завдань при побудові бездротових сенсорних мереж є завдання, пов'язані з оптимізацією енергоспоживання як окремими вузлами, так і мережею в цілому [27].

При побудові бездротових сенсорних мереж широко використовуються кластерні структури. Головний вузол кластера періодично піддається ротації, що дозволяє зменшити загальне споживання енергії кластером та збільшити життєвий цикл кластера і всієї мережі. Базовий алгоритм вибору головного вузла LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) для стаціонарних сенсорних вузлів дозволяє, наприклад, знизити споживання енергії в 7-8 разів у порівнянні з такою ж мережею, в якій головні вузли вибираються випадковим чином. На рис. 1.2 показана архітектура кластерної бездротової сенсорної мережі. Головні вузли кластера виділені помаранчевим кольором, а члени кластера – жовтим.

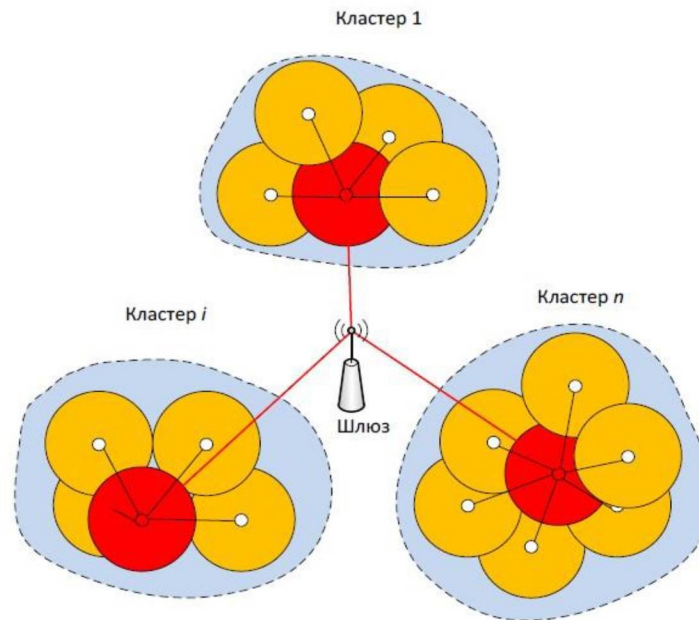


Рисунок 1.2 – Архітектура кластерної бездротової сенсорної мережі

З моменту появи алгоритму LEACH було зроблено багато спроб його покращити, і часто це вдавалося для конкретних застосувань бездротових сенсорних мереж або інших умов їх використання, таких як мобільні сенсорні мережі. Проте оптимального алгоритму для вибору головного вузла в бездротових сенсорних мережах досі не знайдено, що пояснюється практично необмеженою кількістю застосувань таких мереж і великою варіативністю їх параметрів залежно від застосувань [18].

Основні компоненти всепроникної сенсорної мережі:

1. Мережа датчиків. Датчик є одиницею створення USN і являє собою пристрій, що реагує на будь-яку дію або явище (світло, тепло, звук, рух, дотик тощо). Датчик, поєднаний з мікропроцесором для обробки даних, називається інтелектуальним датчиком.

2. Мережа доступу USN. Вузли-посередники або шлюзи, що агрегують інформацію від групи датчиків з метою полегшення подальшої передачі даних в центри управління або інші зовнішні об'єкти.

3. Мережева інфраструктура. Активне і пасивне обладнання наявних дротових/бездротових мереж.

4. Програмне забезпечення. Засоби для збору та обробки великих обсягів даних, хмарні платформи, IoT-платформи тощо.

Основними вимогами до організації USN є низьке споживання енергії пристроями (мережі LPWAN) і самоорганізація мережі (Ad Hoc мережі). Широко використовуваними алгоритмами вибору головного вузла є LEACH і HEED [26].

Забезпечення безпеки в бездротових сенсорних мережах регламентується офіційним документом MCE-T X.1311 «Структура безпеки для всепроникних сенсорних мереж». У цій рекомендації виділяються п'ять категорій взаємозв'язків в USN, які можуть представляти інтерес з точки зору мережевої безпеки:

1. взаємодія сенсорного вузла з базовою станцією (шлюзом);
2. взаємодія базової станції (шлюзу) з сенсорним вузлом;
3. взаємодія базової станції з усіма сенсорними вузлами, наприклад, при перепрограмуванні сенсорної мережі;
4. взаємодія між вузлами сенсорної мережі, включаючи взаємодію головного вузла кластера з сенсорними вузлами і взаємодію прилеглих сенсорних вузлів між собою;
5. взаємодія між базовою станцією (шлюзом) і певною групою сенсорних вузлів, об'єднаних, наприклад, загальним місцем розташування.

Цей перелік взаємозв'язків досить повно характеризує USN, за винятком специфічної взаємодії головного вузла кластера з головним вузлом іншого кластера.

Також в рекомендації X.1311 наголошується, що особливості побудови і функціонування бездротових сенсорних мереж обумовлюють проблеми з використанням традиційних способів і засобів забезпечення безпеки в мережах зв'язку [9].

Бездротові сенсорні мережі є технологічною основою для впровадження концепції Інтернету речей. У цій концепції передбачається, що речі не можуть ефективно функціонувати без хмарних обчислень. Ідея про потоки помилкових подій може бути розвинута до створення помилкових хмар.

1.3. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління

Надщільні мережі та мережі зв'язку з ультра малими затримками відображають загальний процес трансформації мереж. Для забезпечення ультра малих затримок потрібна децентралізація мережі, щоб надавати послуги тактильного Інтернету. Надщільні мережі потребують розвитку взаємодій пристрій-пристрій (D2D), що дозволяє в деяких випадках надавати послуги, використовуючи ресурси мережі на рівні терміналів і/або базових станцій.

Критерій якості вибору маршруту повинен враховувати властивості мережі, що найбільше впливають на якість маршруту. Якість зв'язку між вузлами залежить від ряду факторів, що впливають на поширення сигналу і його обробку в приймальній пристрої. Одним з головних факторів є вплив на відношення сигнал-шум-перешкоди (SINR), що визначає затухання сигналу в середовищі поширення і завади, які є в точці прийому. В умовах надщільної мережі слід очікувати, що найбільшу частину завад створюватимуть внутрішні завади робочого діапазону частот [19].

Одним з найважливіших завдань при оптимізації мереж зв'язку є визначення основних показників системи, що характеризують її якість. Їх можна назвати зовнішніми або вихідними параметрами системи. До них належать, зокрема, середньоквадратична помилка, достовірність повідомлень, затримка переданої інформації, ймовірність помилки при передаванні дискретних повідомлень, середній час безвідмовної роботи, вартість C тощо. Деякі параметри

мають бути фіксованими, а інші можуть змінюватися в певних межах під час проектування [24].

При визначенні показника якості враховується вплив цього показника на якість системи за інших рівних умов. Навіть для такого показника, як вартість, не можна стверджувати, що «чим менше вартість, тим краща система», оскільки при зменшенні вартості можуть погіршуватися інші важливі показники якості, такі як ймовірність помилки та затримка. Введення показників якості дозволяє виключити гірші варіанти побудови системи, полегшуючи і прискорюючи знаходження оптимального рішення [16].

Пошук оптимальної системи часто називають синтезом системи.

Задачу синтезу можна сформулювати так: знайти систему S , що задовольняє сукупність вихідних даних $\{Y, O_s, C_k, O_k\}$ і має найкраще значення вектора показників якості $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$ за обраним критерієм переваги.

Сукупність вихідних даних містить такі підгрупи:

- $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ – сукупність умов;
- $O_s = \{O_{s1}, \dots, O_{sq}\}$ – сукупність обмежень на структуру і параметри проектованої мережі;
- $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ – вектор показників якості системи;
- $O_k = \{O_{k1}, \dots, O_{kt}\}$ – сукупність обмежень, які накладаються на показники якості.

Сукупність O_s містить обмеження на структуру і параметри $x_1, \dots, x_j, \dots, x_u$ системи, які можуть бути у формі рівностей ($x_i = x_{io}$), нерівностей ($x_i \leq x_{im}$ або $x_{imin} \leq x_i \leq x_{im}$), дискретності ($x_i = 1, 2, 3 \dots$), зв'язків $[\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = 0$ або $\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = 0]$ та інших, наприклад, «мережа не повинна містити транзитних вузлів визначеного типу».

До умов Y роботи системи належать різні характеристики мережі або системи зв'язку. Вектор $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ містить показники якості системи, що враховуються в процесі синтезу. Відомий лише склад цієї сукупності, а числові

значення складових k_1, k_2, \dots, k_m залежать від структури і параметрів системи і варіюються у процесі синтезу. Символ C_k означає склад вектора K , а не його величину [10].

Комбінований процес поєднання математичних і евристичних методів називають інженерним синтезом. Синтез складних систем зазвичай має бути векторним, тобто з урахуванням кількох показників якості $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$. Векторний синтез називають векторною оптимізацією або багатокритеріальною оптимізацією. Синтез за єдиним показником якості називається скалярним.

Глобальний синтез враховує всі суттєві показники якості, включаючи економічні та конструктивні. Якщо враховуються не всі суттєві показники, синтез називається частковим. Інженерний синтез має бути векторним і глобальним, оскільки метою є розробка оптимальної з точки зору практичного застосування системи [17].

Математичний синтез, на відміну від інженерного, може бути частковим, оскільки іноді не враховує всі суттєві показники якості.

Синтез телекомунікаційної мережі, системи зв'язку або пристроїв зазвичай включає такі основні задачі:

- синтез оптимальної структури мережі (системи);
- вибір оптимальних значень параметрів мережі або системи (наприклад, затримка переданої інформації, достовірність, мінімальна кількість керуючої інформації в системі керування);
- оптимізацію параметрів;
- вибір оптимального варіанту побудови мережі (системи) із скінченної кількості варіантів S_1, S_2, \dots, S_n .

Таким чином, синтез телекомунікаційної мережі (системи і пристрою) складається з синтезу структури, оптимізації параметрів і дискретного вибору мережі (системи).

Висновки за розділом 1

Мережі 5G характеризуються високими швидкостями передачі даних, низькими затримками, високою пропускнуою здатністю та підтримкою великої кількості підключених пристроїв, що робить їх критично важливими для сучасних комунікаційних систем. Застосування технології D2D дозволяє істотно розширити можливості мережі зв'язку за рахунок вивантаження частини трафіку з базової мережі.

Було проведено класифікацію основних характеристик мереж 5G, що включає аналіз пропускнуої здатності, енергоспоживання, спектральної ефективності, надійності та масштабованості. Цей аналіз дозволив виявити ключові переваги та виклики, пов'язані з впровадженням 5G технологій, що є основою для подальшого розвитку і вдосконалення мереж.

Дослідження методів впровадження всепроникних сенсорних мереж у контексті 5G показало, що такі мережі є важливими для забезпечення повного охоплення і безперервного зв'язку. Всепроникні сенсорні мережі забезпечують збір та обробку даних у реальному часі, що є критичним для таких додатків, як розумні міста, промислова автоматизація та інтернет речей (IoT).

Дослідження системологічних характеристик мереж зв'язку п'ятого покоління дозволило виявити ключові фактор, що впливають на їх ефективність та надійність, а також розробити стратегії та методи для оптимізації параметрів мережі. Це має важливе значення для подальшого розвитку та впровадження 5G технологій, що забезпечують високоякісний зв'язок та підтримку інноваційних додатків у різних галузях.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

2.1. Маршрутизація трафіку в мережі бездротового зв'язку

Мережі зв'язку 5G є гетерогенними, що проявляється у використанні різних технологій на рівні мереж доступу та застосуванні різних методів побудови самих мереж. Наприклад, застосування технологій D2D, як внутрішньосмугових, так і позасмугових, у мережах 5G, забезпечує додаткові можливості для підвищення ефективності використання мережевих ресурсів. Застосування позасмугових технологій D2D дає потенційну можливість, за певних умов, організувати мережі великого масштабу [38].

Ефективність маршрутизації трафіку можна оцінити якістю обраних маршрутів. Критерій вибору повинен враховувати ті властивості мережі, які найбільше впливають на якість маршруту.

Якість каналу між двома сусідніми вузлами залежить від ряду факторів, що впливають на поширення радіосигналу та його обробку в радіоприймальному пристрої. В першу чергу, це фактори, що впливають на відношення сигнал/шум (шум + перешкоди), такі як відстань, що визначає загасання сигналу в середовищі поширення, і перешкоди, які виникають у точці прийому. В умовах мережі високої щільності слід очікувати, що найбільшу частину перешкод створюватимуть сусідні вузли мережі (внутрішньоканальні перешкоди). Таким чином, при маршрутизації трафіку в бездротовій мережі слід визначити критерій, що враховує щонайменше ці основні чинники [19].

Взаємний вплив вузлів мережі бездротового зв'язку, які використовують один і той самий частотний канал, може проявлятися дwoяко. Розглянемо ситуацію, коли деякий вузол (передавач) мережі повинен передати дані іншому

вузлу (приймачу), що знаходиться в його зоні зв'язку. Інші вузли мережі також можуть обмінюватися даними. Сигнали, вироблені передавачами цих вузлів, будуть присутні в точках розташування розглянутих вузлів. Називатимемо їх сторонніми сигналами, а сигнали, вироблені передавальним вузлом, корисними.

По-перше, якщо потужність стороннього сигналу (перешкоди) в точці розташування передавача корисного сигналу досить велика, передавач корисного сигналу розцінює стан середовища як зайняте і очікує її звільнення. У цьому випадку виникають втрати часу, тобто збільшується навантаження на канал.

По-друге, якщо потужність перешкоди в цій точці досить мала, передавач здійснює передачу корисного сигналу, а сигнал від іншого джерела в точці прийому створює перешкоди і знижує відношення сигнал / (шум + перешкода). Це зниження призводить до вибору нижчої швидкості передачі даних у каналі.

Таким чином, наявність стороннього сигналу в обох випадках призводить до зменшення пропускної здатності каналу між розглянутими вузлами. Отже, при побудові маршруту слід прагнути до збільшення потужності корисного сигналу та зменшення енергії сторонніх сигналів у точці прийому, що можна виразити через відношення SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio). Це формула (2.1):

$$b_{ij} = \phi(\text{SINR}), b_i \quad (2.1)$$

де $\phi(\text{SINR})$ – залежність швидкості передачі від співвідношення сигнал/шум, обумовлена стандартом як номер схеми модуляції і кодування (MCS).

Типова залежність для стандарту IEEE 802.11n наведена на рис. 2.1. Для зручності обчислень ступінчасту функцію можна апроксимувати безперервною функцією.

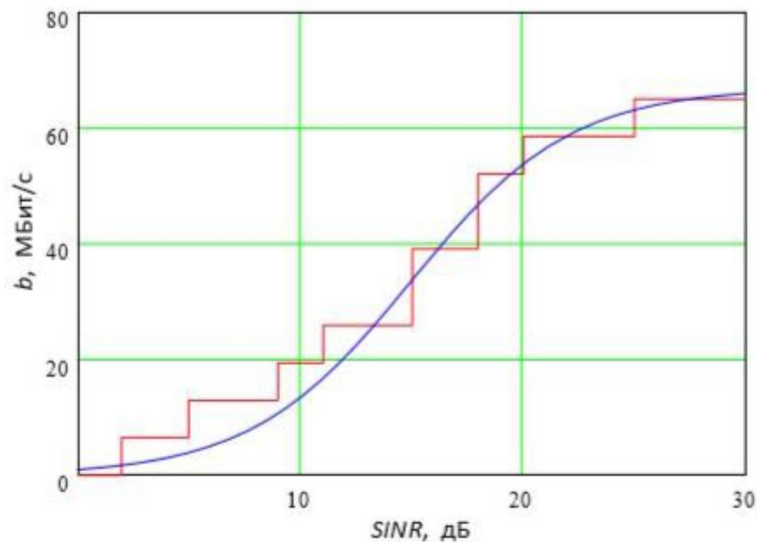


Рисунок 2.1 – Залежність пропускної здатності від відношення $SINR$ сигналу на вході приймача (IEEE 802.11n)

Відношення $SINR$ є визначальним показником, проте воно враховує лише потужності, тобто миттєві або середні значення, і не враховує трафік, що генерується вузлами мережі, який в кінцевому підсумку визначає ступінь взаємовпливу. Наприклад, низьке гіпотетичне (без урахування трафіку) значення $SINR$ ще не свідчить про низьку якість каналу. Якщо ці вузли не генерують трафік, то фактична потужність перешкод дорівнюватиме нулю.

Пропускна здатність маршруту визначається пропускною спроможністю його «найгіршої» ділянки. Таким чином, ділянка маршруту з найменшим значенням $SINR$ визначає його максимальну пропускну здатність [28].

Розглянемо модель мережі у вигляді графа, заданого множиною вершин VV і дуг $AG (V, A)$, у якому вершини відповідають вузлам мережі, а дуги – зв'язкам між ними. Зв'язки між вершинами характеризують властивості каналів, які в загальному випадку не симетричні.

Доведемо, що вибір маршруту з максимальною пропускною спроможністю за критерієм максимуму мінімального її значення для всіх ділянок маршруту

еквівалентний вибору маршруту за критерієм максимуму мінімального значення SINR для всіх ділянок маршруту.

Для вирішення задачі пошуку маршруту з максимальною пропускною спроможністю можуть бути використані алгоритми з теорії графів. Як вихідний параметр можна використовувати величину SINR. Алгоритм вибору маршруту може відрізнятися залежно від застосовуваного протоколу маршрутизації. Як приклад розглянемо застосування алгоритму, заснованого на використанні тримісної операції виду (2.2):

$$\text{SINR}_{ij} = \max (\text{SINR}_{ij}, \min(\text{SINR}_{ik}, \text{SINR}_{kj})) \quad (2.2)$$

де SINR_{ij} – відношення сигнал / (шум + перешкода) на вході приймача вузла при прийомі сигналу від вузла i .

Припустимо, що гіпотетична сумарна потужність сигналів інтерференції може бути отримана простим підсумовуванням потужностей сигналів від відповідних вузлів за умови, що всі вони одночасно передають ці сигнали.

В якості залежності затухання від відстані може бути обрана модель, яка найбільше відповідає реальним умовам розповсюдження сигналу. Вважаючи, що більшість користувачів D2D зосереджені всередині приміщень, опишемо загасання сигналу моделлю, рекомендованою для застосування всередині приміщень [24].

На рис. 2.2. наведені результати імітаційного моделювання вибору маршруту між двома вузлами мережі відповідно до критерію мінімальної відстані (а) і максимального пропускнуго здатності з урахуванням перешкод (б). Видно, що довжина маршруту, побудованого за другим критерієм, суттєво більша (у першому випадку 4 транзитних вузли, у другому – 12 транзитних вузлів).

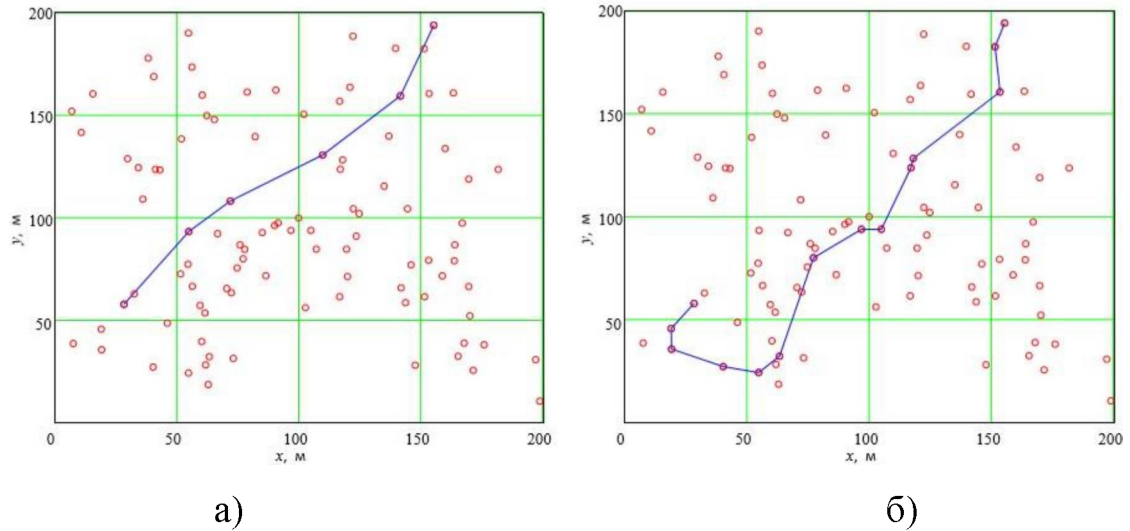


Рисунок 2.2 – Приклади вибору маршрутів за критеріями довжини (відстані)

На рис. 2.3. наведені приклади вибору маршруту між двома вузлами мережі відповідно до критерію максимального пропускної здатності з урахуванням інтерференції (а) і максимального пропускної здатності з урахуванням інтерференції та інтенсивності трафіку (б).

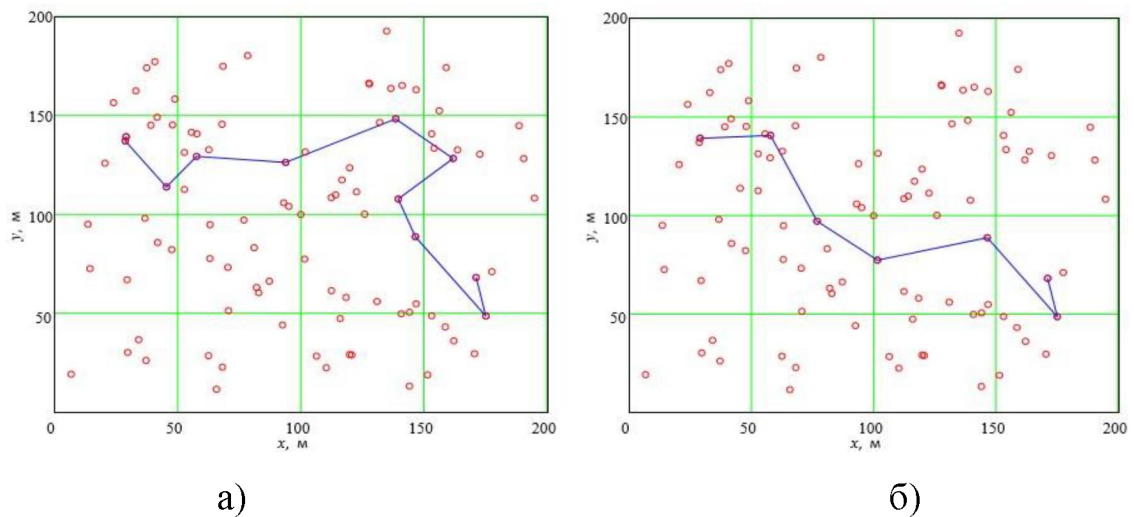


Рис. 2.3 – Приклади вибору маршрутів з урахуванням і без урахування інтенсивності трафіку

З наведених прикладів видно, що врахування інтерференції, спричиненої сигналами вузлів мережі, значно впливає на вибір маршруту. Аналіз результатів імітаційного моделювання показав, що порівняно з маршрутом, обраним за критерієм найменшої відстані, в середньому збільшується кількість транзитів (стрибків). Це пояснюється вибором ділянок з максимальним співвідношенням сигнал/шум (SINR), величина якого обернено пропорційна відстані між передавальними і приймальними вузлами. Збільшення кількості транзитів загалом негативно впливає на якість маршруту, тому це доцільно враховувати при пошуку рішення [13].

Оскільки одночасне застосування двох критеріїв на кожному кроці процедури пошуку маршруту неможливе, сформулюємо умову для надання переваги одному з них.

Для вибору цієї величини виходимо з таких міркувань. Збільшення кількості транзитних вузлів у маршруті підвищує трафік, створений у мережі (використання середовища передачі), а отже, і потужність перешкод для інших вузлів, знижуючи їхнє відношення сигнал/шум (SINR).

На рисунку 2.4. показані результати імітаційного моделювання маршрутів за критеріями довжини (а), максимальної пропускної здатності (б) та комбінованого критерію (в) і (г). Найкоротший маршрут містить мінімальну кількість транзитних вузлів (4 транзитні вузли). Маршрут, обраний за критерієм пропускної здатності (за умови рівності інтенсивності трафіку всіх вузлів), показаний на рис. 2.4б, містить 30 транзитних вузлів. Результати, отримані за комбінованим критерієм, показані на рисунках в) і г), містять 18 і 10 транзитних вузлів відповідно. Різниця між двома останніми результатами полягає в тому, що в першому випадку (рис. 2.4 в) критична величина $\epsilon_0 = 2$ дБ, а в другому випадку (рис. 2.4 г) $\epsilon_0 = 5$ дБ.

Отримані результати показали, що застосування простих критеріїв вибору маршруту за одним параметром дає приватні рішення, які можуть виявитися

практично непридатними через занадто велику кількість транзитів. Запропонований метод вибору маршруту з використанням комбінованого критерію дає можливість знайти компроміс між довжиною маршруту (кількістю транзитів) і якістю маршруту.

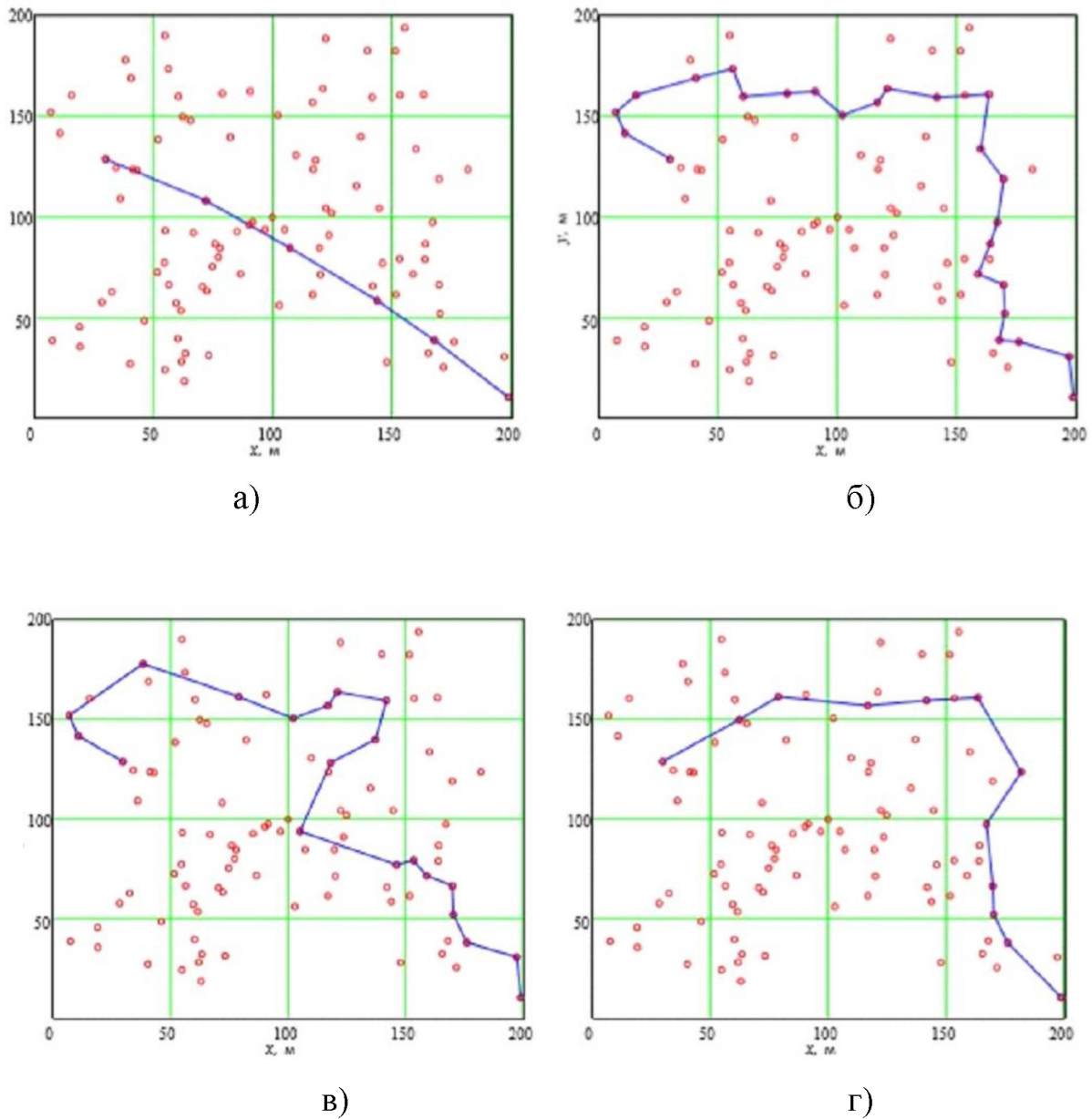


Рисунок 2.4 – Приклади вибору маршрутів за критеріями довжини – а, максимуму пропускної здатності – б комбінованого критерію – в і г

Параметри вибраного маршруту впливають на мережу зв'язку. Кожен транзитний вузол маршруту обслуговує як свій власний трафік, так і транзитний трафік від інших вузлів. Оскільки один вузол може бути частиною декількох маршрутів, обсяг трафіку, який він обробляє, залежить від кількості маршрутів, де він виступає транзитним вузлом.

Аналіз результатів показує, що зниження щільності користувачів призводить до зменшення середньої потужності перешкод та середньої довжини маршруту. Це узгоджується з очікуваннями, оскільки в умовах низької щільності мережі організація маршрутів стає ефективним засобом побудови мережі.

При занадто низькій щільності терміналів відстань між ними настільки зростає, що ймовірність побудови маршруту при випадковому розподілі вузлів наближається до нуля. У таких випадках маршрути можна ефективно будувати лише за умови невипадкового розміщення вузлів мережі [17].

Гіпотетична модель мережі передбачає, що кожен вузол може виконувати функції транзитного, але в реальних мережах це не завжди так. Тому подальші дослідження можуть бути зосереджені на методах вибору транзитних вузлів та їх впливі на параметри функціонування мережі.

2.2. Організація та проведення чисельного моделювання

Результати чисельного моделювання показали, що зменшення щільності користувачів призводить до зниження середньої потужності перешкод і скорочення середньої довжини маршруту. Це узгоджується з теоретичними очікуваннями, оскільки зменшення кількості активних терміналів у певній області знижує взаємний вплив сигналів. Таким чином, у мережах з низькою щільністю користувачів організація маршрутів стає більш ефективною, оскільки потребується менша кількість транзитних вузлів. Однак, при дуже низькій щільності користувачів (менше 0,005 користувачів на квадратний метр), відстані

між терміналами настільки збільшуються, що ймовірність побудови маршруту при випадковому розподілі вузлів практично дорівнює нулю. Тому в таких умовах організація маршрутів є доцільною лише за умови не випадкового розміщення вузлів, коли їхні позиції ретельно сплановані [24].

Дані на графіках підтверджують, що з підвищенням значення ϵ_0 відносний обсяг трафіку, обслуговуваного вузлом, зменшується, що пов'язано зі скороченням довжини маршруту. Права частина кривих на графіках, яка відповідає щільності менше 0,005 користувачів на квадратний метр, демонструє, що побудова маршрутів у таких умовах має здебільшого теоретичне значення і вимагає не випадкового розташування вузлів для досягнення практичної доцільності. Отримані результати свідчать про те, що в мережах з низькою щільністю користувачів ефективна організація маршрутів можлива за умови правильного вибору транзитних вузлів і планування їхнього розташування.

У Таблиці 2.1. наведені значення a і b для різного рівня використання каналного ресурсу ρ . Апроксимація результатів моделювання дозволила вивести просту емпіричну функцію, яка встановлює залежність потужності перешкоди від щільності терміналів і інтенсивності використання каналу.

Таблиця 2.1

Параметри апроксимації

Канал	Значення a	Значення b
0,01	16,0	19,9
0,10	6,9	45,5
0,50	5,0	42,4

На рис. 2.5 показана залежність швидкості передачі даних для характерних значень щільності пристроїв 0,016 і 0,001 на квадратний метр за стандартом IEEE 802.11n [13].

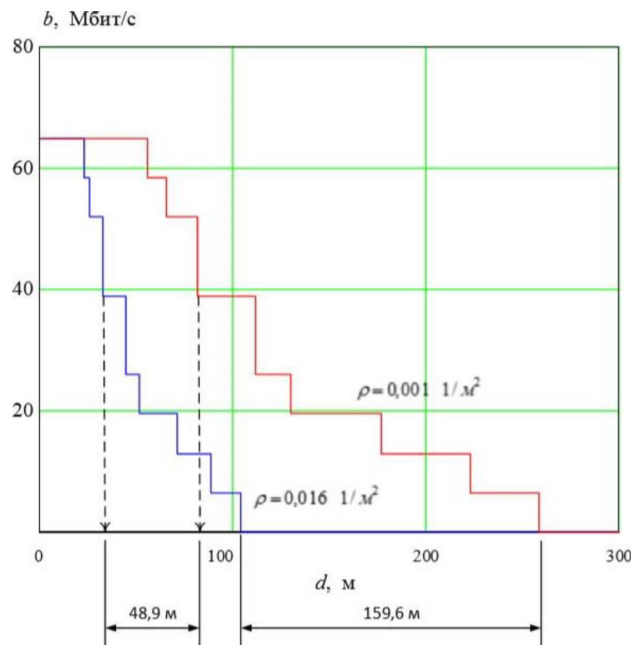


Рисунок 2.5 – Залежність досяжної швидкості ПД для стандарту IEEE 802.11n

З отриманих результатів видно, що для типових значень щільності терміналів у міських і сільських умовах різниця в потужності сигналу інтерференції становить близько 45 дБ (при низькому використанні каналного ресурсу 0,01) і близько 20 дБ (при високому використанні – 0,1 ... 0,5). Це фактично означає, що подібні результати будуть характерні і для відношення сигнал/шум (SINR), що дозволяє значно збільшити зону зв'язку і якість обслуговування (QoS) трафіку. Численні оцінки демонструють відчутний вигравш у швидкості передачі даних і дальності зв'язку за умов низької щільності терміналів.

Чисельне моделювання підтвердило теоретичні очікування щодо впливу щільності користувачів на потужність перешкод і довжину маршруту. Зниження

щільності терміналів призводить до зменшення середньої потужності перешкод і скорочення середньої довжини маршруту, що робить організацію маршрутів більш ефективною. Однак, при дуже низькій щільності (менше 0,005 пристроїв на квадратний метр), побудова маршрутів стає малоімовірною через великі відстані між терміналами, тому ефективна організація можлива лише за умови планованого розташування вузлів [23].

Запропонована емпірична функція, яка описує залежність потужності перешкод від щільності терміналів і інтенсивності трафіку, показує, що з підвищенням інтенсивності використання каналу знижується відносний обсяг трафіку, обслуговуваного вузлом, що пов'язано зі скороченням довжини маршруту. Різниця в потужності сигналу інтерференції для міських і сільських умов при різних щільностях терміналів становить від 20 до 45 дБ, що дозволяє значно збільшити зону зв'язку і покращити якість обслуговування трафіку. Це забезпечує відчутний виграш у швидкості передачі даних і дальності зв'язку в умовах низької щільності терміналів.

2.3. Аналіз та вибір алгоритму маршрутизації потоків

У сучасному світі, який швидко змінюється, інформація, дані та знання є важливими ресурсами, що впливають на розвиток як окремих підприємств, так і цілих країн. Завдяки прогресу в галузі обчислювальної техніки та впровадженню систем моніторингу і автоматизації, генерується величезний обсяг даних, які необхідно зберігати і аналізувати. Потік даних також збільшується через використання сучасних засобів зв'язку та популярність соціальних платформ. Це вимагає накопичення великих обсягів інформації, що іноді перевищують 1015 байт, для стратегічного аналізу та прийняття рішень, а також для комерційних цілей.

Процес прийняття рішень, заснований на виявленні корисних знань та пошуку прихованих закономірностей, стає ефективнішим при використанні засобів візуального моделювання даних. Це дозволяє аналітикам перевіряти гіпотези, висувати вимоги до даних і аналізувати результати. Для цього використовуються системи бізнес-аналітики (Business Intelligence, BI), які дозволяють оперативно трансформувати дані та представляти їх у зручній формі через інтерактивні візуалізації. Системи BI, як клас систем підтримки прийняття рішень (СППР), зосереджені на інтелектуальному управлінні даними і включають технології, програмне забезпечення та практики, спрямовані на досягнення бізнес-цілей [15].

Детальні дані для аналізу зазвичай зберігаються в транзакційних системах OLTP (On-Line Transaction Processing), які призначені для виконання операцій у реальному часі з мінімальним часом відгуку. Вихідні дані також можуть зберігатися у файлах та зовнішніх системах і часто є слабо структурованими, тому потребують процедур структуризації. У випадку використання різнорідних джерел даних необхідне ведення майстер-даних: довідників, класифікаторів та іншої нормативно-довідкової інформації.

Сучасні системи BI використовують концепцію сховищ даних, які вирішують завдання структуризації та об'єднання вихідних даних з урахуванням їх можливої невірогідності, суперечливості та швидкості змін. Це досягається через консолідацію, трансформацію, очищення та попередню обробку даних. Корпоративні сховища даних зазвичай базуються на багатовимірних моделях, які прості для розуміння і побудови запитів, але мають недоліки, такі як неможливість завантаження великих обсягів даних, складність побудови моделей для розподілених даних і необхідність денормалізації таблиць фактів.

Ефективний аналіз даних вимагає розуміння їх контексту. Окремі одиниці інформації можуть бути малозначимими для кінцевого користувача, тому дані повинні бути контекстуалізовані, щоб перетворитися на інтелектуальні знання.

Таким чином, при проектуванні інформаційних структур для систем бізнес-аналітики необхідно враховувати обсяги оброблюваних даних і час, необхідний для зміни аналітичної моделі.

Замість традиційного підходу використання сховищ даних разом із системами ВІ все частіше застосовуються різні підходи до побудови вітрин даних, обчислення в пам'яті (In-Memory Computing) і використання асоціативних моделей даних. Пропонований підхід до побудови оперативно-аналітичних вітрин даних забезпечує доступність джерел, швидкість і структурування даних для вирішення завдань [4].

На рис. 2.6 наведені рівні взаємодії в класі мереж LLN.

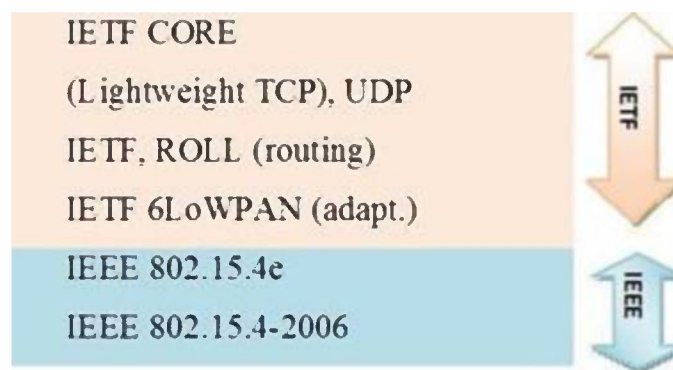


Рисунок 2.6 – Рівні взаємодії в класі мереж LLN

Іншим рішенням у БСС є протокол динамічної маршрутизації AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector), який оптимізує час передачі даних між вузлами. Ця топологія дозволяє передавати інформацію, обираючи найкоротший маршрут, де вузли користувачів можуть динамічно адаптуватися до змін (рис. 2.7).

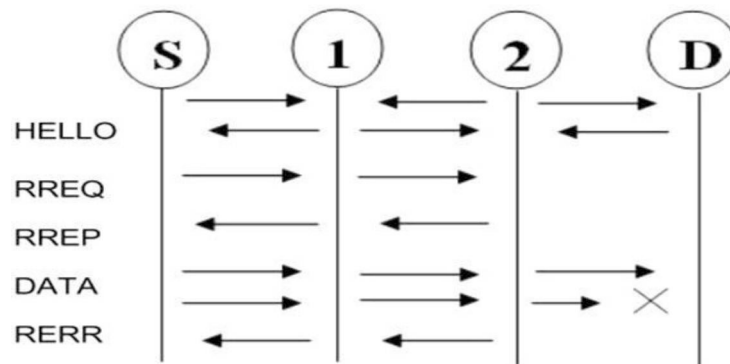


Рисунок 2.7 – Обмін повідомленнями в протоколі AODV

Перевагою протоколу AODV у передачі даних за встановленим маршрутом є відсутність додаткового трафіку. Однак недоліком є наявність ієрархії доменів, що знижує ефективність маршрутизації і вимагає службового трафіку.

Моделювання трафіку в мережах БСС розглядає процес передачі кольорових зображень у M2M-додатках для БСС-мереж. Характерною особливістю цього процесу є поетапна передача даних через вузли сенсорної мережі та стиснення розміру зображення відповідно до стандарту JPEG шляхом кодування і декодування. Цей метод передачі не чутливий до затримок і забезпечує гарантовану доставку зображення споживачеві [20].

Основний принцип методу полягає у створенні множини оптимальних маршрутів за допомогою модифікованих алгоритмів імітації відпалу та мурашиного алгоритму. Ці алгоритми дозволяють знаходити глобальний екстремум функції через впорядкований випадковий пошук та здійснювати пошук маршруту з найкращим значенням параметра QoS шляхом видалення або додавання вузла до маршруту, а також враховувати неоднорідності в мережі.

Метод маршрутизації працює за умови, що вузол для видалення або додавання знаходиться в зоні досяжності вузлів, які розглядаються [22].

На рис. 2.8 наведений алгоритм маршрутизації інформаційних потоків.

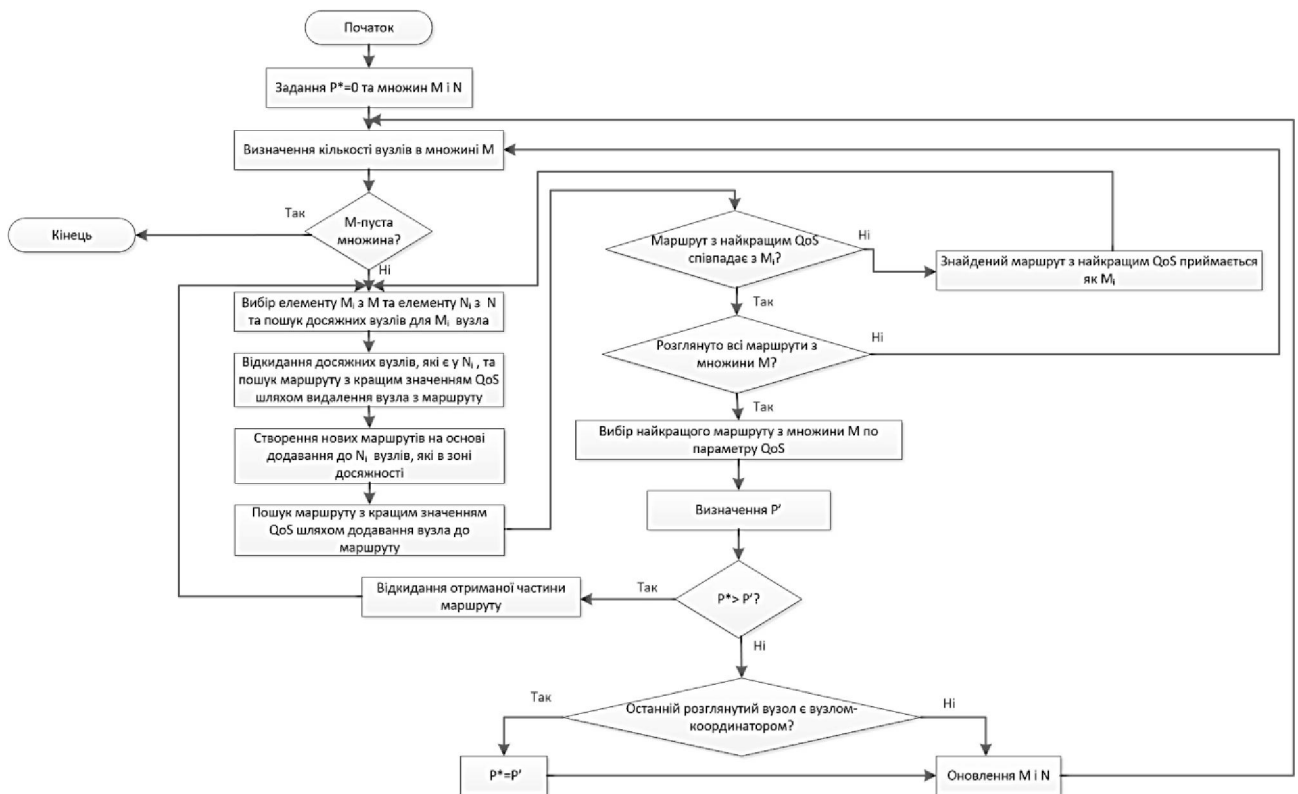


Рисунок 2.8 – Розроблений алгоритм маршрутизації інформаційних потоків

Аналіз ефективності маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій mesh-мережі проводився за допомогою імітаційного моделювання у середовищі Matcad.

Для моделювання самоорганізованої мережі було використано 30 вузлів, які були випадковим чином розміщені, як показано на рис. 2.9. На цьому рисунку вузол під номером 18 є координатором. Для кожного вузла мережі α визначається множина його доступних зв'язків Q_α за умови, що для кожної пари вузлів існує принаймні один шлях, що їх з'єднує.

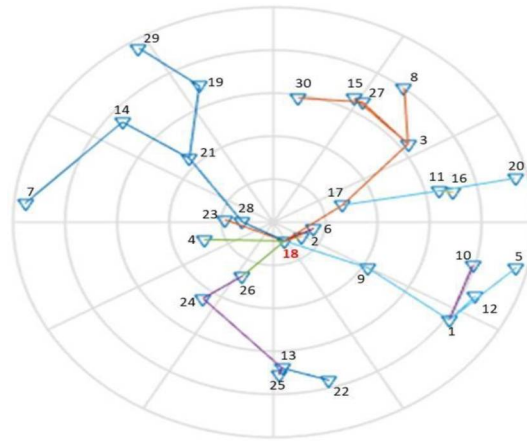


Рисунок 2.9 – Розміщення вузлів мережі

Для прикладу було проведено моделювання мережі з використанням модифікованого мурашиного алгоритму, представленої на рис. 2.8. Результати цього моделювання показані на рис. 2.10., де кожна точка відображає середній час передачі даних від відповідного вузла (номер якого вказано над точкою) до вузла-координатора, залежно від найкоротшої відстані між вузлом-джерелом і вузлом-координатором, наприклад, від 7 до 18.

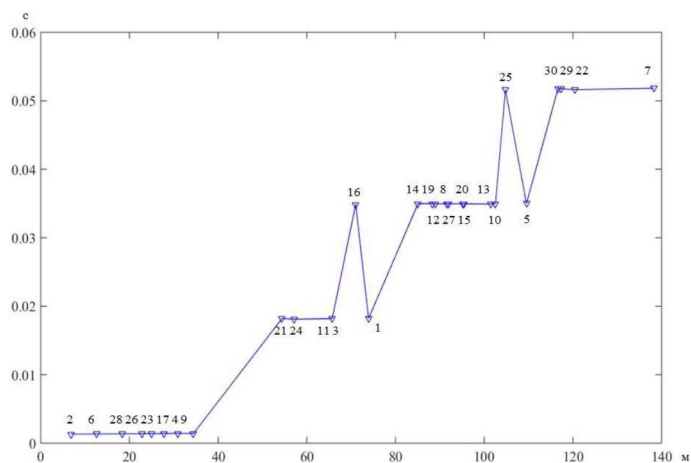


Рисунок 2.10 – Залежність часу передачі даних від пройденого шляху для модифікованого мурашиного алгоритму

Висновки по розділу 2

У процесі дослідження маршрутизації трафіку в мережі бездротового зв'язку було визначено, що ключовими вимогами для ефективного функціонування мереж 5G є висока пропускна здатність, мінімальні затримки та надійність з'єднання. Важливою особливістю мереж 5G є їх здатність обслуговувати одночасно велику кількість пристроїв, включаючи мобільні телефони, сенсори IoT та інші пристрої, які потребують швидкого та стабільного зв'язку. Аналіз існуючих методів маршрутизації показав, що традиційні підходи не завжди можуть забезпечити необхідну якість обслуговування в умовах високої динамічності та неоднорідності мереж 5G, що вимагає розробки нових адаптивних алгоритмів.

Організація та проведення чисельного моделювання були спрямовані на оцінку ефективності різних алгоритмів маршрутизації у реалістичних сценаріях мереж 5G. Під час чисельного моделювання були досліджені різні алгоритми маршрутизації, зокрема, ті, що базуються на методах машинного навчання та прогнозуванні мережевих умов. Результати симуляцій показали, що адаптивні алгоритми, які враховують поточний стан мережі та передбачають можливі зміни, значно підвищують ефективність використання мережевих ресурсів та зменшують затримки.

Аналіз та вибір алгоритму маршрутизації потоків був проведений на основі результатів чисельного моделювання та порівняння різних підходів. Вибрані алгоритми маршрутизації були оцінені за такими критеріями, як продуктивність, масштабованість, надійність та здатність забезпечувати якість обслуговування.

Запропоновані адаптивні алгоритми маршрутизації показали високу ефективність у різних сценаріях роботи мережі та можуть бути використані для підвищення продуктивності та якості обслуговування у мережах 5G.

РОЗДІЛ 3.

РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Обґрунтування середовища проєктування та програмної реалізації методу оптимізації маршрутизації

Для автоматизації математичних, інженерно-технічних і наукових розрахунків використовуються різні обчислювальні засоби, від програмованих калькуляторів до потужних суперкомп'ютерів. Однак, навіть із сучасними засобами, такі розрахунки залишаються складними для багатьох користувачів. Додаткові труднощі виникають через необхідність знань алгоритмізації, програмування та чисельних методів.

До програмних комплексів належать пакети Mathcad, MatLab, Mathematica, Maple, MuPAD, Derive та інші. Mathcad займає особливе місце серед них завдяки своїй інтегрованій системі для вирішення математичних, інженерно-технічних та наукових задач. Програма містить текстовий і формульний редактор, обчислювач, засоби наукової і ділової графіки, а також велику базу довідкової інформації у вигляді вбудованого довідника, електронних книг і традиційних друкованих видань [23].

Текстовий редактор Mathcad використовується для введення та редагування текстів, які є коментарями і не виконуються. Текст може містити слова, математичні символи, вирази та формули. Формульний редактор забезпечує природний набір формул у звичній математичній нотації, підтримуючи кириличні символи. Обчислювач Mathcad дозволяє проводити складні математичні обчислення, працювати з комплексними числами, вирішувати різні рівняння та системи, виконувати векторні та матричні операції, статистичний аналіз та інше.

Mathcad включає засоби символічної математики для аналітичних перетворень та графічний процесор для створення графіків і діаграм. Програма орієнтована на вирішення типових математичних задач з можливістю швидкої зміни виду та розміру графіків, додавання текстових написів та переміщення їх у документі [12].

Mathcad є універсальною системою, яка може використовуватися в будь-якій науковій або технічній галузі, де застосовуються математичні методи. Інтуїтивний інтерфейс Mathcad, близький до стандартного мови математичних розрахунків, спрощує постановку і вирішення задач. Mathcad інтегрується з іншими комп'ютерними системами та дозволяє легко вирішувати різноманітні задачі, такі як введення математичних виразів, проведення математичних розрахунків, створення графіків, підготовка звітів, публікація результатів в Інтернеті та отримання довідкової інформації.

Починаючи з версії 14, Mathcad інтегрований з Pro/ENGINEER та SolidWorks, забезпечуючи двосторонній зв'язок між додатками. Це створює зручне обчислювальне середовище для широкого спектра математичних розрахунків і документування результатів роботи. Mathcad дозволяє створювати корпоративні та галузеві засоби сертифікованих розрахунків, забезпечуючи єдину методологію для організацій. Остання версія Mathcad підтримує 9 мов і дозволяє виконувати потужні та зрозумілі обчислення.

Mathcad 14.0 значно розширює можливості користувачів у розв'язанні дедалі складніших обчислювальних завдань, покращуючи узгодженість розрахункових документів протягом всього циклу розробки продукту. В умовах глобалізації розробки виробів науково-технічні обчислення набувають особливого значення. Випуск Mathcad 14.0 від PTC забезпечує повну підтримку кодування Unicode, а найближчим часом продукт буде доступний на дев'яти мовах, включаючи італійську, іспанську, корейську та обидва китайські діалекти – традиційний і спрощений. Розширена підтримка мов у Mathcad 14.0 дозволить

командам з різних регіонів виконувати та документувати розрахунки своєю рідною мовою, підвищуючи продуктивність праці за рахунок збільшення швидкості та точності.

Mathcad 14.0 також дозволяє виконувати більш складні розрахунки, зберігаючи їх зрозумілість завдяки новим функціям робочого аркуша, додатковим засобам оперативної числової оцінки та розширеному набору символів. Це допоможе користувачам при виведенні формул, відображенні обчислювального процесу та документальному обґрунтуванні розрахунків. В результаті, нові можливості дозволять працювати з більш широким спектром інженерно-технічних завдань [20].

Панелі інструментів з'являються у вікні редагування документів при активації відповідних значків на першій лінії панелі керування системою. Використовуючи загальну панель інструментів, можна вивести або всі панелі одночасно, або лише ті, що потрібні для конкретної роботи.

3.2. Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі

Для забезпечення функціонування мережі при високій щільності користувачів потрібно мати гарантовані кошти, які забезпечать можливість побудови маршрутів між їх терміналами. Припускаючи, що маршрутизація трафіку через термінали користувачів підтримується тільки частково, можна ввести додаткові вузли – маршрутизатори, які не виробляють власний трафік, а служать для транзиту трафіку, створеного терміналами користувачів. Вводячи такі маршрутизатори, потрібно враховувати, що вони не мають необмеженого резерву енергії. Фактично, це передбачає створення додаткової мережевої інфраструктури, яка розширює можливості мережі через додаткові вузли. Оскільки функціонально такі додаткові вузли схожі на абонентські термінали, їх

введення може бути вигідним для забезпечення функціональних можливостей мережі. Основними завданнями у такому випадку є вибір місць розташування та кількості маршрутизаторів [12].

Розглянемо ситуацію, де в певній зоні обслуговування, яка є двовимірною областю, розміщені nT терміналів користувачів, які можуть бути вузлами мережі. Також у цій же області може бути розміщено nM додаткових вузлів - маршрутизаторів. Загальна кількість вузлів в цій зоні $n = nT + nM$, і частка маршрутизаторів становить $\eta = nM/n$. У цій задачі ми розглядаємо такі фактори, як відстані між вузлами, потужності передачі сигналів, загасання сигналу, трафік, вироблений кожним вузлом. При передачі сигналів вузли створюють перешкоди для інших вузлів, що впливає на якість прийому. Ця якість характеризується відношенням сигналу до сумарного шуму та перешкод.

На рис. 3.1 наведена модель мережі.

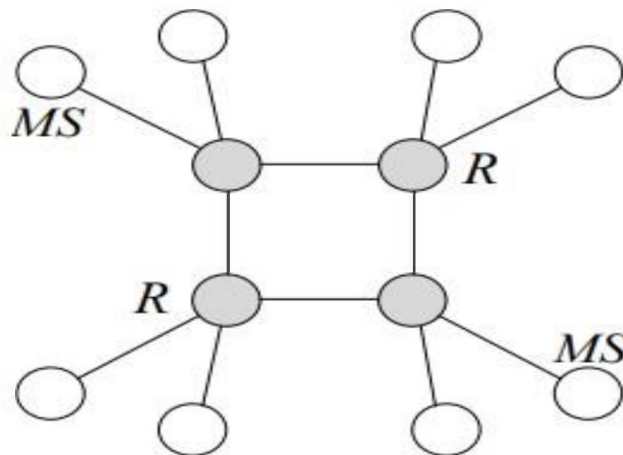


Рисунок 3.1 – Модель мережі

Припускаємо, що вузли мережі розміщені в межах зони обслуговування випадковим чином, що означає, що вони утворюють пуассоновське поле. Координати цих вузлів (x_i, y_i) вважаються незалежними випадковими числами з рівномірним розподілом.

Протокол маршрутизації RPL (Routing protocol for low power and lossy network) забезпечує з'єднання з низьким енергоспоживанням та високим рівнем шифрування. Він базується на наборі параметрів, за якими вузли формують ациклічний граф, що визначає збіжний характер сенсорної мережі RPL із кореневим та батьківськими вузлами. Фізично батьківський вузол ініціюється в мережі, опитує сусідів та очікує їх відповіді. Ациклічність графа забезпечується одно- або багатоадресними повідомленнями. Після встановлення стабільності графа частота повідомлень зменшується, а обсяг сигнального трафіку знижується.

На рис. 3.2 представлена топологія RPL у вигляді ациклічного графа.

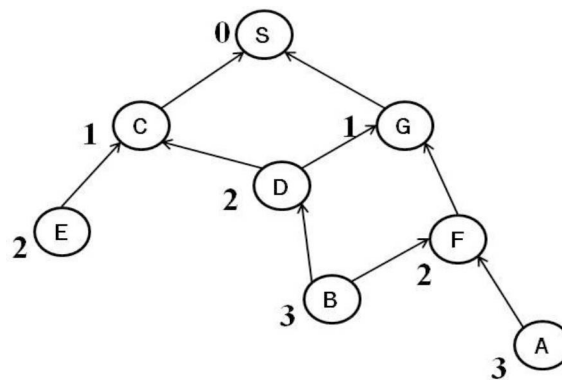


Рисунок 3.2 – Топологія RPL у вигляді ациклічного графа

Як альтернативу RPL розглядається протокол маршрутизації AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector). Порівняльний аналіз ефективності обох протоколів проведено на сенсорному полі розміром 50 на 50 метрів з різною щільністю розміщення вузлів. Результати моделювання показали, що при невеликій кількості вузлів (10) обидва протоколи майже однаковою мірою вимагають кількості кроків від вилюченого вузла до маршрутизатора. Однак при збільшенні числа вузлів до 100 протокол RPL потребує меншої кількості кроків (рис. 3.3).

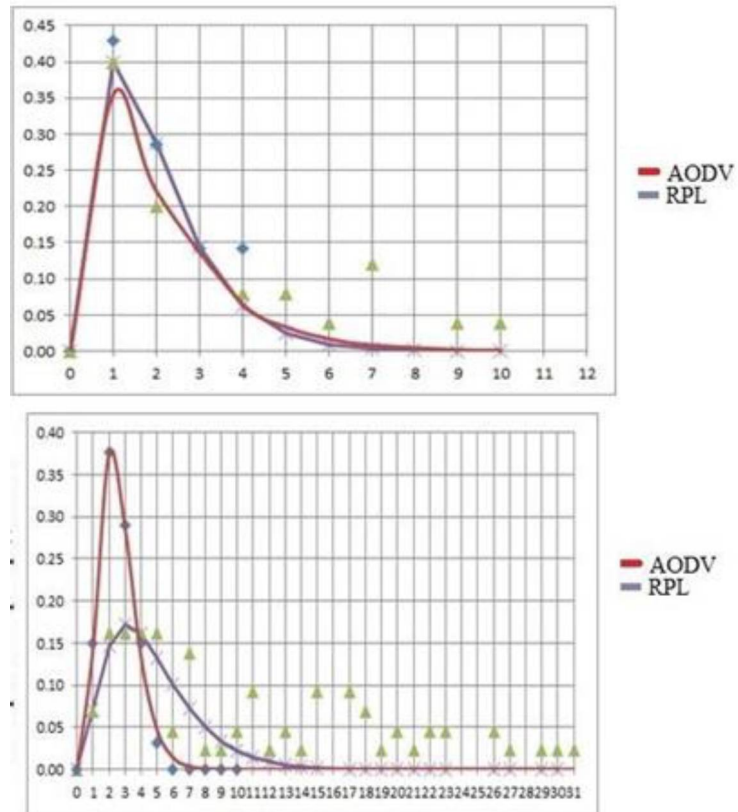


Рисунок 3.3 – Розподіл кількості кроків для AODV і RPL для 10 і 100 вузлів

Стандарт 5G є комплексною системою радіоточок, які забезпечують високошвидкісний обмін інформацією. Прогнозується, що до 2025 року 15-20% мобільних з'єднань у нашій країні будуть працювати на п'ятому поколінні. Технологія прямого з'єднання між пристроями (D2D) дозволяє пристроям обмінюватися даними без використання мережевого маршрутизатора, що має переваги не лише у структурі мережі, але й у забезпеченні надійності та управлінні мобільними даними з високою якістю обслуговування QoS.

На рис. 3.5 зображено різновиди D2D-комунікацій: перший – з частковим або повним контролем оператора (базової станції) над з'єднанням, другий – без прив'язки до базової станції, але з її координацією, третій – без участі оператора, а четвертий – споживання комунікаційного ресурсу між клієнтом і джерелом, що потребує особливої уваги до перешкодозахисту в обмеженому просторі [8].

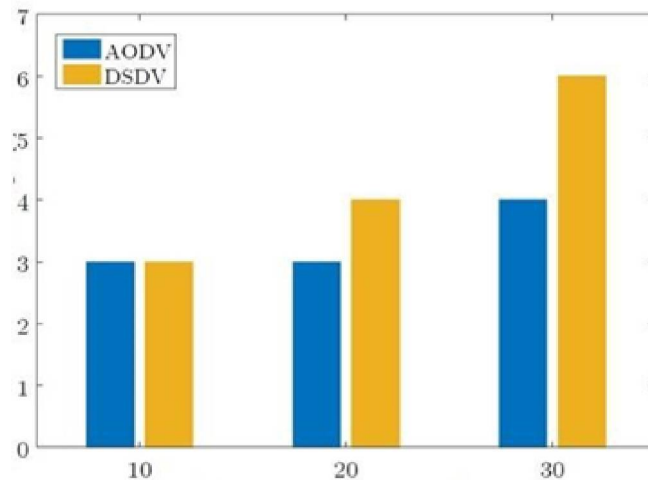


Рисунок 3.4 – Число кроків у маршрутизації залежно від числа кінцевих обладнань для двох протоколів передачі даних

Для систем D2D-комунікацій розглядається використання протоколів маршрутизації, таких як AODV або DSDV. При аналізі сценарію з 20 вузлами на сенсорному полі моделювання, використання протоколу DSDV призвело до загальної затримки 450 мс (з включенням D2D та стільникового зв'язку для доступу до Інтернету через вилучений хост), у той час як застосування AODV показало загальну затримку 85 мс. Аналіз кількості кроків для обох варіантів маршрутизації також свідчить на користь протоколу AODV. Отже, для системи D2D-комунікацій протокол AODV є більш вигідним варіантом.

Підвищення пропускної здатності мереж п'ятого покоління має велике значення не лише для зростання їх пропускної здатності на рівні широкосмугового оптоволоконного Інтернету, але й для створення нового якісного рівня в різних сферах, таких як «розумні речі», безпілотний транспорт, інтеракція між людьми, суспільством і владою. Очікується, що вигоди від їх застосування значно перевищать витрати на їх розробку [24].

Для бездротових сенсорних мереж (БСС) була виявлена оптимальна структура, що базується на низькому енергоспоживанні та використанні

оптимального протоколу маршрутизації AODV. У проведеному моделюванні різних сценаріїв БСС на основі сенсорного поля розміром 50x50 метрів було використано критерій Колмогорова. Було визначено, що оптимальним значенням коефіцієнта Херста для таких мереж є $H = 0,845$. Були розглянуті перспективні технології маршрутизації для мереж БСС і 5G. Було показано, що для бездротових сенсорних мереж найбільш оптимальним є використання протоколу RPL, тоді як для D2D-комунікацій, що можуть застосовуватися в мережах п'ятого покоління, кращим вибором є протокол маршрутизації AODV.

На рис. 3.6 наведена структура системи.

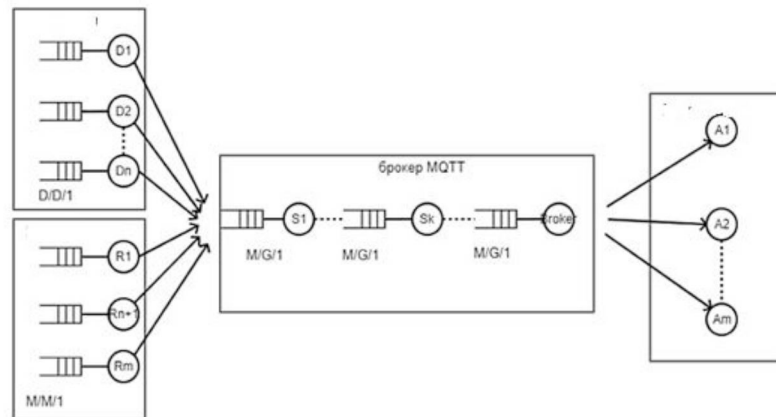


Рисунок 3.6 – Структура системи

У системі ми використовували дві черги з пріоритетами з експоненціально розподіленими швидкостями вступу пакетів та довільним розподілом для обслуговування. Отже, проміжний вузол і комутатори ретрансляції моделюються як окремі серверні пристрої з чергою $M/G/1$, які відповідають за передачу даних IoT підписаним клієнтам. Зважаючи на розподілену природу обладнання IoT, брокер є складовою мережі з обмеженим пропуском. Потрібно активно контролювати кількість пакетів, що надходять до центрального брокера, для запобігання перевантаженню мережі. Брокер працює з чергами без пріоритетів

M/G/1 з експоненціально розподіленим часом між вступами λ і середнім часом обслуговування X . Припускається, що випадкові пакети (тобто трафік IoT на основі подій) мають вищий пріоритет. Швидкість вступу пакетів (інтенсивність трафіку) та загальна кількість видавців (обсяг трафіку) є двома ключовими факторами, що знижують навантаження на мережу.

Ця модель експериментально досліджує та аналізує ряд показників швидкості вступу пакетів до IoT-брокера, щоб визначити ймовірність того, що підвищена інтенсивність вступу (λ) перебуває в межах припустимого діапазону для додатку. У цьому випадку швидкість пакетів не повинна перевищувати максимальну швидкість вступу $\lambda_{\text{макс}}$. З іншого боку, максимально допустима кількість видавців $M_{\text{макс}}$ повинна бути визначена згідно з вимогами до якості обслуговування.

Метою є аналіз методів уникнення перевантаження трафіку в мережі IoT, з мінімізацією негативного впливу на користувачів системи. Основні завдання включають таке:

1. Розрахунок максимальної частоти вступу пакетів, яка відображає внутрішні характеристики вузла-видавця;
2. Визначення максимального інтервалу вибірки для розрахунку поточної швидкості пакетів, щоб загальна затримка в черзі відповідала заданому порогу QoS [25];
3. Розрахунок максимальної кількості видавців, яку система може обслуговувати, не перевищуючи обмежень за затримкою.

Для вирішення цих завдань в мережі IoT ми проводили аналіз чергової моделі для мережі IoT-MQTT та оцінку механізму виявлення на основі швидкості вступу трафіку та кількості користувачів до того, як мережа перевантажиться. Розглянемо аналітичні вирази для ключових метрик продуктивності QoS, які залежать від великого мережевого навантаження, таких як час реакції системи,

затримка в черзі та загальна кількість пакетів, що надійшли до центрального брокера.

У роботі використовуються такі позначення:

- M – кількість MQTT видавців (верб);
- M_{max} – максимальна кількість MQTT видавців, яку може обслуговувати система;

система;

- T_{QoS} – визначений поріг затримки для QoS, с;
- Q – загальна затримка в черзі, с;
- λ – швидкість вступу пакетів, пакети/с;
- λ_{max} – максимальна швидкість вступу пакетів, пакети/с;
- X – середній час обслуговування в брокера, с;
- X_2 – другий момент часу обслуговування в брокера, с;
- R – середній залишковий час, с;
- W – середній час очікування, с;
- T – середній час відповіді, с;
- N – середня кількість пакетів;
- I – інтервал вибірки для розрахунку поточної максимальної швидкості вступу пакета, с.

вступу пакета, с.

Зібравши та дослідивши значну кількість історичних даних про прихід пакетів λ_{max} для кожного типу трафіку в брокері MQTT, можна досягти чіткого розподілу між пристроями IoT. Запропонована модель сприяє покращенню продуктивності брокера IoT в умовах будь-якого навантаження пакетів. Коли виявляються надмірні запити від одного чи кількох видавців MQTT, брокер адекватно реагує на такий обсяг трафіку, припиняючи неналежну активність пристроїв IoT [16].

Для забезпечення попередньо встановленого QoS, загальна затримка, перевірена за допомогою механізму виявлення, не повинна перевищувати певний поріг TQoST. Таким чином, кумулятивна затримка може бути прямо пов'язана з

інтервалом вибірки Π , позначеним як час, потрібний для збору та обчислення поточного максимуму λ .

3.3. Аналіз результатів чисельного моделювання

У кваліфікаційній роботі ми використовували програму MathCAD для створення імітаційних моделей та проведення математичних розрахунків. За допомогою цієї імітаційної моделі ми досліджували залежність потужності перешкод у точці прийому від щільності пристроїв при різних рівнях використання каналу (різних видів трафіку).

На 3.7 представлена отримана під час моделювання залежність при середньому використанні каналу 0,01, 0,1 та 0,5, при зміні щільності пристроїв від 0,0005 до 0,02 пристроїв на квадратний метр.

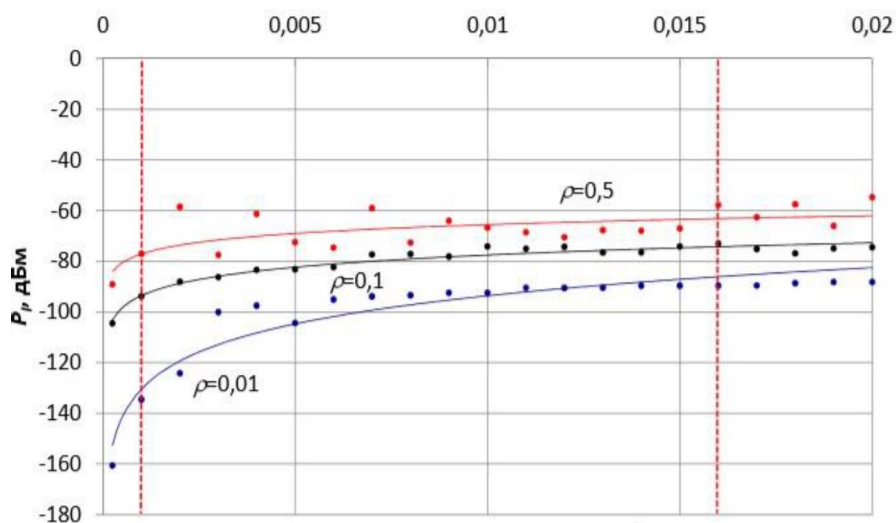


Рисунок 3.7 – Залежність потужності сигналу перешкоди в точці прийому від щільності пристроїв при різному використанні каналу

За допомогою цього дослідження ми можемо краще зрозуміти, як щільність пристроїв та використання каналу впливають на потужність перешкод у мережі.

Ця інформація може бути корисною для оптимізації проектування та управління бездротовими мережами, що може покращити їхню продуктивність та ефективність.

Використання програми MathCAD дозволило провести імітаційне моделювання та математичні розрахунки, щоб вивчити залежність потужності перешкод в точці прийому від щільності пристроїв та інтенсивності використання каналу. Отримані результати надали важливі відомості про взаємозв'язок цих факторів, що може бути корисним для оптимізації проектування та управління бездротовими мережами. Такий аналіз може допомогти покращити продуктивність та ефективність мережі, що має важливе значення в сучасному світі технологій.

3.4. Практичні рекомендації щодо використання методу оптимізації маршрутизації

Впровадження методу D2D у мережах зв'язку п'ятого покоління та оптимізація маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі вимагають комплексного підходу, який охоплює технічні, безпекові та енергетичні аспекти. Забезпечення надійності та безпеки з'єднань, ефективне управління ресурсами, адаптивна маршрутизація, енергоефективність, масштабованість та використання когнітивного радіо є ключовими елементами, що сприяють підвищенню ефективності та стабільності мережі. Співпраця між різними учасниками ринку та стандартизація протоколів додатково сприятимуть створенню сумісних і високоякісних рішень. Використання симуляцій для тестування алгоритмів і регулярне оновлення підходів дозволяють швидко адаптуватися до нових викликів та потреб користувачів [19].

Для успішного впровадження методу D2D у мережах зв'язку п'ятого покоління важливо звернути увагу на кілька ключових аспектів. Одним з

основних є забезпечення високої надійності та безпеки з'єднань між пристроями, що спілкуються безпосередньо. Це досягається за допомогою використання надійних протоколів шифрування та аутентифікації, що забезпечують конфіденційність та цілісність переданих даних.

Також слід ретельно планувати розподіл ресурсів у мережі, щоб уникнути перевантаження та забезпечити рівномірний розподіл навантаження між вузлами. Ефективне управління ресурсами включає динамічне виділення частотних каналів та потужності передачі, що дозволяє максимізувати пропускну здатність мережі та мінімізувати інтерференцію між з'єднаннями.

Оптимізація маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі за допомогою D2D вимагає врахування топології мережі та динамічної зміни її структури.

Важливим аспектом є управління енергоспоживанням пристроїв, оскільки D2D-з'єднання можуть вимагати більше енергії порівняно з традиційними методами передачі. Тому необхідно впроваджувати енергоефективні протоколи та технології, що дозволяють знизити енергоспоживання та продовжити час роботи пристроїв від акумулятора. Зокрема, технології, які дозволяють пристроям переходити в режим низького енергоспоживання під час простою, можуть суттєво знизити загальне енергоспоживання мережі [22].

Важливо також впроваджувати механізми для швидкого виявлення та вирішення проблем, таких як виявлення збоїв або вузлів, що виходять з ладу, та автоматичне перенаправлення трафіку на інші шляхи. Це може бути досягнуто за допомогою методів моніторингу мережі та самоорганізації, що дозволяють мережі автоматично адаптуватися до змін і підтримувати стабільність та ефективність роботи.

Нарешті, важливою складовою успішного впровадження D2D у Mesh-мережах є співпраця між різними учасниками ринку – постачальниками обладнання, операторами зв'язку та розробниками програмного забезпечення.

Стандартизація протоколів та взаємодія між різними виробниками обладнання сприятиме створенню сумісних та ефективних рішень. Впровадження методів D2D має відбуватися в контексті загальної стратегії розвитку мережі, враховуючи як поточні потреби, так і перспективні вимоги, що забезпечить довготривалу ефективність та стабільність роботи мережі.

Висновки по розділу 3

Було обрано сучасне симуляційне середовище, яке забезпечує можливості для моделювання мережевих умов, а також ефективне програмне забезпечення для реалізації алгоритмів маршрутизації. Використання мов програмування високого рівня та спеціалізованих бібліотек дозволило створити гнучкий і масштабований модуль для оптимізації маршрутизації, який можна інтегрувати в існуючі системи управління мережами 5G. Це середовище забезпечило надійну базу для подальших досліджень та тестувань.

Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованій Mesh-мережі показало, що запропонований метод значно покращує продуктивність мережі. Mesh-мережі, які характеризуються високою мобільністю вузлів та динамічними змінами топології, вимагають адаптивних рішень для маршрутизації.

Аналіз результатів чисельного моделювання показав, що розроблений метод оптимізації маршрутизації демонструє високі показники ефективності у різних сценаріях мережевих умов. Моделювання включало різні типи трафіку, змінні навантаження та мобільність користувачів. Результати підтвердили, що адаптивні алгоритми, які враховують поточний стан мережі та прогнозують майбутні зміни, значно покращують використання мережевих ресурсів та зменшують затримки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено методи оптимізації маршрутизації трафіку в мережах 5G з метою підвищення ефективності використання мережевих ресурсів та забезпечення високої якості обслуговування. В ході роботи було проведено аналіз існуючих підходів до маршрутизації у мережах 5G, що дозволило виявити їхні переваги та недоліки. На основі цього аналізу було визначено ключові критерії та параметри, які впливають на ефективність маршрутизації, зокрема, динамічність мережевих умов, навантаження на канали зв'язку та вимоги до якості обслуговування.

Розроблено новий метод оптимізації маршрутизації, що враховує динамічні зміни в умовах мережі та використовує адаптивні алгоритми для перерозподілу трафіку в реальному часі. Запропонований метод був реалізований у вигляді програмного модуля та інтегрований у систему управління мережею, що дозволило провести його симуляційне моделювання.

Результати моделювання показали, що розроблений метод значно покращує ефективність використання мережевих ресурсів, зменшує затримки та підвищує якість обслуговування у порівнянні з існуючими підходами. Також було оцінено продуктивність та масштабованість запропонованого методу при різних навантаженнях та кількості підключених пристроїв, що підтвердило його здатність адаптуватися до змінних умов мережі. Загалом, результати дослідження демонструють, що розроблений метод оптимізації маршрутизації може бути ефективно використаний у мережах зв'язку п'ятого покоління для забезпечення стабільного та швидкого зв'язку. Він сприяє підвищенню продуктивності мережі, покращенню якості обслуговування та задоволенню зростаючих потреб користувачів у високошвидкісному та надійному зв'язку.

Важливим компонентом моделі є використання машинного навчання для прогнозування змін у мережевих умовах, що дозволяє заздалегідь планувати

маршрутизацію та підвищувати ефективність управління трафіком. Модель оптимізації маршрутизації також включає механізми забезпечення якості обслуговування (QoS), що дозволяє враховувати вимоги до затримок, пропускну здатності та надійності для різних видів трафіку. Це особливо важливо для підтримки критичних додатків, таких як дистанційна хірургія або автономні транспортні засоби, де будь-яка затримка може мати серйозні наслідки. Розробка моделі оптимізації маршрутизації є важливим кроком до забезпечення стабільного та високоякісного зв'язку в мережах 5G, що відповідає зростаючим вимогам сучасних користувачів та індустрій.

Реалізація включала розробку адаптивних алгоритмів маршрутизації, використання методів машинного навчання для прогнозування навантаження та забезпечення якості обслуговування (QoS). Для оцінки ефективності запропонованого методу було проведено симуляційне моделювання в різних сценаріях мережеских умов, що включали різну кількість підключених пристроїв, змінне навантаження та різні типи трафіку. Результати симуляцій показали, що розроблений метод значно покращує ефективність використання мережеских ресурсів, зменшує затримки та підвищує якість обслуговування у порівнянні з існуючими підходами. Зокрема, було досягнуто значного зменшення затримок для критичних додатків, що є важливим для забезпечення їх надійної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

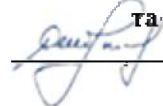
1. Бортник Г.Г. Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення радіосигналів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Вип. № 1 (281). С. 48-51.
2. Бортник Г.Г. Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2020. 126 с.
3. Васильківський М.В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління. *Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем*. 2019. Вип. № 4. С. 68-80.
4. Власенко В.О. Розробка методики визначення параметрів OFDM-сигналів в сучасних мобільних мережах. *Сучасний захист інформації*. 2016. Вип. № 3. С. 45-57.
5. Власова В.О. Метод визначення координат об'єктів на етапі ініціалізації гомогенної бездротової сенсорної мережі : монографія. Харків : Фактор-Друк, 2015. 215 с.
6. Галкін П.В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. Вип. 59. С. 24-38.
7. Голубничий Д.Ю. Порівняльний аналіз методів маршрутизації в інформаційно-телекомунікаційній мережі АСУ авіацією та протиповітряною обороною. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2017. Вип. 4 (53). С. 90-102.
8. Гофман К.О. Що таке 5G, і наскільки швидко це буде? Київ : Вид-во КНУ імені Т.Г. Шевченка, 2019. 106 с.
9. Довженко Н.М. Методика забезпечення достовірності інформації на основі двомірного кодування в сенсорній мережі : монографія. Київ : Наука, 2017. 160 с.

10. Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону. *Перспективи телекомунікацій*. 2019. Вип. № 2(47). С. 222-234.
11. Курбала Д.С., Кучук Г.А. Завдання штучного інтелекту в мережах зв'язку 5G. *Проблеми інформатизації*. 2023. Вип. № 78. С.71-88.
12. Марчук О.М. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем: монографія. Харків : СМІТ, 2016. 564 с.
13. Марчук О.М. Мережах мобільного зв'язку нових поколінь. *Перспективи телекомунікацій*. 2018. Вип. № 4(45). С. 12-28.
14. Пілінський В.В. Проектування довгих стільникових мереж зв'язку : навч. посібн. Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2018. 169 с.
15. Савченко Р.О. Методика побудови фемтостільників у мережах мобільного зв'язку : монографія. Харків : Фоліо, 2018. 114 с.
16. Стеклов В.К. Інформаційна система : підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Телекомунікації». Київ : Техніка, 2018. 792 с.
17. Степанець І.Ф. Особливості реалізації Massive MIMO у мережах 5G : навч. посібн. Львів : Перша миля, 2018. 70с.
18. Терузовський А.К. Телекомунікаційні системи та мережі. Абонентський доступ і технології локальних мереж : монографія. Харків : СМІТ, 2018. 96 с.
19. Ярош В.О. Методика розрахунку функції виживання телекомунікаційних мереж при багатократній дії дестабілізуючих факторів. *Сучасний захист інформації*. 2016. Вип. № 3. С. 23-34.
20. 5G NR Network Relationship. Neighbor Planning. *Techplayon*. URL: <http://www.techplayon.com/5g-nr-network-relationship-neighbor-planning/> (дата звернення: 14.05.2024).
21. Kirichek R. Model networks for internet of things and SDN. *Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2016, Issue № 27(3). P. 76-89.

22. Kirichek R. Flying Ubiquitous Sensor Networks as a Queueing System. *Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2018, Issue № 42(1). P. 42-54.
23. Koucheryavy A. Methods of Testing the NGN Technical Facilities. *Communications Magazine*, 2020, Issue № 67(2). P. 51-70.
24. Koucheryavy A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks. London : McOreilly, 2018. 371 p.
25. Mahmood O. Optimization of Routes in the Internet of Things. *Next Generation Wired/Wireless*. 2019, Issue № 16. P. 33-45.
26. Maier M. The tactile internet: vision, recent progress, and open chal-lenges. *Communications Magazine*. 2018, Issue №54. P. 138-145.
27. Muthanna A. Enabling M2M Communication through MEC and SDN. *Communications in Computer and Information Science*. 2018. Issue №59. P. 95-106.
28. Muthanna A. Analytical Evaluation of D2D Connectivity Potential in 5G Wireless Systems : Guide for Computer Science. New York : Solution Tree Press, 2019, 403 p.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет комп'ютерних наук
Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) **бакалавр**
галузь знань: 15 – Автоматизація та приладобудування
спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри теоретичної
та прикладної системотехніки
 д.т.н., проф. Шматков С. І.
«21» грудня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Голоцвана Данііла Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи: **«Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління»**

Керівник роботи: **Чуб Ольга Ігорівна – к.е.н, доцент кафедри ТПС**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» травня 2024 року № 4101-5/909

2. Строк подання студентом роботи 31 травня 2024 року.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

- 1) Огляд сучасних методів маршрутизації в мережах зв'язку п'ятого покоління.
- 2) Обґрунтування вибору алгоритму маршрутизації для впровадження у мережі.
- 3) Моделювання архітектури маршрутизації для мереж зв'язку п'ятого покоління.
- 4) Аналіз ефективності запропонованих методів на основі чисельного моделювання.
- 5) Розробка програмної системи оптимізації маршрутизації в мережах зв'язку п'ятого покоління.
- 6) Підготовка практичних рекомендацій щодо впровадження та використання оптимізованих методів маршрутизації у реальних умовах.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Формулювання наукової проблеми, обґрунтування актуальності, мети та завдань кваліфікаційної роботи, узгодження об'єкта, предмета та методів дослідження, а також формулювання очікуваних практичних результатів	19.12.2023 – 02.01.2024
2	Аналіз актуальних наукових досліджень та публікацій з теми кваліфікаційної роботи	02.01.2024 – 25.01.2024
3	Класифікація основних характеристик мереж зв'язку п'ятого покоління	25.01.2024 – 14.02.2024
4	Виклад матеріалу першого розділу кваліфікаційної роботи	14.02.2024 – 28.02.2024
5	Розробка моделі оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління	28.02.2024 – 16.03.2024
6	Проведення чисельного моделювання оптимізації маршрутизації	16.03.2024 – 23.03.2024
7	Виклад матеріалу другого розділу кваліфікаційної роботи	23.03.2024 – 31.03.2024
8	Реалізація програмної системи оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку	31.03.2024 – 16.04.2024
9	Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління	16.04.2024 – 20.04.2024
10	Тестування та контроль якості програмної системи	20.04.2024 – 22.04.2024
11	Аналіз результатів чисельного моделювання та підготовка рекомендацій щодо використання програмної системи	22.04.2024 – 30.04.2024
12	Виклад матеріалу третього розділу кваліфікаційної роботи	30.04.2024 – 08.05.2024
13	Підготовка презентації до пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	08.05.2024 – 14.05.2024
14	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи та проходження перевірки на антиплагіат	14.05.2024 – 25.05.2024
15	Передзахист кваліфікаційної роботи	14.05.2024 – 25.05.2024
16	Отримання рецензії та відгуку керівника	до 25.05.2024
17	Захист кваліфікаційної роботи	до 31.05.2024


5. Дата видачі завдання: 21.12.2023

Студент Д.І. Голоцван



 підпис

Керівник роботи О.І. Чуб



 підпис

**Технічне завдання
на розробку програмного виробу**

«Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління»

Назва розділу	Назва і зміст підрозділу
1. Введення	1.1. Назва проекту: Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління. 1.2. Галузь застосування: Телекомунікації та мережі зв'язку.
2. Підстава для розробки	2.1. Робочий навчальний план спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. 2.2. Завдання на дипломну роботу бакалавра, затверджено наказом по університету № 4101-5/909 від 3 травня 2024 року.
3. Призначення розробки	3.1. Мета: Підвищення функціональної ефективності телекомунікаційної мережі зв'язку п'ятого покоління. 3.2. Призначення: Оптимізація маршруту передавання інформації та реструктуризації трафіку. 3.3. Початкові дані для розробки: Специфікації наявних мереж, технічні вимоги та оперативні характеристики мереж 5G.
4. Технічні вимоги до програмного виробу	4.1. Функціональні характеристики: - підтримка різноманітних топологій мережі; - ефективне управління трафіком і мінімізація затримок. 4.2. Надійність: - висока доступність та відмовостійкість системи. 4.3. Умови експлуатації: Система працює на основних операційних системах, таких як Windows, macOS і Linux. 4.4. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів: - використання обчислювальних платформ, які підтримують високу пропускну спроможність і низькі затримки для маршрутизації даних у мережах зв'язку п'ятого покоління. - підтримка модульної архітектури для легкої інтеграції з різними мережевими пристроями та середовищами. 4.5. Сумісність: Система сумісна із загальноприйнятими протоколами та стандартами в мережах 5G. 4.6. Вимоги до маркування та упаковки: Система не має спеціальних вимог. 4.7. Вимоги до транспортування і зберігання: Немає вимог, оскільки продукт цифровий.

	4.8. Спеціальні вимоги: Система має бути спроектована з урахуванням можливості розширення та модернізації в майбутньому без значних змін у її основній архітектурі.		
5. Вимоги до програмної документації	Програмою документацією системи є: 1) Технічне завдання на розробку програмного виробу (Додаток Б); 2) Програма та методика випробувань програмного виробу (Додаток В); 3) Опис програмного виробу (Розділ 2 та Розділ 3 Пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи бакалавра).		
6. Техніко-економічні показники	Економічний ефект від зменшення затримок та підвищення продуктивності мережі.		
7. Стадії і етапи розробки	№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання
	1	Формулювання наукової проблеми, обґрунтування актуальності, мети та завдань кваліфікаційної роботи, узгодження об'єкта, предмета та методів дослідження, а також формулювання очікуваних практичних результатів	19.12.2023 – 02.01.2024
	2	Аналіз актуальних наукових досліджень та публікацій з теми кваліфікаційної роботи	02.01.2024 – 25.01.2024
	3	Класифікація основних характеристик мереж зв'язку п'ятого покоління	25.01.2024 – 28.02.2024
	4	Розробка моделі оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління	28.02.2024 – 16.03.2024
	5	Проведення чисельного моделювання оптимізації маршрутизації	16.03.2024 – 31.03.2024
	6	Реалізація програмної системи оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку	31.03.2024 – 16.04.2024
	7	Дослідження ефективності оптимізації маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління	16.04.2024 – 20.04.2024
	8	Тестування та контроль якості програмної системи	20.04.2024 – 22.04.2024
9	Аналіз результатів чисельного моделювання та підготовка рекомендацій щодо використання програмної системи	22.04.2024 – 30.04.2024	

8. Порядок контролю і приймання	1) Внутрішній контроль: Проводиться керівником кваліфікаційної роботи на кожному етапі розробки для забезпечення відповідності технічному завданню і стандартам якості; 2) Тестування програмного виробу: Проводиться керівником кваліфікаційної роботи разом з виконавцем після остаточного виконання Технічного завдання на розробку виробу; Приймання роботи: Проводиться на засіданні Атестаційної комісії № 44 на базі Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.
---------------------------------	--

Виконавець:

студент групи КУ-41
Голоцван Д.І.

**Замовник:**

к.е.н., доцент кафедри теоретичної
та прикладної системотехніки
Чуб О.І.



Програма і методика випробувань програмного виробу

«Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління»

1. Об'єкт випробувань

1.1. Назва: «Метод маршрутизації у мережах зв'язку п'ятого покоління».

1.2. Область застосування: Телекомунікації, мережі зв'язку п'ятого покоління.

2. Мета випробувань

Перевірка відповідності функціональності програмної системи заявленим у Технічному завданні функціональним можливостям (Додаток Б до пояснювальної записки).

3. Загальні положення

3.1. Підстави для проведення випробувань: Наказ по університету про призначення Атестаційної комісії № 44.

3.2. Місце і тривалість випробувань: Випробування проводяться у віртуальному лабораторному середовищі протягом роботи Атестаційної комісії № 44.

3.3. Обсяг випробувань: Приймання та тестування програмного виробу проводяться в обсягах, які відповідають пункту 3.2 цієї Програми.

3.4. Організації, які беруть участь у випробуваннях: Приймання проводиться в процесі засідання Атестаційної комісії № 44 за участю Замовника, Виконавця та інших осіб, присутніх на засіданні.

4. Вимоги до програми або програмного виробу

Система повинна задовольняти наступні вимоги:

1. Функціональні характеристики:

- підтримка різноманітних топологій мережі;
- ефективне управління трафіком і мінімізація затримок.

2. Надійність:

- висока доступність та відмовостійкість системи.

3. Умови експлуатації: Система працює на основних операційних системах, таких як Windows, macOS і Linux.

4. Вимоги до складу і параметрів технічних засобів:
 - використання обчислювальних платформ, які підтримують високу пропускну спроможність і низькі затримки для маршрутизації даних у мережах зв'язку п'ятого покоління.
 - підтримка модульної архітектури для легкої інтеграції з різними мережевими пристроями та середовищами.
5. Сумісність: Система сумісна із загальноприйнятими протоколами та стандартами в мережах 5G.
6. Спеціальні вимоги: Система має бути спроектована з урахуванням можливості розширення та модернізації в майбутньому без значних змін у її основній архітектурі.

5. Вимоги до програмної документації

Програмою документацією системи є:

1. Технічне завдання на розробку програмного виробу (Додаток Б);
2. Програма та методика випробувань програмного виробу (Додаток В);
3. Опис програмного виробу (Розділ 2 та Розділ 3 Пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи бакалавра).

6. Засоби і порядок випробувань

6.1. Засоби випробувань: Для проведення випробування необхідне середовище, яке підтримує мову програмування Python та має відповідні бібліотеки.

6.2. Порядок проведення випробувань: Випробування програмного засобу відбувається за допомогою проведення 3 тестів.

Тест 1: Перевірка зменшення затримок у передачі даних

- Мета: Оцінити ефективність запропонованого методу маршрутизації у зменшенні затримок у передачі даних.
- Опис процедури: Використовується модель мережі (рис. В.1) для симуляції різних сценаріїв передачі даних, включаючи різні топології та інтенсивності трафіку.

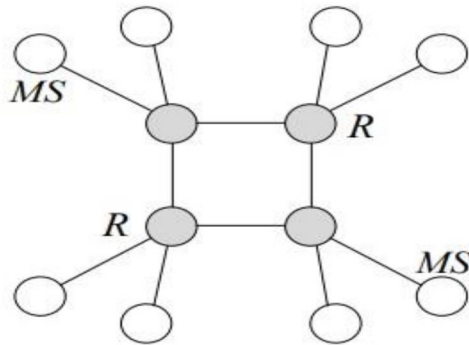


Рисунок В.1 – Модель мережі

Тест 2: Покращення пропускної спроможності мережі

- Мета: Визначити вплив методу маршрутизації на пропуску спроможність мережі.
- Опис процедури: Використання топології RPL у вигляді ациклічного графа (рис. В.2) для тестування ефективності маршрутизації в умовах високої завантаженості мережі.
- Результати: Порівняння пропускної спроможності мережі до та після застосування нового методу маршрутизації.

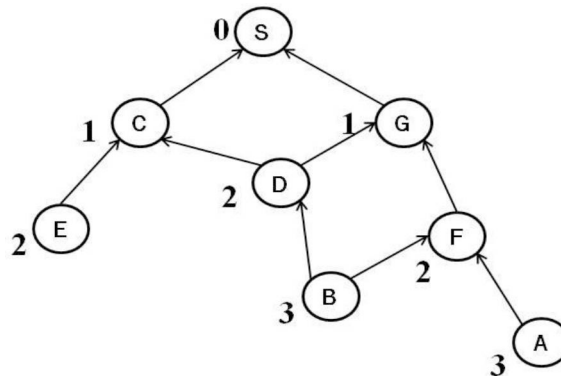


Рисунок В.2 – Топологія RPL у вигляді ациклічного графа

Тест 3: Аналіз результатів чисельного моделювання

- Мета: Оцінити ефективність модифікованого мурашкового алгоритму для маршрутизації.

- Опис процедури: Використання результатів чисельного моделювання для аналізу залежності часу передачі даних від пройденого шляху (рис. В.3).
- Результати: Оцінка середнього часу передачі даних для різних відстаней та порівняння з іншими методами маршрутизації.

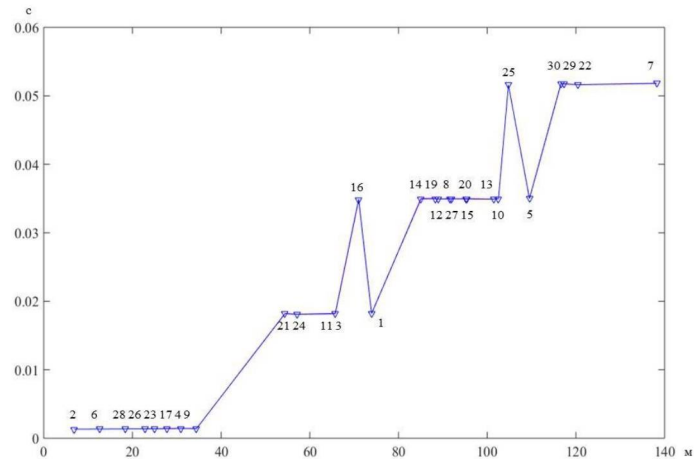


Рисунок В.3 – Залежність часу передачі даних від пройденого шляху для модифікованого мурашкового алгоритму

Висновок: при вдалому проходженні всіх трьох тестів випробування розробленої системи вважаються успішними.

Виконавець:

студент групи КУ-41

Голоцван Д.І.