

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод побудови безпроводних
Mesh-мереж NDN

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-4
Зубенко В. П.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: проф. Можєв О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра _____ електронних обчислювальних машин
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ Системне програмування
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Зубенко Володимир Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод побудови безпроводних Mesh-мереж NDN

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 257 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи операційна система Windows або Linux, 1Гб оперативної пам'яті ПК процесор на 1ГГц, 100Мб вільної пам'яті на жорсткому диску

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

- 1) аналітичний огляд;
- 2) програмне моделювання та розробка системи;
- 3) програмна реалізація системи та її дослідження;
- 4) тестування;
- 5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 13

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел-	02.04.24-08.04.24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	09.04.24-16.04.24	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.24-22.04.24	
4	Розробка моделей протоколів	23.04.24-06.05.24	
5	Проведення експериментів	07.05.24-23.05.24	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	04.06.24-07.06.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	08.06.24-12.06.24	

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Можасєв О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 65 с., 16 рис., 3., 2дод.,
17 джерел.

MESH МЕРЕЖІ, НАНОМЕРЕЖІ, NDN-МЕРЕЖІ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання більш ефективного використання мережевих ресурсів при обслуговуванні значних інформаційних потоків, що генеруються сенсорними пристроями Інтернету. Програми Інтернету промов досліджуються на прикладі Інтернету новаторської, як найекстремальнішого випадку. Ця проблема, особливо актуальна у бездротових мережах, оскільки може зменшити або навіть паралізувати роботу мережі через високу інтерференцію та обмежену пропускну здатність.

Метою роботи є забезпечення функціонування послуг зв'язку, що включають додатки Інтернету речей, в умовах ізолюваності або обмеженої доступності мережі Інтернет шляхом удосконалення технології бездротових Mesh мереж.

ABSTRACT

Master's thesis: 65 pages, 26 figures, 3 tables, 2 appendices, 17 sources.

MESH NETWORKS, NANONETWORKS, NDN-NETWORKS

The thesis examines the issue of more efficient use of network resources when serving significant information flows generated by Internet sensor devices. Speech Internet programs are studied on the example of the innovative Internet as the most extreme case. This problem is especially relevant in wireless networks, as it can reduce or even paralyze the network due to high interference and limited bandwidth.

The purpose of the work is to ensure the functioning of communication services, including Internet of Things applications, in conditions of isolation or limited Internet availability by improving the technology of wireless Mesh networks.

Technical and economic calculations of the project are given.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ	13
1.1 Дослідження загального розвитку мереж зв'язку та послуг	13
1.2 Аналіз розвитку мереж доступу	14
1.3 Прогресивні телекомунікаційні технології	15
1.3.2 Mesh мережі	19
2 ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ОСНОВНІ ТОПОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ MESH МЕРЕЖ.....	25
2.1 Технології MESH мереж.....	25
2.2 Однорангова та багаторангова топології MESH мереж.....	27
2.3 Кластеризація MESH мереж із багаторанговою топологією.....	30
2.4 Моделювання кластеризації Mesh мереж із багаторанговою топологією.....	33
3 МОДЕЛЮВАННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ MESH МЕРЕЖІ.....	36
3.1 Опис моделі Mesh мережі	37
3.2 Симуляція роботи Mesh мережі.....	37
3.3 Симуляція роботи бездротової пористої NDN-мережі	43
3. 4 Симуляція роботи гетерогенної MESH мережі	50
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	56
ДОДАТОК Б Публікація	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

AI – агрегаторами інформації
БШД – бездротовий широкопasmовий доступ;
ОП – оперативна пам'ять
ОС – операційної системи
3GPP – 3rd Generation Partnership Project
5G – Fifth Generation
5G NR – Fifth Generation. New Radio
AODV – Ad-hoc On-Demand Distance Vector
BGP – Border Gateway Protocol
CCN – Content-Centric Networking
CS – Content Store
D2D – Device-to-Device
LPWAN – LoRa, SigFox, NB-IoT, Weightless
NDN – Named Data Networking
WMN – Wireless Mesh Networks

ВСТУП

Актуальність теми. Безперечно, вже кілька десятиріч років і нині одними з головних двигунів технологічного прогресу є сфери телекомунікацій та інформаційних технологій, а основними аспектами розвитку інформаційного суспільства – інформатизація та інтернетизація. Зближення цих двох областей за останні роки стало настільки тісним, а кордони настільки розмилися, що серед дослідників та інженерів став популярним такий термін, як «інфокомунікації», що означає, що розглядати інформаційні технології без телекомунікацій і наоборот неприпустимо. Результатом пильної уваги до інфокомунікацій стала їхня інтеграція фактично у всі сфери людської життя. Практично неможливо уявити повсякденність без засобів зв'язку, не говорячи вже про застосування їх у робочій діяльності – за допомогою засобів зв'язку лікарі дистанційно консультують своїх пацієнтів, підприємці керують бізнесом, а вчителі в середніх освітніх установах задають домашні завдання за допомогою «електронних журналів» та «електронних щоденників». Також слід сказати про те, що найчастіше навіть для організації чи ремонту самих каналів зв'язку потрібна наявність засобів зв'язку. Таким чином, можна сказати, що зростання доступності послуг зв'язку та засобів надання, обробки та зберігання інформації розширило можливості людини, однак і зробило її певною мірою залежним від них, оскільки зі вступом людства в епоху цифрової економіки, стійка робота мереж є критично важливою компонентом.

Порушення працездатності мережі здатне призвести не лише до фінансових втрат, пов'язаних із призупиненням залежних від наявності зв'язку процесів, а й до ситуацій критичним для здоров'я та життя людини. Як приклад таких умов можна представити зруйновану внаслідок стихійного лиха інфраструктуру населеного пункту, коли частина мережевих вузлів виявилася недоступною: комунікації між пунктами надання допомоги

відсутня стан в екстрені служби або зв'язатися з родичами, а банки та комерційні організації не можуть обмінюватися даними та здійснювати віддалені операції. Проте, як підвищення надійності одна із головних напрямів розвитку інфокомунікацій, а й територіальне розширення зон обслуговування мереж, оскільки наявність зв'язку потрібна в тих місцях, де немає можливості будівництва інфраструктурних елементів. Іншими словами, іншою головною тенденцією розвитку мереж є збільшення їхньої доступності.

Одним із можливих рішень, що підвищують доступність і стійкість послуг зв'язку, може бути застосування бездротових мереж (WMN, від англ. Wireless Mesh Networks). Завдяки можливості швидкого розгортання, самоорганізації та масштабованості даний тип мереж є досить перспективним способом забезпечення зв'язку в місцях, де може бути ускладнена організація інфраструктурних мереж доступу (віддалені території), або потрібне швидке відновлення послуг зв'язку, якщо інфраструктура пошкоджена або зруйнована.

Програми WMN різноманітні, проте їх можна поділити на кілька основних типів: програми для закритих груп користувачів, таких як корпоративні користувачі; напівзакритих груп, що обслуговуються мережевими провайдерами чи операторами; а також для відкритих груп кінцевих користувачів, таких як громадські мережі з бездротовим доступом до Інтернету. При цьому слід зазначити те, що в першому випадку від пористої мережі переважно потрібно задоволення вимог до безпеки та надійності, в іншому - вимог до швидкості передачі даних та якості надання послуг, а мережі додатків третьої групи повинні бути якомога доступнішими і масштабованішими. . Саме тому при проектуванні Бездротова мережа рекомендується звертати увагу на який тип програм вона орієнтована.

Крім того, не слід забувати про наростаючий темп розвитку додатків Інтернету промов і таке його перспективне напрям, як Інтернет нове, областями застосування якого є: медицина, моніторинг ресурсів,

промисловість, системи «розумного міста», сільське господарство та інші. [1, 3, 5] Нехай в даному випадку кінцевими користувачами або виробниками даних будуть служити точки доступу, призначені для збору та передачі даних, що збираються сенсорними пристроями, проте, враховуючи важливість областей застосування, не слід забувати про вищеперераховані вимоги. Наприклад, використання медичних додатків Інтернету наново сильно залежить від якості надання телекомунікаційних послуг, якщо говорити точніше, то медичні додатки можуть бути надзвичайно чутливими до затримок та втрат [2].

Бездротові комірчані мережі здатні задовольняти більшість сучасних вимог додатків Інтернету речей і новаторської, проте однією з найважливіших проблем практичного використання Mesh або WMN мереж у рамках мережевої моделі IP є індексація ресурсів, що знаходяться в цих мережах, та їх зіставлення з мережевими адресами. Зокрема, з відсутністю можливості підтримувати доступ до системи доменних імен (DNS) у динамічній розподіленій мережі, пошук та надання інформації може бути скрутними, оскільки користувачі, а також їх пристрої можуть не володіти знанням про те, на якому саме вузлі знаходяться потрібні їм дані та їх найменування на цьому вузлі, щоб зробити потрібний запит. Дані проблеми значною мірою обмежують застосовність пористих мереж на практиці. Крім того, як показано в дослідженнях [7], WMN, засновані на IP, здатні передавати дані з прийнятною швидкістю і затримкою тільки в умовах статичної або топології, що зрідка змінюється, в умовах динамічної топології через постійне перебудовування таблиць маршрутизації вузлів і частих розривів та відновлення з'єднань затримка та втрата в таких мережах зростатимуть.

Для запобігання перерахованим вище недолікам, у кваліфікаційній роботі пропонується використовувати нову архітектуру мереж зв'язку - Named Data Networking (NDN) [7], або мережі іменованих даних, замість традиційної хост-орієнтованої мережевої архітектури. Передбачається, що

використання технологій NDN вирішити проблеми надання інформації користувачам усередині однієї ізольованої мережі, а також покращити якість надання телекомунікаційних послуг. [6, 8, 9] Однак через те, що мережі іменованих даних є новою технологією, можливе виникнення проблем при її впровадженні у існуючу інфраструктуру, а саме у харчуванні взаємодії пристроїв нової архітектури з елементами традиційних мереж. Саме тому одним із питань, що розглядаються в цій роботі, стала розробка алгоритму роботи шлюзу, що дозволяє обмінюватися цими пристроями двох різних мережесих архітектур.

Крім того, ця робота також розглядає питання більш ефективного використання мережесих ресурсів при обслуговуванні значних інформаційних потоків, що генеруються сенсорними пристроями Інтернету. Програми Інтернету промов досліджуються на прикладі Інтернету новаторської, як найекстремальнішого випадку. Ця проблема, особливо актуальна у бездротових мережах, оскільки може зменшити або навіть паралізувати роботу мережі через високу інтерференцію та обмежену пропускну здатність.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є забезпечення функціонування послуг зв'язку, що включають додатки Інтернету речей, в умовах ізольованості або обмеженої доступності мережі Інтернет шляхом удосконалення технології бездротових Mesh мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) провести аналіз технології Mesh мереж для надання послуг Інтернету речей в умовах обмеженої доступності мережі Інтернет ;
- 2) розробити метод доступу до ресурсів у бездротових Mesh мережах в умовах обмеженої доступності мережі Інтернет;
- 3) провести імітаційне моделювання роботи MESH мережі.

Об'єктом дослідження – процес передачі даних у бездротових Mesh мережах.

Предмет дослідження – методи передачі додатків у бездротових Mesh мережах.

Методи дослідження. При розв'язанні науково-дослідного завдання було використано широкий спектр методів, таких як методи теорії масового обслуговування, теорії ймовірності, математичної статистики та комп'ютерного імітаційного моделювання.

Наукова новизна полягає в тому, що розроблено метод розповсюдження даних у бездротовій MESH мережі, що враховує вплив популярності даних, що запитуються, інтенсивності передачі трафіку в мережі, розміру внутрішнього сховища вузла і щільності ділянки мережі, що розглядається.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонований метод надання послуг зв'язку на території з обмеженою доступністю мережі Інтернет може бути використаний для організації зв'язку на території з пошкодженою або відсутньою інфраструктурою.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Дослідження загального розвитку мереж зв'язку та послуг

Один із найбільш наочних та важливих показників розвитку технології чи мереж зв'язку в цілому називається терміном «проникнення». Прийнято, що проникнення технології чи послуги зв'язку виражається числом користувачів на 100 людина, а виміри проводяться лише на рівні регіону чи країни. [2, 9] Необхідно відзначити, що даний показник в даний час не надає вичерпну інформацію, оскільки з появою Інтернету речей користувачем може бути не тільки людина, але і пристрій (комп'ютер, мікроконтролер або телефон), що є споживачем або джерелом інформації, що передається через мережа.

Другою технологією надання послуг зв'язку, що росте з найбільшими темпами, є бездротовий широкосмуговий доступ (БШД), що збільшив кількість своїх користувачів більш ніж на 20% тільки за останній рік. Можна припустити, що таке швидке зростання пов'язане з розвиненими мережами 3G і 4G, а також появою 5G мереж.

Також слід зазначити, що, хоч і набагато меншими темпами, але й технології фіксованого проводового зв'язку досі набирають користувачів, проте зростання їхнього проникнення суттєво сповільнилося в останні роки. Даний факт можна пояснити тим, що технології рухомого зв'язку в даний час мають достатні можливості для задоволення вимог до надання більшості існуючих послуг і, крім цього, є більш комфортними у використанні.

Слід зазначити, що зі зростанням проникнення технологій зв'язку з кожним роком зростає і популярність їх використання в інших сферах людської життєдіяльності, наприклад, в економіці. За даними [5] впливає, що у 2022 році в усьому світі 37% усіх користувачів робили покупки за допомогою мережі Інтернет, що на 3,1% більше, ніж у попередньому році .

Всі перераховані вище статистичні дані доводять високий рівень впровадження мережевих послуг і засобів зв'язку і в повсякденну, і в робочу діяльність людини і підтверджує появу деякої залежності від них.

Необхідність підтримки надійної та безперервної роботи мереж зв'язку стає очевидною, оскільки порушення працездатності мережі здатне призвести до непрогнозованих матеріальних втрат для людини, компанії або навіть держави. Крім того, рівень проникнення інфокомунікацій у повсякденне життя також означає, що кількість і щільність засобів зв'язку, що збільшується, дають можливість застосувати їх як мережеві елементи бездротових пористих мереж, що в тому числі активно досліджується в рамках роботи зі стандартизації 5G NR в 3GPP. Дані мережі можуть використовуватися не тільки як резервна мережа, що дозволяє запобігти повній непрацездатності мережної інфраструктури або її сегменту, але також для організації додаткових каналів зв'язку, що сприятиме розвантаженню мереж доступу та покращить якість надання послуг.

1.2 Аналіз розвитку мереж доступу

Крім проникнення мережі зв'язку можна також охарактеризувати їх потенційними можливостями, які залежать від застосовуваних технологій організації каналів зв'язку. Удосконалення, або, навіть можна сказати, еволюційний процес технологій зв'язку штовхають вперед розвиток елементної бази пристроїв мережевих вузлів і модернізація існуючих або ж розробка нових методів і алгоритмів обробки сигналів і даних, закодованих ними. Підсумком такої еволюції стає перехід до наступних поколінь мережевих пристроїв, які перевершують попередників щодо характеристик і основних показників якості. Прикладами таких еволюційних процесів розвитку технологій є зміни стандартів мереж рухомого зв'язку та бездротових локальних мереж, що просуваються Wi-Fi Alliance (від 802.11a до 802.11ax та стандартів, що перебувають у розробці). Розвиток цих

технологій з кожним наступним поколінням помітно не лише фахівцям у своїй галузі, а й пересічному користувачеві, оскільки спектр послуг, що пропонуються, розширюється, а якість вже існуючих підвищується.

Одним із основних параметрів мереж зв'язку є максимальна пропускна здатність, яка, як відомо, визначається найбільш «вузьким» місцем маршруту, яким проходить передача даних. Найчастіше таким місцем є мережа доступу – ділянка між терміналом користувача та крайнім пристроєм мережі постачальника послуг – базовою станцією, точкою доступу тощо.

З найпопулярніших технологій бездротових мереж доступу виділяють: мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G), технології бездротової локальної мережі сімейства стандартів IEEE 802.11 - Wi-Fi, технології на основі стандарту IEEE 802.15.4, а також технологій на основі сімейства стандартів LPWAN (LoRa, SigFox, NB-IoT, Weightless P).

1.3 Прогресивні телекомунікаційні технології

Кожному наступному поколінню властиво вдосконалювати, відточувати вже існуючі технології, пристрої, методи та концепції, а також розробляти нові рішення, що дозволяють змінити або розширити точку зору на деякі речі і досягти результатів, про які раніше ніхто не наважився б подумати. Це стосується всіх галузей наукового знання, зокрема й інфокомунікацій. У цій підрозділі розглядаються технології, які зараз не мають широкого застосування в сучасних мережах зв'язку, але які привертають все більше уваги дослідників та розробників своїми потенційними можливостями. Кожна з розглянутих технологій, крім позитивних перспектив, має специфічний вплив на працездатність інфокомунікаційної мережі, здатний як покращити якість надання телекомунікаційних послуг, так і зробити її гіршою, якщо не будуть враховані всі фактори впливу.

1.3.1 Наномережі

Виробництво пристроїв Інтернету речей стало економічнішим, а самі пристрої та його компоненти пішли шляхом мініатюризації. Так з'явилися мікропроцесори, мікросенсори, мініатюрні антени та елементи живлення. Охопивши практично весь спектр сфер людської діяльності, включаючи і повсякденне життя, розвиток Інтернету речей продовжив свій рух не лише «вшир», а й «вглиб», скориставшись допомогою нанотехнологій. Так з'явилася ідея Інтернету.

Останні дослідження в галузі нанотехнологій дозволяють розробляти пристрої, які називаються наномашинами, розміром від одного до кількох сотень нанометрів. Наномашина являє собою функціональний блок з інтегрованими в нього нанокомпонентами, здатний виконувати не тільки обчислювальні операції, але і такі прості завдання, як зняття показань за допомогою сенсорів або здійснення будь-якого впливу на навколишнє середовище. Розширити застосування елементарних можливостей окремих нанопристроїв як з боку їх складності, так і з боку областей використання можливо за допомогою координації та обміну інформацією між ними, утворюючи при цьому мережі зв'язку. Такі мережі отримали назву "наносіти" [3, 4, 6].

Нова мережева парадигма, названа Інтернетом наноречей, була запропонована IF Akyildiz і співавторами в роботі [3, 8] і визначалася як взаємозв'язок нанорозмірних пристроїв з класичними видами мереж, у тому числі і з Інтернетом. Також у [38] було описано архітектура мережі Інтернету ноновищей, основними компонентами якої є:

- нановузли – найпростіші наномашини, що мають дуже обмежені обчислювальні здібності та об'єм пам'яті. Оскільки розміри нановузлів не дозволяють оснащувати їх елементами живлення великих обсягів, дані пристрої здатні передавати сигнал тільки дуже невелику відстань;

- наномаршрутизатори - нанопристрою, що забезпечують агрегування

інформації, що надходить від нановузлів. Крім того, наномаршрутизатори служать для того, щоб керувати поведінкою нановузлів (включення або вимкнення, «занурення в сон» або «пробудження»), команда на зчитування значення параметра, що вимірюється тощо). Передбачається, що наномаршрутизатори мають порівняно більшими обчислювальними та енергетичними ресурсами, ніж нановузли, а таке збільшення можливостей передбачає і збільшення розмірів самого пристрою;

- нано-мікро інтерфейси – пристрої, здатні агрегувати інформацію, що надходить від наномаршрутизаторів, передавати їх у мікромасштабні мережі. Вважається, що нано-мікро інтерфейси – це гібридні пристрої, які використовують як класичні парадигми зв'язку, і методи зв'язку наноуровня;

- шлюзи - пристрої, що здійснює контроль над всією мережею через мережу Інтернет. Наприклад, у випадку мережі з сенсорами на тілі людини цю функцію може виконувати мобільний телефон, який транслює інформацію про потрібні показники до медичного закладу.

На сьогоднішній день існує два основних типи зв'язку між наноустройствами: електромагнітний (передача інформації здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль) та молекулярний (для передачі інформації використовуються переміщення речовини).

Молекулярні наносіти можна класифікувати залежно від їхньої дальності зв'язку: нано- та мікрометрові [4, 7], міліметрові [2, 5, 8] та наносіти, інформація в яких передається на метри та більше [5, 6, 8, 9]. Як приклад наномашини молекулярних наномереж може служити клітина організму, яка за своєю структурою нагадує мікроробота (або мікроробот, що нагадує клітину організму). Кожен із представлених класів молекулярних наномереж по-своєму унікальний, а тому на даний момент дослідження та розробки проводяться у всіх напрямках.

Зупинимось докладніше на електромагнітних наномережах. Застосування електромагнітного способу засноване на використанні частот ТГц діапазону, що багато в чому стало можливим завдяки унікальним

властивостям графену.

Графен – двовимірна алотропна модифікація вуглецю, утворена шаром атомів вуглецю товщиною один атом. Його основними властивостями є: висока механічна жорсткість, висока теплопровідність, висока електропровідність, а також графен є найтоншим і найлегшим матеріалом у світі. [5, 7] З цього матеріалу виготовляються антени довжиною 1 мкм, робота яких ґрунтується на поверхневій плазмонній поляризації. Нещодавні дослідження демонструють, що графенові антени можуть підтримувати електромагнітний зв'язок в діапазоні терагерца (0.1 – 10 ТГц), дозволяючи передавати інформацію з величезною швидкістю (кілька Тб / с), а їх розміри дають можливість застосовувати їх в нанопристроях. З іншого боку, такі антени, як уже говорилося, можуть забезпечувати передачу даних тільки на обмежену дистанцію через великі втрати рівня потужності сигналу, пов'язаних з поширенням електромагнітних хвиль терагерцового діапазону частот, молекулярного поглинання (абсорбції) і втрат через частинок, що розсіюють. [3, 7]

Незважаючи на специфічні характеристики каналу зв'язку, що ускладнюють роботу, дослідники знайшли спосіб уникнути сильних спотворень сигналу. У діапазоні терагерцових частот є звані вікна прозорості – частоти, у яких коефіцієнт пропускання середовища дуже високий, малих і середніх дистанцій. Що означає наявність зневажливо малих значень втрат через молекулярну абсорбцію і порівняно невеликий молекулярний шум. У всьому спектрі терагерцових частот існує декілька таких вікон прозорості, і їхня кількість зменшується зі збільшенням відстані передачі. Так, наприклад, стало відомо, що для дистанції передачі 0,01 метра існує до п'ятнадцяти вікон прозорості, а для 1 метра – лише шість. Також стало відомо, що найбільш відповідним вікном для передачі сигналів є перше вікно зі смугою частот 0,1 – 0,54 ТГц. Працюючи на даних частотах зв'язок між пристроями наносети здатна досягати дистанцій до 15 метрів зі швидкістю передачі, достатньої додатків Інтернету нановещей. [4, 5, 8].

Варто окремо виділити тему поєднання наномереж із традиційними мережами загального користування. Наномережі працюють за принципом «ведучий – ведений», а збирання даних датчиками здійснюється відповідно до заздалегідь заданих правил. Трафік наномережових додатків здебільшого характеризується M2M взаємодією, як і більшість трафіку Інтернету речей. Він являє собою детермінований потік, що відрізняється більшою «стійкістю» до втрат, на відміну від випадкових потоків, які більшою мірою схильні до втрат [9, 16]. У такому трафіку переважають дані, що містять звіти наносенсорів, які передаються у вигляді пакетів. У пакетах службова інформація займає більшу частину обсягу пакета в порівнянні з інформацією про вимірювані параметри [8]. Також відмінною рисою наномереж є те, що вони включають до свого складу величезну кількість нановузлів (до декількох сотень), що передають свої повідомлення практично одночасно. Така кількість нановузлів пояснюється тим, що для забезпечення надійності та достовірності потрібна деяка надмірність.

Через передачу великої кількості пакетів від усіх сенсорів у каналі зв'язку створюється досить високий трафік, і при надмірній кількості нанопристроїв у мережі такий трафік стане подібним до трафіку при DDoS-атаці і може порушити працездатність мережі зв'язку загального користування. А враховуючи той фактор, що службова інформація у трафіку переважає над корисною, можна зробити висновок, що мережеві ресурси можуть використовуватися неефективно [2, 4, 8].

1.3.2 Mesh мережі

Як відомо, основним типом даних, що передаються в Інтернеті, є веб-сторінки, хоча останнім часом помітно зросли частки передачі медіа-інформації – потокові передачі аудіо та відео. За результатами загальної статистики 70-80% загального трафіку становить саме HTTP-трафік, отже, більшість користувачів хочуть підключатися не до певного пристрою, а

отримувати деякий фрагмент даних, вказаний на ім'я (зазвичай URL, Uniform Resource Locator). На цій ідеї і засновано концепцію мереж іменованих даних.

Ідея мереж іменованих даних (Named Data Networking, NDN) не нова і корінням сягає більш ранній проект мереж, орієнтованих на вміст переданих даних, (Content-Centric Networking, CCN), представлений громадськості в 2006 році американським дослідником Ваном Якобсоном - одним з розробників стека TCP/IP [6] NDN є повністю новою мережевою архітектурою, яка може бути використана як самостійно, так і поверх нинішніх функціонуючих IP-мереж.

В даний час глобальна мережа центрується навколо універсального мережевого рівня (IP), що реалізує мінімальну функціональність для організації та підтримки зв'язків мережі. Архітектуру сучасного Інтернету цілком можна зобразити у вигляді пісочного годинника, де на місці, так званого, «вузького шийки» знаходяться адреси мережевих вузлів – їх унікальні ідентифікатори в мережі. У мережах іменованих даних є фрагменти інформації, що передається, значущі самі по собі (рисунок 1.1).

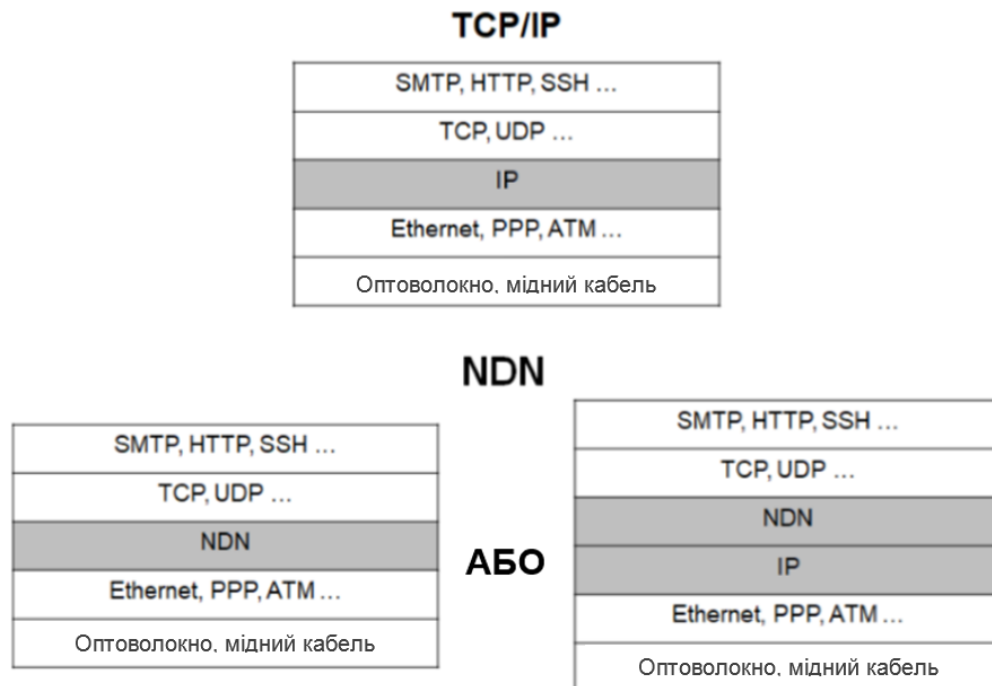


Рисунок 1.1 – Схема архітектури IP та NDN

Як відомо, для IP-архітектури необхідним фактором передачі даних є організація сеансу зв'язку між кінцевими вузлами, у той час як для архітектури NDN дані мають власне ім'я, не пов'язане з пристроєм, на якому знаходиться інформація. Ім'я такого інформаційного фрагмента (далі, NDN-пакет) може бути обрано випадково або бути ім'ям будь-якої характеристики, властивої інформації, що передається - джерела інформації, порції даних кінофільму або зображення, команди пристрою Інтернету речей тощо. Ця проста зміна дозволяє мережам іменованих даних використовувати майже всі перевірені функції Інтернету для вирішення набагато ширшого кола питань, у тому числі розподілу даних в ізольованих мережах, де користувач, який запитує інформацію, не знає, на якому вузлі вона знаходиться.

Обмін інформацією мережах іменованих даних управляється одержувачами даних з допомогою обміну пакетами двох типів: Interest і Data. Обидва NDN-пакети мають ім'я, що ідентифікує фрагмент даних, який має бути переданий в одному Data-пакеті. Пристрій, що відправляє запит, вносить ім'я бажаної порції даних в пакеті Interest і посилає його в мережу. Проміжні вузли використовують це ім'я для просування Interest пакета до джерела даних, записуючи з якого пристрою або на який інтерфейс прибув Interest. Коли цей пакет досягає вузла, що містить дані, що запитуються, той повертає Dataпакет, в якому знаходиться таке ж ім'я фрагмента даних, як і в Interest-пакеті, і, власне, сам фрагмент. Data-пакет просувається до одержувача назад за тими самими транзитними вузлами та їх інтерфейсами, за якими від одержувача був прийнятий пакет Interest. Отримуючи Interest-пакети з однаковим ім'ям, проміжний вузол відправляє далі до мережі лише один запит, це дозволяє уникнути надлишкового трафіку у мережі [9, 10].

Зупинимося трохи докладніше на механізмі маршрутизації NDN-пакетів. Щоб виконати просування NDN-пакетів кожен маршрутизатор управляється трьома структурами даних: таблиця очікуваних інтересів (Pending Interest Table, PIT), таблиця пересилання пакетів (Forwarding Information Base, FIB) та сховище даних (Content Store, CS).

Ключовим компонентом вузла мережі іменованих даних є сховище даних – внутрішня пам'ять, в якій зберігаються Data-пакети. Коли на пристрій надходить новий Interest-пакет, вузол в першу чергу порівнює ім'я даних з іменами збережених в CS Data-пакетів. Якщо на вузлі вже зберігається Data-пакет із запитуваним ім'ям, то цей Data-пакет відразу відправляється до одержувача; якщо ж ім'я відсутнє у пам'яті пристрою, то Interest прямує далі у мережу [5, 9]. Після отримання чергового Interest та відсутності даних з таким ім'ям у CS, маршрутизатор повинен просунути Interest далі за маршрутом, але перед цим йому необхідно записати Interest запит у РІТ – цей запис зберігатиметься там до задоволення запиту. У таблицю записується ім'я даних, що запитуються, і вхідний інтерфейс, через який пройшов пакет. Після запису Interest РІТ пакет пересилається далі через інтерфейс, зазначений у таблиці маршрутизації FIB, яка наповнюється будь-яким протоколом маршрутизації, заснованому на префіксі імені пакета. Якщо кілька портів маршрутизатора приходять кілька Interest-запросов з однаковими іменами, він коригує свою РІТ-таблицю щодо інтерфейсів, проте у бік мережі просуває лише один, перший, Interest пакет.

Як було сказано раніше, коли Interest-пакет досягає джерела інформації, джерело формує та передає Data-пакет, який повинен буде пройти через усі ті пристрої та інтерфейси, через які пройшов Interest та залишив запис у таблиці РІТ. Коли Data-пакет прибуває маршрутизатор, той знаходить запис у РІТ таблиці, направляє пакет на «зацікавлені» інформації інтерфейси, записує їх у свій CS і видаляє запис з РІТ. Цей процес протікає до тих пір, поки пристрій, який надіслав запит, не отримає Data-пакет (рисунок 1.2).

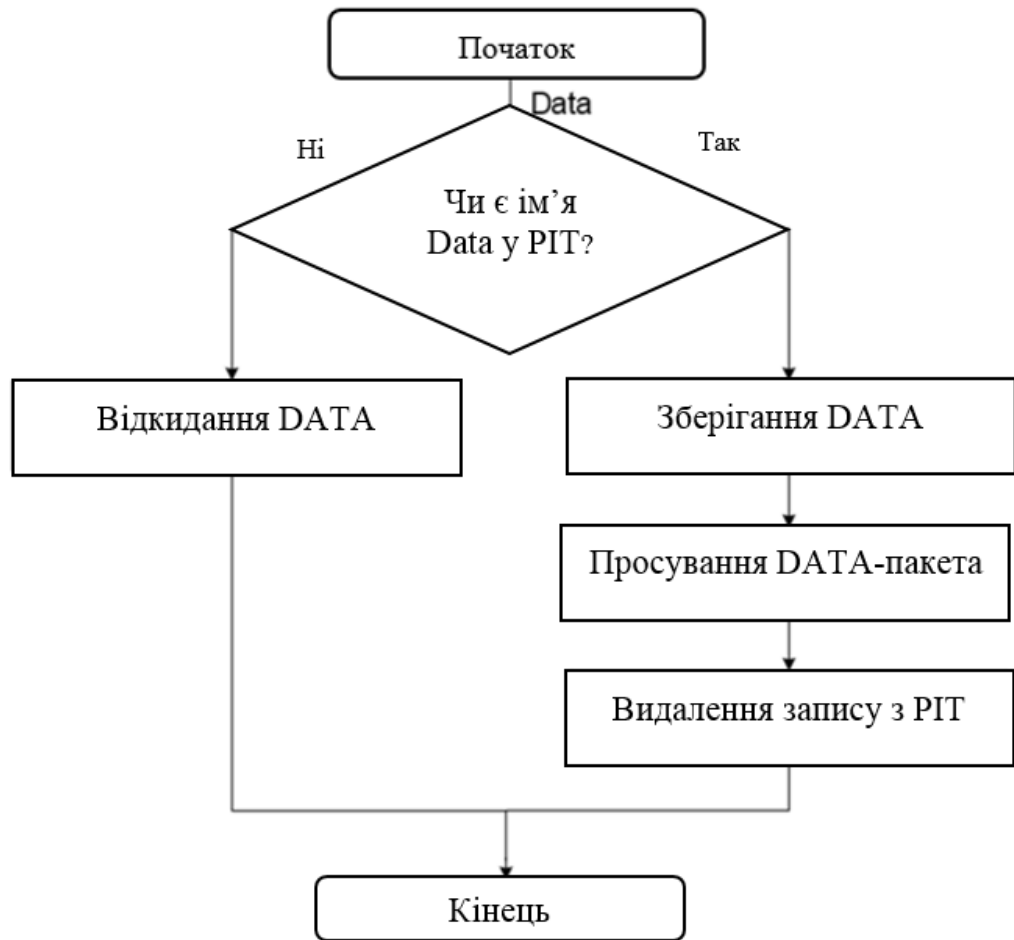


Рисунок 1.2 – Алгоритм обробки Data-пакету маршрутизаторами у MESH мережах

Мережі іменованих даних можуть використовувати традиційні алгоритми маршрутизації, такі як алгоритми вектора відстані та стану каналу, проте замість IP-префіксів маршрутизатор повідомляє префікси імен, які маршрутизатор здатний обслужити. Протокол маршрутизації розповсюджує ці сповіщення у мережі, оновлюючи таблиці FIB пристроїв. Такі протоколи, як OSPF або BGP, також можуть бути адаптовані під роботу в мережах NDN. [6, 9].

Маршрутизатори здатні розпізнавати межі між різними рівнями префіксів у імені, але не приписують значень цим іменам. Це рішення дозволило будь-якому додатку вибирати схему найменування, яка найбільше йому підходить. Мережі іменованих даних припускають ієрархічну структуру імен, в текстовому поданні, подібно до URL, наприклад: третій

фрагмент зображення, створеного компанією «SL» може мати вигляд «/SL/images/demo.psd/3», при цьому «/» є роздільником імені на префікси різних рівнів [10].

Той факт, що NDN-повідомлення у своїх заголовках несуть інформацію тільки про фрагменти даних, а не про адреси вузлів зв'язку, робить можливим отримання інформації, що запитується в умовах, коли ні пристрої, ні користувачі не мають відомостей про адресу мережного елемента для ініціації запиту.

2 ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ОСНОВНІ ТОПОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ MESH МЕРЕЖ

2.1 Технології MESH мереж

Незважаючи на залежність суспільства від безперервної роботи мереж зв'язку, мають місце ситуації, коли застосування традиційних рішень не є можливим або просто нерентабельним, наприклад, у регіонах з нерозвиненою чи зруйнованою телекомунікаційною інфраструктурою.

Одним із актуальних рішень проблеми надання послуг зв'язку в подібних ситуаціях є використання бездротових мереж (WMN). Бездротові ніздрюваті мережі утворюються безліччю з'єднань «точка-точка» між мережевими вузлами з радіоінтерфейсами, що знаходяться в зоні обслуговування один одного.

Головною особливістю WMN є самоорганізація – з'єднання між вузлами встановлюються автоматично, і навіть будь-який із цих вузлів здатний виконувати роль маршрутизатора інших, здійснюючи транзитну передачу даних. Оскільки бездротові мережі не потребують побудови ліній зв'язку, а при додаванні нових мережеских елементів, з'єднання до них організуються автоматично, WMN вважаються легко масштабованими. Надійність у WMN забезпечується надмірністю кількості вузлів, що надає можливість складання альтернативних маршрутів, в обхід вузлам, що відмовили, не перериваючи роботу мережі. Крім того, використання альтернативних маршрутів також здатне підвищити пропускну здатність мережі за рахунок передачі даних через менш завантажені мережескі елементи. Зниження енергоспоживання досягається за допомогою зниження потужності передачі радіосигналу через більше мережеских вузлів, що знаходяться на невеликій дистанції один від одного. WMN здатні виникати стихійно тоді, коли необхідно здійснювати взаємодію між абонентами або їх

пристроями, та зникати, коли ця потреба відпадає. Також варто зазначити, що такі мережі можуть бути збудовані на основі лише абонентського бездротового обладнання [3, 5].

Така топологія буде особливо дієва в населених пунктах з користувачами, які вже мають засоби зв'язку, але з якоїсь причини втратили доступ до мережі Інтернет, оскільки дані пристрої можуть використовуватися як транзитні вузли для передачі даних, тим самим збільшуючи ймовірність зв'язності джерела та одержувача інформації та підвищуючи доступність послуг. Бездротові ніздрюваті мережі завдяки особливостям своєї топології є перспективним способом забезпечення зв'язку в місцях, де може бути утруднена організація інфраструктури мереж дротового або стільникового зв'язку. Бездротові мережі дозволяють організувати покриття в певній локальній області. Однак використання WMN у вищеописаних ситуаціях також викликає низку складнощів, що потребують вирішення.

Першою проблемою WMN є те, що з великою ймовірністю багато з мережевих елементів періодично будуть перебувати в русі, що спричинить зміну топології – пристрої входитимуть і виходитимуть із зони обслуговування один одного. Робота мережі за таких умов веде у себе часті розриви каналів зв'язку та коригування таблиць маршрутизації кожному мережному вузлі. Крім того, важливим параметром стає щільність мережі - кількість мережевих елементів на одиницю площі, оскільки при низькій щільності мережа може виявитися недостатньо зв'язковою, що призведе до появи довгих маршрутів або навіть до тимчасової відсутності маршруту між джерелом та відправником інформації.

З іншого боку, занадто висока щільність мережі в даному випадку також небажана – більша кількість рухомих елементів у топології передбачає освіту більшої кількості записів у таблицях маршрутизації, а також більшу інтенсивність внесення в них коригування. При цьому з кожною зміною таблиці елементам необхідно проводити обмін маршрутною інформацією, що створює безліч ширококомовних службових пакетів, тим самим займаючи

частину смуги пропускання, яка могла б бути використана для передачі корисної інформації. Також слід зазначити, що велика щільність мережних вузлів, що використовують бездротові технології зв'язку, має на увазі і велика кількість входжень пристроїв у зони обслуговування один одного, що збільшує ймовірність роботи вузлів на частотах одного або суміжних радіоканалів, при цьому пристрої створюють перешкоди один для одного, що є причиною збільшення затримки та зниження швидкості передачі даних. Загальновідомий той факт, що пристрої з модулем Wi-Fi, що працюють в діапазоні 2,4 ГГц, використовуються в багатоквартирних будинках, і внаслідок близького розташування та перетину зон обслуговування даної множини бездротових локальних мереж якість передачі даних в них може бути нижче очікуваного.

Також досить важливим є питання щодо відсутності доступу до системи доменних імен (DNS). У подібних ситуаціях через неможливість виконати DNS-запит пошук та надання інформації всередині мережі може бути скрутним з тієї причини, що користувачі, а також їх абонентські пристрої можуть не знати, який саме мережевий елемент здатний надати потрібні їм дані, щоб надіслати запит .

Для вирішення більшості вищеописаних питань замість традиційної мережевої архітектури у цій роботі пропонується використовувати мережеві технології іменованих даних [7].

2.2 Однорангова та багаторангова топології MESH мереж

Побудова мережі зв'язку, елементами якої є безліч рухливих вузлів, є досить складною задачею. Складність її вирішення залежить від низки умов, серед яких можна перерахувати: кількість об'єктів у мережі, швидкість та напрямок їх руху, а також специфіка використовуваних технологій зв'язку. Через те, що всі перераховані вище параметри можуть бути надзвичайно різноманітні, загальні рішення даної задачі, ймовірно, не мають практичного

сенсу. Отже, вирішення цього завдання необхідно шукати кожної окремо взятої ситуації.

У кваліфікаційній роботі розглядається один із можливих випадків побудови мережі зв'язку, вузлами якої є рухомі пристрої. Посилаючись на мету роботи, уявимо ситуацію: у населеному пункті, що постраждав від стихійного лиха, порушено організацію зв'язку. Для якнайшвидшого відновлення функціонування міських служб, а також з метою координування рятувальних операцій було вирішено розгорнути бездротову мережу, включно з ділянками літаючих мереж (використовуються безпілотні літаючі пристрої як мережеві вузли), а зона обслуговування технології бездротового зв'язку набагато менша за область, якої розгорнуто мережу. З цієї причини з великою ймовірністю передачі інформації між кінцевими вузлами необхідно задіяти інші пристрої, що територіально знаходяться між ними – транзитні вузли. При цьому дана мережа також може використовувати як транзитні мережеві елементи пристрою місцевого населення, що збільшує щільність мережі. Крім того, через ізолюваність мережі від системи DNS та відсутність можливості отримання інформації про IP-адресу джерел інформації було запропоновано використовувати архітектуру мереж іменованих даних для маршрутизації трафіку [7].

Очевидно, що за наявності різних варіантів здійснення транзитної передачі даних необхідно вибрати елемент, який буде здійснювати цю функцію. Таким чином, постає питання визначення критерію та методу вибору такого вузла – питання побудови маршруту передачі даних.

У цьому дослідженні до розгляду пропонується два сценарії взаємодії вузлів мережі, здатних забезпечити маршрутизацію трафіку: однорангова (ad-hoc) і багаторангова топології. Під одноранговою топологією мається на увазі така топологія, в якій всі пристрої мережі здатні виконувати однакові функції і в залежності від ситуації можуть виступати в будь-якій з ролей – кінцевим клієнтом або транзитним вузлом. Багаторангова топологія передбачає наявність у мережі кількох додаткових елементів, що беруть він особливу

роль функціонування мережі, наприклад, здійснення маршрутизації трафіку. При цьому кожна з перерахованих топологій має свої переваги за тих чи інших умов.

Для побудови пористих мереж іменованих даних з багаторанговою топологією в цій роботі пропонується використовувати мережеві елементи, які називають агрегаторами інформації (AI). Під агрегаторами інформації маються на увазі пристрої, що виконують у мережі такі функції: відстеження розташування терміналів (далі, в контексті багаторангової топології під «терміналами» розуміються мережеві елементи, що не є AI); поповнення та зберігання реєстру імен даних, які готова надати мережу; пошук запитуваної інформації в мережі та побудова маршруту передачі даних від джерела інформації до приймача. Дані мережеві елементи не є пристроями користувачів і розташовуються не випадково, вони розміщуються в заздалегідь розрахованих місцях – у центрі кластерів, на які ділиться вся мережа. [15] Оскільки AI є нерухомими або малорухливими елементами, що не потребують високих показників маневреності, можливе використання аеростатів, що витрачають найменшу кількість електроенергії на підтримку висоти та пересування.

Агрегатори інформації є свого роду шлюзами, оскільки повинні мати два інтерфейси бездротового зв'язку – «короткий» і «довгий». «Коротким» інтерфейсом в даному випадку називається інтерфейс для організації зв'язку з терміналами, стандартом бездротового зв'язку такого інтерфейсу може виступати IEEE 802.11n, що використовується практично в кожному сучасному пристрої, однак має відносно невеликий радіус зони обслуговування. «Довгим» інтерфейсом можна назвати інтерфейс, що використовує технологію, що дозволяє передавати дані на більш далекі відстані, навіть якщо при цьому швидкість передачі буде меншою, ніж швидкість «короткого» інтерфейсу. "Довгий" інтерфейс застосовується для забезпечення зв'язку між агрегаторами інформації (в основному, для передачі службової інформації), які можуть перебувати на відстані, що в кілька разів

перевищує радіус зони обслуговування "короткого" інтерфейсу. Прикладом технології, яка використовується в «довгому» інтерфейсі, може бути IEEE 802.11ah (також звана Wi-Fi HaLow) або LoRaWAN, що дозволяють здійснювати передачу даних на відстані до 10 кілометрів. Передбачається, що один агрегатор інформації буде обслуговувати кілька терміналів, при цьому необов'язково, щоб термінали входили в зону обслуговування «короткого» інтерфейсу AI, оскільки інформація може бути передана за допомогою транзитної передачі.

Важливим питанням організації багаторангової структури бездротової комірчастої мережі, що впливає на зв'язність, є вибір кількості та місць розміщення агрегаторів інформації. Іншими словами, необхідно вирішити задачу кластеризації мережі. [14, 15] Для вирішення даної задачі можуть бути використані різні методи, засновані на вирішенні геометричної задачі вибору точки на площині або в об'ємі, в якій забезпечується найкраща (за вибраними критеріями) зв'язок між усіма вузлами пористої мережі.

Слід зазначити, що цей спосіб побудови мережі може застосовуватися в мережах з великою кількістю елементів, оскільки в ній передбачено механізм обмеження поширення широкомовних пакетів. Далі буде розглянуто механізм взаємодії вузлів бездротової комірчастої мережі з агрегаторами інформації.

2.3 Кластеризація MESH мереж із багаторанговою топологією

Вибір кількості та місць розміщення агрегаторів інформації є досить важливим питанням, від вирішення якого залежить зв'язність бездротової мережі мережі іменованих даних, а значить і ймовірність якісного надання телекомунікаційних послуг.

Для вирішення цієї задачі можуть бути використані різні методи, проте всі вони вимагають визначення безлічі мережевих елементів, що розбиваються на кластери $NE = \{NE_1, NE_2, \dots, NE_n\}$, і цілі кластерного

аналізу, відповідно до якої буде обрано алгоритм кластеризації. У цій роботі метою кластерного аналізу є визначення кількості кластерів та їх центрів при заданій щільності вузлів та радіусі зони обслуговування кластера. Залежно від розміру зони обслуговування агрегатора інформації можна визначити приблизну ймовірність зв'язності між ним і найдальшим елементом кластера, оскільки вона безпосередньо залежить від кількості транзитних вузлів.

У цьому дослідженні на вирішення завдання кластеризації було прийнято рішення використовувати алгоритм кластеризації FOREL (FORmal ELement). Цей алгоритм вирішує завдання шляхом мінімізації відхилення позицій терміналів від центрів кластерів. Цільова функція для алгоритму FOREL може бути сформульована як:

$$M = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2 \quad (2.1)$$

де k – кількість груп; x_j – координати j -го вузла кластера; μ_i – координати центру i кластера; $(x_j - \mu_i)$ – відстань між вузлом мережі та центром кластера; S_i – множина елементів i кластера.

Відмінною рисою FOREL, яка дозволяє використовувати його для вирішення поставленого завдання, є те, що як вхідні дані задається r – радіус кластера, а вузли розглядаються як точка на площині (x_j, y_j) або просторі (x_j, y_j, z_j) і описуються координатами.

Координати центру i -го кластера визначаються виразами:

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, \quad y_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j, \quad z_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_j \quad (2.2)$$

При цьому, крім координат, кожен термінал мережі може охарактеризуватись деяким параметром m_j , масою. У такому разі центр кластера визначатиметься як центр «мас» (2.3).

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{m_i^{\Sigma}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j x_j, \quad y_i^{(\mu)} = \frac{1}{m_i^{\Sigma}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j y_j, \quad z_i^{(\mu)} = \frac{1}{m_i^{\Sigma}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j z_j, \quad (2.3)$$

Алгоритм FOREL передбачає послідовне виконання наступних кроків.

Крок перший. Визначення меж аналізованої області та координат

терміналів, а також максимального розміру кластера, r ;

Крок другий. Вибір випадкової позиції m_i у заданій області – дана позиція розглядається першому етапі як центр кластера;

Крок третій. Усі термінали, відстань до яких від обраного центру кластера менше r , приписуються до цього кластера;

Крок четвертий. Для одержаної групи терміналів обчислюється новий центр мас.

Якщо обчислена позиція збігається з точкою m_i , вважається, що кластер i знайдено і всі термінали, закріплені за даним агрегатором інформації, маркуються його номером та виключаються з подальшого ходу рішення.

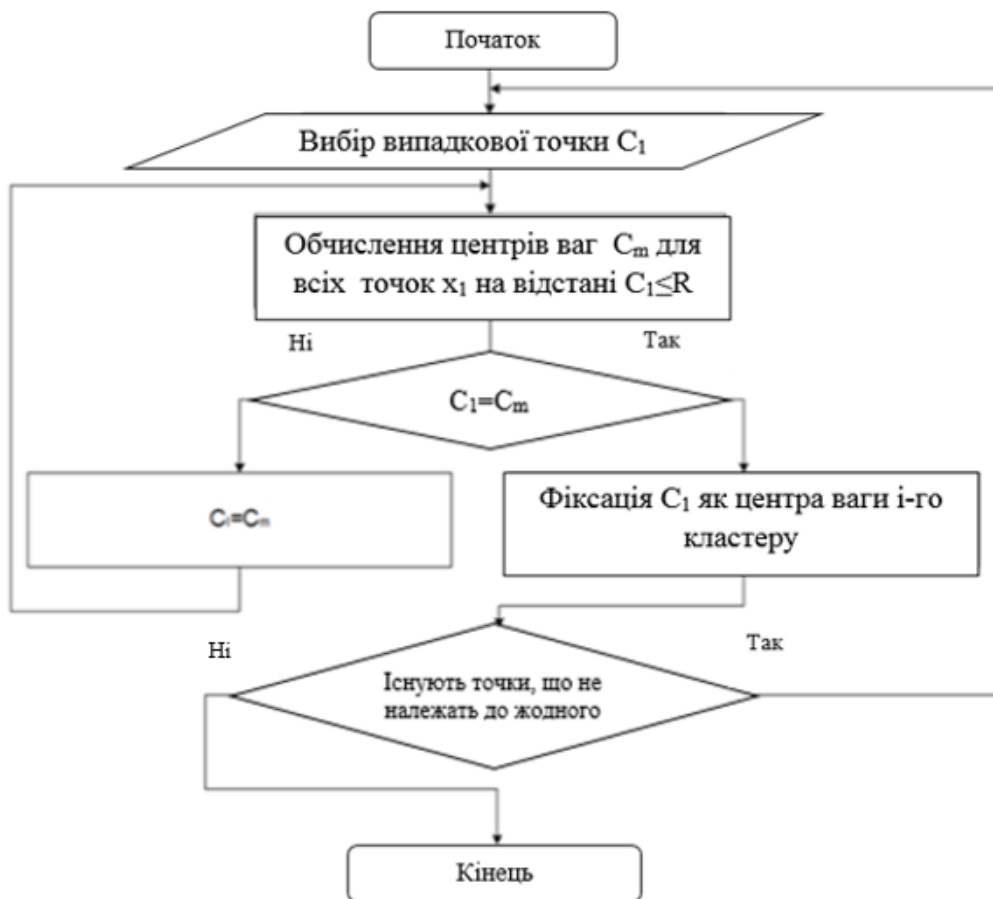


Рисунок 2.1 – Метод FOREL

Якщо отримані координати відрізняються від точки, m_i прирівнюється

до значення знайденої точки і відбувається повторне виконання пункту 3.

Крок п'ятий. Відбувається перевірка, чи є вузли, які не належать жодному кластеру. Якщо ні, то алгоритм закінчує свою роботу. Якщо «вільні» термінали залишилися, відбувається перехід до пункту 2, і алгоритм виконує пошук наступного центру кластера (рисунок 2.1).

2.4 Моделювання кластеризації Mesh мереж із багаторанговою топологією

Далі як приклад роботи алгоритму FOREL буде наведена модель, розроблена за допомогою мови програмування Python. Модель імітує пористу бездротову мережу, що складається з 400 вузлів, випадково розташованих на території 1000x1000 м, або інакше мережа з щільністю 400 вузлів/км². Передбачуваний радіус кластера визначається величиною кратної радіусу зони обслуговування технології бездротового зв'язку. Наприклад, $R = 60$ м і $r = 300$ м, це передбачає, що мінімальна кількість проміжних терміналів між A_1 і найвіддаленішим вузлом дорівнюватиме п'яти. Результатом виконання симуляції є виділення кількох кластерів (рисунок 2.2).

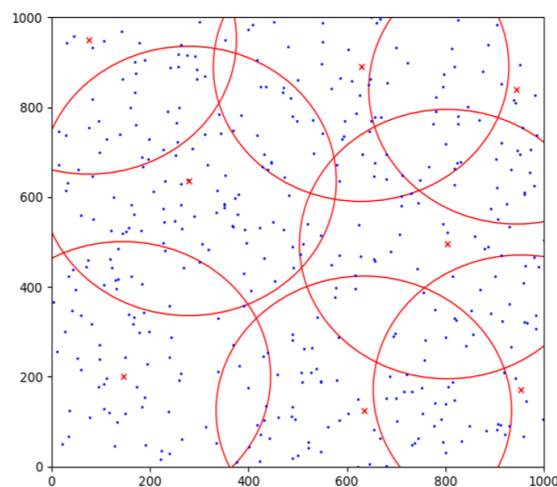


Рисунок 2.2 – Приклад розв'язання задач кластеризації (сформовано 8 кластерів)

Сума елементів всіх кластерів перевищує 400 (рисунок 2.3), цей факт пояснюється тим, що один елемент може належати відразу кільком кластерам. Факт приналежності низки елементів декільком кластерам свідчить про існування зв'язності між терміналами різних агрегаторів інформації.

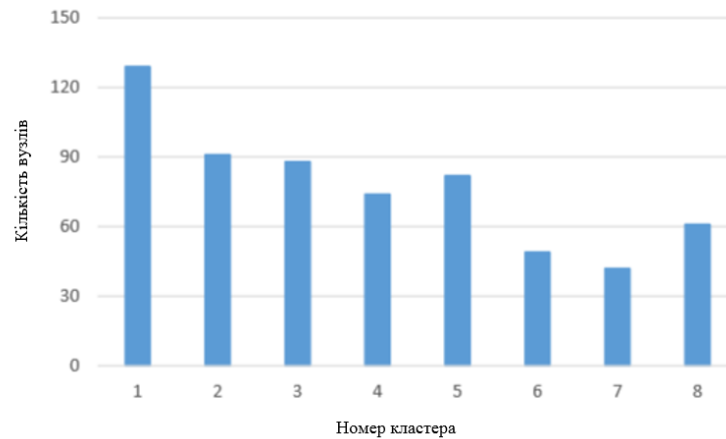


Рисунок 2.3 – Щільність вузлів у кожному кластері

Необхідно відзначити, що в умовах реальної бездротової мережі найкоротший маршрут може виявитися не оптимальним через те, що швидкість пересування вузлів, навантаження і поширення сигналів різні, а тому слід розглядати одночасно кілька маршрутів.

Таким чином, вирішивши задачу кластеризації, а також дізнавшись кількість елементів у кожному, можна визначити ймовірність зв'язності для багаторангової мережі:

$$P_c = P_{t(1),r(1)} \prod^H P_{t(h),t(h-1)} P_{r(h),r(h-1)} \quad (2.4)$$

де $P_{t(1),r(1)}$ – ймовірність існування маршруту між пристроями 1-го рангу (джерелом та приймачем); $P_{t(h),t(h-1)}$, $P_{r(h),r(h-1)}$ – ймовірності існування маршрутів між пристроями рангу h і $h-1$ в кластерах h -го рангу передавальної та приймаючої сторін відповідно.

Відповідно до (2.4), слід уточнити формулу ймовірності зв'язності для

дворангових мереж (2.3), якою і є запропонована топологія, що включає агрегатори інформації:

$$P_c = P_m P_{ta} P_{ra} = (1 - e^{-\pi \rho_t l^2})^n (1 - e^{-\pi \rho_r l^2})^{n_{ra}} \quad (2.5)$$

$$P_c = (1 - e^{-\pi N_t l^2 / S_a}) (1 - e^{-\pi N_r l^2 / S_a})^{n_{ra}} (1 - e^{-\pi N_r l^2 / S_a})^{n_{ra}} \quad (2.6)$$

де S_a – площа зони обслуговування АІ; ρ_t і ρ_r – мережні щільності кластерів джерела та одержувача даних відповідно; N_t та N_r – кількість вузлів у зоні обслуговування АІ джерела та одержувача, відповідно; n_{ta} і n_{ra} – кількість транзитних вузлів у маршрутах від джерела та одержувача даних відповідно до їх агрегаторів інформації.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ MESH МЕРЕЖІ

Архітектура мереж іменованих даних виглядає логічним кроком еволюції мереж зв'язку, що вирішує деякі актуальні проблеми поширення інформації та масштабованості мережі. Однак, якщо у випадку однієї локальної мережі можливий варіант швидкого переходу від однієї мережевої архітектури до іншої шляхом заміни обладнання мережевих вузлів, то у випадку мереж постачальника послуг зв'язку або всесвітньої мережі Інтернет, процес може розтягнутися на кілька років або навіть десятиліть. Даний факт пов'язаний з тим, що модернізації повинні бути піддані не тільки пристрої «останньої милі», але й самі пристрої користувача, оскільки якщо одна частина пристроїв буде працювати за протоколом IP, а інша по NDN, вони не будуть здатні взаємодіяти між собою. Вже зараз можна з упевненістю сказати, що заміна обладнання кожного мережевого вузла може бути утруднена або відкладена з різних причин: абоненту фінансово не вигідно змінювати обладнання, доступ до обладнання утруднений через географічні особливості місцевості або обмежений пропускну режимом об'єкта, на якому воно знаходиться і тощо. Крім того, не виключено, що модернізація всіх сегментів всесвітньої мережі не буде затребувана, наприклад: абоненти, які використовують P2P-з'єднання, або транспортна мережа, що передає дані, не звертаючи уваги на їхню предметність і належність, на перший погляд, не вимагають переходу до NDN. Однак, для мереж доступу, на ділянках мережі між пристроями користувачів і транспортною мережею, NDN-архітектура дуже доречна, що і буде показано в цьому розділі. Саме тому у так званий проміжний відрізок часу або, як було сказано, навіть на постійній основі, мережі працюватимуть відповідно до двох мережевих архітектур, отже, необхідна організація деяких шлюзових елементів – елементів, які б дозволили взаємодіяти мережам IP та NDN.

3.1 Опис моделі Mesh мережі

Для того, щоб більш наочно показати перевагу Mesh мереж над класичною мережевою архітектурою, були розроблені моделі сегмента бездротової комірчастої мережі в дискретно-подійних мережних симуляторах NS-3 [6] та ndnSIM [3] для архітектур IP та NDN, відповідно.

Модель m відображає сценарій справжньої роботи: у населеному пункті, що постраждав від стихійного лиха, у зв'язку з необхідністю координування рятувальних операцій та відновлення функціонування міських служб була організована бездротова мережа, вузлами якої є спеціально встановлені точки доступу та особисті пристрої користувачів, що знаходяться в даному районі.

Параметризуємо цю ситуацію для імітаційної моделі: мережа організована на території 500x500 метрів, користувачі використовують пристрої для бездротового зв'язку стандарту IEEE 802.11n (5 ГГц), а також безперервно рухаються відповідно до моделі RDM (зі швидкістю 4 м/с та 1 раз на секунду випадково змінюють напрямок свого руху). Уявімо, що у вищеописаній ситуації при організованій бездротовій мережі мережі одному з користувачів необхідно отримувати певну інформацію, що генерується джерелом зі швидкістю 512 кбіт/с і відправляється в мережу кадрами розміром 1024 байт, при цьому джерело та одержувач інформації знаходяться за межами зон обслуговування один одного

3.2 Симуляція роботи Mesh мережі

Як вже було сказано, через ізолюваність мережі від системи DNS і відсутність можливості отримання IP-адреси джерел інформації, вузол якому необхідно отримати інформацію не зможе відправити запит до мережі. Однак, для проведення експерименту уявімо, що одержувач має інформацію про IP-адресу джерела. Крім цього, для організації передачі даних у мережах з архітектурою IP одержувачу, джерелу та транзитним вузлам, що беруть участь у процесі передачі даних, потрібно знати про сусідні вузли, щоб

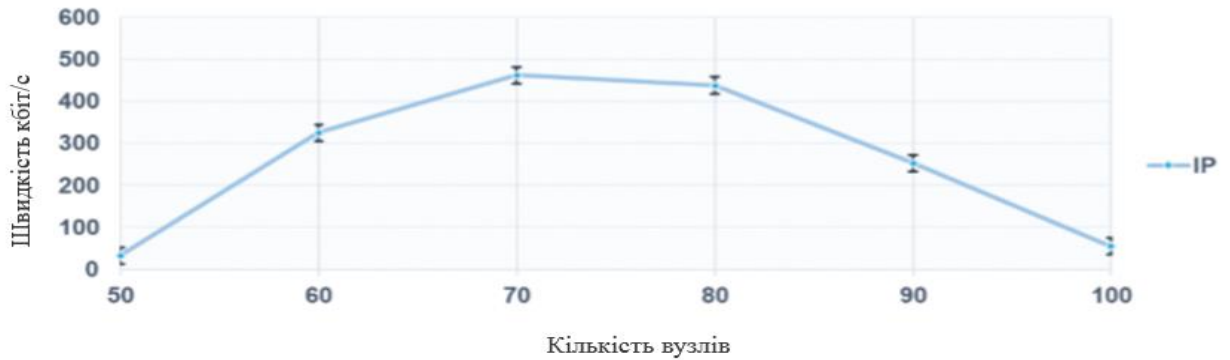
побудувати маршрут. Як уже було сказано, у поданій ситуації з часом топологія мережі швидко змінюватиметься, тому для збереження якості зв'язку необхідний гнучкий протокол маршрутизації, здатний в найкоротші терміни визначати сусідів і будувати шлях, яким повинні передаватися пакети. Нині одним із таких протоколів є AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) – реактивний протокол динамічної маршрутизації, спеціально створений для мобільних ad-hoc мереж. [8] Саме тому AODV був обраний як протокол маршрутизації для симуляції роботи бездротової комірчастої мережі, заснованої на IP.

Для відстеження залежностей якості зв'язку від різних умов було проведено низку симуляцій зі зміною таких характеристик моделі: кількість вузлів мережі (щільність мережі), N – від 50 до 100 вузлів; швидкість пересування вузлів, v – від 0 до 6 м/с; кількість вузлів-одержувачів інформації, N_{rx} - від 1 до 4 вузлів; кількість вузлів-джерел інформації, N_{tr} - від 1 до 4 вузлів. При зміні однієї з параметрів інші параметри не змінювалися.

Як було зазначено, критеріями якості зв'язку було обрано основні мережеві параметри: швидкість передачі – середня швидкість прийому даних, зафіксована на приймачі; середня затримка передачі пакета – тимчасовий інтервал між передачею джерелом першого біта пакета і прийомом останнього біта пакета одержувачем, в даному випадку, розраховувався як середнє для всіх прийнятих пакетів за весь час симуляції; втрати – відношення кількості прийнятих пакетів до кількості надісланих. У цьому загальний час симуляції становило 10 хвилин.

Як результат симуляції в NS-3 були отримані наступні графіки, що наочно відображають поведінку мережі. Якість зв'язку в бездротових пористих IP-мережах має сильну залежність від щільності мережі. При 50 мережевих елементах (рисунок 3.1) затримка і втрати найбільш високі, це пояснюється тим, що вузли розосереджені по всій території і можуть бути сильно віддалені один від одного - при такій щільності мережі мають

найменшу кількість сусідів, а тому маршрут між джерелом і одержувачем інформації може включати більше проміжних вузлів, оскільки є ймовірність, що через неповне покриття зони мережі оптимальний маршрут лежатиме «в обхід» географічно найкоротшого шляху між джерелом і одержувачем даних.



а)



б)



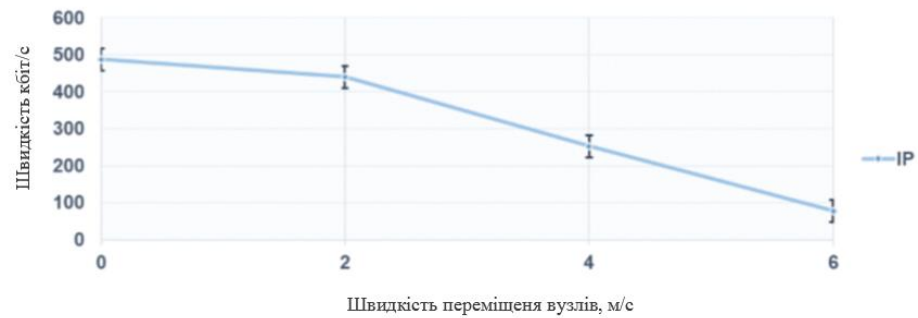
в)

Рисунок 3.1 – Залежність параметрів мережі IP від кількості вузлів

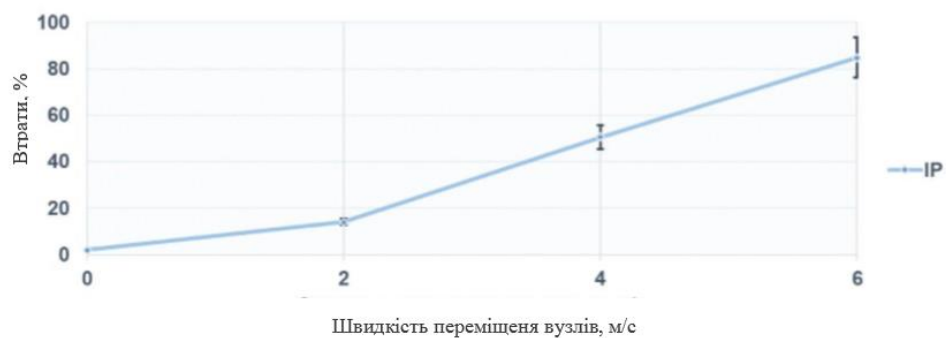
($v = 4$ м/с; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол): а) швидкість передачі;

б) затримка; в) втрати

Зі зростанням числа вузлів спостерігається покращення якості роботи мережі за рахунок збільшення кількості зв'язків із сусідніми терміналами, що дозволяє вибирати найбільш короткий шлях для передачі пакетів (рисунок 3.2).



а)



б)

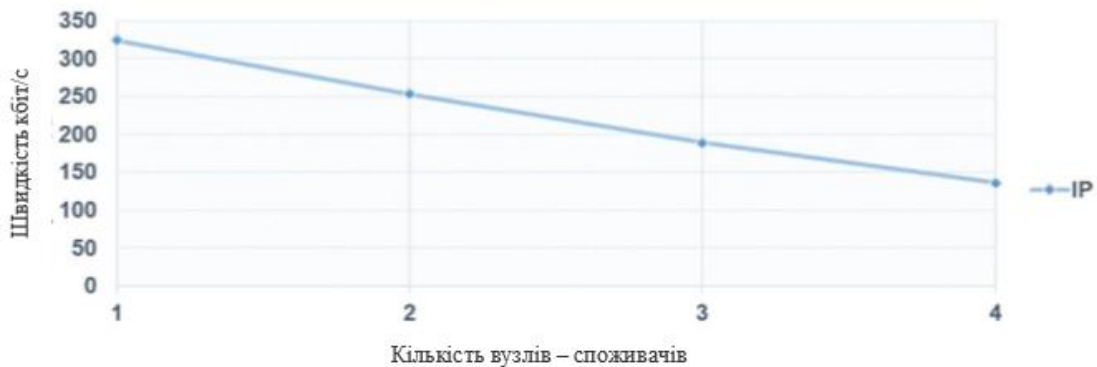
Рисунок 3.2 – Залежність параметрів мережі IP від швидкості пересування вузлів ($N = 90$ вузлів; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол):

а) швидкість передачі; б) втрати

Однак з перевищенням певного значення щільності мережі якість зв'язку починає знижуватися через те, що таблиці маршрутизації мережевих елементів включають дані про велику кількість сусідів, а оскільки всі вузли знаходяться в русі і періодично входять в зони обслуговування один одного і виходять з них, це викликає постійні додавання та видалення рядків у таблицях маршрутизації та перебудову маршрутів, що займає ресурси обчислювального пристрою терміналу та збільшує час знаходження оптимального маршруту. До того ж велика кількість вузлів, що знаходяться

поруч, може створювати перекриття радіочастотних каналів і формувати перешкоди, що також знижує якість передачі даних.

Наступні результати (рисунок 3.3), обумовлені тими самими причинами, як і ділянки падіння якості зв'язку— зростання швидкості пересування вузлів веде до дедалі більш частішої зміни таблиць маршрутизації, що, як було сказано, веде до погіршення всіх мережевих характеристик.



а)



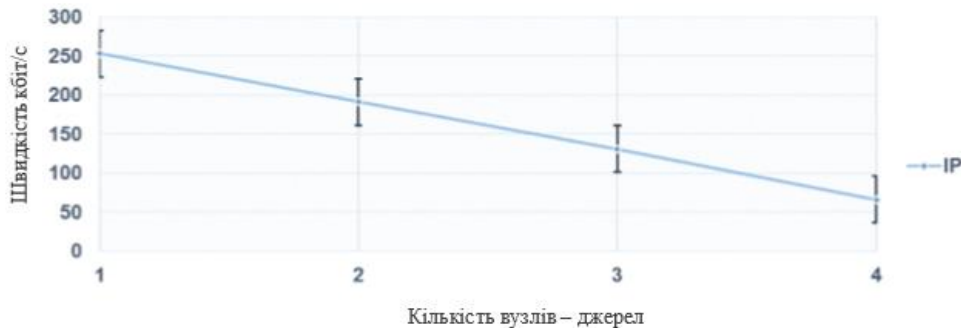
б)

Рисунок 3.3 – Залежність параметрів мережі IP від кількості вузлів-споживачів ($N = 90$ вузлів; $v = 4$ м/с; $N_{tr} = 1$ вузол):

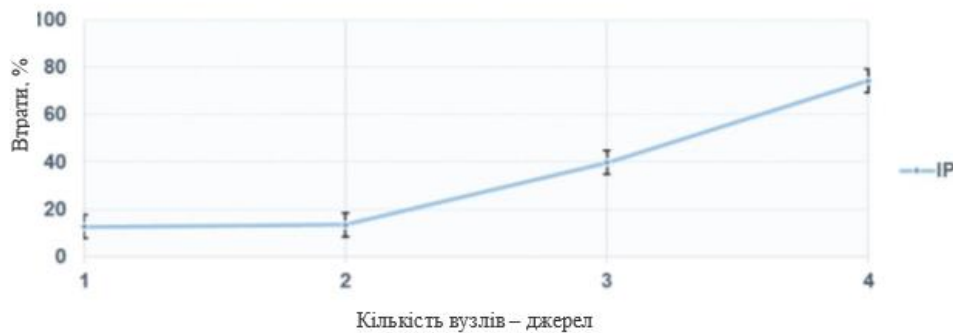
а) швидкість передачі; б) втрати

Через те, що розрахунок затримки залежить від загальної кількості прийнятих пакетів, а зі збільшенням швидкості пересування вузлів одержувача досягає надмірно мала їх кількість, і тільки в тому випадку, коли джерело та одержувач виявляються найближчими один до одного, можна вважати, що графік затримки не відображає дійсних залежностей та

неінформативний, саме тому даний графік у цій роботі не відображено. Також через велике значення втрат не відображено графіки залежностей затримки від наступних змінних.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Залежність параметрів мережі IP від кількості вузлів-джерел ($N = 90$ вузлів; $v = 4$ м/с; $N_{tr} = 1$ вузол):

а) швидкість передачі даних; б) втрати

Як було сказано, сучасні мережі передачі даних успадкували від традиційних телефонних мереж двоточкову організацію сеансу зв'язку, інакше кажучи, для того, щоб розпочати передачу даних джерелу та приймачеві необхідно «договоритися» про те, що обмін інформацією відбудеться. Зі збільшенням кількості одержувачів інформації (рисунок 3.4) джерелу необхідно підтримувати дедалі більше сеансів зв'язку, а умовах їх періодичних розривів і відновлення цей факт впливає як на продуктивність самих пристроїв, а й збільшує кількість сигнального трафіку, що передається мережею. При збільшенні кількості джерел інформації (рисунок 3.4) виникає

та сама проблема – одержувачу необхідно підтримувати кілька сеансів зв'язку, проте до цього ще додається той факт, що маршрути передачі даних від декількох джерел до одного можуть мати спільні транзитні вузли, що може формувати вузький ділянку мережі та створювати на проміжному вузлі ситуації, коли трафік перевищує смугу пропускання.

Відповідно до отриманих результатів можна зробити висновок, що якість зв'язку в бездротовій мережі безпосередньо залежить від кількості пристроїв, підключених до мережі, їх швидкості пересування, а також від кількості кінцевих вузлів, що одночасно беруть участь у процесі обміну даними. Передбачається, що особливості мереж іменованих даних дозволять знизити вплив вищезгаданих факторів на показники працездатності мережі [7].

3.3 Симуляція роботи бездротової пористої NDN-мережі

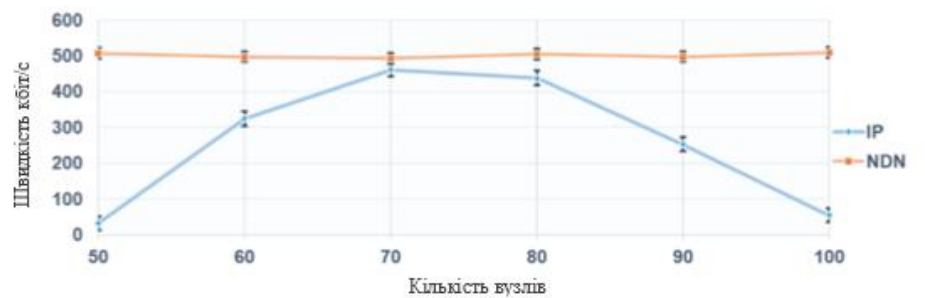
В оригінальному NS-3 відсутня можливість моделювання мереж іменованих даних, саме тому для вирішення цього завдання було використано симулятор ndnSIM [3] – одну з модифікацій NS-3, створену розробниками проекту Named Data Networking. Оскільки ndnSIM практично є NS-3, внівши деякі зміни, стала можливою конвертація моделі, розробленої для IP, в модель мережі з архітектурою NDN. Необхідно перерахувати деякі параметри, застосовані до нової моделі.

Оскільки аналізований сегмент мережі, розгорнутий на відносно невеликій площі, мережа іменованих даних представлена одноранговою топологією, отже, всі пакети, що пересилаються, є ширококомовними; - як було сказано в попередньому розділі, інтенсивність запитів тих чи інших імен даних залежить від їх популярності в мережі, отже, вузлиодержувачі відправляють Interest-запити за іменами даних відповідно до частотного розподілу Ципфа, що забезпечує можливість повторного запиту імені у мережі.

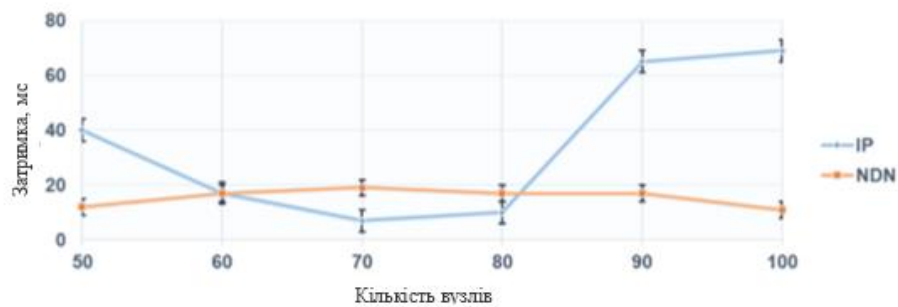
Content Store транзитних вузлів здатний зберігати не більше двадцяти

Dataпакетів. Для чистоти експерименту вузол-одержувач не має можливості кешувати пакети зовсім, оскільки можлива ситуація, коли наступний запит збігається з одним із попередніх десяти, у такому разі термінал знаходить ім'я у своєму сховищі даних і не надсилає запит до мережі.

Результатом експерименту стали наступні графіки, суміщені з результатами симуляцій IP-мережі, що дозволяє візуально порівняти параметри працездатності мереж, що базуються на різних архітектурах (рисунок 3.5).



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Залежність параметрів мережі NDN від кількості вузлів ($v = 4$ м/с; $N_{ГХ} = 1$ вузол; $N_{ГТ} = 1$ вузол): а) швидкість передачі; б) затримка; в) втрати



а)



б)

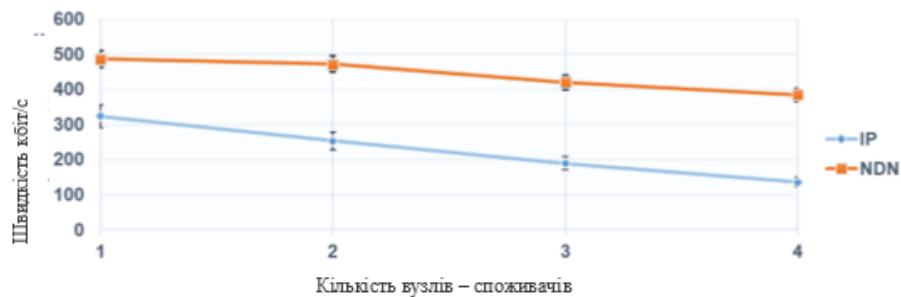


в)

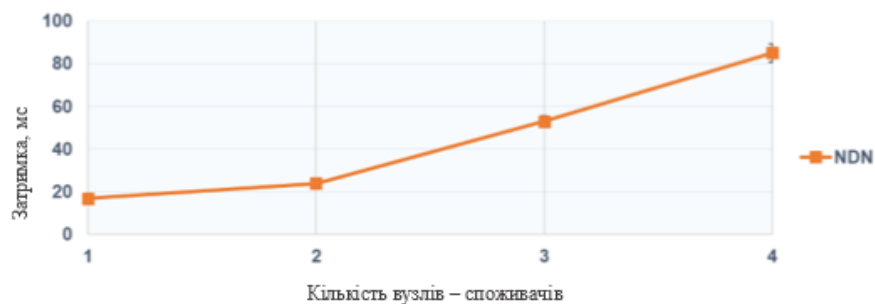
Рисунок 3.6 – Залежність параметрів мережі NDN від швидкості пересування вузлів ($N = 90$ вузлів; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол): а) швидкість передачі; б) затримка; в) втрати

Зміна щільності мережі та швидкості пересування (рисунок 3.5, 3.6) терміналів, принаймні у вибраних межах, слабо впливає на якість зв'язку

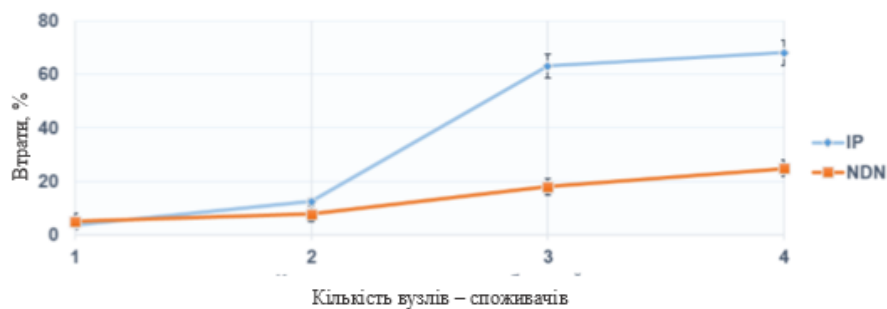
при NDN-архітектурі та залишає його на гранично високому рівні (рисунок 3.7). Даний факт пов'язаний з тим, що завдяки широкомовному поширенню Interest-пакетів терміналам немає необхідності щоразу обчислювати оптимальний шлях до джерела при кожному випадку перебудови таблиць маршрутизації, оскільки після ініціації запиту з великою ймовірністю в PIT-таблиці більшості вузлів мережі, у тому числі транзитних терміналів та майбутнього відправника Data-пакетів, буде занесений відправлений Interest.



а)



б)



в)

Рисунок 3.7 – Залежність параметрів мережі NDN від кількості вузлів споживачів ($N = 90$ вузлів; $v = 4$ м/с; $N_{tr} = 1$ вузол): а) швидкість передачі; б) затримка; в) втрати

Отримавши ім'я даних, що запитуються мережею, джерело дізнається, яку інформацію від нього вимагає мережа, і в напрямку яких саме транзитних вузлів вона повинна бути відправлена. Крім того, повторно варто відзначити, що транзитні вузли, отримавши Data-пакет, зберігаючи його у своїй внутрішній пам'яті, створюють у мережі більше джерел інформації у разі повторного запиту імені мережею, тим самим знижуючи можливу кількість транзитних вузлів у маршруті.

Збільшення кількості одержувачів інформації, у разі одного джерела в мережі, погіршує якість зв'язку через те, що пристрою джерела необхідно відповідати на більшу кількість різних Interest-пакетів, тим самим відправляючи більше інформації, таким чином ділянка мережі поблизу джерела даних, як і в у випадку з IP-мережею стає «вузьким» місцем. Однак слід зазначити, що навіть при зниженні характеристик мережі архітектура NDN показує кращі результати ніж IP, оскільки через можливість транзитних терміналів зберігати пакети, що приходять, існує можливість отримати інформацію від нового джерела, обійшовши «вузьке місце».

Оскільки джерелам і одержувачу, як було сказано вище, не потрібно вибудовувати та підтримувати між собою сеанси зв'язку, Data-пакети надходять від найближчого в будь-який момент часу джерела, тим самим створюючи можливість передачі даних через менше транзитних вузлів, ніж при одному джерелі в мережі. Таким чином, можна сказати, що збільшення кількості джерел даних не тільки не знижує якість зв'язку, як було при архітектурі IP, але й цілком може їх покращити.

Крім того, слід окремо звернути увагу на результати, отримані для середньої затримки передачі пакетів – у більшості проведених експериментів (крім збільшення кількості одержувачів інформації) максимальне значення затримки не перевищує 20 мс, таке досить мале значення затримки в ситуації, що склалася, може бути важливим для працездатності деяких додатків, наприклад, медичних (рисунок 3.8).

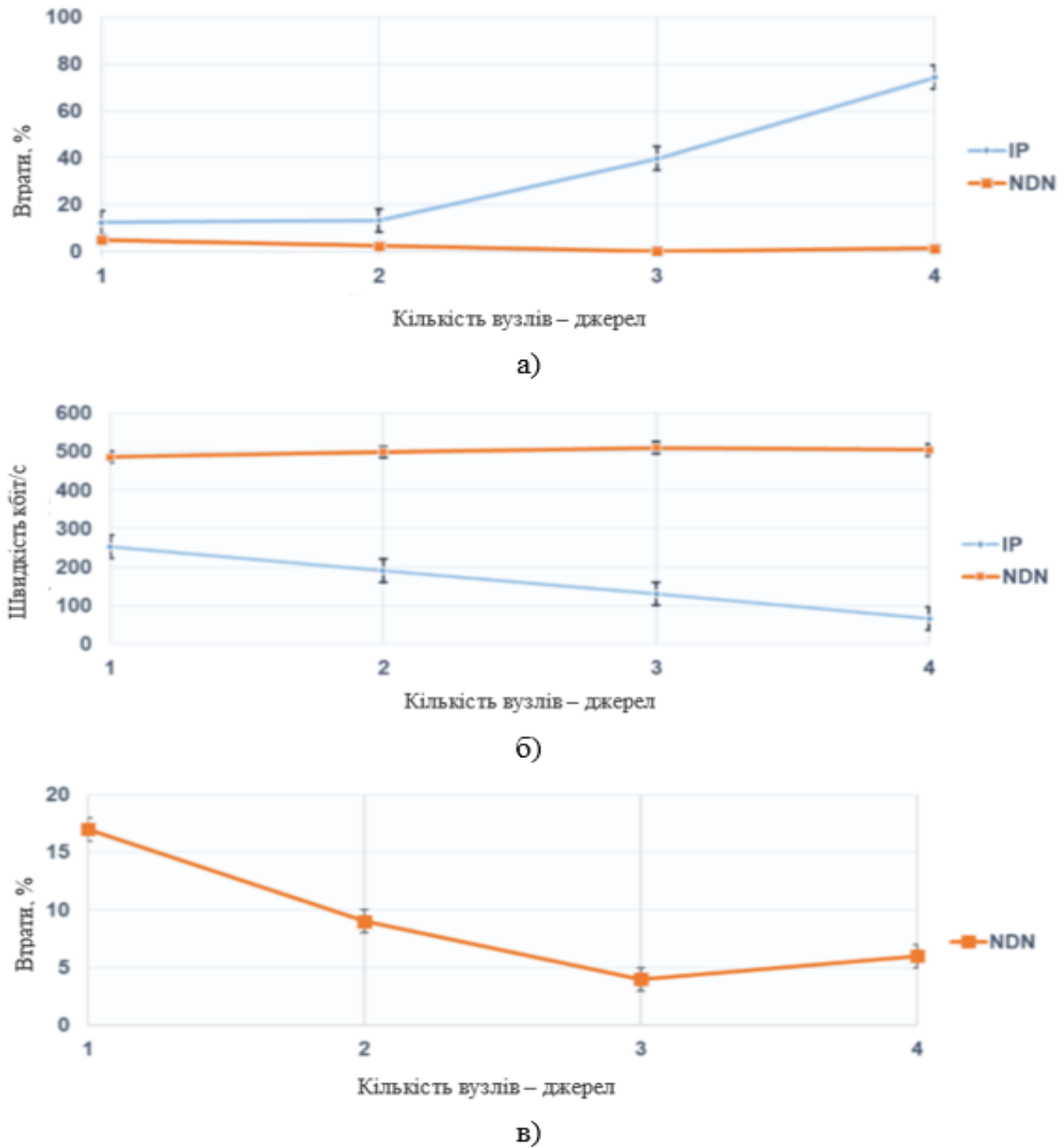
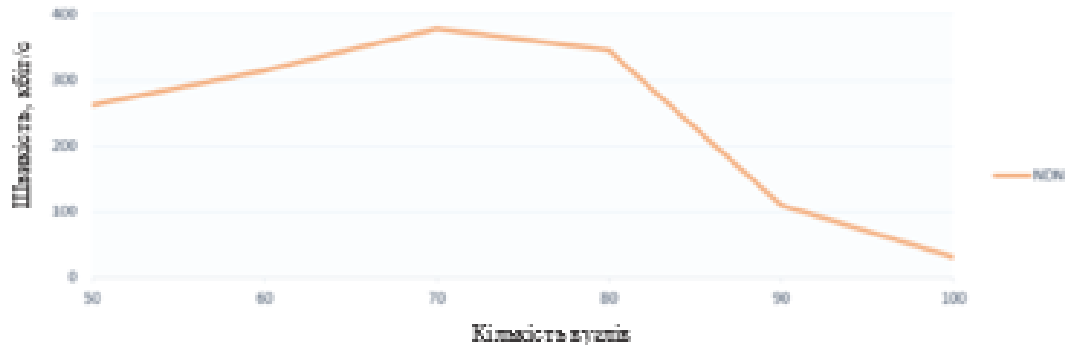


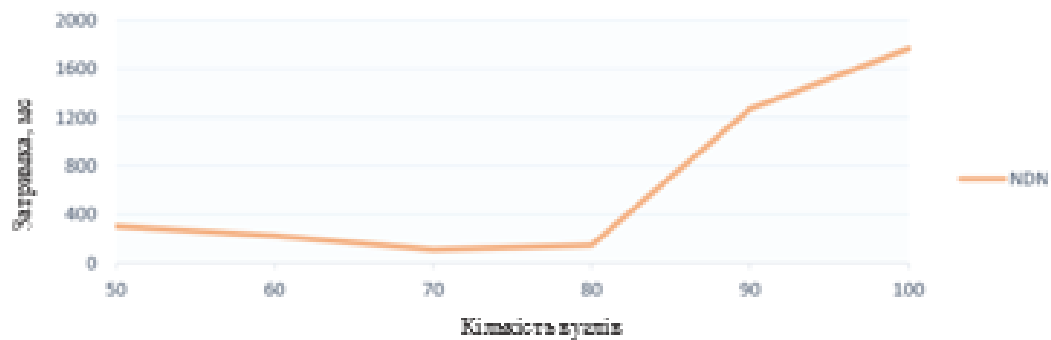
Рисунок 3.8 – Залежність параметрів мережі NDN від кількості вузлів-джерел (N = 90 вузлів; v = 4 м/с; Ntr = 1 вузол): а) швидкість передачі даних; б) втрати

Додатково, хотілося б показати важливість наявності сховища даних пристрої терміналів, для цього повторно були проведені симуляції, що показують залежність мережевих параметрів від щільності мережі, проте на всіх проміжних вузлах була відключена функція збереження Data-пакетів.

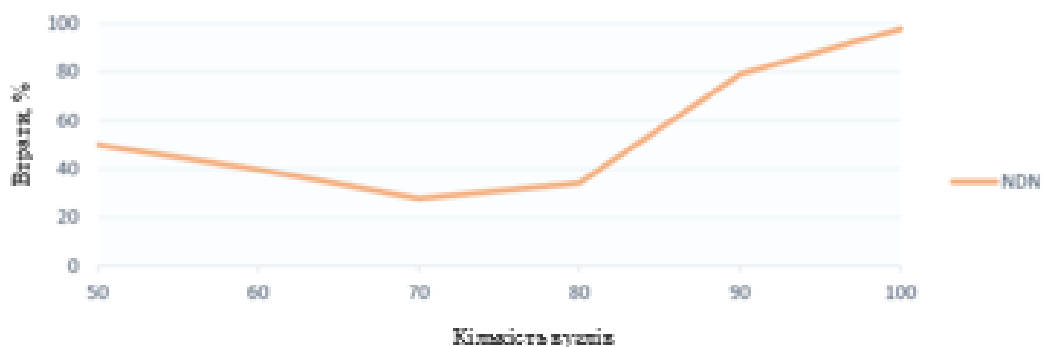
Результати (рисунок 3.9), здебільшого повторюють тенденції графіків IP, проте при цьому показують, що NDN-мережа без сховища даних має нижчі показники якості зв'язку.



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Залежність параметрів мережі NDN без компонента Content Store від кількості вузлів ($v = 4$ м/с; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол): а) швидкість передачі; б) затримка; в) втрати

Мережа з подібними характеристиками не може задовольняти вимоги більшості сучасних додатків, а тому, можна зробити висновок, що використання бездротових мереж мереж іменованих даних без збереження Data-пакетів на транзитних вузлах не рекомендується.

Підсумовуючи справжнього експерименту, можна резюмувати, що застосування архітектури мереж іменованих даних у бездротових пористих мережах, зокрема ізольованих, не тільки не поступається сучасним підходам, а й може мати кращі мережеві параметри, ніж архітектура IP, що використовується в даний момент, що і доведено результатами. проведених симуляцій. [7]

3. 4 Симуляція роботи гетерогенної MESH мережі

Для симуляції роботи гетерогенної бездротової мережі використовувалася модифікована модель, розроблена в ndnSIM і описана вище. Для відстеження залежності якості зв'язку від присутності в мережі розробленого NDN/IP-шлюзу було змінено ряд умов: кожному вузлу мережі випадково призначалася мережева архітектура – NDN або IP, при цьому співвідношення вузлів IP до NDN становило 50 на 50 відсотків. Після передачі деякого обсягу даних між однією парою кінцевих вузлів також випадково вибиралися нові джерело і одержувач, при цьому дані кінцеві вузли могли мати як однакові, так і різні мережеві архітектури.

У ході симуляції була досліджена доступність вузлів мережі, що розглядається, відносно один одного, тобто кількість задоволених запитів, при цьому вводилося обмеження на затримку рівне 80 мс – у разі, якщо час передачі пакета перевищував встановлене значення, пакет вважався втраченим. З результатів експерименту (рисунок 3.10) видно, що у гетерогенної мережі розробленого IP/NDN-шлюзу збільшує доступність вузлів практично вдвічі.

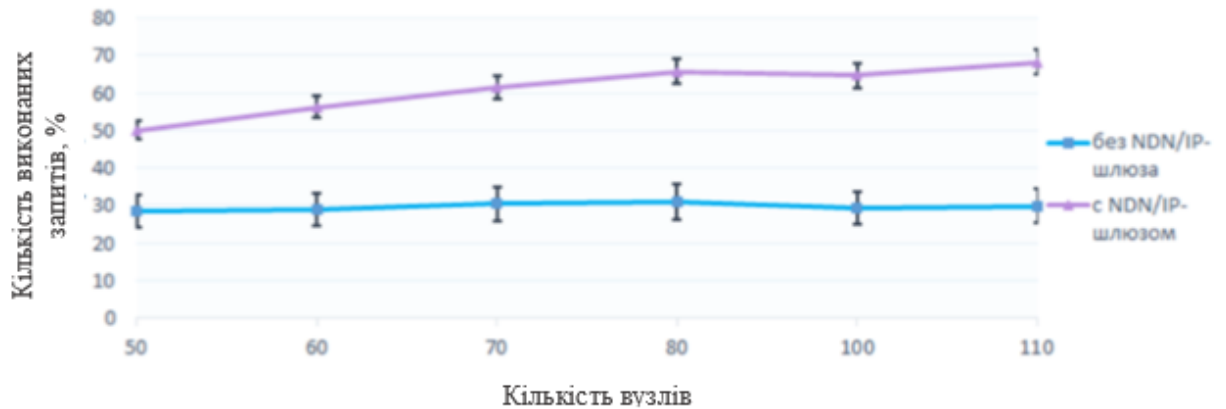


Рисунок 3.10 – Залежність кількості задоволених запитів гетерогенної мережі від кількості вузлів ($v = 4$ м/с; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол, $N_{IP}/N_{tr} = 1$, $t_l = 80$ мс)

Крім того, було досліджено вплив наявності шлюзу на швидкість передачі даних та затримку (рисунок 3.11).

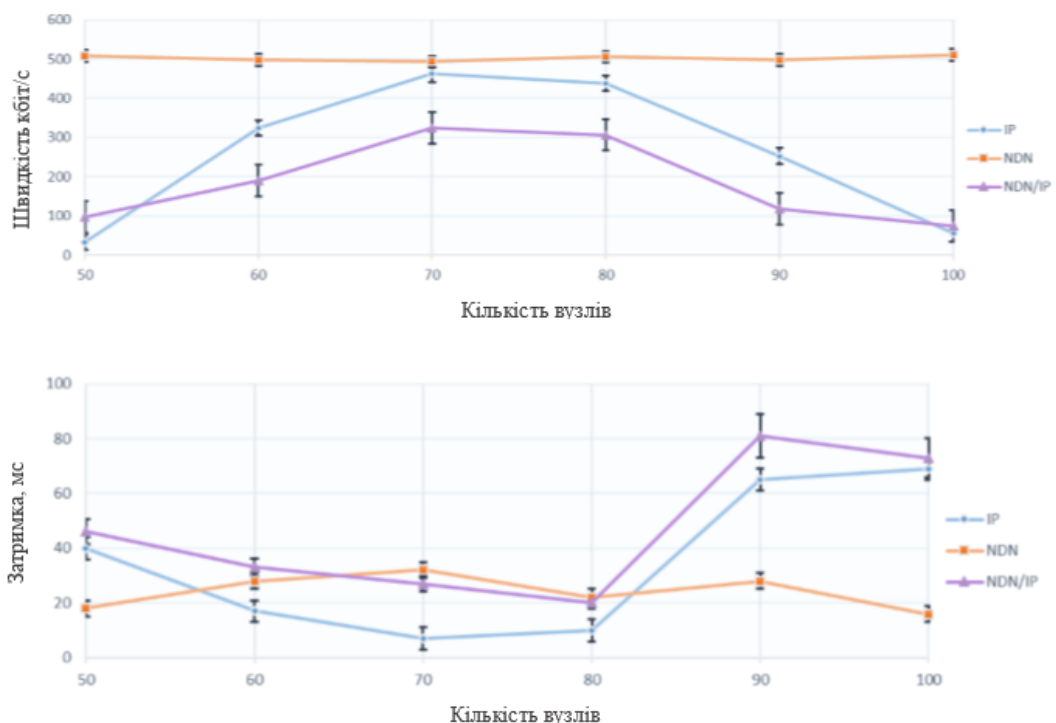


Рисунок 3.11 – Залежність параметрів гетерогенної мережі з NDN/IP-шлюзом від кількості вузлів ($v = 4$ м/с; $N_{rx} = 1$ вузол; $N_{tr} = 1$ вузол, $N_{IP}/N_{tr} = 1$): а) швидкість передачі даних; б) затримка

З графіків видно, що середня затримка в мережі з NDN/IP-шлюзом більша, ніж при передачі пакетів між окремо взятими IP і NDN вузлами, це пояснюється тим, що побудова маршруту від джерела до одержувача складається з двох окремих процесів маршрутизації, а також затримку вносить необхідність одержання шлюзом відповідей на DNS-запити.

Результати моделювання показали, що шлюз, що працює відповідно до представленого алгоритму, може бути рекомендований для використання в мережах, вузли яких засновані на різних мережевих архітектурах. Застосування цього алгоритму дозволяє взаємодіяти вузлам різних архітектур, що підвищує відсоток задоволених запитів.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень отримані такі наукові та практичні результати.

Проведено аналіз проблем, що викликаються відсутністю доступу до мережі Інтернет, зокрема, відсутністю доступу до DNS-ресурсів, а також проблем, зумовлених постійним пересуванням елементів бездротових мереж.

Запропоновано метод організації мережі зв'язку для забезпечення інфокомунікаційними послугами територій з обмеженою доступністю до мережі Інтернет за допомогою застосування бездротових мереж іменованих даних.

Проведено імітаційне моделювання роботи Mesh мережі. Результати показали, що шлюз, що працює відповідно до представленого алгоритму, може бути рекомендований для використання в мережах, вузли яких засновані на різних мережевих архітектурах. Застосування цього алгоритму дозволяє взаємодіяти вузлам різних архітектур, що підвищує відсоток задоволених запитів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зубенко В.П., Жовтоніжко Д.С., Можасєв О.О., Гук А.С. Дослідження детекторів локальних особливостей зображення. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. Вип. 2(76). С. 66–70.
2. Kurimo M. Unsupervised segmentation of words into morphemes / M. Kurimo, M. Creutz, E. Arsoy. – Morpho challenge, 2015. – 95 p.
3. Tran T.X. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. Hajisami, A., Pompili, D. IEEE Communications Magazine 55, 2017, 54–61. doi:10.1109/MCOM.2017.1600863.
4. Fan, Z., Xiao, Y., Nayak, A., Tan, C.: ‘An improved network security situation assessment approach in software defined networks’, Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017.
5. Phan, T.V., Bao, N.K., Park, M.: ‘Distributed-SOM: A novel performance bottleneck handler for large-sized software-defined networks under flooding attacks’, Journal of Network and Computer Applications, 2017,91, pp. 14-25. 39.
6. Phan, T.V., Bao, N.K., Park, M.: ‘Distributed-SOM: A novel performance bottleneck handler for large-sized software-defined networks under flooding attacks’, Journal of Network and Computer Applications, 2017,91, pp. 14-25.
7. Technical Specification ETSI TS 123 01 v16.6.0 Release 16. 5G. System architecture for the 5G System (5GS). ETSI, France. – October 2020.
8. Keller J. Fundamentals of Computational Intelligence: Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation / J. Keller, D. Liu, D. Fogel. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc., 2016. – 378 p.
9. Object & Scene Tracking Augmented Reality [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wikitudo.com/augmented-reality-object->

scene-recognition/

10. Що таке Colaboratory [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=ru#scrollTo=5fCEDCU_qrC0

11. Google Colab - ваш робочий простір на Python в хмарному середовищі [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.machinelearningmastery.ru/google-colab-your-python-workspace-on-cloud-c3aed424de0d/>

12. Просте введення в Pytorch для нейронних мереж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.machinelearningmastery.ru/an-easy-introduction-to-pytorch-for-neural-networks-3ea08516bff2/>

13. Початок роботи з набором даних COCO [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://towardsdatascience.com/getting-started-with-coco-dataset-82def99fa0b8>

14. A. Itzkovitz and A. Schuster. Distributed shared memory: Bridging the granularity gap, in Proceedings of the First ACM Workshop on Software Distributed Shared Memory (WSDSM, 1999.)

15. A. Snavely and D. M. Tullsen. Symbiotic job scheduling for a simultaneous multithreading processor. In Proceedings of the Ninth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pages 234–244, Nov. 2020.

16. A.V. Bogdanov, M. Dmitriev, Ye Myint Naing, Eucalyptus Open-source Private Cloud Infrastructure, GRID 2010, Proceedings of the 4th International Conference Dubna, June 28- July 3, 2010. Page: 57-63.

17. A.V.Bogdanov, A.A. Lazarev, La Min Htut, Myo Tun Tun, Building User Access System in Grid Environment, Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education: Proceedings of the 4th Intern. Conference, Dubna, 2019, Pages: 63-69.