

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»



Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»

ПЕСТОВ ОЛЕКСІЙ ДМИТРОВИЧ
Група КНТ-513м

МАСШТАБНА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА MESH МЕРЕЖА
НА ОСНОВІ YGGDRASIL

АВТОРЕФЕРАТ

магістерської роботи на здобуття освітньо-кваліфікаційного
рівня «магістр» 123 «Комп'ютерна інженерія»
освітньої програми «Комп'ютерні системи та мережі»

2024 р.

Магістерська робота є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка», на кафедрі комп'ютерних систем та мереж

Керівник кандидат технічних наук, доцент
Киричек Галина Григорівна,
Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

Офіційний рецензент: кандидат технічних наук, доцент
Малий Олександр Юрійович,
Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів

Захист відбудеться "13" грудня 2024 р.

Секретар екзаменаційної комісії, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Т. В. Голуб

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В наші дні централізовані програмно-визначені мережі (Software-Defined Networking, SDN) стають все більш популярними серед інтернет-провайдерів (ISP) завдяки перевагам у автоматизованому віддаленому налаштуванні обладнання, моніторингу, контролі, простоті розгортання, використанні апаратного забезпечення типу «white box» тощо. Тим не менш, згадані переваги мають місце за рахунок надійності мережі та стійкості до збоїв, оскільки централізація неминуче додає системі єдині точки відмови. Наслідком цього є, наприклад, відносно недавній сумнозвісний колапс мережі Київстар 12 грудня 2023 року, що призвів до кількох днів простою з повною відсутністю зв'язку у клієнтів. Численні сервіси по всій Україні поклалися на «Київстар» і не могли функціонувати, поки мережу не було відновлено.

Це є прикладом того, наскільки ненадійними є централізовані ієрархічні системи зв'язку та вимагає іншого підходу - сітчастої (mesh) мережі, де межа між маршрутизаторами та кінцевими пристроями стає розмитою. Ідея цієї парадигми полягає в тому, що кожен вузол мережі функціонує незалежно від будь-якого іншого, встановлюючи зв'язки з іншими вузлами поблизу (peering) і співпрацюючи з метою маршрутизації трафіку для учасників мережі, а не покладаючись для цього на центральний орган.

Хоча концепція mesh мереж не нова, ряд протоколів маршрутизації вже розроблено і успішно використано, нема протоколу, який би масштабувався за межі невеликих локальних мереж і робив це ефективно. Додатковою проблемою таких мереж є підтримка конфіденційності даних користувача при передачі їх через мережу з урахуванням того, що вони можуть прослуховуватись проміжними вузлами.

Цей дипломний проект присвячено проведенню досліджень з теоретичних та практичних питань розгортання масштабної децентралізованої mesh мережі.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дипломної роботи є проведення досліджень, визначення доцільності використання схеми маршрутизації Yggdrasil, як основи

масштабної децентралізованої mesh мережі, а також проведення реалізації і тестування прототипу вузла мережі, яка проєктується.

У ході дослідження необхідно визначити масштабованість експериментальної схеми маршрутизації Yggdrasil стосовно ліміту переходів, використання оперативної пам'яті та процесору, а саме їх залежності від розмірів мережі, її топології та інших факторів. З цього робиться висновок про доцільність використання схеми маршрутизації Yggdrasil у якості основи для побудову масштабних децентралізованих mesh мереж. При позитивному висновку необхідно визначити орієнтовну структуру впроваджуваної mesh мережі та реалізувати прототип вузла, як апаратно-програмну платформу для розгортання mesh мережі на основі Yggdrasil.

Об'єктом дослідження є процес проєктування масштабної децентралізованої mesh мережі на основі схеми маршрутизації Yggdrasil.

Предметом дослідження є моделі, методи та програмні засоби реалізації масштабної децентралізованої mesh мережі на основі Yggdrasil.

Методи дослідження базуються на симуляційних випробуваннях схеми маршрутизації Yggdrasil у середовищах meshnet-lab та coreemu-lab з порівняльним аналізом результатів за допомогою побудови графіків та діаграм. Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю принципів параметрів, постановки задачі, обсягом вибірки для перевірки.

Наукова новизна отриманих результатів:

Результати дослідження дозволили зробити висновок про доцільність використання схеми маршрутизації Yggdrasil у якості основи при впровадженні масштабних децентралізованих mesh мереж незалежних вузлів.

Практичне значення отриманих результатів:

Визначено базову технологію каналного рівня та орієнтовну структуру масштабної mesh мережі на основі Yggdrasil. Реалізовано прототип вузла впроваджуваної мережі, розроблено принципіальну електричну схему пристрою, описано необхідне апаратне забезпечення, процес прошивки і налаштування та його автоматизацію. Мережа є децентралізованою стійкою до відмов альтернативою традиційним централізованим ієрархічним мережам Інтернет-провайдерів.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення магістерської роботи та результати досліджень представлено на 3 конференціях та опубліковано у фаховому виданні:

- In Proceedings of the ICST-2024. CEUR Workshop. Vol. 3790;
- Materials of the XII International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies», 23th – 25th September, 2024, Odesa;
- Тиждень науки-2024. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції;
- Системи та технології, 2024, 68 (2).

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та принципіальної схеми. Основна частина містить 81 сторінку, 48 рисунків і 3 таблиці, список використаних джерел зі 23 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** розглянуто суміжні дослідження та роботи. Проаналізовано протоколи mesh маршрутизації CottonCandy, VORTEX та маршрутизацію на основі «теплових слідів», з якими порівняно схему маршрутизації Yggdrasil. Визначено причини, за якими вони не підходять для масштабних мереж загального призначення.

Наведено загальний опис функціоналу та особливостей Yggdrasil, основна суть якої полягає у використанні адресації на основі відкритих ключів Ed25519 і самоорганізованого остовного дерева мережі. Bloom-фільтри присутні на кожній гілці у дереві (on-tree links) та представляють собою набір ключів вузлів, доступних через конкретне з'єднання. Пошук вузлів виконується на вимогу та за допомогою широкомовних розсилок, які фільтруються цими bloom-фільтрами. Результатом такого пошуку є отримання координат вузла, який приймає дані, відносно поточного кореня мережі, за якими надсилається трафік. Для того, щоб визначити напрямок трафіку, на кожному наступному вузлі застосовується опортуністична жадібна маршрутизація.

Взаємне виявлення вузлів виконується multicast-розсилкою «маяків» з IPv6 link-local адрес мережевих інтерфейсів. Сусідські TCP-з'єднання між вузлами встановлюються таким же чином, або через будь-які інші явно прописані з'єднання. Перевантаженість мережі (network congestion) автоматично контролюється на кожному вузлі за допомогою форми чесної черги пакетів, яка намагається рівномірно збалансувати потоки трафіку між різними вузлами, де це можливо. Основним недоліком підходу Yggdrasil є те, що трафік не завжди проходить найкоротшим можливим шляхом, створюючи більшу затримку, що можна враховувати і вважати справедливим компромісом. Якість зв'язку також не розглядається поза пріоритетами між декількома пірингами до одного вузла (наприклад, встановлення пріоритету кабельних інтерфейсів над бездротовими).

Кожен вузол мережі зберігає в пам'яті лише bloom-фільтри у 1 КБ для кожної зі своїх гілок, а також 32-байтні ключі своїх прямих сусідів та їхніх попередників на шляху до поточного кореня. Це означає, що використання пам'яті певним вузлом має залежати лише від кількості з'єднань і відстані до поточного кореня.

Визначено завдання, які виконуються у ході роботи.

Другий розділ присвячено дослідженню Yggdrasil з приводу її масштабованості відносно ліміту переходів, використання системних ресурсів та логіки роботи. Проведено низку експериментів як у великому, так і у малому масштабах з використанням середовищ meshnet-lab та coeemu-lab відповідно.

Результати експериментів показали, що Yggdrasil значно перевершує у ліміті переходів інші широко використовувані протоколи mesh маршрутизації, такі як OLSR і Babel (рис. 1). Експерименти також показали типовий час конвергенції, а також тенденції використання пам'яті (рис. 2) та процесора Yggdrasil і підтвердили їх масштабування з глибиною мережі, а не її загальним розміром. Це підтверджує доцільність використання Yggdrasil у якості основи для розгортання великомасштабних децентралізованих mesh мереж незалежних вузлів як альтернативи традиційним централізованим ієрархічним мережам, що використовуються в мережах інтернет-провайдерів.

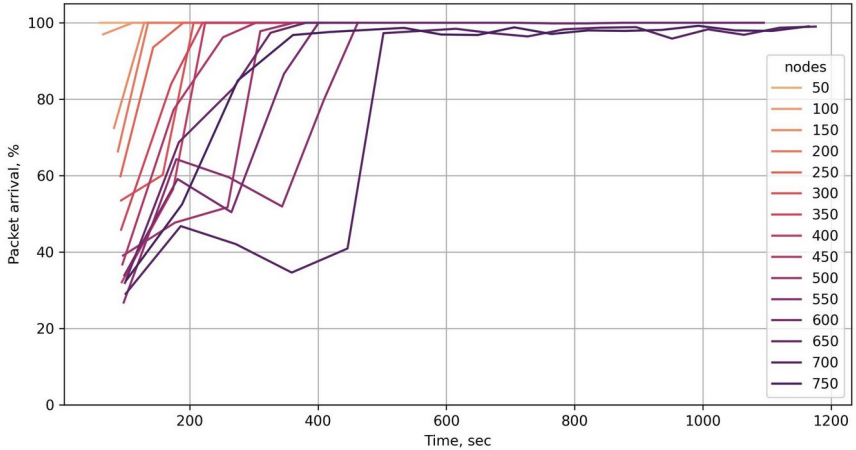


Рисунок 1 - Надходження пакетів для мереж різних розмірів, лінійна топологія

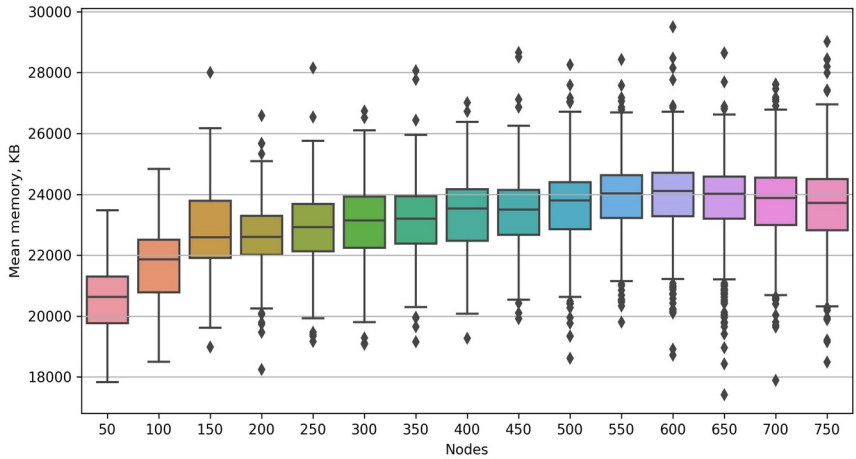


Рисунок 2 - «Box plot» розподіл середнього використання пам'яті вузлами у мережах різного розміру, лінійна топологія

Тестування також виявило деякі особливості у мережах на основі Yggdrasil, такі як збільшення використання процесору на

довгих гілках остовного дерева та аномалії трафіку, внесені блукаючим кореневим вузлом.

Коли вузли розташовані в лінію, використання процесору масштабується відповідно до її довжини і тим більше, чим ближче до середини лінії конкретний вузол (рис. 3). Крім того, кореневий вузол завжди ділить лінію на дві частини, для яких довжина та середні точки розглядаються окремо. Це особливо чітко видно на лініях у 700 та 450 вузлів, де кореневий вузол опинився ближче до середини.

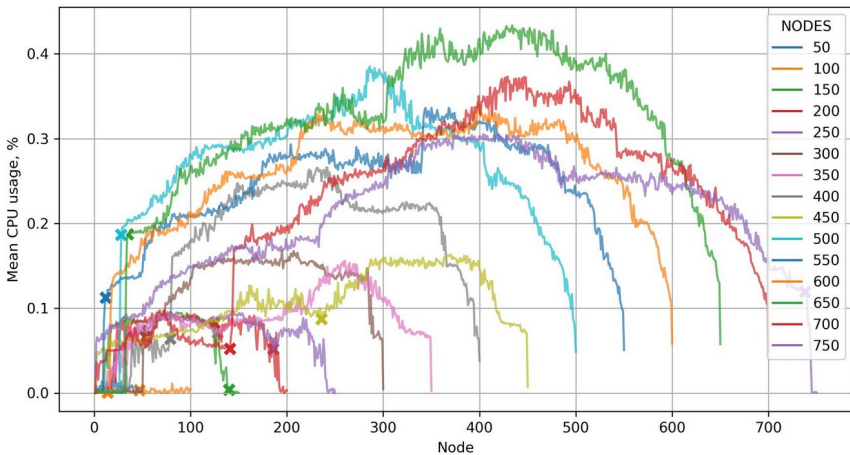


Рисунок 3 - Середнє використання процесору кожним вузлом у лінійній топології для мереж різних розмірів, хрестами відмічено кореневі вузли

Блукаючий кореневий вузол змушує вузли, до яких він підключається, змінювати свої координати у дереві та поширювати дані про цю зміну по всій мережі. Однак, до того часу, кореневий вузол може створювати з'єднання із іншими сусідніми вузлами, що також спричиняє поширення конфліктного перевпорядкування. Це призводить до того, що вузли мають різні представлення про зв'язки у остовному дереві, що у свою чергу є причиною різних проблем з передачею трафіку (рис.4).

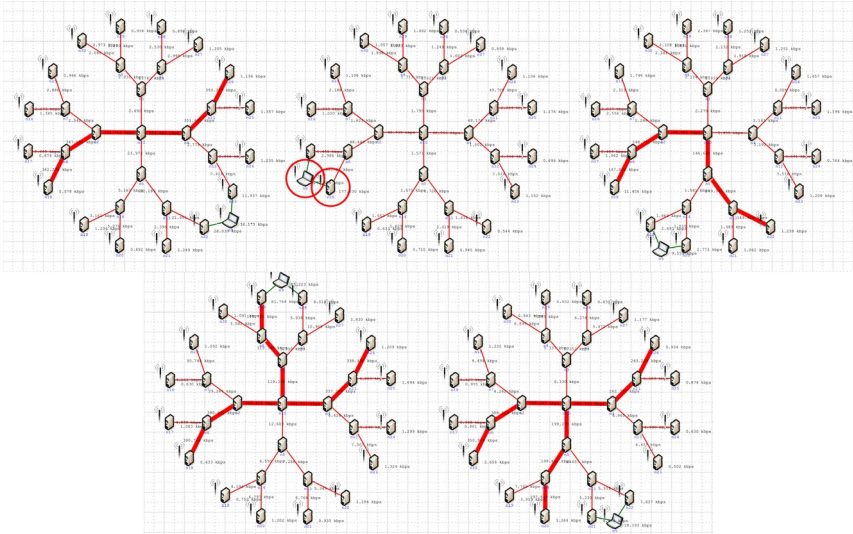


Рисунок 4 - Мережа на 30 вузлів, блукаючий кореневий вузол n9, нормальний трафік від n18 до n26 та його аномалії

Як засіб пом'якшення цих проблем було запропоновано упереджувальний майнінг малих ключів для детермінованого розміщення кореневих вузлів.

У **третьому розділі** визначено бажану базову технологію зв'язку каналного рівня, у якості якої обрано стандарт 802.11s. При вимкненому стандартному протоколі маршрутизації HWMP, стандарт дозволяє вузлам поблизу обмінюватися даними через Wi-Fi без встановлення з'єднань через точки доступу, комутатори, тощо.

Наведено орієнтовну структуру проєктованої мережі. Більшість мобільних пристроїв є доволі закритими та або не підтримують стандарт 802.11s, або просто не дозволяють використовувати цей режим. Додатковою проблемою є наявність недостатнього покриття, якщо мережа застосовує лише клієнтські пристрої. В такому випадку потрібно будувати мережу на спеціальних вузлах, які можна переконфігурувати відповідно до умов використання, наприклад: у режим точки доступу; мосту зі спрямованою антеною; кабельного Ethernet шлюзу, тощо.

Таке рішення призведе до того, що в мережі будуть присутні вузли, які здатні одночасно встановлювати лише одне з'єднання. Тому таке рішення є неоптимальним, бо не вирішує завдання по розширенню покриття мережі. На жаль, на даний час не існує іншого способу під'єднати до мережі пристрої під управлінням операційних систем Windows, Android та IOS, хоча деякі клієнтські пристрої все ж таки під'єднуються до мережі за допомогою Wi-Fi адаптерів із підтримкою 802.11s, і таке можливо під управлінням систем Linux, BSD тощо. Альтернативне підключення також можливе із використанням спеціального вузла у якості шлюзу для пристрою. Таким чином, клієнтські пристрої допомагатимуть мережі створювати належне покриття, а не лише використовуватимуть її для передачі даних.

Визначено програмне та апаратне забезпечення необхідне для реалізації прототипу вузла mesh мережі на основі Yggdrasil. Прототип вузла під управлінням операційної системи OpenWRT збирається на основі модуля HLK-7628N (рис. 5) виробництва Hi-Link. Додатково використовується периферія у вигляді штирових антен, перехідних кабелів для них, Ethernet 8P8C роз'єму, DC-DC перетворювача, USB-C роз'єму для живлення та USB-UART адаптеру.

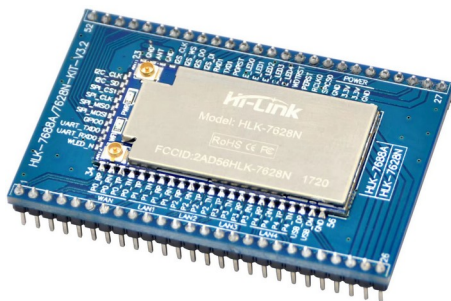


Рисунок 5 - Модуль HLK-7628N

Четвертий розділ присвячено процесу реалізації прототипу вузла мережі. Наведено принципіальну електричну схему пристрою (рис. 6), розглянуто особливості процесу збірки. Зібраний пристрій наведено на рисунку 7.

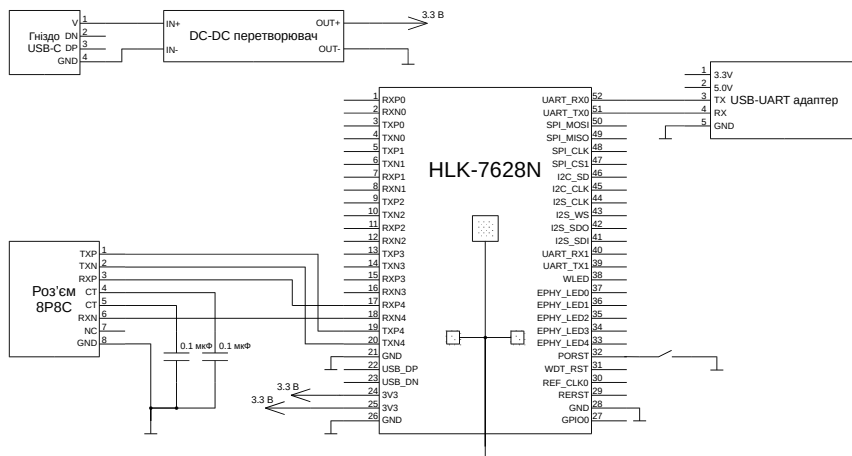


Рисунок 6 - Принципова електрична схема прототипу вузла

Розглянуто процеси початкової прошивки та оновлення пристрою. Розроблено скрипти автоматизації процесу прошивки та первісного налаштування пристрою. Проведено перевірку загальної працездатності пристрою та мережі з двох прототипів, двох пристроїв під управлінням Linux та двох телефонів під управлінням Android.

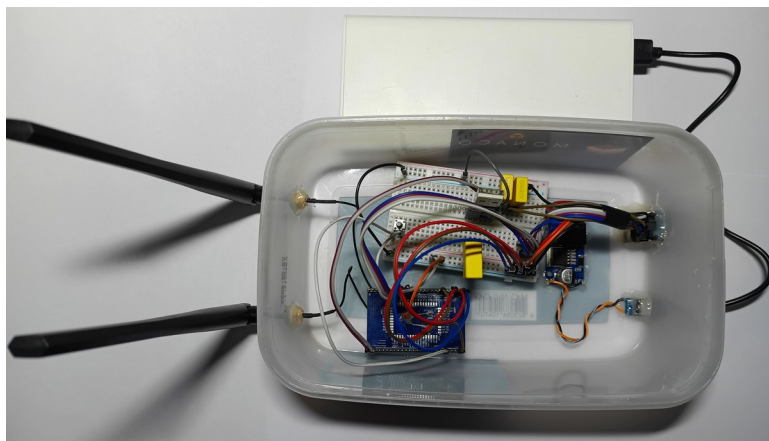


Рисунок 7 - Зібраний прототип вузла з живленням від павербанку

Визначено орієнтовний радіус покриття окремого вузлу, що становить приблизно 100 (95 ± 5) м при умовно прямій видимості та використанні штирових всепрямованих антен. Виміряно орієнтовну пропускну здатність TCP-з'єднання у мережі з 2, 3 та 4 вузлів при даній конфігурації (табл. 1), виявлено негативний вплив кількості сусідніх вузлів на пропускну здатність. Продемонстровано приклад прикладного використання мережі з web-сервером та клієнтом на Android пристроях.

Таблиця 1 - Результати вимірювання пропускну здатності

К-ть вузлів	Макс.	Мін.	Сер.
2	3.93 Мбіт/с	3.04 Мбіт/с	3.5 Мбіт/с
3	3.53 Мбіт/с	2.04 Мбіт/с	2.91 Мбіт/с
4	3.40 Мбіт/с	1.96 Мбіт/с	2.89 Мбіт/с

Результати тестування підтверджують практичну можливість і доцільність розгортання мережі.

ВИСНОВКИ

В процесі проведення досліджень та виконання роботи визначено доцільність використання схеми маршрутизації Yggdrasil, як основи масштабної децентралізованої mesh мережі, а також проведено реалізацію прототипу вузла мережі, яка проєктується. Експерименти з демоном маршрутизації проведено на різного розміру топологіях із використанням середовищ meshnet-lab і coreemu-lab. В результаті визначено орієнтовну структуру масштабної децентралізованої mesh мережі та технічні вимоги до її вузлів. Експерименти демонструють, що Yggdrasil значно перевершує інші протоколи маршрутизації сітчастої мережі в обмеженні переходів та визначають параметри використання системних ресурсів. Тому Yggdrasil є перспективним методом розгортання великомасштабних децентралізованих сітчастих мереж незалежних вузлів і альтернативою традиційним централізованим ієрархічним мережам.

Під час тестування виявлено деякі особливості застосування Yggdrasil, як то збільшення використання процесору на довгих гілках остовного дерева і аномалії трафіку, що внесені блукаючим кореневим вузлом. Як засіб пом'якшення запропоновано попереджувальний майнінг малих ключів для детермінованого розміщення корневих вузлів. Наведено орієнтовну модель системи та обґрунтовано використання стандарту IEEE 802.11s з вимкненою маршрутизацією як базової технології канального рівня.

Проведено тестування і створено прототип вузлу мережі на основі модуля HLK-7628N виробництва Hi-Link та ОС OpenWRT. Описано процеси збірки та прошивки прототипів. Процеси початкової прошивки та оновлення пристроїв частково автоматизовано за допомогою розроблених скриптів. Налаштування пристроїв після прошивки автоматизовано розробленим скриптом uci-defaults.

Тестування показало повну працездатність реалізованих прототипів і мережі з двох прототипів, двох пристроїв під управлінням Linux та двох телефонів під управлінням Android. Визначено орієнтовні ліміти покриття окремого вузла та пропускну здатність мережі при даній конфігурації. Продемонстровано приклад прикладного використання мережі з web-сервером та клієнтом на Android пристроях.

Подальшими напрямками дослідження визначено удосконалення прошивки, структури і конструкції вузлів мережі з метою покращення стабільності їх роботи, розширення функціоналу та збільшення пропускну здатності.