

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

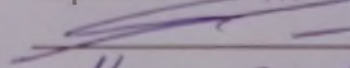
ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ MESH-МЕРЕЖ В УМОВАХ ВЕЛИКОЇ
ЩІЛЬНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ВІДСУТНОСТІ МЕРЕЖЕВОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка



Тичинський Д. Д.

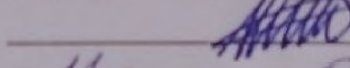
Керівник: к.т.н., доц., професор каф. ІКСТ



Барась С. Т.

« 11 » серпня 2025 р.

Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

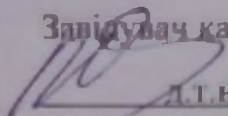


Семенов А. О.

« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ



д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«5» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
Тичинському Дмитру Дем'яновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Ефективність алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, доцент,

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

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

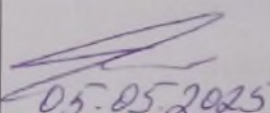
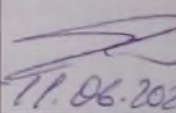
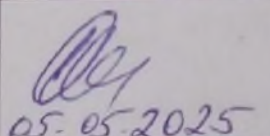
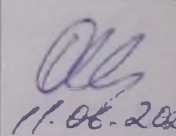
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Робочі частоти 2,4 та 5 ГГц, 800-900 МГц; адаптація до стандарту 802.11s; кількість точок доступу в межах одного кластеру від 8 до 16; протоколи маршрутизації B.A.T.M.A.N., AODV, HWMP, OLSR, DSR; топології мережі: плоска, ієрархічна, гібридна.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, особливості роботи безпроводних систем в умовах значної щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури, протоколи маршрутизації в Mesh-мережах, вплив топології Mesh-мереж на ефективність передачі даних, удосконалення алгоритмів маршрутизації у Wi-Fi Mesh-мережах, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): архітектура WMN мережі, протоколи маршрутизації в самоорганізованих мережах (класифікація), «плоска» безпроводна мережа, ієрархічна Mesh-мережа, гібридна Mesh-мережа, алгоритм широкомовної розсилки у реактивному режимі протоколу маршрутизації HWMP, алгоритм роботи удосконаленого протоколу маршрутизації HWMP.

6. Консультанти розділів роботи

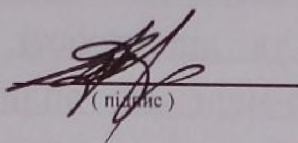
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання п
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 11.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 05.05.2025	 11.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

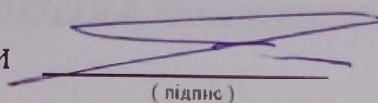
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Пр
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Тичинський Д. Д.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 681.324

Тичинський Д. Д. Ефективність алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 95 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 25 назв; рис.: 16; табл. 5.

Робота присвячена дослідженню безпроводних систем, побудованих за комірковою технологією (mesh) в умовах їх функціонування при значній щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури.

Метою дослідження є удосконалення алгоритмів маршрутизації при передачі даних у mesh-мережі за умови значної щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури.

Основними завданнями роботи є аналіз супровідних факторів при функціонуванні безпроводних систем в зазначених умовах, дослідження протоколів маршрутизації в mesh-мережах та визначення шляхів підвищення ефективності маршрутизації даних, оцінка впливу топології mesh-мереж на ефективність передачі даних, моделювання алгоритмів маршрутизації в Wi-Fi mesh-мережах.

Робота містить п'ять розділів. У першому розділі виконано аналіз особливостей роботи безпроводних систем в умовах значної щільності абонентських пристроїв та відсутності мережевої інфраструктури.

У другому розділі досліджені протоколи маршрутизації в mesh-мережах.

У третьому розділі дана оцінка впливу топології mesh-мереж на ефективність передачі даних.

У четвертому розділі дано обґрунтування удосконаленого алгоритму маршрутизації у Wi-Fi mesh-мережі.

У п'ятому розділі виконано розрахунки, які стосуються охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: mesh-мережа, алгоритми, маршрутизація, топології, щільність користувачів, охорона праці.

ABSTRACT

Tychynskiy D. D. Efficiency of mesh network algorithms in conditions of high user density and lack of network infrastructure. Bachelor's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - software for telecommunication systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 95 p.

In Ukrainian. Bibliography: 25 titles; fig.: 16; tab. 5.

The work is devoted to the study of wireless systems built using cellular technology (mesh) in the conditions of their functioning with a significant user density and lack of network infrastructure.

The purpose of the study is to improve routing algorithms for data transmission in a mesh network with a significant user density and lack of network infrastructure.

The main objectives of the work are to analyze the accompanying factors in the operation of wireless systems in the specified conditions, to study routing protocols in mesh networks and to determine ways to increase the efficiency of data routing, to assess the influence of mesh network topology on the efficiency of data transmission, to model routing algorithms in Wi-Fi mesh networks.

The work contains five sections. The first section analyzes the features of the operation of wireless systems in conditions of significant density of subscriber devices and lack of network infrastructure.

The second section studies routing protocols in mesh networks.

The third section assesses the influence of mesh network topology on the efficiency of data transmission.

The fourth section provides a justification for the improved routing algorithm in Wi-Fi mesh networks.

The fifth section performs calculations related to occupational health and safety.

Keywords: mesh network, algorithms, routing, topologies, user density, occupational safety.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК	УМОВНИХ	СКОРОЧЕНЬ	4
.....			
ВСТУП			6
.....			
1	ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗНАЧНОЇ ЩІЛЬНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ВІДСУТНОСТІ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ		9
1.1	Підвищена щільність користувачів		9
1.1.1	Проблемні аспекти функціонування		9
1.1.2	Загальна характеристика алгоритму		12
1.2	Мережева інфраструктура		16
1.2.1	Особливості роботи		16
1.2.2	Загальна характеристика алгоритму		19
1.3	Технологія Mesh-мереж		23
1.4	Висновки до розділу		30
2	ПРОТОКОЛИ ТА МАРШРУТИЗАЦІЯ В MESH-МЕРЕЖАХ		32
2.1	Протоколи маршрутизації		32
2.1.1	Протокол B.A.T.M.A.N.		35
2.1.2	Протокол AODV		36
2.1.3	Протокол HWMP		37
2.1.4	Протокол Optimized Link State Rout (OLSR)		38
2.1.5	Протокол DSR		39
2.2	Шляхи підвищення ефективності маршрутизації даних		40
2.3	Висновки до розділу		47
3	ВПЛИВ ТОПОЛОГІЇ MESH-МЕРЕЖ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ		49
3.1	Архітектура безпроводної мережі		50
3.1.1	«Плоска» безпроводна мережа		51
3.1.2	Ієрархічна Mesh-мережа		52
3.1.3	Гібридна Mesh-мережа		53

		3
3.2	Вибір типу топології мережі	55
3.3	Принципи організації зв'язку в Ad-Hoc мережах	58
3.4	Порівняльний аналіз mesh-мережі та розподіленої мережі WDS	60
3.5	Висновки до розділу	64
4	УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ У Wi-Fi MESH-МЕРЕЖАХ	65
4.1	Алгоритм вибору режиму роботи протоколу HWMP	65
4.2	Алгоритм роботи протоколу HWMP	68
4.3	Висновки до розділу	70
5	ОХОРОНА ПРАЦІ	71
5.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	71
5.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	74
5.2.1	Мікроклімат.....	74
5.2.2	Склад повітря робочої зони.....	75
5.2.3	Виробниче освітлення.....	75
5.2.4	Виробничий шум.....	76
5.2.5	Виробничі випромінювання.....	77
5.3	Пожежна безпека.....	79
5.3.1	Пожежна безпека.....	79
5.3.2	Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	80
5.4	Висновки до розділу.....	81
	ВИСНОВКИ	82
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
	Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал	87
	Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AODV - Ad hoc On-Demand Distance Vector (протокол маршрутизації за запитом)

AP – Access Point (точка доступу)

B.A.T.M.A.N. - Better Approach to Mobile Ad hoc Networkin (протокол для мобільних ад-хок мереж)

DSR - Dynamic Source Routing (протокол маршрутизації для ad-hoc мереж)

DVG - (дистанційно-векторна геомаршрутизація)

HWMP - Hybrid Wireless Mesh Protocol (гібридний протокол маршрутизації для mesh-мереж)

IEEE 802.11 – мережевий протокол.

IP – Internet Protocol (інтернет протокол)

LAN – Local Area Network (локальна мережа)

MAC – Media Access Control (керування доступом)

MAP - Mesh Access Point (вузол комірчастої мережі з функцією точки доступу)

MDA – Mesh Deterministic Access (детермінований доступ до mesh-мережі)

MP - Mesh Point (вузол комірчастої мережі)

MPP - Mesh Portal (граничний вузол мережі (шлюз))

OLSR – Optimized Link State Routing (протокол маршрутизації для мобільних ad-hoc мереж)

P2P - Peer-to-Peer (рівний до рівного – однорангова, децентралізована мережа)

PC – Personal Computer (персональний комп'ютер)

PREQ - Path Request (широкомовний запит)

RFC – Request for comment (інформаційний документ)

RREP - Path Reply (пакет підтвердження)

SSH – Secure SHell (безпечна оболонка)

SSID – Service Set Identifier (найменування бездротової мережі)

STA – Stations (безпроводні станції)

VoIP – Voice over internet protocol (технологія передачі медіа- даних)

WAN – Wide Area Network (глобальна мережа)

WAP – Wireless Access Point (точка безпроводного доступу)

WDS - Wireless Distribution System (розподілена безпроводна система)

WEP – Wired Equivalent Privacy (стандарт захисту безпроводного трафіку, заснований на алгоритмі потокового шифрування RC4)

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access (стандарт безпроводного зв'язку, що забезпечує широкосмуговий зв'язок на значні відстані зі швидкістю, порівняною з кабельними з'єднаннями)

WMN – Wireless Mesh Network (безпроводна меш мережа)

WPA – Wired Equivalent Privacy (стандарт безпроводного шифрування)

ГДК - гранично допустимі концентрації

ЕМП - електромагнітне поле

КПК - кишеньковий персональний комп'ютер

КПО – коефіцієнт природного освітлення

ПК – персональний комп'ютер

СКС - структурована кабельна система

ША – широкомовна адреса розсилки

ВСТУП

Актуальність теми. Інформаційні мережі, побудовані на основі топології Mesh, за останні півтора-два роки набули значного поширення. Масштаби проєктів сягнули тисяч точок доступу та десятків тисяч користувачів. Mesh-мережі представляють інноваційні рішення, поєднуючи різні мережеві та радіотехнології, що дозволяє повною мірою відповідати зростаючим потребам абонентів [1-4].

Завдяки можливості створення локальних (LAN) і міських (MAN) мереж, які легко інтегруються у глобальні мережі (WAN), Mesh-архітектура є привабливою як для муніципальних, так і для індивідуальних користувачів. Сучасні Mesh-мережі здебільшого базуються на технології Wi-Fi, що забезпечує доступність рішень завдяки широкому вибору недорогих стандартних пристроїв. Це сприяє комерційній успішності подібних проєктів.

Наразі не існує чітких критеріїв, що визначають поняття Mesh-мереж у контексті систем ширококутового бездротового доступу. Загальне визначення звучить так: «Mesh — це мережева топологія, у якій пристрої з'єднані численними (часто надлишковими) зв'язками, оптимізованими з огляду на стратегічні міркування». Основною характеристикою таких мереж є їхня самоорганізована архітектура, що забезпечує:

- створення зон безперервного інформаційного покриття великої площі;
- масштабованість (збільшення зони покриття та щільності інформаційного обміну) у режимі самоналаштування;
- використання бездротових транспортних каналів (backhaul) для з'єднання точок доступу за принципом «кожен з кожним»;
- стійкість мережі до втрати окремих вузлів.

Стандарт 802.11 не містить жорстких вимог до реалізації хендвера (безшовного переміщення користувачів між точками доступу), проте передбачає спеціальні процедури сканування та приєднання («association»). Перемикання клієнтів у Wi-Fi-мережах може здійснюватися різними

способами, зокрема через протокол Radius або за допомогою інтелектуального бездротового контролера, який створює «тунель» між точками доступу під час переходу користувача. Ще одним варіантом є використання mesh-мереж [3-6].

Спеціалізовані MESH-мережі формуються динамічно для виконання конкретних завдань, після чого розпадаються на окремі елементи, готові до повторного створення за потреби. Вони особливо ефективні в умовах високої щільності користувачів та відсутності стаціонарної мережевої інфраструктури. Дослідження ефективності таких мереж у подібних сценаріях є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Значна частина робіт стосовно mesh-мереж присвячена питанням підвищення ефективності маршрутизації та удосконалення відповідних протоколів [2-5].

У дослідженні [2] аналізується вплив різних параметрів на якість передачі даних у бездротових багатокрокових мережах. Встановлено, що такі фактори, як потужність сигналу, розмір пакета та швидкість вузлів, можуть впливати на якість зв'язку не менше, ніж кількість вузлів або вибраний протокол маршрутизації. Крім того, результати змінюються залежно від поєднання різних параметрів, зокрема розташування та кількості вузлів.

У роботі [3] розглядається оцінка ефективності рішень, запропонованих у сфері мобільних ад-хок мереж (MANET), для аналізу експлуатаційних характеристик Mesh-мереж. Запропоновано протокол маршрутизації, оптимізований для самоорганізованих мобільних мереж. У розробленій моделі передбачено довільне переміщення вузлів.

Дослідження [4] присвячене методам реалізації багатоканального режиму в мережах із комірчастою топологією на основі стандарту IEEE 802.11. Отримані результати підтверджують високу точність аналітичних моделей і демонструють можливість багаторазового збільшення пропускної спроможності Mesh-мережі за умови використання всього двох радіоінтерфейсів на кожному пристрої.

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є удосконалення алгоритмів маршрутизації при передачі даних у mesh-мережі за умови значної щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз роботи безпроводних систем в умовах значної щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури;
- дослідження протоколів маршрутизації в mesh-мережах та визначення шляхів підвищення ефективності маршрутизації даних;
- оцінка впливу топології mesh-мереж на ефективність передачі даних;
- удосконалення алгоритму маршрутизації у Wi-Fi mesh-мережах;
- охорона праці.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗНАЧНОЇ ЩІЛЬНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ВІДСУТНОСТІ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Робота безпроводних систем у середовищах з високою щільністю користувачів вимагає врахування низки технічних і організаційних аспектів, оскільки наявність великої кількості пристроїв, що підключаються до мережі, може призвести до зниження якості обслуговування, збоїв у зв'язку та втраті продуктивності. Робота безпроводних систем в умовах відсутності мережевої інфраструктури — це складне завдання, яке вимагає використання спеціальних технологій для забезпечення зв'язку і передачі даних без залежності від традиційних мережевих елементів (наприклад, базових станцій або точок доступу). Така ситуація може виникати в умовах природних катастроф, віддалених регіонах, в польових умовах або на великих заходах, де немає доступу до стандартної інфраструктури мобільних або Wi-Fi мереж. Наведемо основні особливості та проблеми, з якими стикаються безпроводні системи в таких умовах.

1.1 Підвищена щільність користувачів

1.1.1 Проблемні аспекти функціонування

Висока щільність користувачів в обмеженому просторі може мати місце, наприклад, на стадіонах, на великих конференціях, в міських районах з великим потоком людей, у багатоквартирних будинках тощо. Це часто призводить до перенавантаження каналу зв'язку. Багато пристроїв можуть одночасно намагатися встановити з'єднання або передавати дані, що призводить до:

- зниження швидкості передачі даних;
- збільшення часу затримки;
- зростання рівня помилок у передачі.

У середовищах з великою кількістю користувачів і пристроїв часто виникають проблеми з завадами та інтерференцією, що можуть істотно вплинути на якість безпроводного зв'язку. До них відносять інтерференцію від інших безпроводних пристроїв (Wi-Fi, Bluetooth, мобільні телефони тощо), що використовують однакові або суміжні частоти, а також багатопроменеве поширення – коли сигнал проходить кілька шляхів через відбиття від стін, металевих конструкцій чи інших перешкод, що викликає спотворення і зниження якості сигналу.

В умовах високої щільності користувачів виникає необхідність у розумному розподілі радіочастотних ресурсів, щоб зменшити затримки і оптимізувати використання спектра. Це вимагає використання технологій розділення каналів у часі (TDMA), за частотою (FDMA) або кодового розподілу (CDMA), що дозволяють зменшити міжканальну інтерференцію. Можливе також динамічне розподілення каналів на основі аналізу завантаженості мережі та вимог користувачів.

Для підтримки високої продуктивності в умовах високої щільності користувачів необхідно застосовувати новітні стандарти зв'язку:

- 5G і майбутні 6G мережі, які здатні обробляти більші обсяги даних завдяки використанню більш високих частот (мм хвиль), які мають вищу пропускну здатність. Однак ці технології потребують наявності більшої кількості базових станцій і антенної інфраструктури для забезпечення стабільного покриття.

- Wi-Fi 6 (802.11ax), що має кращу здатність до роботи в умовах великої кількості користувачів завдяки підтримці MU-MIMO (мульти-юзер MIMO) та OFDMA (ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням).

Для забезпечення стабільної роботи безпроводних систем в умовах великої щільності користувачів необхідно ефективно проектувати і налаштовувати мережу:

- Багатоточкова або малонаправлена антена для забезпечення рівномірного покриття і зменшення міжканальної інтерференції.

- Розподілені системи безпроводного доступу (small cells, Wi-Fi точок доступу) для покращення якості зв'язку на конкретних ділянках, зменшуючи навантаження на основну інфраструктуру.

Висока щільність користувачів потребує ефективного механізму для розподілу навантаження на базові станції або точки доступу:

- Використання механізмів керування трафіком для пріоритезації трафіку (наприклад, відео або голосового зв'язку) і зменшення затримок.
- Адаптивні алгоритми для оптимізації швидкості з'єднання і зменшення часу відгуку на основі умов мережі.

В умовах високої щільності користувачів можуть виникати проблеми з мобільністю (наприклад, під час переміщення через місто або на великих заходах). У таких випадках важливо:

- Забезпечити безшовний перехід між базовими станціями або точками доступу.
- Реалізувати механізми для підтримки різних типів трафіку в умовах мобільності, щоб мінімізувати втрати з'єднання.

В умовах великої кількості підключених пристроїв збільшується ймовірність атак на безпроводні мережі. Для уникнення цього потрібно впроваджувати більш потужні механізми шифрування та аутентифікації для запобігання несанкціонованому доступу до мережі. Використання мобільних мереж 5G також має свої переваги у плані безпеки завдяки вдосконаленим протоколам захисту і шифрування.

У умовах значної кількості пристроїв важливо забезпечити ефективне управління енергоспоживанням. Сюди відносять малоенергетичні технології для зменшення споживання енергії мобільними пристроями, а також методи керування енергоспоживанням на рівні мережі, таких як енергозберігаючі режими для базових станцій.

Отже, в умовах високої щільності користувачів безпроводні системи повинні бути адаптовані до нових викликів, таких як високі навантаження, перешкоди, потреби в великій пропускну здатності та швидкому з'єднанні.

Використання новітніх технологій, таких як 5G, Wi-Fi 6, а також інтелектуальні системи керування трафіком і безпеки, є ключовими для забезпечення стабільної та ефективної роботи безпроводних мереж у таких умовах. Зазначимо, що в технологіях 5G та Wi-Fi 6, зокрема, мова йде про меш-мережі, які можуть суттєво допомогти у забезпеченні стабільного, надійного та ефективного безпроводного з'єднання в умовах значної щільності користувачів.

1.1.2 Загальна характеристика алгоритму

Алгоритм роботи mesh-мережі при великій щільності користувачів враховує потребу в ефективній маршрутизації, оптимізації пропускну здатності, відновленні зв'язку при збоях і підтримці високої надійності в умовах великої кількості підключених пристроїв. Mesh-мережі мають унікальні можливості завдяки тому, що кожен вузол в мережі може виконувати функцію ретранслятора, що дозволяє створювати стабільні маршрути навіть у складних умовах.

Ключові етапи алгоритму роботи mesh-мережі при високій щільності користувачів:

1. Динамічне створення мережевої топології

В умовах високої щільності користувачів топологія mesh-мережі змінюється в залежності від того, де з'являються нові пристрої, як вони переміщуються, або як змінюється інфраструктура (наприклад, збої в роботі одного з вузлів). Тому:

- Визначається місце розташування вузлів. Кожен пристрій або точка доступу у mesh-мережі може стати активним вузлом, що ретранслює сигнал і передає дані.
- Автоматично встановлюються з'єднання між новими пристроями, що додаються до мережі, і вже існуючими вузлами.
- Відбувається оновлення топології: мережа постійно оновлює свої з'єднання, коли користувачі переміщуються, з'являються нові пристрої або один з вузлів виходить з ладу.

2. Маршрутизація та вибір оптимальних маршрутів

У mesh-мережах маршрутизація здійснюється через кілька можливих шляхів, що дозволяє оптимізувати передачу даних і уникати перевантаження одних маршрутів:

- Протоколи маршрутизації, такі як OLSR (Optimized Link State Routing) або AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector), використовуються для динамічного визначення найкращих маршрутів.
- Адаптивний вибір маршруту: в умовах високої щільності користувачів може змінюватися якість зв'язку між вузлами через перевантаження або інтерференцію. Протоколи маршрутизації в реальному часі вибирають маршрути, що мають найкращі характеристики (наприклад, найменші затримки або найменше навантаження).
- Оновлення маршруту на основі змін у мережі: при великій кількості пристроїв маршрути можуть бути змінені в реальному часі залежно від того, як змінюється мережа, і які маршрути стають менш ефективними через навантаження або помилки.

3. Розподіл навантаження та баланс пропускної здатності

Оскільки в умовах високої щільності користувачів мережа може бути перевантажена, необхідно правильно розподіляти навантаження між усіма вузлами:

- Балансування навантаження: алгоритми визначають, які вузли або маршрути повинні обробляти більшу кількість трафіку, а які – менше, з урахуванням пропускної здатності кожного з'єднання та доступних ресурсів.
- Динамічне перенаправлення трафіку: якщо один маршрут або вузол перевантажений, система може автоматично перенаправити трафік через інші вузли або канали для зменшення затримок і збереження високої швидкості передачі даних.

4. Адаптація до зміни топології та надійність

В умовах високої щільності користувачів можуть виникати ситуації, коли вузли переміщуються, з'являються нові пристрої або деякі вузли втрачають зв'язок через переповнення каналу або інші технічні проблеми. Для підтримки стабільності мережі необхідно:

- Відновлення маршруту при збоях: mesh-мережі мають здатність автоматично відновлювати маршрути, якщо один з вузлів вийшов з ладу або зменшилась якість з'єднання.
- Використання кількох маршрутів: для забезпечення високої надійності передача даних може бути розподілена між кількома маршрутами, що забезпечує стійкість до збоїв в мережі. Протокол маршрутизації вибирає найкращий доступний шлях або застосовує декілька шляхів одночасно.

5. Зменшення інтерференції та оптимізація спектра

У середовищах з високою щільністю користувачів, де одночасно працюють багато пристроїв, може виникати інтерференція, що знижує якість зв'язку:

- Динамічне управління частотами: mesh-мережі можуть динамічно змінювати канали або частоти для кожного з'єднання для уникнення інтерференції між пристроями, які працюють на однакових частотах.
- Розподіл трафіку на різні канали або частоти для зменшення перевантаження на окремих частинах спектра.
- Використання методів просторового мультиплексування для одночасної передачі даних на різних каналах.

6. Оптимізація енергоспоживання

В умовах високої щільності користувачів кожен пристрій у мережі може бути обмежений по енергії, тому важливо забезпечити ефективне управління енергоспоживанням:

- Використання енергозберігаючих режимів: пристрої, які не активно передають або отримують дані, можуть переходити в сплячі режими для економії енергії.

- Розумне управління передачею даних: зменшення частоти передачі даних, коли інтерфейси або канали знаходяться під високим навантаженням, також може допомогти в економії енергії.
- Оптимізація рівня потужності передачі для забезпечення зв'язку при мінімальному енергоспоживанні.

7. Скалярність та забезпечення високої пропускної здатності

При великій кількості користувачів важливо забезпечити високу пропускну здатність для передачі даних без значних затримок:

- Використання багатоканальності для одночасної передачі даних через кілька каналів.
- Масштабовані протоколи маршрутизації забезпечують надійність та ефективність передачі даних навіть при великій кількості пристроїв.

Алгоритм роботи mesh-мережі при високій щільності користувачів можна розділити на такі етапи:

1. Початкове з'єднання, яке складається з підключення нових пристроїв до мережі та визначення поточного стану топології та вибір оптимальних маршрутів для зв'язку.

2. Динамічне оновлення топології: визначення руху або зміни місцезнаходження пристроїв та вибір оптимальних маршрутів для передачі даних.

3. Оптимізація передачі даних: розподіл навантаження між вузлами і динамічне відновлення маршрутів у разі збою.

4. Адаптація до змін: постійне коригування маршрутизації та пропускної здатності та зменшення інтерференції та оптимізація частот.

5. Заключний етап: постійний моніторинг мережі для забезпечення високої продуктивності та стійкості.

Таким чином, алгоритм роботи mesh-мережі в умовах високої щільності користувачів передбачає інтеграцію динамічної маршрутизації, оптимізацію розподілу навантаження, адаптацію до змінюваної топології, зменшення інтерференції і ефективне управління енергоспоживанням для забезпечення

стабільної, надійної та масштабованої роботи мережі. Зазначені етапи сприяють забезпеченню стабільного, надійного та ефективного безпроводного з'єднання в умовах значної щільності користувачів.

1.2 Мережева інфраструктура

1.2.1 Особливості роботи

Основні особливості роботи безпроводних систем в умовах відсутності мережевої інфраструктури:

1. Використання Ad-Hoc мереж

У таких умовах часто використовуються Ad-Hoc мережі — тимчасові мережі, які створюються без необхідності в інфраструктурі. Кожен пристрій в такій мережі може бути як передавачем, так і ретранслятором, що дозволяє здійснювати зв'язок між пристроями безпосередньо, або через інші пристрої (міжвузлове з'єднання).

- Переваги: Мережа може швидко адаптуватися до змін умов, таких як переміщення пристроїв, зміни в топології.
- Недоліки: Обмежена пропускна здатність, залежність від кількості пристроїв у мережі, зростаючі затримки при збільшенні відстані або кількості пристроїв.

2. Мережі Mesh

Для покращення надійності та забезпечення більшої дальності в умовах відсутності мережевої інфраструктури також можуть використовуватись mesh-мережі. Це мережі, в яких кожен вузол (пристрій) виконує функцію як передавача, так і ретранслятора для інших пристроїв. Мережа автоматично вибирає найкращі маршрути для передачі даних між пристроями, що дозволяє забезпечити стійке підключення навіть у складних умовах.

Переваги: Висока надійність та масштабованість, мережа здатна адаптуватися до змін у середовищі (наприклад, при переміщенні користувачів або зміні топології).

Недоліки: Потребує великої кількості вузлів для забезпечення належного покриття, особливо в великих або відкритих просторах.

3. Розподілене управління трафіком

У відсутності центральної мережевої інфраструктури управління трафіком здійснюється безпосередньо на рівні пристроїв у мережі, що використовують розподіл навантаження. У таких мережах важливо, щоб кожен пристрій мав можливість контролювати трафік і маршрутизувати дані так, щоб мережа залишалась максимально ефективною.

Алгоритми для оптимізації маршруту, наприклад, AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) або OLSR (Optimized Link State Routing), можуть бути використані для динамічного визначення найкращих шляхів.

Потрібно враховувати обмеження по енергоспоживанню та обчислювальних ресурсах на кожному пристрої.

4. Безпека і шифрування даних

В умовах відсутності інфраструктури традиційної безпеки, як наприклад, аутентифікація через центральний сервер або контроль доступу, важливо реалізувати мобільні протоколи безпеки для захисту даних у мережі:

- використання шифрування на рівні пристроїв для захисту переданих даних.
- використання різних методів аутентифікації для забезпечення безпеки з'єднань між пристроями.

5. Розподілені додатки та зберігання даних

В умовах відсутності звичайної інфраструктури безпроводні системи можуть використовувати розподілені додатки та зберігання даних, де дані зберігаються не на одному центральному сервері, а на численних пристроях, які взаємодіють у мережі.

Використання Peer-to-Peer (P2P) технологій для зберігання та обміну даними між користувачами без необхідності централізованого зберігання.

Можливість роботи в автономних умовах без потреби в постійному з'єднанні з центральним сервером.

6. Проблеми з енергоспоживанням

У відсутності традиційної інфраструктури часто доводиться працювати в умовах обмеженого енергопостачання, тому оптимізація енергоспоживання є важливим аспектом. Багато безпроводних пристроїв (особливо мобільні телефони або датчики) повинні мати можливість працювати з мінімальним споживанням енергії.

- Рішення: Використання енергозберігаючих режимів та протоколів для зниження енергоспоживання, таких як Bluetooth Low Energy (BLE) або Zigbee.
- Проблеми: Обмеження ресурсів на пристроях може призвести до зниження пропускної здатності або обмеження кількості одночасно активних пристроїв.

7. Підвищена надійність та адаптивність

Безпроводні системи в умовах відсутності інфраструктури повинні бути адаптованими до змінних умов середовища:

- Адаптивні мережеві протоколи можуть допомогти зменшити вплив динамічних змін у середовищі (наприклад, коли користувачі переміщуються або підключають нові пристрої).
- Мережі повинні швидко відновлювати зв'язок у разі збоїв або відмови вузлів.

8. Локальна передача даних

Якщо глобальний доступ до мережі відсутній, система може використовувати локальні канали передачі даних, такі як Wi-Fi Direct або Bluetooth, для забезпечення зв'язку між пристроями без необхідності в інтернет-підключенні.

- Переваги: Висока швидкість локальної передачі та невеликий енергозатратний характер таких з'єднань.
- Обмеження: Обмежена дальність та пропускна здатність, яка може стати проблемою при великій кількості користувачів.

Приклад застосування:

1. Польові умови або операції з порятунку: У випадку природних катастроф або в умовах віддалених місцевостей без традиційної мережевої інфраструктури, рятувальні команди можуть використовувати безпроводні Ad-Hoc або mesh-мережі для обміну інформацією, координування дій і передачі даних між пристроями на місці.
2. Військові або гуманітарні операції: Військові підрозділи можуть використовувати mesh-мережі для забезпечення зв'язку в умовах, коли немає доступу до традиційних мереж або базових станцій.

Отже, безпроводні системи в умовах відсутності мережевої інфраструктури повинні бути гнучкими та адаптивними. Використання Ad-Hoc мереж, mesh-мереж, розподілених додатків і технологій з енергозбереженням дозволяє забезпечити ефективний зв'язок навіть у відсутності традиційних мережевих елементів. Технології, що підтримують дистрибуцію трафіку та автоматичну адаптацію до змін у мережі, є основою для надійної роботи в таких умовах.

1.2.2 Загальна характеристика алгоритму

Без інфраструктури (наприклад, базових станцій, маршрутизаторів, точок доступу) mesh-мережа може працювати автономно, залежачи тільки від вузлів, які виступають як ретранслятори, маршрутизатори та кінцеві пристрої одночасно. Цей тип мережі особливо корисний в умовах, де відсутня центральна мережна інфраструктура або в умовах катастроф, стихійних лих або тимчасових застосувань.

Основні особливості алгоритму роботи mesh-мережі без інфраструктури:

1. Автономна та динамічна топологія. У відсутності централізованої інфраструктури мережа створюється безпосередньо з пристроїв, які взаємодіють один з одним без допомоги базових станцій чи роутерів. Кожен пристрій (вузол) має здатність з'єднуватися з іншими пристроями, передавати дані і виконувати роль маршрутизатора для інших вузлів. Топологія мережі

змінюється динамічно в залежності від того, які пристрої в даний момент підключені і доступні для маршрутизації.

2. Автоконфігурація та самоорганізація. Mesh-мережа здатна самоорганізовуватися при відсутності централізованої інфраструктури. Кожен пристрій в мережі автоматично знаходить інші пристрої поблизу і встановлює з ними з'єднання. У випадку, коли один вузол виходить з ладу або змінюється його положення, мережа автоматично коригує маршрути для забезпечення з'єднання між іншими пристроями.

3. Маршрутизація без централізованого управління. У mesh-мережах маршрутизація відбувається через децентралізовану модель, де кожен вузол бере участь у виборі маршруту передачі даних. Розрізняють маршрутизацію за запитом (on-demand) та постійно оновлювану маршрутизацію (наприклад, використовуючи протоколи типу OLSR або AODV). Протоколи маршрутизації на основі OLSR (Optimized Link State Routing) використовують стан мережі для прийняття рішень і вибору найкращих маршрутів між вузлами. Протоколи AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) виконують маршрутизацію за запитом — маршрут вибирається тільки коли він потрібен для передачі даних, що зменшує навантаження на мережу.

4. Автоматичне відновлення з'єднань. У випадку, якщо якийсь з вузлів виходить з ладу або припиняє роботу (наприклад, через переміщення пристрою чи збої в мережі), автоматично виконується пошук альтернативних шляхів для передачі даних. Перемикання маршруту може відбуватися без участі користувача або оператора, що забезпечує безперервний зв'язок між вузлами.

5. Розподіл навантаження між вузлами. Для уникнення перевантаження одного вузла і забезпечення ефективної передачі даних по мережі, виконується балансування навантаження. Деякі протоколи маршрутизації дозволяють вузлам динамічно переадресовувати трафік з одного маршруту на інший, якщо певний шлях перевантажений або є перешкоди. Алгоритм маршрутизації активно використовує нескінченні шляхи, якщо вони доступні, і при високій щільності вузлів.

6. Самовідновлення і стійкість до збоїв. У mesh-мережах важливо забезпечити стійкість до збоїв: мережа може продовжувати функціонувати навіть при часткових відмовах в мережі, оскільки дані можуть передаватися через альтернативні маршрути. Збої одного з вузлів (наприклад, через відмову обладнання або зміщення в мобільних мережах) не призводять до повного припинення функціонування мережі. Мережа автоматично змінює топологію та шукає нові шляхи, що дозволяє підтримувати зв'язок без централізованої інфраструктури.

7. Оптимізація використання спектра. При передачі даних в mesh-мережах без інфраструктури важливо ефективно використовувати доступний радіочастотний спектр. Динамічний вибір каналів: пристрої можуть динамічно змінювати канали частот для уникнення інтерференції з іншими пристроями. Когнітивні методи передачі даних дозволяють кожному вузлу використовувати ті частоти, які на момент передачі даних мають найменше навантаження.

8. Оптимізація енергоспоживання. У випадку мережі з великою кількістю мобільних пристроїв енергозбереження є важливим аспектом. Багато вузлів мережі, особливо мобільних, мають обмежену кількість енергії (акумулятори). Енергозберігаючі режими можуть включати: перехід в режим очікування при низькій активності передачі даних; оптимізацію потужності передачі для мінімізації енергоспоживання при стабільному зв'язку; використання протоколів енергозбереження, що дозволяють вузлам оптимізувати використання ресурсів під час встановлення з'єднань і передачі даних.

9. Безпека та шифрування. У відсутності централізованої інфраструктури безпека мережі стає критичним аспектом. Всі вузли мережі повинні підтримувати криптографічні протоколи для захисту даних. Використовуються методи автентифікації та шифрування для забезпечення безпеки даних, що передаються через мережу. Це важливо для захисту від атак типу "man-in-the-middle" та інших зловмисних дій.

Основні етапи алгоритму роботи mesh-мережі без інфраструктури:

1. Ініціалізація мережі:

- кожен пристрій ініціалізує своє з'єднання з іншими пристроями в радіусі досяжності.

- створення базової топології мережі за допомогою протоколів маршрутизації (OLSR, AODV).

2. Автоконфігурація та визначення маршрутів:

- вузли автоматично визначають можливі шляхи передачі даних, використовуючи протоколи для обміну інформацією про стан мережі.

- визначення найкращих шляхів для передачі даних, враховуючи наявні вузли та навантаження на маршрути.

3. Динамічне оновлення маршрутизаторів:

- у разі відмови або переміщення одного з вузлів, мережа динамічно оновлює маршрути, шукаючи альтернативні шляхи.

- використання алгоритмів адаптивної маршрутизації для мінімізації затримок і перерв у зв'язку.

4. Розподіл навантаження: урахування навантаження на канали та маршрути, перенаправлення трафіку для оптимізації роботи мережі.

5. Моніторинг і відновлення мережі:

- моніторинг стану мережі та виконання дій по відновленню з'єднань після збоїв.

- пошук альтернативних шляхів у разі виходу одного з вузлів з ладу.

6. Безпека і шифрування: включення методів шифрування і автентифікації для забезпечення конфіденційності і захисту від атак.

Таким чином, mesh-мережі в умовах відсутності інфраструктури працюють на основі динамічного створення топології, де кожен пристрій є і кінцевим користувачем, і маршрутизатором. Такі мережі самовідновлюються, адаптуються до змін, розподіляють навантаження і здатні підтримувати зв'язок навіть при виході з ладу окремих вузлів. Вони є ідеальним рішенням для тимчасових або екстремальних ситуацій, коли відсутні центральні інфраструктурні елементи.

1.3 Технологія Mesh-мереж

Mesh-мережі – це перспективний клас широкосмугових бездротових інформаційних мереж, який активно застосовується в локальних і розподілених міських бездротових системах як альтернатива WiMAX. Однією з ключових особливостей Mesh-мереж є самоорганізована архітектура, що забезпечує такі можливості: топологію «кожен з кожним», стійкість до відмов окремих вузлів, масштабованість (автоматичне розширення зони покриття) та динамічну маршрутизацію трафіку з контролем стану мережі. Mesh-мережі можуть бути як стаціонарними, так і мобільними, причому до складу мобільних вузлів можуть входити кишенькові ПК, мобільні телефони та інші пристрої.

Wi-Fi-мережі, що використовують технологію Mesh, є ефективними в промислових умовах, де потрібна висока гнучкість, масштабованість і можливість обслуговування великої кількості користувачів. Вони дозволяють автоматично відновлювати з'єднання у разі виходу з ладу окремих вузлів. Сучасні стандарти Mesh-мереж спрямовані на оптимізацію маршрутів у комірчастих безпроводних мережах (WMN – Wireless Mesh Networks) та інтеграцію їх можливостей в існуючі мережі 802.11 на рівні MAC-протоколу.

Структура WMN включає чотири основні класи пристроїв:

Mesh Point (MP) – вузол мережі, що виконує функції маршрутизації та передачі даних у комірчастій топології.

Mesh Access Point (MAP) – вузол із функцією точки доступу (AP), що дозволяє безпроводним пристроям стандарту 802.11 підключатися до Mesh-мережі.

Mesh Portal (MPP) – граничний вузол (шлюз), який забезпечує взаємодію комірчастої мережі із зовнішніми провідними або безпроводними мережами.

Stations (STA) – безпроводні пристрої, що підтримують стандарт 802.11 та підключаються до вузла MAP.

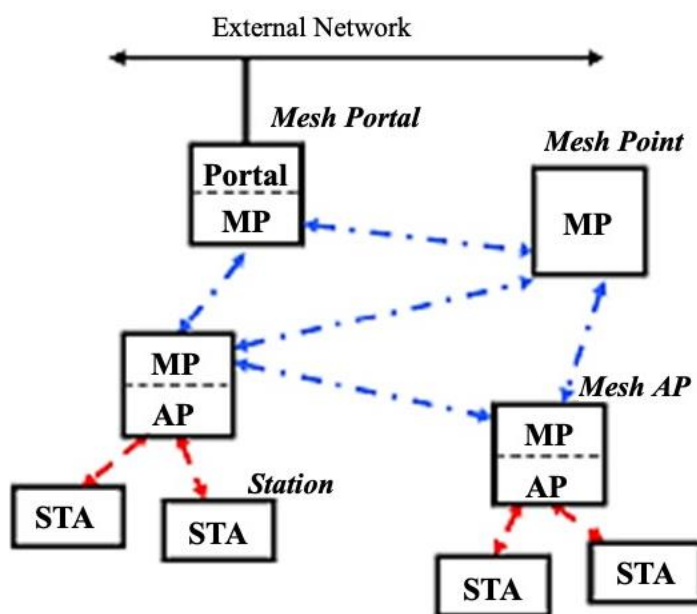


Рисунок 1.1 - Архітектура WMN мережі

У мережах стандарту 802.11 абонентські станції (STA) з'єднуються виключно з точками доступу (AP) і взаємодіють лише з ними. Точки доступу, у свою чергу, можуть підключатися до інших мереж, наприклад, Ethernet, але не обмінюються даними між собою. У Mesh-мережах, як показано на рисунку 1.1, крім термінальних станцій і точок доступу, використовуються спеціальні вузли – Mesh Points (MP). Ці пристрої можуть взаємодіяти між собою та підтримувати mesh-служби. Завдяки цьому Mesh-мережа функціонує подібно до широкомовної Ethernet-мережі, у якій усі вузли об'єднані на каналному рівні.

Важливо зазначити, що зміни у стандартах Wi-Fi для Mesh-мереж майже не впливають на фізичний рівень. Всі оновлення стосуються MAC-підрівня каналного рівня, зокрема аспектів маршрутизації пакетів, що виходить за межі початкових положень стандарту IEEE 802.11. Вирішення питань маршрутизації є ключовим для ефективної роботи Mesh-мереж.

MDA-резервування

Детермінований доступ до Mesh-мережі (Mesh Deterministic Access – MDA) – це додатковий механізм, що дозволяє отримувати доступ до

середовища у заздалегідь зарезервовані часові інтервали. Такий підхід мінімізує конкуренцію за ресурси передачі даних, що значно підвищує ймовірність своєчасної доставки інформації, чутливої до затримок, наприклад, аудіо- та відеопотоків або високопріоритетних даних.

MDA-з'єднання можливе лише між станціями, що підтримують цей механізм. У рамках MDA-резервування визначаються часові інтервали, протягом яких такі станції утримуються від передачі даних, щоб уникнути конфліктів із зарезервованим каналом.

При встановленні MDA-з'єднання вузол ініціює запит до іншої станції, вказуючи бажані часові інтервали. Одержувач аналізує можливість створення з'єднання з запропонованими параметрами та надсилає відповідь – позитивну або негативну. Якщо запитувані часові інтервали перекриваються з уже існуючими MDA-з'єднаннями, відомими отримувачу, він може запропонувати альтернативний час. Для розриву MDA-з'єднання один із учасників передає спеціальні службові елементи (MDAOP Set Teardown information element).

Усі пристрої, що підтримують MDA-резервування, повинні періодично інформувати сусідні вузли про зарезервовані інтервали. Це відбувається шляхом надсилання інформаційних елементів MDAOP Advertisements, які включаються у керуючі пакети, наприклад, бікони, або передаються через спеціальні службові кадри (MDA action frame). MDA-вузли ведуть список усіх резервувань, про які отримують інформацію через рекламні повідомлення, а також тих, у яких вони безпосередньо беруть участь.

Синхронізація та бікони.

Стандарт IEEE 802.11 підтримує два режими роботи мережі: hot spot і ad hoc.

У режимі hot spot одна зі станцій виконує роль точки доступу (AP), і передача даних відбувається виключно між нею та іншими станціями.

У режимі ad hoc станції можуть обмінюватися даними безпосередньо між собою, без використання точки доступу.

У режимі hot spot точка доступу періодично розсилає спеціальні сигнальні кадри — бікони (beacon). Вони забезпечують:

- синхронізацію годинників станцій через поле Timestamp, яке містить час передавання першого біта бікона через радіоінтерфейс;
- надання інформації про сервіси та режими роботи точки доступу.

Синхронізація станцій є важливою як на фізичному рівні (наприклад, у режимі FHSS — частотних стрибків, де всі станції повинні змінювати частоту одночасно), так і на канальному рівні, особливо для механізмів енергозбереження.

У режимі ad hoc бікони виконують аналогічну функцію, але їх передавання здійснюється децентралізовано — участь у цьому процесі беруть усі станції. Крім біконів, у цьому режимі можуть використовуватися АТІМ-кадри для реалізації механізмів енергозбереження.

Механізм передавання бікона

Передача бікона відбувається за механізмом конкурентного доступу з контролем несучої (CSMA/CA), подібно до передавання даних.

У момент TBTT (Target Beacon Transmission Time) кожна станція зупиняє свій лічильник відстрочки передавання даних і запускає таймер передавання бікона.

Таймер встановлюється на випадкову кількість слотів у діапазоні від 0 до $2 \times aCW_{min}$.

Якщо середовище залишається вільним, таймер зменшується. Якщо інша станція починає передавання, решта станцій призупиняють свої таймери на час передавання плюс інтервал DIFS.

У разі колізії (коли кілька станцій намагаються передати бікон одночасно) використовується довший інтервал EIFS.

Передавання бікона виконується тією станцією, чий таймер першим досягне нуля. Решта станцій скасовують передавання своїх біконів після отримання бікона від будь-якої іншої станції.

Енергозбереження у MAP-вузлах.

МАР-вузли завжди залишаються активними, оскільки до них можуть підключатися пристрої, що не підтримують енергозберігаючий режим. Однак для пристроїв з автономним живленням, таких як датчики, ноутбуки чи мобільні телефони, мінімізація енергоспоживання є критично важливим завданням.

Щоб мережеві вузли могли сигналізувати про підтримку енергозберігаючого режиму, використовується спеціальне інформаційне поле у біконах та відповідях на пробні пакети. Перехід між активним і енергозберігаючим режимами можливий лише після того, як пристрій повідомить усі підключені до нього вузли про зміну стану. Для цього застосовуються null-data кадри — спеціальні порожні пакети, які інформують сусідів про перехід у режим енергозбереження.

Маршрутизація у WMN

У бездротових комірчастих мережах (WMN) використовуються три основні підходи до маршрутизації:

Реактивні протоколи — маршрут до вузла встановлюється за потреби, тобто в момент передачі даних.

Проактивні протоколи — маршрути до більшості вузлів заздалегідь зберігаються в маршрутній таблиці.

Гібридні протоколи — поєднують обидва підходи, що дозволяє балансувати між швидкістю встановлення маршруту та ефективністю використання ресурсів.

Одним із найпоширеніших гібридних протоколів у WMN є HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol), який може працювати як у проактивному, так і в реактивному режимі.

Кожен з підходів має свої переваги та недоліки:

Проактивні протоколи (наприклад, RA-OLSR) забезпечують мінімальний час встановлення маршруту, але створюють додаткове навантаження на мережу через обмін службовими пакетами.

Реактивні протоколи підходять для динамічних мереж, оскільки не витрачають ресурси на постійне оновлення маршрутів, проте їхнім недоліком є збільшена затримка при встановленні нового з'єднання.

Гібридні протоколи, такі як HWMP, адаптивно комбінують ці підходи залежно від умов роботи мережі.

Для стабільних WMN-мереж, які мають меншу динаміку змін у порівнянні з традиційними ad hoc-мережами, доцільніше використовувати проактивні (RA-OLSR) або гібридні (HWMP) протоколи.

Метрики та профілі маршрутизації

Стандарт WMN використовує систему профілів маршрутизації, що має формат: {ідентифікатор профілю; ідентифікатор протоколу маршрутизації; ідентифікатор метрики}.

Обов'язковими параметрами є:

- протокол маршрутизації – HWMP;
- метрика – Airtime Link Metric, яка визначає ефективність з'єднання між вузлами.

Метрика Airtime Link Metric базується на оцінці часу, необхідного для передачі пакета до сусіднього вузла, що розраховується за спеціальною формулою.

$$C_d = \left(O \frac{B_t}{r} \right) \frac{1}{1-e_f}, \quad (1.1)$$

де O - константа, що визначає час доступу до каналу залежно від фізичної реалізації; B_t - кількість бітів у тестовому пакеті (8192); r - швидкість передачі даних у каналі (Мбіт/с); e_f - ймовірність виникнення помилки у тестовому пакеті (вимірюється експериментально для пакетів довжиною B_t).

За умовою, що помилки в пакеті виникають незалежно одна від одної, ймовірність помилки e_f можна обчислити так:

$$e_f = 1 - (1 - p_0)^n \approx np_0, \quad (1.2)$$

де p_0 - ймовірність виникнення бітової помилки під час передачі; n - кількість бітів у пакеті.

Метрика Airtime Link Metric вимірює час (у секундах), необхідний для передачі пробного пакета довжиною B_t , враховуючи можливі повторні передачі у разі втрат у каналі. Хоча стандарт не містить конкретних вказівок щодо визначення параметрів r та e_f , ймовірно, їх оцінюють за допомогою періодичної розсилки пробних пакетів розміром $B_t = 8192$ біт [11].

Протокол маршрутизації HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) – це гібридний протокол маршрутизації, який підтримує як реактивний, так і проактивний режими. Така гнучкість дозволяє адаптувати його до різних сценаріїв роботи мережі.

На рисунку 1.2 наведено приклад побудови маршруту за допомогою HWMP.

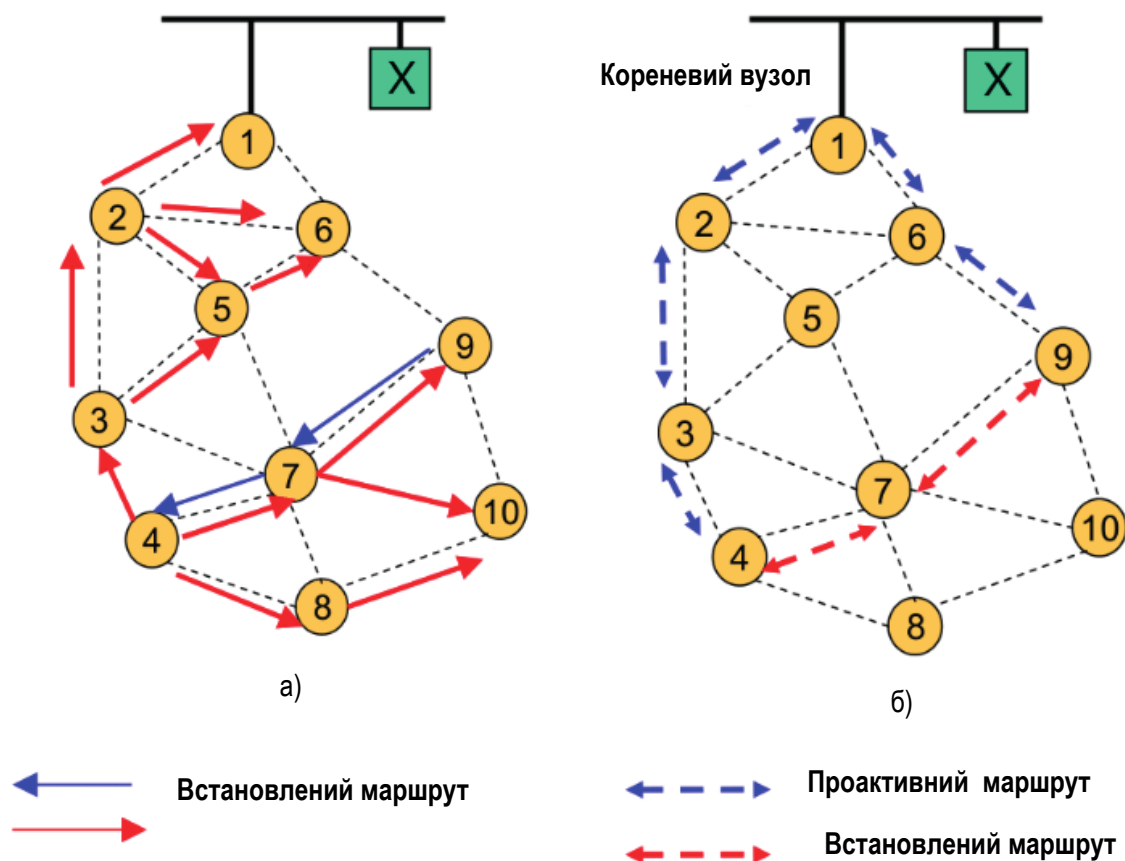


Рисунок 1.2 – Приклад побудови маршруту від вузла 4 до вузла 9 в реактивному (а) та проактивному (б) режимах

У реактивному режимі маршрутизації таблиці маршрутів у mesh-вузлах створюються безпосередньо перед передачею даних у відповідь на запит маршруту (RREQ).

Перед початком передачі вузол-відправник формує широкомовний запит Path Request (RREQ), який надсилається всім сусіднім вузлам. Кожен проміжний вузол оновлює поле метрики відповідно до своїх параметрів та пересилає запит далі.

Коли вузол-одержувач отримує RREQ, він вже містить повну інформацію про метрику всього маршруту. Одержувач формує відповідь Path Reply (RREP) та надсилає її назад до відправника.

Після отримання RREP відправник аналізує метрику маршруту та приймає рішення про початок передачі даних. Процес ілюструється на рисунку 1.2, а.

На відміну від реактивного режиму, де маршрути створюються лише за потреби, проактивний режим передбачає використання кореневого mesh-вузла.

Цей вузол періодично надсилає широкомовні запити RREQ, формуючи дерево маршрутів, у якому він виступає коренем. Всі mesh-вузли заздалегідь мають таблиці маршрутизації, що значно скорочує час встановлення з'єднання при передачі даних. Процес ілюструється на рисунку 1.2, б.

1.4 Висновки до розділу

Розглянуто особливості функціонування безпроводних систем в умовах підвищеної щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури.

Показано, що в умовах високої щільності користувачів безпроводні системи повинні бути адаптовані до режимів високих навантажень, підвищеного рівня завад, збільшення пропускної здатності та швидкого з'єднання. Це може, зокрема, забезпечити технологія mesh-мереж. Mesh-мережі є мережами, де кожен пристрій або точка доступу виступає не лише як клієнт

чи точка зв'язку, а й як ретранслятор сигналу для інших пристроїв або точок доступу. Це дозволяє створити більш гнучку та масштабовану інфраструктуру.

Зазначається також, що робота безпроводних систем в умовах відсутності мережевої інфраструктури потребує використання спеціальних технологій для забезпечення зв'язку і передачі даних без прив'язки до традиційних мережевих елементів: базових станцій або точок доступу. Така ситуація може виникати в умовах природних катастроф, віддалених регіонах, в польових умовах або на великих заходах, де немає доступу до стандартної інфраструктури мобільних або Wi-Fi мереж. Проведений аналіз показав, що алгоритм роботи mesh-мережі без інфраструктури може працювати автономно. Цей тип мережі особливо корисний в умовах, де відсутня центральна мережна інфраструктура або для тимчасових застосувань.

Розглянуто сутність технології mesh-мереж. Показано, що такі мережі забезпечують гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів, створюючи розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла. Mesh-мережі дозволяють зменшити затримки, інтерференцію та перевантаження, забезпечуючи більш стабільний і надійний безпроводний зв'язок у складних умовах.

2 ПРОТОКОЛИ ТА МАРШРУТИЗАЦІЯ В MESH-МЕРЕЖАХ

2.1 Протоколи маршрутизації

Оскільки мобільні мережі, що самоорганізуються, мають змінну топологію, то для її організації необхідно вирішити, як ефективно побудувати маршрут передачі пакетів між джерелом і адресатом.

Прийнято протоколи маршрутизації таких мереж поділяти на чотири основні групи, рис. 2.1 [2]:

- проактивні чи табличні (proactive, table-driven);
- реактивні або працюючі на запит (reactive, table-driven);
- гібридні (hybrid);
- дистанційно-векторна геомаршрутизація (DVG).

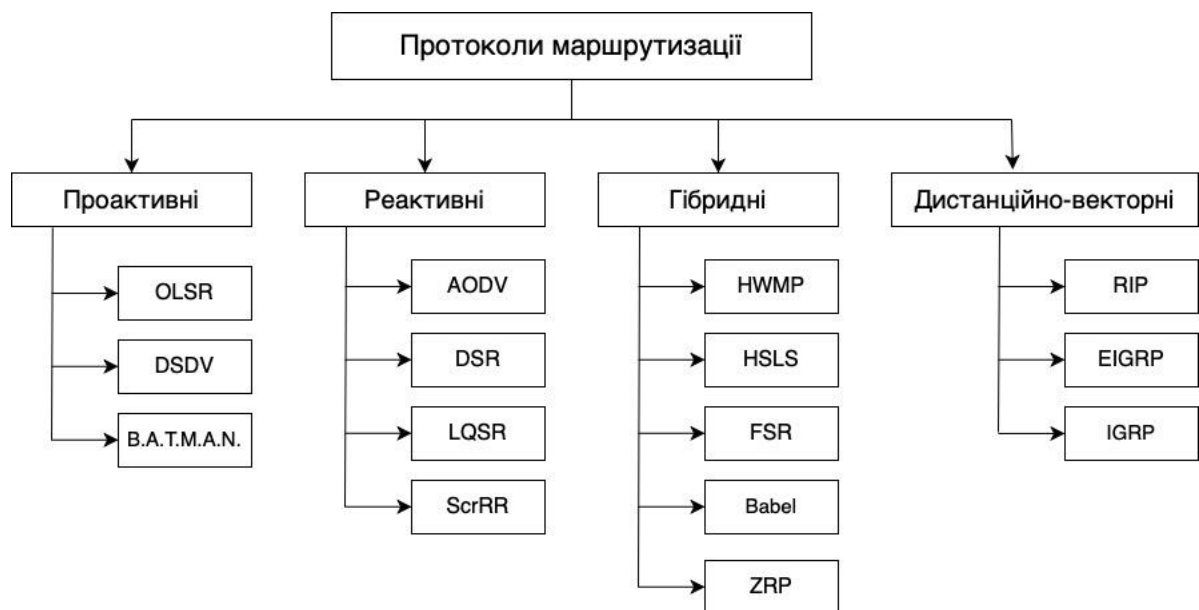


Рисунок 2.1 – Протоколи маршрутизації в самоорганізованих мережах

Проактивні протоколи забезпечують наявність таблиці маршрутизації на кожному вузлі, що містить маршрути до всіх абонентів мережі. Для підтримки актуальності цієї інформації вузли періодично обмінюються керуючими повідомленнями. Прикладами таких протоколів є OLSR, DSDV та

В.А.Т.М.А.Н.. Однак із зростанням кількості вузлів та їх мобільності вони можуть створювати значне навантаження на мережу та споживати більше енергоресурсів.

Реактивні протоколи не вимагають попереднього збереження маршрутів. Вузол визначає шлях до пункту призначення лише за потреби, використовуючи вже наявний маршрут або створюючи новий на основі доступних каналів. Основний недолік цього підходу— збільшення затримки при встановленні маршруту у великих і динамічних мережах. До реактивних протоколів належать DSR та AODV.

Гібридні протоколи поєднують підходи проактивних та реактивних протоколів, що дозволяє ефективніше використовувати ресурси мережі. Вони застосовують ієрархічне структурування вузлів, що зменшує навантаження, але ускладнює реалізацію та знижує ефективність маршрутизації через необхідність управління кластерами. Прикладом є HWMP.

Окремо варто виділити протокол DVG (дистанційно-векторна геомаршрутизація), який використовує періодичну широкомовну розсилку hello-повідомлень. Вони містять ідентифікатор вузла, його географічні координати та час надсилання. Щоб уникнути надмірного навантаження, кожне hello-повідомлення ретранслюється вузлом лише один раз, якщо воно ще не було оброблене.

Алгоритм обробки hello-повідомлень:

Вузол отримує hello-повідомлення та зчитує з нього ідентифікатор відправника, координати та час відправлення.

Якщо повідомлення вже було отримане раніше, його подальша обробка припиняється.

Якщо повідомлення нове, інформація заноситься в кеш, а сам пакет ретранслюється.

Після цього оновлюється час актуальності маршруту та оновлюється вектор маршрутизації до вузла-джерела.

Загалом існує багато різних схем маршрутизації для mesh-мереж, які конкурують та доповнюють одна одну. Ось деякі з них:

Проактивні протоколи: OLSR, DSDV, B.A.T.M.A.N., Babel, HSLS

Реактивні протоколи: AODV, DSR, TORA, ZRP

Гібридні протоколи: HWMP, ODMRP

Інші: OSPF, PWRP, RPL

Важливо зазначити, що адаптація стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) до mesh-мереж переважно відбувається на рівні MAC-підрівня канального рівня моделі OSI, не змінюючи фізичний рівень. Також стандарти 802.11 передбачають механізми маршрутизації, що виходять за межі традиційного застосування Wi-Fi. Структура MAC-пакетів у mesh-мережах зображена на рисунку 2.2.

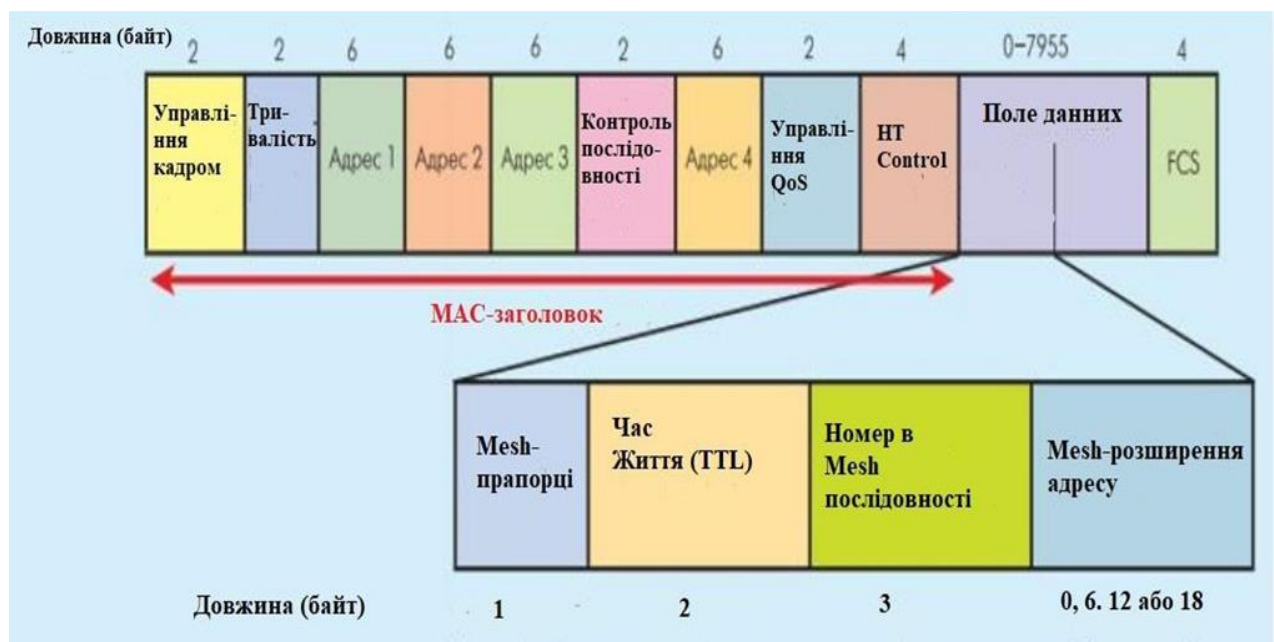


Рисунок 2.2 - Структура пакетів MAC-рівня в Mesh-мережі

Однією з ключових проблем маршрутизації в мобільних мережах є постійні зміни топології, що вимагає безперервного оновлення маршрутів між мобільними вузлами та інфраструктурою. Для цього зазвичай застосовуються протоколи динамічної маршрутизації на мережевому рівні, розроблені спеціально для мобільних мереж, зокрема OLSR, B.A.T.M.A.N., AODV, DSDV.

2.1.1 Протокол В.А.Т.М.А.Н.

В.А.Т.М.А.Н. (Better Approach to Mobile Ad hoc Networking) – це проактивний протокол маршрутизації, призначений для бездротових mesh-мереж, включаючи мобільні ad-hoc мережі (MANET) та інші динамічні середовища. Його головна стратегія полягає у визначенні для кожного вузла в мережі оптимального сусіда (з одним переходом), який слугує шлюзом для зв'язку з пунктом призначення.

Протокол зберігає лише інформацію про наступний "стрибок", а не повний маршрут, що значно прискорює обробку та покращує ефективність роботи. Завдяки цьому В.А.Т.М.А.Н. дозволяє швидко адаптуватися до змін у топології мережі без необхідності розрахунку детальних маршрутів.

Особливості В.А.Т.М.А.Н.:

Обробка втрати пакетів: Протокол враховує втрати пакетів у зашумлених середовищах за допомогою статистичного аналізу, що дозволяє приймати ефективні рішення без залежності від стану або топології інших вузлів.

Мінімальне використання ресурсів: Пакети протоколу містять мінімальну необхідну інформацію, що зменшує накладні витрати та спрощує маршрутизацію.

Надійність: Втрачені пакети не компенсуються резервуванням, але враховуються для коригування маршрутів, що допомагає уникнути зациклювань та підвищує стабільність мережі.

Переваги:

Техніка forwarding: Використовує проміжні вузли для пересилання даних, що підвищує гнучкість маршрутизації.

Робота на каналному рівні (Layer 2): Автоматично виявляє та підтримує маршрути, забезпечуючи ефективну передачу даних між вузлами.

Адаптивність до змін: Добре підходить для динамічних мереж з частими змінами топології.

Відсутність централізованого контролю: Дозволяє працювати в децентралізованих мережах, що підвищує їхню стійкість.

2.1.2 Протокол AODV

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) – це реактивний протокол маршрутизації, який формує топологію мережі на вимогу. Це означає, що маршрути встановлюються лише тоді, коли вузлу необхідно передати дані.

Якщо вузол А хоче надіслати дані до вузла В, але не має маршруту до нього, він генерує та розсилає ширококомовний запит RREQ (Route Request). Запит передається сусіднім вузлам, які своєю чергою ретранслюють його далі, записуючи інформацію про маршрут. Таким чином, кожен вузол, що отримує RREQ, знає шлях, яким запит до нього дійшов.

Зрештою, запит досягає або вузла В, або проміжного вузла, який уже має відомий маршрут до В. У відповідь відправляється RREP (Route Reply), але вже не ширококомовно, а спрямовано назад по знайденому маршруту. Це дозволяє швидко вибудувати двосторонній шлях передачі даних.

Як тільки вузол А отримує RREP, він негайно починає передачу даних цим маршрутом. Якщо пізніше з'являється коротший шлях, вузол автоматично перемикається на нього.

Основні характеристики AODV:

- динамічна побудова маршрутів – обчислення маршруту відбувається за допомогою запитів RREQ та відповідей RREP;
- оптимізація передачі – після встановлення маршруту пакети передаються без додаткової маршрутної інформації, що зменшує накладні витрати;
- гнучкість і адаптивність – підтримує оновлення маршрутів у разі змін у топології мережі.

Переваги:

- економія ресурсів – маршрути формуються лише за необхідності, що знижує загальне навантаження на мережу;
- швидка адаптація – маршрути автоматично оновлюються у разі появи більш ефективного шляху;

- підтримка мобільних мереж – добре працює у динамічних середовищах із частими змінами підключень.

2.1.3 Протокол HWMP

Гібридний протокол маршрутизації HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) є частиною стандарту IEEE 802.11s і використовується для організації бездротових Mesh-мереж. Його основою є протокол AODV (RFC 3561), а також механізм маршрутизації на основі дерева.

HWMP працює на базі Peer Link Management, що дає змогу кожному вузлу виявляти та контролювати своїх сусідів. Якщо один із вузлів має підключення до дротової інфраструктури, протокол використовує вже зібрану карту мережі та вибирає оптимальні шляхи без необхідності додаткового обчислення маршрутів.

HWMP підтримує два способи пошуку маршрутів:

Реактивний метод – аналогічно AODV, маршрут створюється лише у момент потреби передати дані.

Проактивний метод – маршрути формуються заздалегідь, незалежно від поточних потреб передавання, що забезпечує швидкий доступ до оптимальних шляхів. У цьому випадку кореневий вузол ініціює побудову графа маршрутів, що робить мережу централізованою.

Основні особливості HWMP:

Гібридний підхід – поєднує ієрархічну маршрутизацію (на основі дерева) з логікою маршрутизації на вимогу (AODV).

Робота на каналному рівні (ISO 2) – замість класичної маршрутизації на рівні IP (ISO 3) використовує MAC-адреси для визначення шляхів.

Відкритий стандарт – розроблений для заміни пропрієтарних рішень, таких як Meraki, дозволяючи однорангову маршрутизацію через відкриті прошивки.

Інтеграція в операційні системи – реалізація 802.11s (open80211s) була включена до ядра Linux компанією Cozybit Inc., а FreeBSD підтримує HWMP, починаючи з версії 8.0.

Переваги HWMP:

Гнучкість – адаптується до змін у топології мережі.

Оптимізація маршрутів – використовує як алгоритми мінімізації затримки, так і маршрутизацію на основі відстані.

Висока ефективність у густонаселених мережах – добре працює в умовах значної кількості вузлів.

Поєднання переваг статичної та динамічної маршрутизації, що робить його універсальним для різних сценаріїв.

2.1.4 Протокол Optimized Link State Rout (OLSR)

Optimized Link State Routing (OLSR) – це протокол маршрутизації для мобільних мереж Ad-Hoc, розроблений робочою групою IETF MANET. Він є вдосконаленою версією алгоритму стану зв'язків (Pure Link State), оптимізованою для динамічних мереж.

Основна концепція OLSR – використання багатоточкових реле (MPR). Набір MPR формується таким чином, щоб охопити всі вузли в радіусі двох переходів. Завдяки цьому значно зменшується кількість широкомовного трафіку, оскільки тільки вузли MPR ретранслюють контрольні повідомлення.

Механізм роботи OLSR включає:

HELLO-повідомлення – кожен вузол періодично відправляє їх для виявлення сусідів і визначення вузлів, розташованих на відстані двох переходів.

ТС-повідомлення (Topology Control) – генеруються вузлами MPR для інформування про зв'язки між ними та вузлами, які їх вибрали. Це дає змогу створювати часткову топологічну карту мережі без зайвого навантаження на мережу.

Алгоритм найкоротшого шляху – використовується для розрахунку таблиць маршрутизації, що дозволяє кожному вузлу ефективно знаходити оптимальні маршрути.

Основні особливості OLSR:

Протокол "Link State" – вузли обмінюються інформацією про стан своїх з'єднань, що покращує точність маршрутизації.

Регулярне оновлення маршрутів – знижує ймовірність втрати або пошкодження маршрутів, забезпечуючи стабільність передачі даних.

Ефективний вибір MPR – чим менша кількість вузлів у MPR, тим нижчі витрати мережевих ресурсів.

Переваги OLSR:

Зниження затримок – маршрути оновлюються без необхідності чекати на запити.

Оптимізація маршрутизації – передача даних здійснюється на основі актуальної топології мережі.

Зменшення трафіку управління – завдяки механізму MPR лише частина вузлів бере участь у ретрансляції контрольних повідомлень.

OLSR є ефективним рішенням для великих і динамічних бездротових мереж, де важливо мінімізувати накладні витрати та забезпечити швидку адаптацію до змін у топології.

2.1.5 Протокол DSR

Динамічна маршрутизація від джерела (Dynamic Source Routing, DSR)

DSR – це протокол маршрутизації для мережі mesh, який подібний до AODV, оскільки формує маршрути на вимогу за допомогою широкомовного запиту. Однак головна відмінність DSR полягає в тому, що він зберігає всю інформацію про маршрут у кожному пакеті, що дозволяє уникнути підтримки таблиць маршрутизації на окремих вузлах.

Основні особливості DSR:

Маршрут вказується безпосередньо у заголовку пакета (Source Routing).

Повний список вузлів маршруту додається до кожного пакета, що дозволяє отримувачу знати шлях проходження даних.

Відсутність необхідності в таблицях маршрутизації на кожному вузлі, оскільки маршрути передаються разом із пакетом.

Переваги DSR:

Зниження навантаження на мережу, оскільки маршрути не зберігаються глобально, а передаються у самих пакетах.

Гнучкість і динамічне оновлення маршрутів, що робить DSR ефективним для мобільних мереж із часто змінюваною топологією.

DSR є оптимальним вибором для динамічних та високомобільних мереж, де важлива гнучкість маршрутизації та мінімізація обчислювальних витрат на підтримку таблиць.

2.2 Шляхи підвищення ефективності маршрутизації даних

У даний час mesh-мережі є об'єктом дослідження та засобом передачі даних при нерозвиненій телекомунікаційній інфраструктурі. Огляд сучасного стану технологій побудови mesh-мереж показав, що основною проблемою при їх організації залишається ефективна маршрутизація даних, що впливає на швидкість доставки даних, надійність та тривалість роботи вузлів. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати мурашиний алгоритм на основі багатоантенних алгоритмів фізичного рівня, оскільки дані алгоритми довели свою ефективність у задачах пошуку найкоротшого маршруту при вирішенні транспортних завдань та пошуків оптимальних маршрутів між вузлами транспортної мережі.

Мурашині алгоритми маршрутизації (або ant-based routing protocols) є однією з концепцій, що черпає натхнення від поведінки мурашок у природі. Ці протоколи базуються на принципі природної поведінки мурашок при пошуку їжі: вони залишають хімічні сліди (феромони), які допомагають іншим мурашкам знайти найкращий шлях до джерела їжі. У контексті мережевих

технологій, це можна інтерпретувати як пошук оптимальних маршрутів через мережу за допомогою «феромонів» у вигляді віртуальних міток або інформації, що передається через мережу.

Mesh-мережа (коміркова мережа) – це мережева топологія, в якій робочі станції з'єднуються одна з одною і здатні брати на себе роль комутатора для решти учасників мережі [1]. Основна відмінність Mesh-мережі від централізованих систем у тому, що у них усі вузли рівноправні – кожен вузол може бути як маршрутизатором (роутером), так і мостом. В даний час коміркові мережі продовжують залишатися об'єктом дослідження та засобом вирішення завдань передачі інформації в умовах з нерозвиненою телекомунікаційною інфраструктурою.

Mesh-мережі мають ряд недоліків, що заважають їх широкому застосуванню [2]:

- проведення реального тестування мережі великого розміру досить проблематично внаслідок високої складності її реалізації;
- обмеженість ресурсу джерела живлення мобільних вузлів;
- складність маршрутизації даних;
- складність зв'язку пристроїв між собою при використанні середовища передачі даних Wi-Fi.

Незважаючи на наявні публікації та запропоновані варіанти організації Mesh-мереж, остаточно зазначені недоліки не подолані. В цілому, до сьогодення залишаються актуальними роботи, присвячені впливу різних параметрів (розмір пакета, потужність сигналу, швидкість передачі даних тощо) на якість передачі даних у бездротових Mesh-мережах. Таким чином, дослідження, присвячені підвищенню ефективності Mesh-мереж залишаються актуальними.

При запуску Mesh-мережі необхідно вирішувати безліч завдань маршрутизації, одночасно поєднуючи це з шифруванням переданої інформації та можливістю оверлейного режиму роботи. Складність задач маршрутизації

призвела до створення великої кількості протоколів, частина з яких розглянута вище.

Узагальнюючи роботи [2-8], можна виділити найважливіші з погляду продуктивності Mesh-мережі експлуатаційні характеристики:

1. Автоконфігурована маршрутизація – відсутня необхідність ручного налаштування маршрутизації в мережі.
2. Розподілена маршрутизація – вузли обмінюються інформацією про маршрутизацію.
3. Об'єднання мереж – вміння поєднувати мережі через звичайний інтернет.
4. Автоналаштування – дозволяє користуватися мережею без встановлення будь-якого стороннього програмного забезпечення.
5. Авто-призначення адреси - клієнт сам вибирає собі адресу і може не міняти її, переходячи з однієї підмережі до іншої. Нема єдиного центру видачі адрес.
6. Розробка – статус розробки протоколу (завершено чи стадії розробки).
7. Підтримка операційних систем – які операційні системи можуть бути повноцінними учасниками мережі.
8. IPv4/v6 – за яким протоколом працює мережа – IPv4 чи IPv6.
9. DNS – наявність сервера доменних імен, що дозволяє отримувати IP-адресу ресурсу за іменем хоста.

З наведених протоколів [3-5] найповніший облік зазначених характеристик здійснюється протоколом CJDNS.

Огляд сучасного стану технологій побудови Mesh-мереж показав, що основною проблемою при їх організації залишається ефективна маршрутизація даних, що впливає на швидкість доставки даних, надійність та тривалість роботи вузлів.

Одним із відносно нових та перспективних способів пошуку оптимальних маршрутів є мурашині алгоритми на основі багатоантенних алгоритмів фізичного рівня. Мурашині алгоритми довели свою ефективність у завданнях

пошуку найкоротшого маршруту при вирішенні транспортних завдань та пошуку оптимальних маршрутів між вузлами транспортної мережі. До переваг мурашиного алгоритму слід віднести динамічну адаптацію до змінних умов середовища поширення даних. При цьому в термінах мурашиного алгоритму під транспортом (вантажівкою) розуміється пакет з даними, вантаж, що перевозиться – розмір пакета, колонія чи депо – вузол мережі, феромон – коефіцієнт, що визначає переважний маршрут до наступного вузла мережі.

У роботі [7] автор вирішує завдання лінійного бульового програмування з одночасним урахуванням низки вихідних умов: безліч критеріїв оцінки рішення, асиметричність матриць вхідних даних, множинність депо та різнорідності парку з обмеженою вантажопідйомністю. Був розроблений метод мультиколоніальної мурашиної системи для вирішення задач комбінаторної оптимізації. Цей метод передбачає пошук складеного рішення у вигляді безлічі однотипних компонентів, при цьому на основі механізму стигмергії одночасно взаємодіють кілька колоній у спільному просторі пошуку. При цьому кожна колонія вирішує своє завдання, формуючи окрему компоненту у загальному рішенні.

На відміну від точних методів, розроблений алгоритм [7] має поліноміальну складність, що дозволяє ефективно застосовувати його під час вирішення задач більшої розмірності. Перевага розробленого алгоритму полягає в суміщенні етапів розбиття вихідного графа на підграфи та формування маршрутів, за рахунок чого виключається можливість втрати перспективних рішень у разі роздільного виконання зазначених етапів. Запропонований в [7] алгоритм побудови оптимальних маршрутів вантажоперевезень може бути адаптовано до задач побудови алгоритмів маршрутизації Mesh-мереж.

Метод мультиколоніальної мурашиної системи пропонується для вирішення узагальнених варіантів завдань комбінаторної оптимізації, в яких подібно до поставленої VRP масштабовано кількість рішень деякого відомого окремого випадку, для якого відоме застосування традиційного мурашиного

алгоритму [7, 8]. Такі узагальнені завдання мають безліч подібних підзавдань і передбачають пошук складеного рішення.

Процес побудови рішення в запропонованій мультиколоніальній мурашиній системі здійснюється у термінах теорії графів. Залежно від типу завдання на кожній ітерації мурашиного алгоритму відбувається формування рішення мурахою у вигляді послідовності виборів станів, дій, пунктів призначень тощо, що позначаються як вершини графа. Насамперед формуються групи мурах, що включають по одному представнику від кожної колонії. По суті кожна така міжколоніальна група є заміною окремої мурахи традиційного варіанту алгоритму. Мурахи групи в результаті «жеребкування» крок за кроком формують рішення, включаючи вершини на кожному кроці в порядку, що визначається ймовірно на основі об'єднаної множини альтернатив.

Мураха в групі k , що належить колонії x , включить у свою частину рішення вершину i на ітерації t з нормалізованою ймовірністю:

$$p_{x,i}^k(t) = \frac{[\tau_{x,i}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,i}^k]^\beta}{\sum_{(y \in Y) \sum (j \in j^k)} [\tau_{x,i}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,i}^k]^\beta}, \quad (2.1)$$

де Y – множина колоній; j^k – множина доступних вершин для групи k ; $\eta_{x,i}^k$ – апіорна принадність альтернативи, зворотна до вартості переходу з поточної вершини мурахи групи k колонії x до вершини i ; $\tau_{x,i}^k$ – апіорна ефективність альтернативи, яка визначається кількістю феромона колонії x на переході з поточної вершини мурахи групи k колонії x до вершини i ; α, β – параметри алгоритма, що налаштовуються.

Щоб виключити багаторазове повторення розрахунку суми добутків у знаменнику формули, при програмній реалізації доцільно здійснювати нормалізацію в останню чергу. Для цього пропонується використати спочатку формулу розрахунку ненормалізованих ймовірностей (2):

$$p_{x,i}^k(t) = [\tau_{x,i}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,i}^k]^\beta. \quad (2.2)$$

Після цього одноразово розрахувати суму отриманих значень ненормалізованих ймовірностей усієї групи k :

$$p^k(t) = \frac{p_{x,i}^k(t)}{\sum_{(y \in Y)} \sum_{(j \in j^k)} p_{y,j}^k(t)}. \quad (2.3)$$

Потім виконати нормалізацію для кожного значення за формулою

$$p_{i,x}^k(t) = \frac{p_{x,i}^k(t)}{p^k(t)}. \quad (2.4)$$

Якщо потрібна агресивніша стратегія поділу вершин між колоніями з метою підвищення якості самих маршрутів, може застосовуватися ускладнена формула розрахунку ненормалізованої ймовірності:

$$p_{i,x}^k(t) = \frac{[\tau_{x,i}^k(t)]^\alpha \cdot [\eta_{x,i}^k]^\beta}{[\sum_{(y \in Y), z \neq x} \tau_{z,i}^k(t)]^\gamma}, \quad (2.5)$$

де γ – новий параметр мурашиного алгоритму, який контролює відразливий вплив феромона на інші колонії. Очевидно, наявність у знаменнику додаткової суми позначається на часі розрахунку ймовірностей, особливо при великій кількості колоній, а ще один керований параметр ускладнює налаштування алгоритму.

Як тільки безліч альтернатив виявиться порожнім, тобто всі вершини будуть відвідані, здійснюється повернення всіх мурах у стартову вершину та рішення вважається сформованим. Так само будують свої рішення всі міжколоніальні групи мурах.

Для кожного рішення збільшується кількість феромону на дугах, що використовуються відповідними колоніями, обернено пропорційна до сумарної

ваги всіх дуг рішення, а потім традиційним чином відбувається часткове повсюдне випаровування феромону.

На рис. 2.3 показана діаграма послідовності роботи мобільного пристрою з використанням мурашиного алгоритму для побудови маршруту передачі даних.

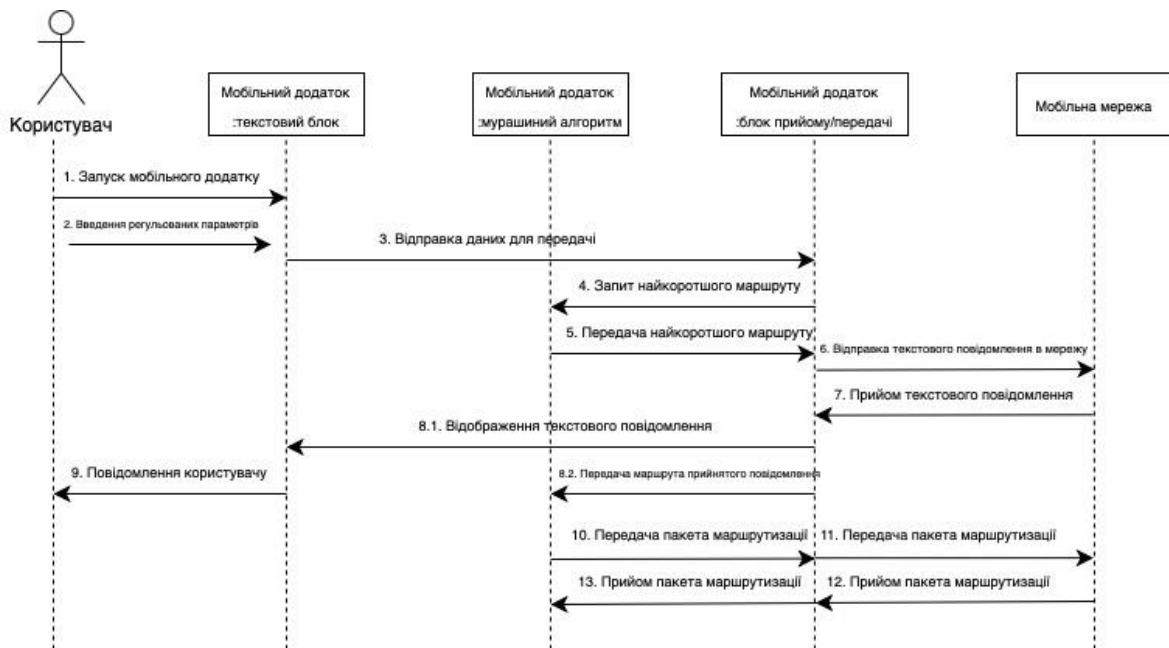


Рисунок 2.3 – Діаграма послідовності роботи мобільного пристрою

На діаграмі представлено взаємодію об'єктів, упорядкованих за часом їх появи. Як об'єкт виступає користувач, текстовий блок мобільного додатка, блок мурашиного алгоритму, блок прийому/передачі та мобільна мережа. Мурашиний алгоритм здійснює передачу пакету маршрутизації («мураха» в термінах мурашиного алгоритму) в мобільну мережу та приймає пакет маршрутизації із мобільної мережі через блок прийому/передачі.

Обмін службовою інформацією про конфігурацію мережі між вузлами мережі може здійснюватися за протоколом, схожим з DHT (Distributed Hash Table) [7] та P2P (Peer-to-Peer) [8], модифікованих для роботи в Mesh-мережах, перш за все виходячи з вимог мінімізації службового трафіку між вузлами мережі.

На закінчення слід зазначити, що, незважаючи на численні роботи, присвячені побудові ефективних Mesh-мереж, багато питань, які вже мають усталені рішення для стаціонарних мереж ще вимагають проведення досліджень. Ефективним способом моделювання та дослідження Mesh-мереж є імітаційне моделювання, а середовищем для практичної перевірки – мережі мобільних операторів та спеціально розроблені мобільні додатки, які взаємодіють між собою за допомогою мобільного інтернету.

2.3 Висновки до розділу

Протоколи маршрутизації для mesh-мереж мають різні підходи до вирішення задач маршрутизації залежно від типу та умов мережі. Протоколи AODV та DSR підходять для динамічних мереж з великою кількістю змін у топології, де маршрути створюються лише за запитом.

Протоколи типу OLSR та HWMP є більш ефективними в стабільних або високо щільних мережах, оскільки вони активно підтримують актуальність маршрутів через регулярні оновлення, що може знижувати навантаження на вузли, але й збільшувати споживання енергії.

B.A.T.M.A.N. є хорошим вибором для мобільних мереж, оскільки здатен адаптуватися до змін топології, проте може бути менш ефективним при великих масштабах. HWMP, у свою чергу, поєднує статичні та динамічні методи маршрутизації, що дозволяє отримати баланс між ефективністю та адаптивністю.

OLSR є прикладом протоколу з централізованим обміном даними про стан ліній зв'язку, в той час як протоколи типу AODV та DSR працюють на основі запитів від джерела, що знижує централізоване навантаження, але збільшує латентність у великих мережах.

Розглянуто можливість підвищення ефективності передачі даних за допомогою мурашиного протоколу маршрутизації. Цей протокол є цікавим підходом до вирішення задач маршрутизації в mesh-мережах, що мають

високий рівень динамічності та змінюваної топології. Адаптивність та масштабованість роблять його потенційно ефективним варіантом використання в безпроводних мережах з великим числом вузлів.

3 ВПЛИВ ТОПОЛОГІЇ MESH-МЕРЕЖ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Існує два види безпроводних мереж.

Інфраструктурна мережа – мережа, що має точку доступу, яка управляє обміном даних у межах безпроводної зони покриття. Точка доступу визначає, які вузли можуть встановлювати зв'язок і в який час. Цей режим роботи мережі найпопулярніший. Під час організації безпроводних мереж окремі пристрої неспроможні взаємодіяти між собою напряму. А для того, щоб це сталося, їм необхідний дозвіл від точки доступу, яка, у свою чергу, керує всіма взаємодіями та забезпечує рівний доступ до мережі всім пристроям.

Мережа ad-hoc – це найпростіша безпроводна мережа, створена за допомогою об'єднання двох чи більше безпроводних клієнтів без точки доступу. Всі клієнти в мережі ad-hoc рівноправні, що дозволяє організувати обмін файлами та інформацією між пристроями без витрат і складнощів, пов'язаних з придбанням та налаштуванням точки доступу.

Ми розглядаємо "ad-hoc мережі", які ще називають, як "mobile ad-hoc" і "mesh", маючи на увазі рівнозначність цих термінів. Це мережі, що самоорганізуються. Вони відрізняються за структурою побудови, призначенням та елементним складом.

Топологія Mesh: принципи та особливості

Mesh-мережі базуються на децентралізованій схемі організації, на відміну від традиційних мереж стандартів 802.11, які використовують централізовану архітектуру. У таких мережах точки доступу виконують не лише роль точок абонентського доступу, а й працюють як маршрутизатори та ретранслятори, забезпечуючи передачу даних між вузлами. Це дає змогу створювати самоорганізовані та самовідновлювані сегменти широкосмужової мережі.

Структура Mesh-мережі

Мережа складається з кластерів, кожен з яких охоплює певну територію.

Кількість кластерів необмежена, а в межах одного кластеру зазвичай працює від 8 до 16 точок доступу.

Одна з точок доступу виконує роль вузлової точки (gateway), підключеної до магістрального каналу через оптичний, електричний або радіозв'язок.

Всі точки кластеру обмінюються даними через транспортні радіоканали та можуть функціонувати як ретранслятори або одночасно як ретранслятори та точки абонентського доступу.

Механізм маршрутизації

Спеціалізовані протоколи дозволяють кожному вузлу динамічно оновлювати таблиці маршрутизації та контролювати стан з'єднань.

При виході з ладу будь-якої точки відбувається автоматичне перенаправлення трафіку альтернативним маршрутом, що забезпечує оптимальний шлях передачі даних.

Розширення мережі

Додавання нових точок доступу здійснюється автоматично, що спрощує масштабування мережі в межах кластеру.

Обмеження Mesh-мереж

Передача даних через кілька проміжних вузлів може спричиняти затримки, що впливає на якість трафіку реального часу (наприклад, голосові та відеодзвінки). Через це існують обмеження на кількість точок доступу в одному кластері для мінімізації впливу затримок. Mesh-мережі є гнучким та надійним рішенням для безпроводного з'єднання, особливо в умовах, де традиційна інфраструктура недоступна або занадто дорога.

3.1 Архітектура безпроводної мережі

WMN (безпроводні мережі) можуть бути розроблені у трьох різних мережевих архітектурах на основі топології мережі: «плоскі» WMN, ієрархічні WMN та гібридні WMN. Розглянемо їх коротко [10].

3.1.1 «Плоска» безпроводна мережа

На рисунку 3.1 представлено «плоску» бездротову мережу.

У такій mesh-топології кожен вузол має можливість безпосереднього з'єднання з будь-яким іншим вузлом у мережі. Це забезпечує рівноправний доступ для всіх вузлів та дозволяє передавати дані без потреби в централізованому контролі.

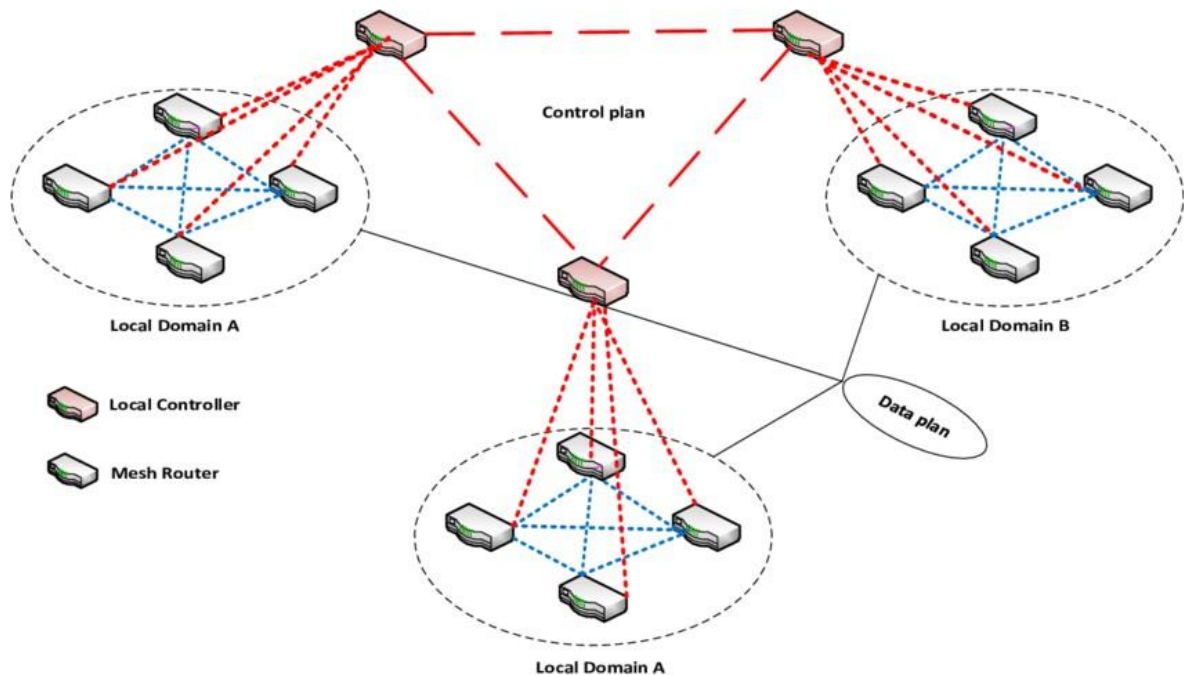


Рисунок 3.1 – «Плоска» безпроводна мережа

Плоска мережа WMN складається з клієнтських пристроїв, які одночасно виконують функції хостів і маршрутизаторів. У цій архітектурі всі вузли знаходяться на одному рівні та взаємодіють між собою без ієрархічної структури. Вузли клієнтів координуються між собою, забезпечуючи маршрутизацію, налаштування мережі, надання послуг і підтримку різних програм. Ця структура найбільш схожа на Ad Hoc-мережу та вважається найпростішою серед трьох архітектур WMN.

До переваг відносять: простоту налаштування та управління, високу надійність завдяки наявності кількох маршрутів для передачі даних, відсутність єдиного вузла відмови, що підвищує стійкість мережі.

Недоліки

Обмежена масштабованість – зі збільшенням кількості вузлів зростає складність встановлення з'єднань.

Високе навантаження на мережу у випадку великої кількості активних вузлів, що обмежує її ресурси.

Проблеми з адресацією, які можуть стати слабким місцем при масштабуванні.

У плоскій мережі WMN використовуються спеціальні механізми адресації, маршрутизації та виявлення послуг, але їх ефективність зменшується при збільшенні кількості вузлів у мережі.

3.1.2 Ієрархічна Mesh-мережа

На рисунку 3.2 зображено приклад ієрархічної Mesh-мережі.

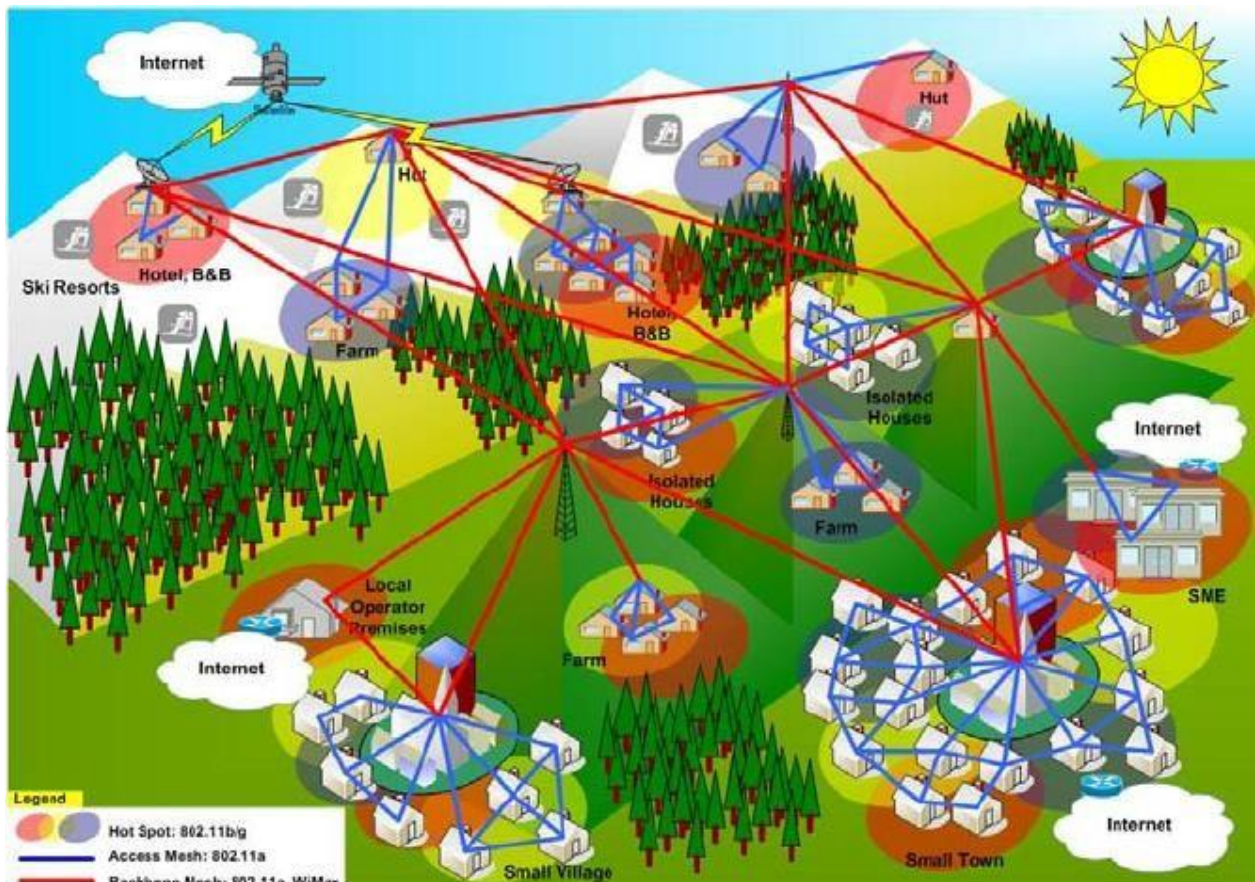


Рисунок 3.2 – Ієрархічна Mesh-мережа

Ієрархічна архітектура WMN передбачає розподіл вузлів на кілька рівнів. Клієнтські вузли займають найнижчий рівень, а керуючі або центральні вузли розташовуються на верхньому рівні. Проміжні вузли відповідають за передачу даних між рівнями. Завдяки такій структурі клієнтські вузли можуть взаємодіяти з магістральною мережею WMN, що складається з маршрутизаторів.

Зазвичай вузли WMN виконують функцію виділених маршрутизаторів, які формують магістральну мережу. На відміну від клієнтських вузлів, вони не генерують і не приймають трафік, а лише забезпечують його передачу. Деякі маршрутизатори можуть мати зовнішній інтерфейс для підключення до Інтернету — такі вузли називаються шлюзовими вузлами.

Переваги:

Висока масштабованість – зменшена кількість з'єднань між вузлами дозволяє ефективно керувати мережею.

Зручність управління – чіткий розподіл рівнів відповідальності полегшує адміністрування.

Оптимізоване навантаження – структура зменшує перевантаженість мережі.

Недоліки:

Точка відмови – вихід з ладу вузлів верхнього рівня може вплинути на всю мережу.

Складність налаштування – управління мережею у разі значних змін може бути ускладненим.

3.1.3 Гібридна Mesh-мережа

На рисунку 3.3 зображено гібрибну Mesh-мережу.

Гібридна Mesh-топологія поєднує елементи плоскої та ієрархічної структур. Вузли в таких мережах можуть бути організовані на двох рівнях: на одному рівні вони мають повний взаємозв'язок (як у плоскій топології), а на іншому — структуровані за ієрархічним принципом.

Цей тип ієрархічної WMN відрізняється тим, що для зв'язку можуть використовуватися інші безпроводні мережі. Наприклад, такі технології як:

- стільникові мережі;
- WiLL (Wireless Local Loop);
- WiMAX;
- супутникові комунікації.

Гібридні WMN застосовуються в різних сферах. Зокрема, вони використовуються у багатопрофільних стільникових мережах, локальних безпроводних мережах з покращеною пропускнуою здатністю (TWiLL) та уніфікованих спеціальних стільникових системах.

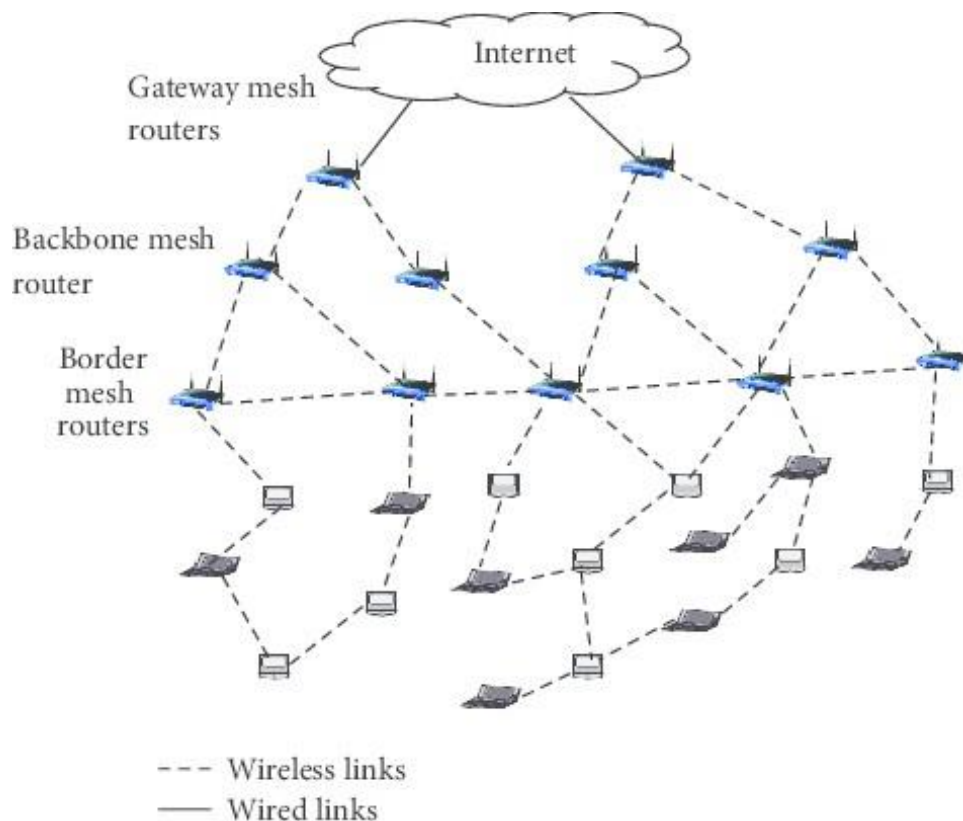


Рисунок 3.3 – Гібридна Mesh-мережа

Практичним прикладом гібридної WMN для екстрених ситуацій є платформа CalMesh, яка може комбінувати різні безпроводні технології для покращення зв'язку та надійності мережі.

Переваги та недоліки гібридної Mesh-топології.

Переваги:

Забезпечує оптимальний баланс між масштабованістю, ефективністю та надійністю.

Відрізняється гнучкістю, що дозволяє адаптувати мережу до різних умов.

Дозволяє оптимізувати передачу даних, використовуючи різні типи з'єднань для різних завдань.

Недоліки:

Складність налаштування та управління, оскільки необхідно враховувати як плоску, так і ієрархічну структуру.

Потребує більше ресурсів для підтримки двох різних архітектур.

Таким чином, кожна з розглянутих топологій має свої переваги та обмеження. Вибір відповідної залежить від потреб у масштабованості, надійності, простоті управління та доступних ресурсів мережі.

3.2 Вибір типу топології мережі

Mesh є однією з найпростіших топологій для налаштування в безпроводних мережах. Вузли розподіляються відносно рівномірно, що дозволяє кожному з них бачити інші вузли в мережі. Проте, якщо область покриття стає надто великою, деякі вузли можуть виявитися занадто віддаленими від інтернет-шлюзу. У такому випадку вони змушені пересилати дані через велику кількість проміжних вузлів, що сповільнює зв'язок.

Додавання додаткових шлюзів, які зменшують кількість переходів між вузлами. Однак цей підхід має високу вартість, оскільки потребує встановлення додаткових інтернет-шлюзів.

Створення магістральної мережі, яка проходить через всю Mesh-інфраструктуру від основного шлюзу. Такий підхід допомагає оптимізувати трафік та мінімізувати затримки.

На рисунку 3.4 представлено простий варіант мережевої схеми, яка функціонує без магістральної структури.

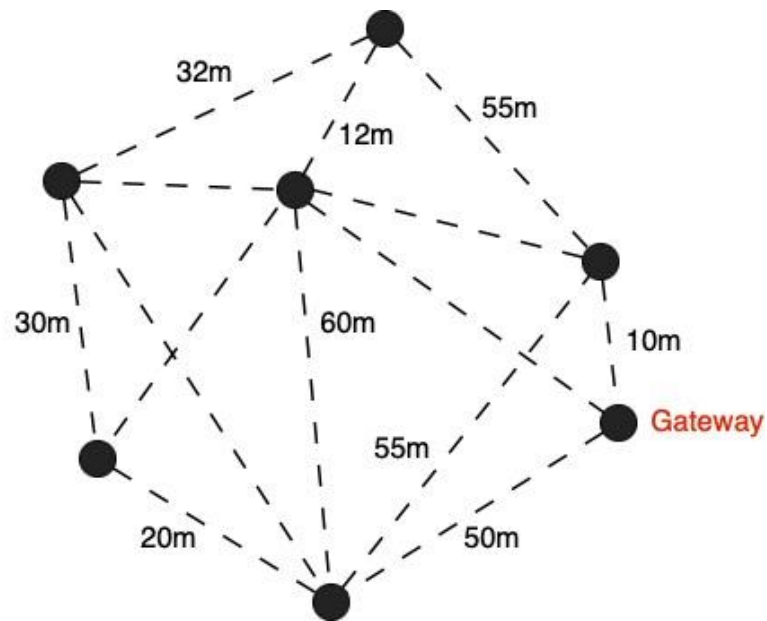


Рисунок 3.4 – Графічне представлення простої Mesh-мережі

Якщо шлюз розташований у центральній частині мережі, може виникнути потреба у кількох магістралях (наприклад, у вигляді топології «зірка»), щоб забезпечити рівномірний розподіл пропускної здатності між усіма вузлами.

На рисунку 3.5 представлено «прямокутну» Mesh-мережу, яка для оптимальної роботи потребує розгортання магістральної структури по всій сітчастій архітектурі.

Якщо кластери розташовані на значній відстані один від одного (залежно від типу використаних антен – внутрішніх або зовнішніх, а також їхніх розмірів), може виникнути потреба у магістралі для їхнього з'єднання [11].

Окрім цього, важливо враховувати розташування інтернет-шлюзу. Як і у попередній топології, магістраль виконує функцію з'єднання шлюзу (або кількох шлюзів) з усіма кластерами, забезпечуючи рівномірний розподіл пропускної здатності [11].

На рисунку 3.6 представлено мережевий графік із трьома кластерами, об'єднаними спільною магістраллю.

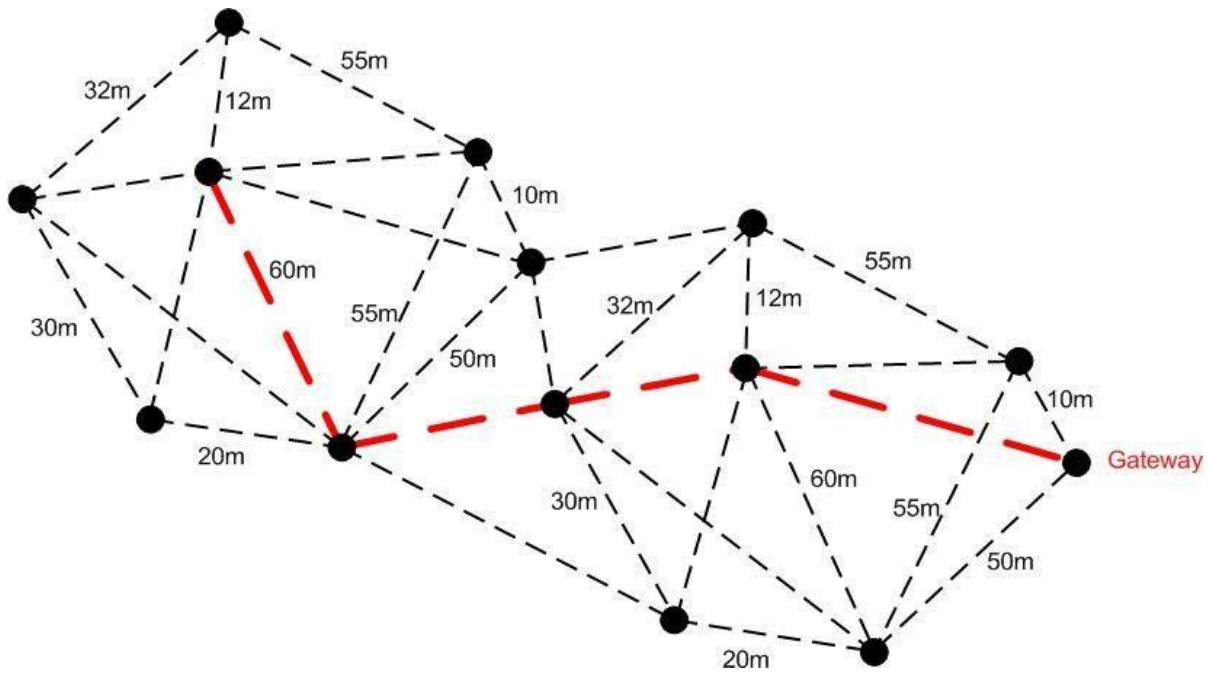


Рисунок 3.5 – Діаграма Mesh-мережі з магістраллю

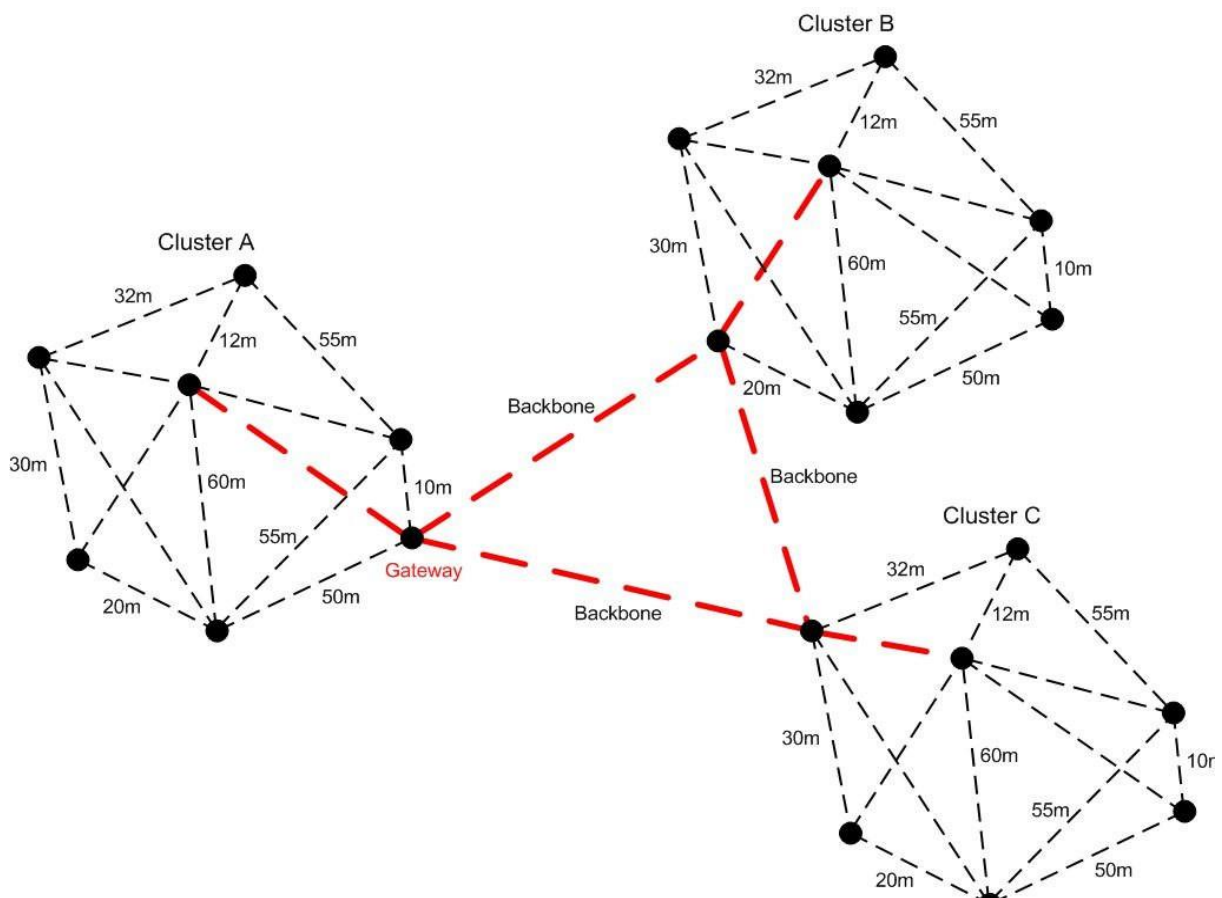


Рисунок 3.6 – Кластерна мережа з магістраллю

Звернемо увагу, що шлюз є частиною магистральної мережі, щоб забезпечити швидше підключення до Інтернету.

3.3 Принципи організації зв'язку в Ad-Hoc мережах

Ad-Hoc мережі, що працюють без фіксованої інфраструктури, принципово відрізняються від традиційних телекомунікаційних систем. Їхні основні характеристики включають:

Спонтанне формування – мережу можуть створювати випадкові абоненти без попереднього налаштування.

Децентралізована архітектура – відсутність базових станцій або центрального контролю.

Багатокрокова маршрутизація (multi-hop) – пакети даних передаються через посередницькі вузли, кожен із яких може виконувати роль безпроводного маршрутизатора.

Кожен вузол в Ad-Hoc мережі або приймає дані як кінцевий отримувач, або передає їх далі до наступного вузла, забезпечуючи ефективну маршрутизацію без централізованого управління.

Основні переваги Ad-Hoc мереж:

Швидке розгортання – можливість оперативного налаштування без додаткової інфраструктури.

Економічність – низька вартість обладнання та відсутність витрат на підтримку мережевої інфраструктури.

Гнучкість і масштабованість – здатність розширювати покриття та підтримувати стабільну роботу навіть у складних умовах.

Сфери застосування:

Спочатку розроблені для військових потреб США у 1970-х роках, сьогодні Ad-Hoc мережі широко використовуються в цивільних сферах:

Надзвичайні ситуації – забезпечення зв'язку під час рятувальних операцій або антитерористичних заходів.

Тимчасові комунікації – організація зв'язку на конференціях, виїзних заходах або польових експериментах.

Доступ до Інтернету в зонах без інфраструктури – можливість встановлення тимчасового підключення.

Місцеві та муніципальні мережі – комунальні, університетські та корпоративні мережі.

Мережі для транспорту – зв'язок між автомобілями (vehicular networks).

Сенсорні мережі – моніторинг довкілля, телеметрія, біометричні вимірювання, RFID-системи.

Наномережі – перспективний напрямок для комунікації між наносенсорами та нанороботами.

Технічна реалізація

Сучасні Ad-Нос мережі (за винятком сенсорних) базуються на існуючому програмно-апаратному забезпеченні та стандартних протоколах безпроводного зв'язку.

Мережевий рівень використовує стандартний стек інтернет-протоколів, переважно IPv6, що враховує потреби мобільних пристроїв.

Транспортний рівень базується на стандартних TCP/IP-протоколах, зокрема TCP та UDP.

Налаштування Ad-Нос мережі

Для активації режиму Ad-Нос достатньо змінити параметри безпроводного адаптера у системних налаштуваннях, перевівши його в одноранговий режим. Це дозволяє об'єднати в мережу різні пристрої – ноутбуки, КПК, мобільні телефони та інші гаджети, що підтримують Wi-Fi (IEEE 802.11) або Bluetooth (IEEE 802.15.1).

Таким чином, Ad-Нос мережі забезпечують мобільність, автономність та ефективне використання ресурсів, роблячи їх ключовим рішенням для різних сфер застосування.

Ad-Hoc принцип використовується для організації зв'язку між сенсорами, які здійснюють збір і передачу даних про фізичні параметри навколишнього середовища (акустичних, оптичних, інфрачервоних, тиску, температурних, радіочастотних тощо) або біологічних організмів, зокрема людини (телебіометрія). У сенсорних мережах для фізичного та каналного рівнів застосовується спеціалізований стандарт ZigBee, а самі сенсори функціонують під керуванням операційної системи TinyOS.

Хоча Mesh-мережі використовують деякі підходи Ad-Hoc, вони базуються на інфраструктурі стаціонарних безпроводних маршрутизаторів (Mesh-роутерів). Ці маршрутизатори виконують роль точок безпроводного доступу з обмеженим радіусом дії. Відмінність від традиційних Wi-Fi точок доступу полягає в тому, що Mesh-роутери не підключаються безпосередньо до фіксованої мережі, а натомість утворюють взаємопов'язану систему, передаючи пакети даних через безпроводні канали за принципом Ad-Hoc зв'язку.

3.4 Порівняльний аналіз mesh-мережі та розподіленої мережі WDS

Розширити безпроводне покриття в заміському будинку чи офісі можна за допомогою двох основних технологій: mesh-мереж або розподіленої безпроводної системи (WDS – Wireless Distribution System), яка використовує Wi-Fi розширювачі (бустери). Для визначення найбільш ефективного рішення доцільно провести порівняльний аналіз цих варіантів.

Wi-Fi mesh-мережі відрізняються від WDS, який підтримується більшістю маршрутизаторів і точок доступу. Хоча обидві технології дозволяють розширювати Wi-Fi мережу без прокладання Ethernet-кабелів, між ними є суттєві відмінності. Mesh-мережа – це більш гнучка і «розумна» версія WDS, яка спрощує налаштування, керування та розгортання безпроводної інфраструктури.

Розподілена безпроводна система (WDS) дозволяє точкам доступу не лише обслуговувати безпроводних клієнтів, але й встановлювати між собою

безпроводні з'єднання в режимі моста або повторювача, не потребуючи дротового підключення. Це дозволяє розширювати покриття Wi-Fi за допомогою декількох точок доступу без необхідності дротового підключення між ними.

Технологія WDS використовує MAC-адреси для встановлення зв'язку між точками доступу, застосовуючи спеціальні кадри, в яких задіяні всі чотири поля MAC-адрес (на відміну від традиційної Wi-Fi передачі, де використовується три поля). Це дає WDS певну перевагу перед іншими рішеннями, оскільки дозволяє зберігати MAC-адреси клієнтів у кадрах, переданих між точками доступу.

При звичайному підключенні клієнтів до точки доступу в заголовку кожного кадру містяться MAC-адреси відправника, отримувача та точки доступу. У WDS-мережі до цих даних додаються MAC-адреси точок доступу, які взаємодіють між собою, що забезпечує ефективніше керування мережею та зменшує ймовірність конфліктів під час передачі даних.

Недоліки WDS.

- Зазвичай WDS дозволяє налаштувати точки доступу для безпроводного підключення до іншої точки, яка має дротове з'єднання. Безпроводні з'єднання з вузлами AP зазвичай є статичними і потребують ручного налаштування MAC-адрес.

- Кількість безпроводних каналів між AP обмежена, і безпека/шифрування безпроводних AP можуть бути ускладнені.

- Канали WDS зазвичай використовують той самий радіоканал, що і звичайний трафік Wi-Fi, а це знижує продуктивність мережі. Пропускна здатність такого безпроводного з'єднання зменшується приблизно вдвічі для кожного з'єднання, або "хопу".

- Динамічно розподілені і обмінені ключі не підтримуються в з'єднаннях WDS. Це означає що WPA і інші технології, що використовують динамічний розподіл ключів, несумісні з WDS. Можуть застосовуватися тільки статичні

ключі WEP. Це також поширюється і на всіх клієнтів, підключених через точки доступу WDS.

Стосовно MESH-МЕРЕЖІ, то будь-який користувач мережі може безпроводним чином підключатися до інших вузлів Mesh-мережі, які мають провідне або безпроводне з'єднання з мережею. Такі точки доступу зазвичай мають виділений радіоканал для зв'язку між осередками, а звичайний дводіапазонний AP обслуговує Wi-Fi користувачів.

У мережі WLAN з'єднання між Mesh-вузлами самоналаштовуються, і підтримують багатопробіжні з'єднання, що самовідновлюються. Це допомагає спростити налаштування та забезпечує кращу надійність. Спроектують все таким чином, що якщо одна AP осередку виходить з ладу або середовище змінюється та негативно впливає на бездротову лінію, відбудеться пошук іншої AP осередку або кращого шляху до хоста (що підключено дротом до Інтернет-каналу).

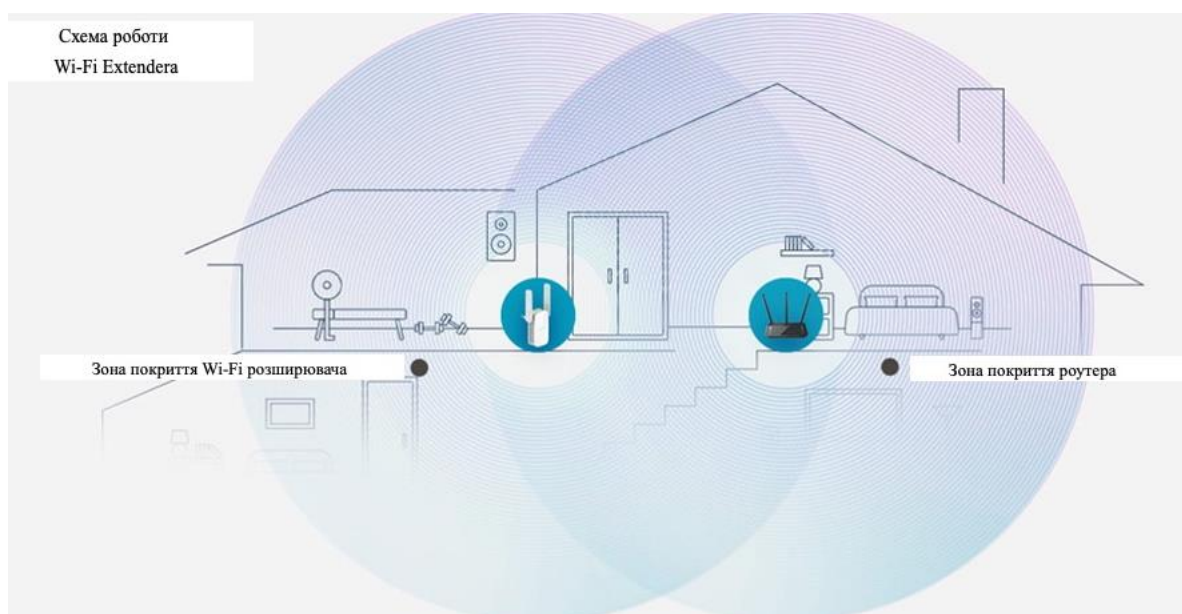


Рисунок 3.7 – Схема роботи Wi-Fi Extender-a

Wi-Fi розширювач (бустер, ретранслятор) – це пристрій, який збільшує зону покриття Wi-Fi, приймаючи сигнал від маршрутизатора та ретранслюючи

його далі. Схематичне зображення роботи Wi-Fi розширювача наведено на рисунку 3.7.

Ці пристрої також відомі як Wi-Fi "бустери" або "ретранслятори", однак усі ці терміни означають одне й те саме – збільшення зони покриття безпроводної мережі.

Wi-Fi розширювачі зазвичай підключаються до маршрутизатора через бездротове з'єднання, проте деякі моделі також підтримують підключення через Ethernet або Powerline, що може забезпечити стабільнішу та швидшу передачу даних.

При встановленні Wi-Fi розширювача він підключається безпосередньо до маршрутизатора та ретранслює сигнал, часто створюючи окрему Wi-Fi мережу. Це може призвести до появи двох різних мереж, наприклад, MyNetwork для основного покриття та MyNetwork_EXT для розширеної зони.

Однак пристрої залишатимуться підключеними до однієї з мереж, доки повністю не вийдуть із її зони дії. Без ручного перемикання між мережами під час руху можливі проблеми зі слабким сигналом та низькою швидкістю у певних точках території.

Основні недоліки Wi-Fi розширювачів:

Неефективне повторення сигналу – розширювач просто приймає кожен пакет і ретранслює його без оптимізації маршруту.

Зменшення пропускної здатності – більшість пристроїв працюють у напівдуплексному режимі, що означає неможливість одночасної передачі та прийому даних, що уповільнює роботу мережі.

Mesh-мережі як альтернатива WDS та Wi-Fi розширювачам

Оскільки mesh-мережі належать до категорії коміркових мереж, вони можуть стати ефективною заміною традиційним WDS-системам та точкам доступу. Вибір mesh-рішень замість традиційних Wi-Fi розширювачів особливо доцільний у ситуаціях, коли прокладання кабелів є складним або неможливим.

Mesh варто використовувати в історичних будівлях, де будівельні роботи заборонені, на масових заходах і конференціях, де потрібні тимчасові внутрішні

або зовнішні мережі, в орендованих приміщеннях, таких як офіси без структурованої кабельної системи (СКС).

Переваги Mesh-мереж:

- відсутність "мертвих зон" – можна легко покращити покриття шляхом додавання нових точок доступу (AP);
- просте налаштування та керування – більшість Mesh-систем можна контролювати через мобільний додаток;
- гнучке розширення – нові вузли підключаються просто через розетку, без складних налаштувань.

Таким чином, mesh-мережі є зручним та ефективним рішенням для розширення покриття Wi-Fi, особливо там, де традиційні методи є недоступними або неефективними.

3.5 Висновки до розділу

Топологія mesh-мережі значною мірою впливає на ефективність передачі даних. Вибір відповідної топології визначає, як будуть організовані з'єднання між вузлами, як будуть передаватися дані, а також як мережа буде реагувати на зміни у топології та навантаженні. Розглянуто основні три види топологій (плоску, ієрархічну, гібридну), наведено їх переваги та недоліки.

Проведено порівняльний аналіз двох популярних архітектур безпроводних мереж - mesh-мережі та розподіленої мережі WDS. При цьому приймалися до уваги їх технічні характеристики, продуктивність та ефективність, управління та налаштування тощо. У підсумку встановлено, що вибір між mesh-мережею і WDS залежить від конкретних потреб: mesh-мережі ідеальні для великих, динамічних середовищ з високими вимогами до надійності та адаптивності, в той час як WDS може бути кращим вибором для простих, стабільних мереж з чітким центральним управлінням і більш низькими витратами.

4 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ У Wi-Fi MESH-МЕРЕЖАХ

4.1 Алгоритм вибору режиму роботи протоколу HWMP

Особливістю Mesh-мережі є протоколи, які використовують спеціальні алгоритми, що дозволяють точкам доступу створювати списки абонентів мережі з контролем стану транспортного каналу. При відмові будь-якої точки відбувається автоматичний перерозподіл трафіку по інших маршрутах, що гарантує передачу трафіку адресату з мінімальною затримкою [14].

Розглянемо алгоритми роботи в реактивному і проактивному режимах роботи протоколу HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol).

У реактивному режимі кожен вузол генерує широкомовний PREQ-пакет запиту шляху. Шляхи обираються на основі метрики, інформація про яку поширюється за допомогою спеціального поля у службових пакетах запиту шляху. По мірі просування від вузла до вузла поле метрики шляху модифікується, відображаючи відстань від поточного вузла до відправника. У підсумку формується повна метрика шляху «одержувач – відправник».

Схема роботи протоколу HWMP, представлена на рис. 4.1, повторюється для кожного вузла мережі. На рис. 4.1 використовуються такі позначення:

- ША – широкомовна адреса розсилки;
- R – початкова адреса (адреса початкового вузла, який згенерував широкомовний пакет);
- A, B, N – адреси проміжних вузлів, що ретранслюють широкомовний пакет.

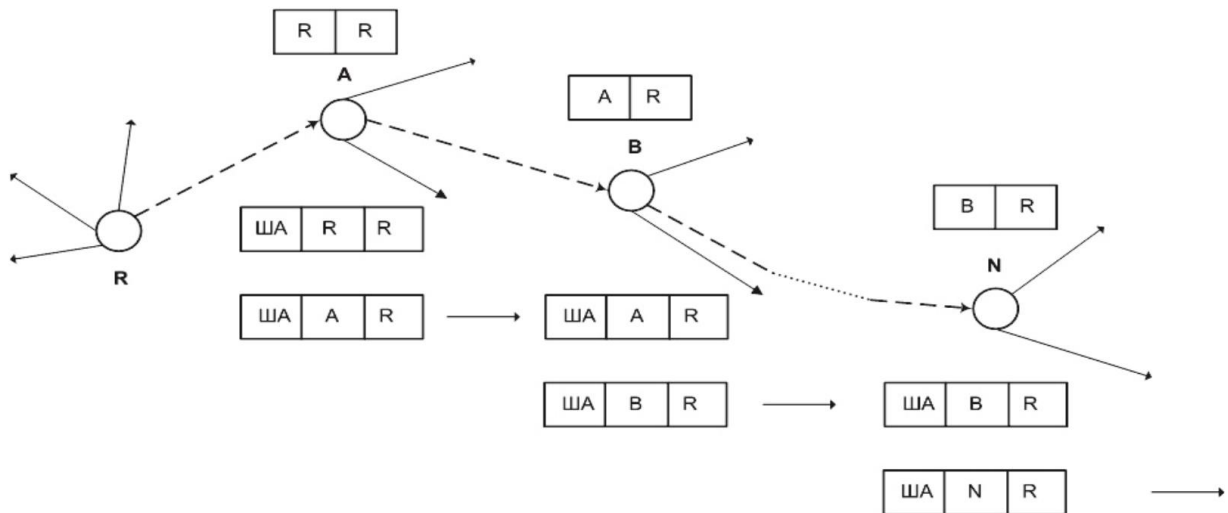


Рисунок 4.1 – Реактивний режим роботи протокола HWMP

У реактивному режимі HWMP кожен вузол генерує широкомовний кадр із власною MAC-адресою в полі початкового відправника (праве поле, адреса R). При цьому перед відправкою кадру він записує у ліве поле пакета власну MAC-адресу проміжного відправника R.

Будь-який із сусідніх вузлів, який отримав цей кадр (на рис. 4.1 це вузол A), не розпаковуючи його, перевіряє, чи отримував він раніше PREQ-пакет з адресою початкового відправника R. Якщо отримував, то кадр відкидається [9]. Якщо ж кадр із таким початковим відправником відсутній, він розпаковується, копіюється, і створюється новий запис у таблиці MAC-адрес (запис RR). У поле проміжного відправника заноситься власна MAC-адреса (адреса вузла A), після чого здійснюється широкомовна розсилка зміненого кадру.

Алгоритм широкомовної розсилки представлений на рис. 4.2. Аналогічні дії виконує кожен вузол мережі, і в результаті в кожному вузлі буде сформована таблиця MAC-адрес з кількістю рядків, яка рівна кількості вузлів всієї мережі.

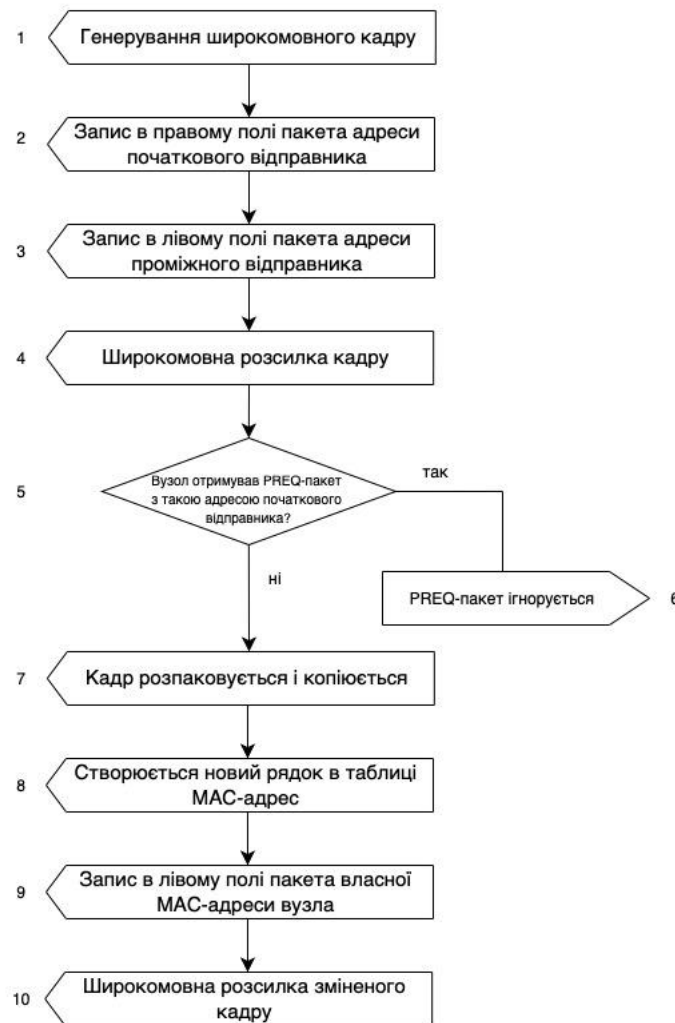


Рисунок 4.2 - Алгоритм широкомовної розсилки

Далі розглянемо проактивний режим, який відрізняється від реактивного тим, що в якості початкової адреси виступає єдиний вузол, який вважається кореневим (R).

Розсилка управляючих пакетів від кореневого вузла відбувається аналогічно реактивному режиму (див. рис. 4.1). На відміну від реактивного режиму, в проактивному режимі кожен вузол (не широкомовно) надсилає кореневому вузлу (R) пакет підтвердження PREP про виконану команду (див. рис. 4.3).

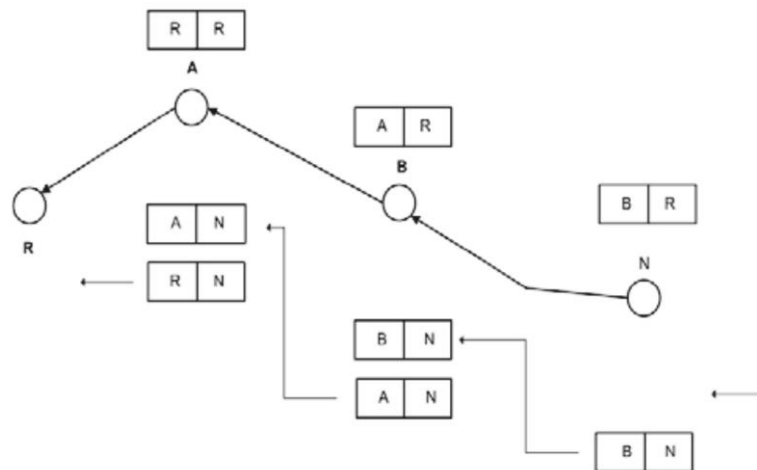


Рисунок 4.3 - Розсилка пакетів підтвердження PREP кореневому вузлу

При розсилці інформаційних пакетів кожен вузол відправляє пакет, знаходить адресу призначення у своїй таблиці MAC-адрес (кінцеву адресу, для якої призначений пакет) і передає його за адресою призначення, через яку даний комутатор має переслати пакет до кінцевого одержувача. Такі дії повторюються, поки пакет не досягне вузла з адресою призначення [11].

4.2 Алгоритм роботи протоколу HWMP

Алгоритм роботи протоколу HWMP представлений на рис. 4.4. Кожен рядок таблиці MAC-адрес має «час життя», який дещо перевищує тривалість одного циклу генерації PREQ-пакета. Якщо протягом часу генерації не відбудеться підтвердження, то рядок із даною адресою призначення видаляється. При підтвердженні лічильник поточного часу обнуляється.

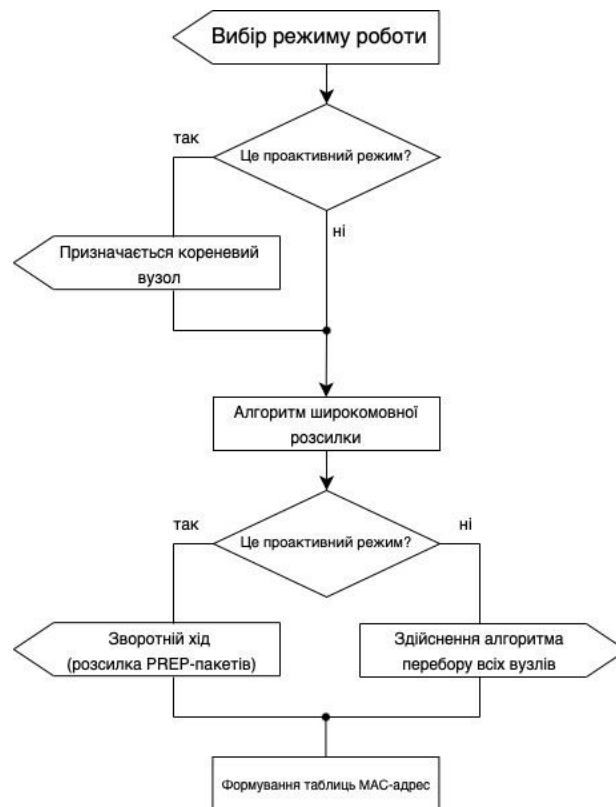


Рисунок 4.4 - Алгоритм роботи протокола HWMP

У мережах моніторингу розподілених об'єктів міститься мало командної інформації, і вона стікається до кореневого вузла mesh-мережі, тому в таких мережах алгоритм маршрутизації може бути значно спрощений, а саме:

- використовується метрика часу прибуття пакета (пакет, що надійшов першим, використовується, а решта ігнорується);
- у полі даних широкомовних пакетів, які розсилає кореневий вузол, розміщується командна інформація для інших вузлів, що дозволяє зменшити обсяг переданих даних у мережі;
- інформаційні пакети від інших вузлів до кореня, а також пакети підтвердження виконання команд маршрутизуються із використанням стандартних протоколів маршрутизації [15].

4.3 Висновки до розділу

Розглянутий у розділі спрощений алгоритм маршрутизації дозволяє організувати роботу Wi-Fi mesh-мережі моніторингу розподілених об'єктів.

Командна інформація в реактивному режимі передається від кореневого вузла разом із ширококомовними пакетами, що організовують маршрутизацію, а контрольно-вимірювальна інформація від об'єктів моніторингу передається до кореневого вузла за протоколом HWMP у проактивному режимі. Такий алгоритм дозволяє спростити процес обміну командною інформацією між кореневим вузлом та іншими вузлами мережі моніторингу.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

На працівника під час дослідження ефективності алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискість;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

– 2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Характер роботи має ключове значення при організації робочого місця. Зокрема, для робочого місця проєктувальника, який працює за комп'ютером, були забезпечені такі основні умови:

- раціональне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній простір для виконання всіх необхідних рухів і переміщень;
- наявність природного та штучного освітлення, достатнього для виконання завдань;
- рівень шуму в приміщенні не перевищує встановлених норм.

Площа приміщення на одне робоче місце має становити не менше 6 м², а об'єм – не менше 20 м³.

Основними елементами робочого місця проектувальника є стіл і крісло. Переважне робоче положення – сидяче. Раціональна організація робочого місця передбачає впорядковане і стабільне розміщення предметів, інструментів і документів. Об'єкти, які використовуються найчастіше, розташовані в зоні легкої досяжності.

Максимальна зона досяжності рук – це область робочого простору, обмежена дугами, які описують руки при їх максимальному витяганні з рухом у плечовому суглобі. Оптимальна зона – це частина робочого простору, обмежена дугами, що формуються рухом передпліч у ліктьових суглобах за умови відносно нерухомого плеча та опори в районі ліктя.

При роботі в положенні сидючи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;

- ширина не менше 500 мм;
- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90^0 (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося дослідження ефективності алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки [3].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.
- Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізованих струмопровідних частин.
- Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Основним нормативним документом, що регламентує параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [4]. Цей документ встановлює оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, допустиму температуру внутрішніх поверхонь приміщення (стіни, стеля, підлога) і зовнішніх поверхонь технологічного обладнання, а також допустиму інтенсивність теплового випромінювання нагрітих поверхонь у приміщенні та відкритих джерел тепла (нагрітий метал, скло, відкритий вогонь тощо) для робочої зони — визначеного простору, в якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників

Робота дослідника ефективності алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [5]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється дослідження ефективності алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

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

5.2.3 Виробниче освітлення

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Багато невгасних випадків на виробництві стається через погане освітлення. Втрати від цього становлять досить значні суми, а, головне, людина може загинути або стати інвалідом. Раціональне освітлення повинно відповідати таким умовам: бути достатнім

(відповідним нормі); рівномірним; не утворювати тіней на робочій поверхні; не засліплювати працюючого; напрямок світлового потоку повинен відповідати зручному виконанню роботи. Це сприяє підтримці високого рівня працездатності, зберігає здоров'я людини та зменшує травматизм.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [6]) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 5.3:

Таблиця 5.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	V0,15 - до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

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

5.2.4 Виробничий шум

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину. Фізична сутність звуку – це механічні коливання пружного середовища (повітря, рідини). Під час звукових коливань утворюються області зниженого і підвищеного тиску, що діють на слуховий аналізатор (мембрану вуха).

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [7]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

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

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

5.2.5. Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

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

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

5.3. Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки на підприємстві покладається на його керівника (власника). В свою чергу, наказом по підприємству він визначає обов'язки інженерно-технічного персоналу та працівників щодо забезпечення пожежної безпеки на ділянках підприємства. Керівник також призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень та експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту. Якщо на підприємстві не призначено спеціально уповноваженої особи відповідальної за загальну пожежну безпеку підприємства, то організаційну роботу з підготовки зазначених документів здійснює, як правило, спеціаліст з охорони праці.

Обов'язки щодо забезпечення пожежної безпеки, утримання та експлуатації засобів протипожежного захисту мають бути відображені у відповідних посадових документах (функціональних обов'язках, інструкціях, положеннях тощо).

В приміщенні, де здійснювалася робота використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень [8].

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії [8]. Робоча зона розробника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

5.3.1 с

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де відбувається проектування резонансної хвилевідно-щілинної антени з синфазним збудженням щілин такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електро побутових пристроїв (електрочайники,

обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;

- залишення без нагляду увімкнутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

5.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежегасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

Інструкції та інші внутрішні документи підприємства з пожежної безпеки слід розробляються на основі діючих правил та інших державних нормативних актів з пожежної безпеки, виходячи зі специфіки пожежної небезпеки будівель, споруд, технологічних процесів, технологічного та виробничого обладнання.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам.

5.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту

ВИСНОВКИ

У роботі показано, що в умовах високої щільності користувачів безпроводні системи повинні бути адаптовані до режимів високих навантажень, підвищеного рівня завад, збільшення пропускну здатності та швидкого з'єднання. Це може, зокрема, забезпечити технологія mesh-мереж. Ця технологія може суттєво допомогти у забезпеченні стабільного, надійного та ефективного безпроводного з'єднання в умовах значної щільності користувачів. Функціонування безпроводних систем в умовах відсутності мережевої інфраструктури потребує використання спеціальних технологій для забезпечення зв'язку і передачі даних без прив'язки до традиційних мережевих елементів: базових станцій або точок доступу. Проведений аналіз показав, що алгоритм роботи mesh-мережі без інфраструктури може працювати автономно, залежачи лише від вузлів, які виступають як ретранслятори, маршрутизатори та кінцеві пристрої одночасно. Цей тип мережі особливо корисний в умовах, де відсутня центральна мережна інфраструктура або для тимчасових застосувань.

Розглянуто сутність технології mesh-мереж. Показано, що такі мережі забезпечують гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів, створюючи розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла. Вони дозволяють зменшити затримки, інтерференцію та перевантаження, забезпечуючи більш стабільний і надійний безпроводний зв'язок у складних умовах.

Протоколи маршрутизації для mesh-мереж мають різні підходи до вирішення задач маршрутизації залежно від типу та умов мережі. Протоколи AODV та DSR підходять для динамічних мереж з великою кількістю змін у топології, де маршрути створюються лише за запитом. Протоколи типу OLSR та HWMP є більш ефективними в стабільних або високо щільних мережах, оскільки вони активно підтримують актуальність маршрутів через регулярні оновлення, що може знижувати навантаження на вузли, але й збільшувати споживання енергії. В.А.Т.М.А.Н. є хорошим вибором для мобільних мереж,

оскільки здатен адаптуватися до змін топології, проте може бути менш ефективним при великих масштабах. HWMP, у свою чергу, поєднує статичні та динамічні методи маршрутизації, що дозволяє отримати баланс між ефективністю та адаптивністю. OLSR є прикладом протоколу з централізованим обміном даними про стан ліній зв'язку, в той час як протоколи типу AODV та DSR працюють на основі запитів від джерела, що знижує централізоване навантаження, але збільшує латентність у великих мережах.

Розглянуто можливість підвищення ефективності передачі даних за допомогою мурашиного протоколу маршрутизації. Цей протокол є цікавим підходом до вирішення задач маршрутизації в mesh-мережах, що мають високий рівень динамічності та змінюваної топології.

Розглянуто основні три види топологій (плоску, ієрархічну, гібридну), наведено їх переваги та недоліки, показано їх вплив на ефективність передачі даних. Проведено порівняльний аналіз двох популярних архітектур безпроводних мереж - mesh-мережі та розподіленої мережі WDS. Установлено, що вибір між mesh-мережею і WDS залежить від конкретних потреб: mesh-мережі ідеальні для великих, динамічних середовищ з високими вимогами до надійності та адаптивності, в той час як WDS може бути кращим вибором для простих, стабільних мереж з чітким центральним управлінням і більш низькими витратами.

Показана можливість спрощення і удосконалення алгоритму моніторингу розподілених об'єктів.

Виконано розрахунки з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бортник Г. Г. Системи передавання в електрозв'язку. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 138 с.
3. Бойко Ю.М. Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж / Ю.М. Бойко, В.В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький . – 2010. – №2. – С. 94 -98.
4. Солодовник В.І. Метод адаптивної об'єднаної прийомо–передавальної просторової модуляції для високошвидкісних систем безпроводового зв'язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 1 – С. 126 – 140.
5. Солодовник В.І. Алгоритм адаптивної модуляції та просторового мультиплексування у багатоантенних системах безпроводового зв'язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 3 – С. 103 – 111.
6. Бабак В.П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації: Навч. посібник [Текст] / В.П. Бабак, Т.М. Наритник, Ю.В. Куц, В.Я. Казимиренко. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с.
7. Головін Ю.О. Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами: навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ НТУУ КПІ, 2016. 322 с.
8. Mesh мережі [Електронний ресурс] // Mesh network. URL: <https://studfile.net/preview/9937489/page:3/>– Дата доступу 15.11.2020.
9. Стандарт локальних мереж іеєе 802.11 wi-fi URL: <https://beloshop.ru/uk/ethernet-standard-ieee-80211-wi-fi/>– Дата доступу 18.11.2020.
10. Адаптація багатоантенних систем до невизначених умов зв'язку в Mesh-мережах URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2011_1/31pos.pdf – Дата доступу 23.11.2020.
11. Технологія іеєе 802.11. Підтримка потокових даних. Сумісність з іншими стандартами бездротового зв'язку [Електронний ресурс]. URL: <https://teploskat.ru/the-technology-ieee-80211/> – Дата доступу 02.12.2020.

12. Протокол 802.11 URL: http://www.irbisnbnv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbnv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nzundiz_2015_6_3.pdf – Дата доступу 06.12.2020.

13. Дослідження показників якості обслуговування в локальних бездротових мережах [Електронний ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2019/fkita/kolenikov/diss/indexu.htm> – Дата доступу 11.12.2020.

14. Технологія бездротового інтелектуальної мережі SmartMesh. Нашу мережу не здолати. Основні особливості побудови mesh мереж [Електронний ресурс]. URL: <https://socscan.ru/uk/virusy/tehnologiya-besprovodnoi-intellektualnoi-seti-smartmesh-nashu-set-ne-odolet.html> – Дата доступу 15.12.2020.

15. Безпроводова MESH-мережа з енергозбереженням та балансуванням мережного навантаження URL: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/41948/.pdf> – Дата доступу 18.12.2020.

16. Бездротові ad hoc мережі [Електронний ресурс]. URL: <https://montazhtv.ru/uk/rezhim-ad-hoc-besprovodnoi-seti-harakterizuesya-sleduyushchim-vvedenie-v-seti-adhoc/> – Дата доступу 21.12.2020.

17. Ad Hoc мережа [Електронний ресурс]. URL: <https://nettech.ua/news/ad-hoc> – Дата доступу 25.12.2020.

18. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИИУЦ», 2016. 21 с

19. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php.

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

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

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

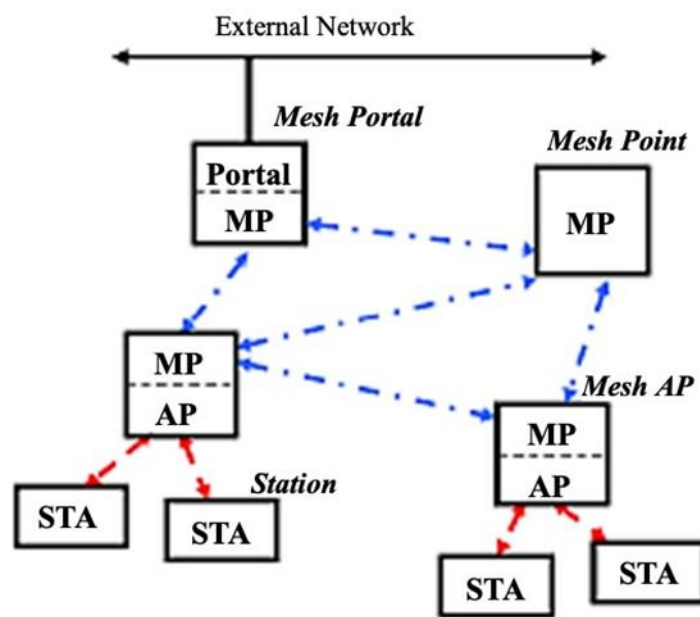
23. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

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

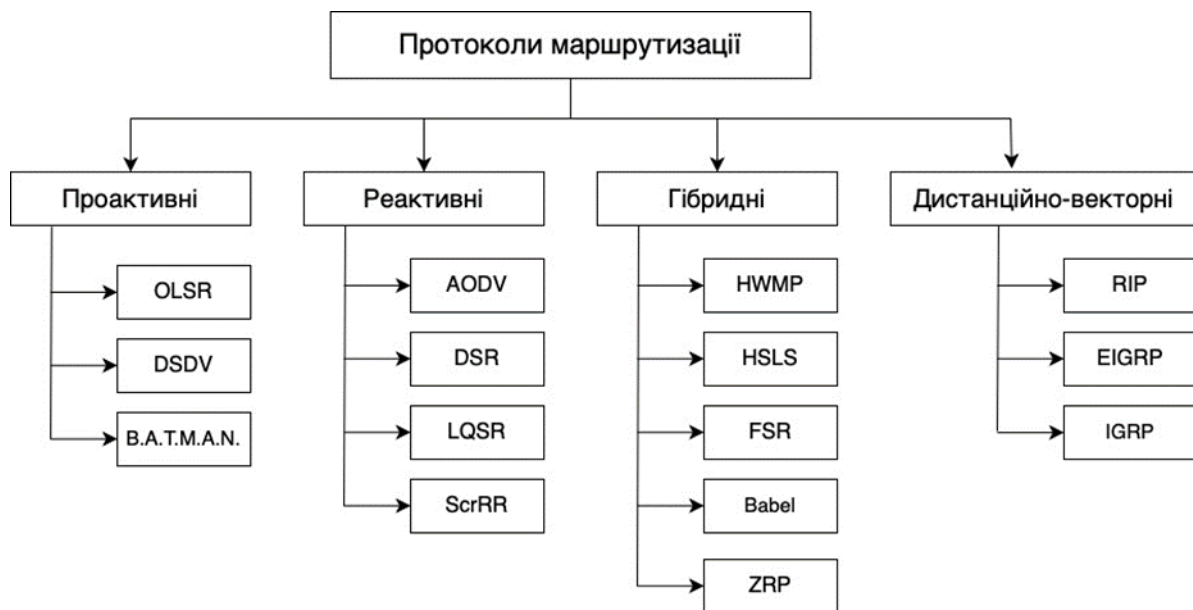
25. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

Додаток А
(обов'язковий)

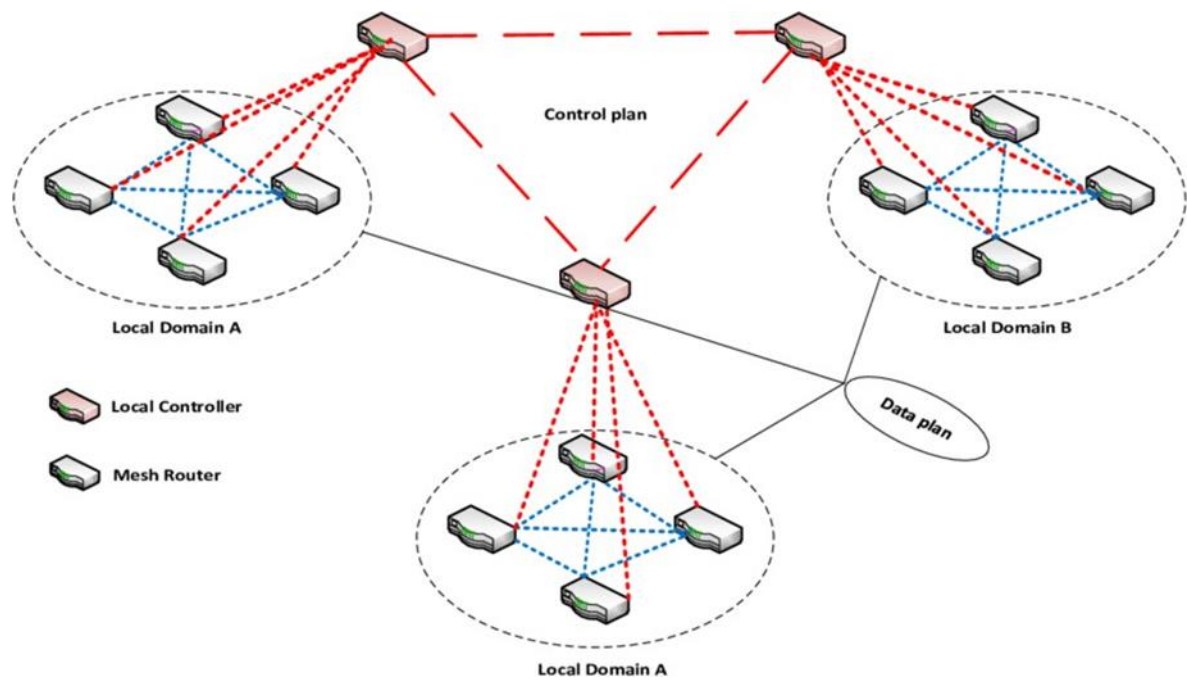
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ MESH-МЕРЕЖ В УМОВАХ ВЕЛИКОЇ
ЩІЛЬНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ТА ВІДСУТНОСТІ МЕРЕЖЕВОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



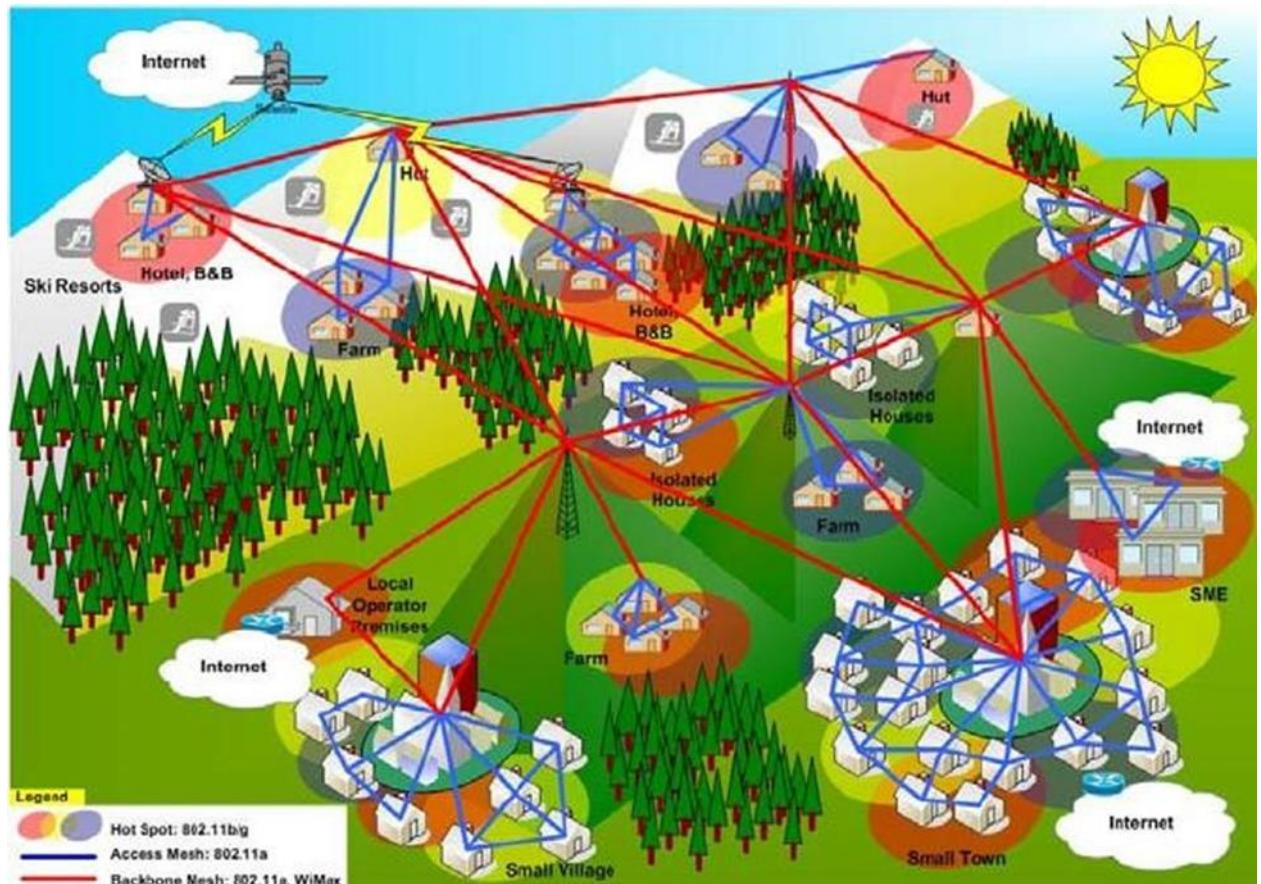
Архітектура WMN мережі



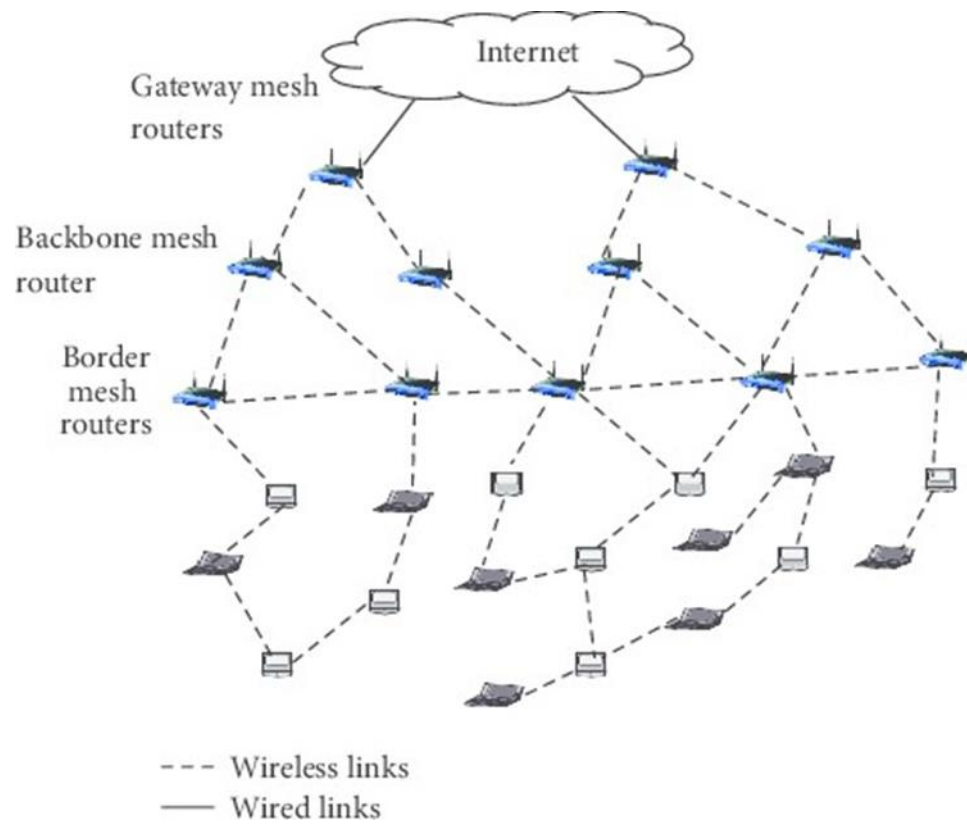
Протоколи маршрутизації в самоорганізованих мережах



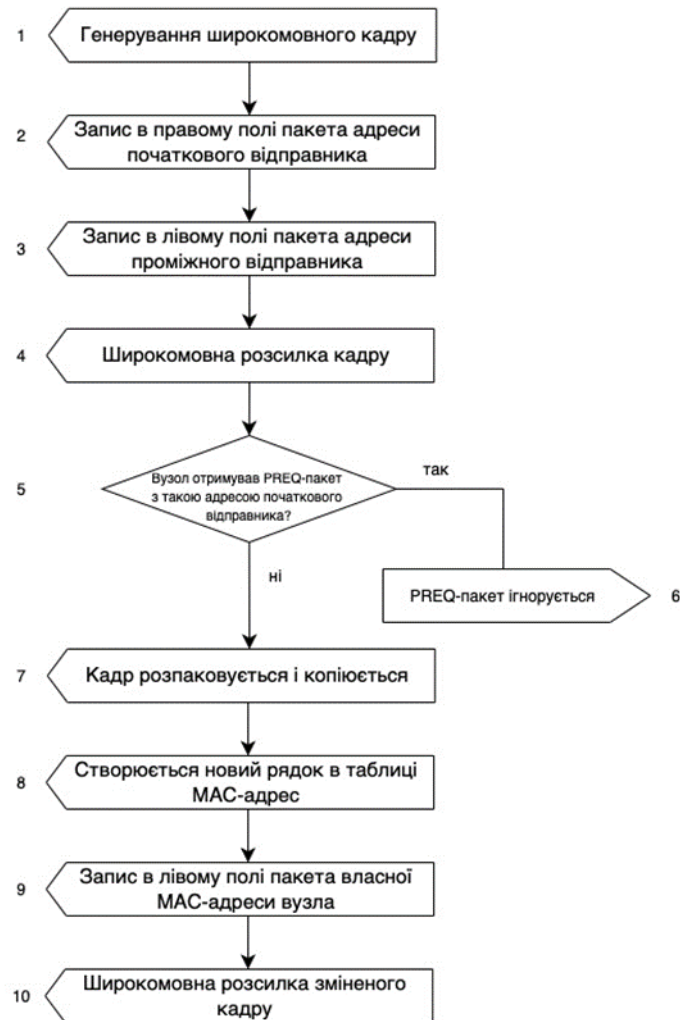
«Плоска» безпроводна мережа



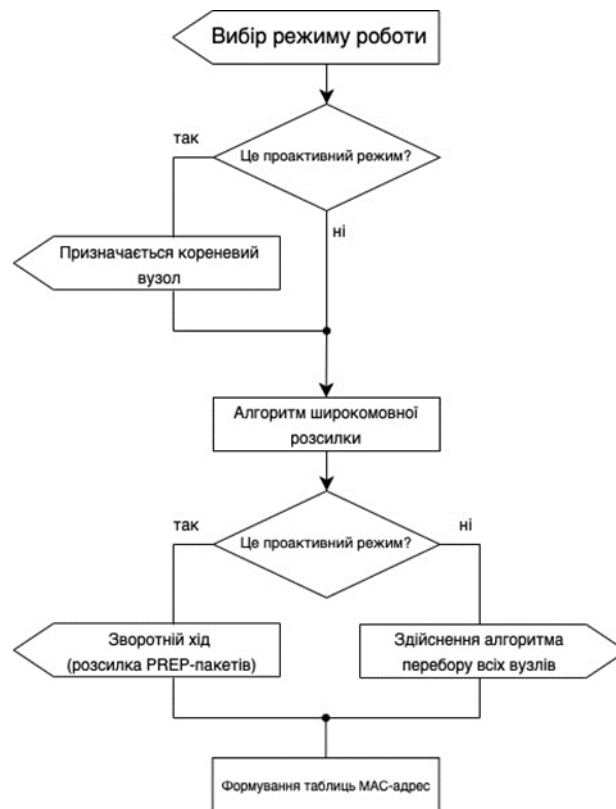
Ієрархічна Mesh-мережа



Гібридна Mesh-мережа



Алгоритм широкомовної розсилки у реактивному режимі
протоколу маршрутизації HWMP



Алгоритм роботи удосконаленого протоколу маршрутизації HWMP

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Ефективність алгоритмів mesh-мереж в умовах великої щільності користувачів та відсутності мережевої інфраструктури

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-21б
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 6,6 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Тичинський Д.Д.

(прізвище, ініціали)