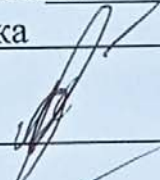


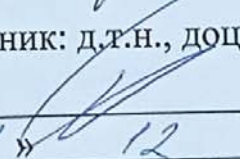
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА


на тему:

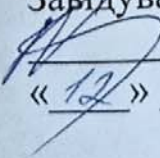
«Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22М
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка


Осіпов А.Д.

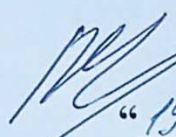
Керівник: д.т.н., доцент каф. ІКСТ

Михалевський Д.В.
« 14 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.
« 12 » 12 2023 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 12 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., проф В.М. Кичак


"19" 09 2023 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Осіпову Андрію Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах

керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, д. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 09 2023 року № 247

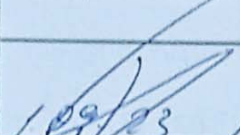
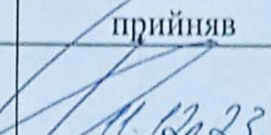
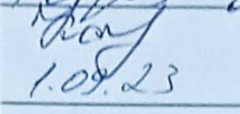
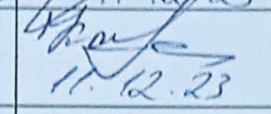
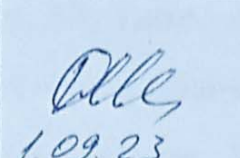
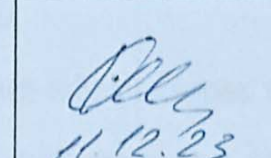
2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: частота – 2,4 ГГц; кількість каналів – 16; ширина каналу – 5 МГц; кількість давачів – 6; топологія – зірка; споживана потужність вузла – до 0,75мВт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ; особливості здійснення маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах; протоколи маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах; принципи функціонування генетичних алгоритмів; використання генетичних алгоритмів для маршрутизації у БСМ; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки; література; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1) Безпроводні сенсорні мереж. 2) Класифікація БСМ. 3) Генетичний алгоритм. 4) Код генетичного алгоритму. 5) Карта маршрутизації. 6) Результати моделювання.

6. Консультації розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Технічна частина | Михалевський Д.В., доцент каф. ІКСТ |  1.09.23 |  11.12.23 |
| Економічна частина | Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ |  1.09.23 |  11.12.23 |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ |  1.09.23 |  11.12.23 |

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1. | Розробка технічного завдання | 08.09.2023р. | |
| 2. | Техніко-економічне обґрунтування розробки | 17.09.2023р. | |
| 3. | Огляд особливостей маршрутизації | 06.10.2023р. | |
| 4. | Розроблення алгоритму | 27.10.2023р. | |
| 5. | Моделювання | 10.11.2023р. | |
| 6. | Аналіз економічної ефективності розробки | 17.11.2023р. | |
| 7. | Аналіз безпеки життєдіяльності, цивільний захист | 24.11.2023р. | |
| 8. | Оформлення пояснювальної записки та графічної частини | 01.12.2023р. | |
| 9. | Нормоконтроль МКР | 04.12.2023р. | |
| 10. | Попередній захист МКР, рецензування МКР | 08.12.2023р. | |
| 11. | Захист МКР ДЕК | 11.12.2023р. | |

Студент

Осіпов А. Д.

Керівник роботи

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Осіпов Андрій Дмитрович. Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 115с.

На українській мові. Бібліогр.: 36 назв; Рис.:30; Табл.: 20.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – розроблення ефективних методів маршрутизації для безпроводних сенсорних мереж. У роботі було проаналізовано сучасні методи маршрутизації в безпроводних мережах. Запропоновано методи на основі генетичних алгоритмів. Промодельовано роботу алгоритму. Розраховано економічний ефект. Розглянуті питання безпеки життєдіяльності та охорони праці. Отримані результати задовольняють вимогам технічного завдання.

Ключові слова: безпроводний, мережа, маршрутизація.

ABSTRACT

UDK 621.396

Osipov Andrii Dmytrovych. Enhancing the efficiency of routing in wireless sensor networks. Master thesis. – Vinnytsya: VNTU, 2023. – 115pp.

In Ukrainian language. Refs.: 36 titles; figs.: 30; tables: 20.

The aim of the master thesis is developing the efficient methods of routing for wireless sensor networks. In this thesis modern methods of the routing in wireless networks are analyzed. Methods based on genetic algorithms are proposed. Operation of a wireless sensor network was simulated. The economic gain was calculated. Problems of industrial and occupational safety were considered. The obtained results satisfy preliminary specifications.

Keywords: wireless, network, routing.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| Вступ..... | 4 |
| 1 ОСОБЛИВОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ..... | 6 |
| 1.1 Принципи та задачі маршрутизації..... | 6 |
| 1.2 Аналіз параметрів маршрутизації | 8 |
| 2 ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ | 20 |
| 2.1 Класифікація протоколів маршрутизації..... | 20 |
| 2.2 Маршрутизація, орієнтована на дані..... | 23 |
| 2.3 Ієрархічні протоколи маршрутизації | 35 |
| 2.4 Маршрутизація на основі місця розташування..... | 40 |
| 2.5 Порівняльний аналіз протоколів маршрутизації | 45 |
| 3 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ..... | 46 |
| 3.1 Простий генетичний алгоритм..... | 46 |
| 3.2 Генетичні оператори | 49 |
| 4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ У БСМ..... | 55 |
| 4.1 Енергоефективна маршрутизація | 55 |
| 4.2 Динамічна маршрутизація | 65 |
| 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА..... | 76 |
| 5.1 Оцінювання наукового ефекту | 76 |
| 5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи | 80 |
| 5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи | 93 |
| 5.4 Висновки по розділу..... | 94 |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..... | 95 |
| 6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт..... | 95 |
| 6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії..... | 98 |
| 6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження області працездатності | 103 |

| | |
|---|-----|
| РЕС в умовах дії загрозливих чинників НС..... | |
| ВИСНОВКИ..... | 106 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 108 |
| ДОДАТКИ..... | 113 |
| Додаток А Ілюстративна частина..... | 114 |
| Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень..... | 115 |

ВСТУП

Актуальність теми. Наразі безпроводні сенсорні мережі (БСМ) можна розглядати як одну із найбільш важливіших галузей подальшого розвитку телекомунікаційних технологій у двадцять першому столітті. Сама ідея побудови та функціонування безпроводних сенсорних мереж набула визнання як в науковому середовищі, так і в промисловості та у суспільстві по всьому світові.

У основі побудови БСМ покладана ідея відмови від безпосередньої участі людей у процесі зборі інформації, через можливу ускладненість їхньої присутності у визначеному місці чи при виконанні певного технологічного процесу, особливо у випадку, коли збір необхідний інформації триває протягом деякого досить великого інтервалу часу. При розгортанні БСМ її користувачі можуть досліджувати навколишні явища і процеси, а також отримувати інформацію, що може бути як досить простою (вимірювання температури), так і дійсно складною (використання у військових областях).

На сьогоднішній день такі безпроводні сенсорні мережі є основним способом збору необхідних даних для досить широкого спектру додатків, до яких відносяться сільське господарство, навколишнє середовище, військова справа, транспорт, здоров'я та інші.

Кожен сенсорний вузол безпроводової мережі збирає необхідні дані від навколишнього середовища. Потім він передає їх до шлюзів чи базових станцій. Це може бути здійснено безпосередньо чи через інші сенсорні вузли. Як правило, всі сенсорні вузли мають досить обмежені можливості з електроживлення і його можливого відновлення. Саме тому однією з основних наукових проблем при розгортанні БСМ є вибір способу організації передачі даних між сенсорними вузлами та шлюзами чи базовими станціями.

Безпроводні сенсорні вузли (БСВ) споживають електроенергію для збору інформації, передавання та обробки повідомлень, а також для здійснення обчислень. Термін служби сенсорного вузла визначається від терміном служби елементів живлення, часто такими є звичайні батареї. Витрати електроенергії

під час передачі повідомлень можуть складати до 75% доступного енергетичного ресурсу. В той же час, при цьому мають бути вирішені завдання як надсилання повідомлень, так і маршрутизації.

Аналіз останніх досліджень. Проведені літературний огляд та його аналіз продемонстрували, що такі вітчизняні науковці як Климаш М.М., Захарченко С.М., Куліш Є.Б., Лемешко О.В., Єременко О. С., Жураковський Б.Ю. присвятили вирішенню проблеми маршрутизації у безпроводних мережах багато уваги [1-7].

Мета та задачі дослідження. Метою даної магістерської дипломної роботи є підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів маршрутизації;
- обґрунтувати покращений метод маршрутизації;
- дослідити роботу методу маршрутизації.

Об'єктом дослідження є безпроводні сенсорні мережі.

Предметом дослідження є маршрутизація в безпроводних сенсорних мережах.

Методи дослідження. Для рішення поставлених завдань були використані методи теорії телетрафіку, теорії інформації та передавання сигналів, методи нечітких обчислень, імітаційне моделювання.

Новизна одержаних результатів: У магістерській кваліфікаційній роботі шляхом використання теорії м'яких обчислень розроблено метод маршрутизації, побудований на математичному апараті генетичних алгоритмів, використання якого дозволить підвищити ефективність функціонування безпроводних сенсорних мереж.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ІІІ науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

1 ОСОБЛИВОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

В найпростішому випадку всі дані, що були зібрані давачами БСМ передаються у напрямку до базової станції, яка з'єднує БСМ з іншими мережами, де ці дані будуть оброблені та проаналізовані. Основним завданням мережевого рівня набору протоколів зв'язку є реалізація процесу встановлення шляху передачі даних від джерела до приймача через один або більше ретрансляторів. Цей процес називається маршрутизацією.

1.1 Принципи та задачі маршрутизації

У сенсорних мережах невеликих розмірів, де давачі розташовані дуже близько один до одного, є можливість забезпечити прямий зв'язок з базовою станцією між всіма сенсорними вузлами. На рис. 1.1 подано принцип забезпечення прямого зв'язку, у випадку, коли всі сенсорні вузли мають змогу зв'язатися з приймачем без необхідності ретрансляції повідомлень через інші вузли. Така модель прямого зв'язку є найпростішою реалізацією, тут всі дані здійснюють лише один стрибок для досягнення цілі.

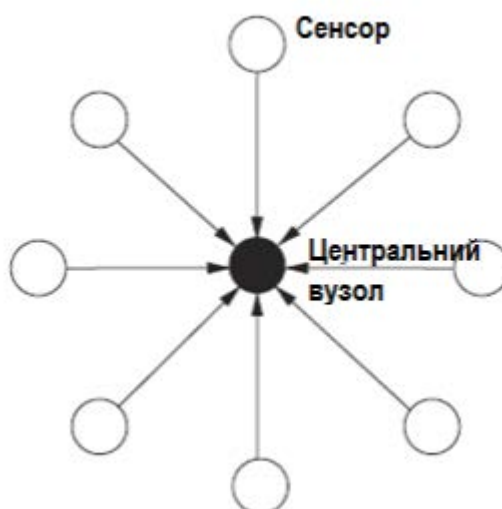


Рисунок 1.1 – Модель прямого зв'язку

Як відомо, більшість сенсорних мереж складаються із багатьох сенсорних вузлів, які покривають велику територію, що, в свою чергу, вимагає застосування непрямого зв'язку (рис. 1.2). При цьому сенсорні вузли не лише генерувати і передають власну інформацію, але додатково виконують ретрансляцію повідомлень інших сенсорних вузлів. Основне завдання мережевого рівня сенсорних вузлів – це визначення шляху від сенсора до приймача через інші сенсорні вузли, які виступають у ролі проміжних.

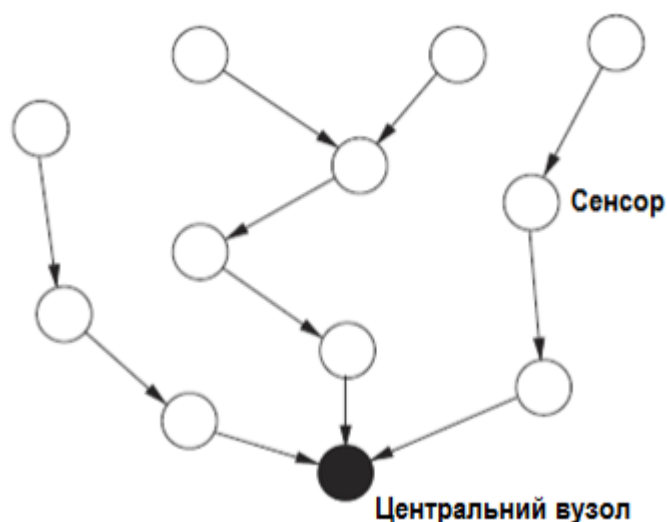


Рисунок 1.2 – Модель непрямого зв'язку

Розглянутий метод здійснення маршрутизації є досить складним через унікальність характеристик сенсорних мереж, таких як недостатність ресурсів або ненадійність безпроводного середовища. Зокрема, обробка даних, зберігання, пропускна здатність, енергоємність потребують досить простих рішень маршрутизації, а зміни топології мережі потребують варіативних рішень маршрутизації. Коли вузли сенсорної мережі розгорнають детермінованим способом, то для зв'язку між ними та базовою станцією застосовують визначені маршрути маршрутизації. Але у випадку, коли вузли розташовуються випадком чином, топологія мережі буде неоднорідною і її неможливо бачити заздалегідь. Тоді першочерговим завданням вузлів буде самоорганізація, це означає, що вони повинні співпрацювати для того, щоб визначити у просторі своє місцерозташування, а також визначити сусідні вузли та шлях до базової станції. Одним з

найбільш важливих параметрів для сенсорних мереж є час життя мережі. Його визначають як термін експлуатації мережі до того, як виснаження автономного джерела живлення вийде з ладу один з вузлів.

Зокрема, пошук маршрутів з мінімальною вартістю може призвести до появи нерівномірного розподілення навантаження між вузлами мережі. Це можна пояснити тим, що вузли, котрі знаходяться на оптимальних маршрутах, які часто використовуються, будуть здійснювати ретрансляцію пакетів значно частіше. При цьому можуть утворюватися такі точки, що будуть використовуватися для одночасної ретрансляції великих об'ємів інформації. Наявність подібних точок із підвищеним навантаженням на вузли призводить до виникнення проблем з пропускнуною спроможністю мережі та передчасним виснаженням джерел енергії. Отже, з метою забезпечення високих показників ефективності функціонування мережі та тривалості її життя, потрібно забезпечити балансування навантаження, що представляє собою розподіл потоків трафіку між вузлами з метою для більш рівномірного використання їхніх ресурсів, зокрема енергії. Отже, у загальному випадку, завдання пошуку маршрутів із балансуванням навантаження представляє собою оптимізацію загальних енергетичних витрат всієї сенсорної мережі, а не для кожного маршруту окремо. Таким чином, для сенсорних мереж відокремлюють дві задачі маршрутизації, котрі відрізняються між собою критеріями пошуку маршрутів. Перша – це задача пошуку оптимальних маршрутів, а оптимальним маршрутом буде вважатися той шлях доставлення пакетів інформації від вузла-відправника до вузла-одержувача, котрий потребує мінімальних сумарних витрат ресурсів всіх вузлів цього шляху. Друга – це задача маршрутизації при забезпеченні максимальної тривалості життя сенсорної мережі

1.2 Аналіз параметрів маршрутизації

Безпроводні сенсорні мережі широко відрізняються, в залежності від призначення, за своїми обмеженнями та характеристиками, що необхідно врахову-

вати при розробленні протоколу маршрутизації. Так, більшість сенсорних мереж обмежені в енергетичних ресурсах, продуктивності та ємності накопичувачів. Такі мережі можуть широко відрізнятись між собою за масштабами та площами географічних зон, що покриваються. Всесвітні програми адресації (наприклад, IP адреси) можуть виявитись недоступними або недоцільними в мережах із різнотипними вузлами або із мобільними вузлами. Окрім того, залежно від призначення інформації, сенсорні дані можуть збиратись у різні відмінні між собою способи. У таких схемах керованих часом як, наприклад, моніторинг навколишнього середовища, сенсорні вузли із певною періодичністю поширюють дані, зібрані ними, до приймача. У таких схемах керованих подіями як, наприклад, виявлення пожеж, сенсорні вузли повідомляють інформацію, зібрану ними, лише тоді, коли відбувається певна подія. У схемах керованих запитом запит на збір даних розсилається приймачей, який збирає дані від сенсорів лише за необхідністю.

Таким чином, параметри маршрутизації застосовуються для того, щоб охарактеризувати різні цілі наявних протоколів маршрутизації, при цьому враховується використання ресурсів.

Розглянемо найбільш важливі параметри і критерії, які вживаються при розробленні способу маршрутизації.

1.2.1 Кількість проміжних вузлів

Найбільш часто в протоколах маршрутизації поширеним використовується показник, який має назву мінімальний хоп (чи найкоротший хоп). Це означає, що протокол маршрутизації буде пробувати знайти шлях від відправника інформації до одержувача, котрий займе найменше число проміжних вузлів. У такому досить простому алгоритмі кожна ланка шляху має визначену вартість, протокол маршрутизації буде обирати такий шлях, котрий мінімізує загальну вартість для передавання інформації від джерела до одержувача. Основна ідея такої метрики –найкоротший шляху приведе до зниження часу передавання і

малих витрат ресурсів, так як задіяне якнайменше число передавальних вузлів. В той же час, такий підхід не бере до уваги фактичну доступність ресурсів на вузлі, тому результуючий маршрут може бути неоптимальним з погляду затримки енергії і запобігання заторів. В багатьох БСМ потрібно використовувати вузли із різними апаратними можливостями – потужністю, ємністю джерела енергії, пропускною здатністю. Тому необхідно враховувати різномірність елементів сенсорної мережі у процесі маршрутизації. В той же час, метрика мінімального хопу, завдяки своїй простоті і практичності, знайшла своє застосування у багатьох протоколах маршрутизації.

1.2.2 Енергія

Енергоефективність є ключовим аспектом маршрутизації у безпроводних сенсорних мережах. У більшості випадків серед елементів вузла, найбільше енергії буде споживати приймач. Саме тому, найбільш поширений спосіб знизити середнє енергоспоживання сенсорного вузла – мінімізації активності у радіоканалі, такої як передача та прийом даних, а також прослуховування каналу. Оскільки кожен вузол – це не лише джерелом та одержувачем інформації, а ще й проміжний ретранслятор пакетів, то важливим завданням рівня маршрутизації є оптимізація об'ємів та напрямів потоку трафіку.

Відомі різні інтерпретації поняття енергоефективності. Одна із ключових ідей – це мінімальні витрати енергії на один пакет, що є найпростішою концепцією енергетичної ефективності, так як її ціль – мінімізація загальної кількості енергії, котру потрібно витратити для поширення одного пакету від джерела до одержувача. Повна енергія – це сумарна енергія, котра споживається кожним вузлом протягом усього маршруту для приймання і передавання пакета.

На рис. 1.3 подано приклад сенсорної мережі невеликих розмірів для випадку, коли вузол джерела намагається передати пакет до вузлу одержувача за маршрутом, котрий дозволяє мінімізувати витрати енергії пакета. Число на лінії зв'язку означає вартість пакета, який передається у цьому напрямку. Тому цей

пакет буде передано через вузли A – D – G, причому загальна вартість дорівнює 5. Також цей маршрут буде відрізнятися від варіанту, де використовується мінімальний хоп маршруту (B – G).

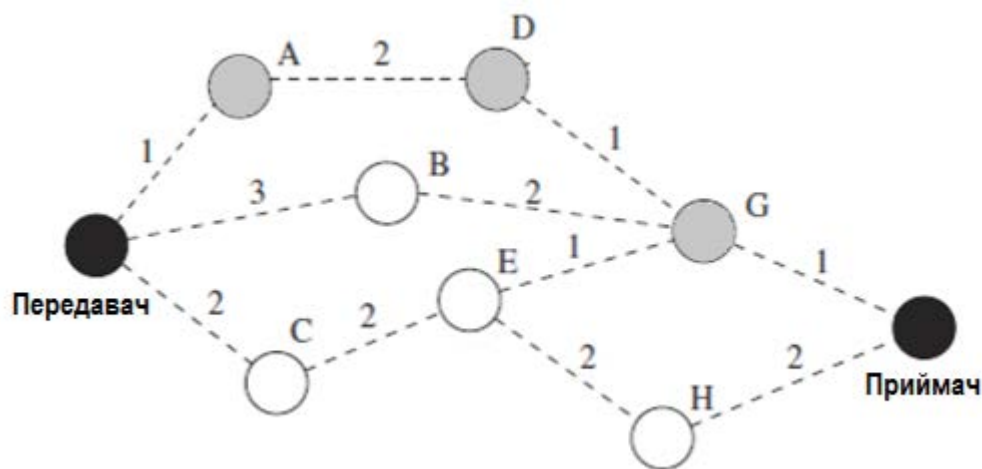


Рисунок 1.3 – Вибір маршруту при умові мінімальних витрати енергії на пакет

Концепція максимального часу поділу мережі означає поділ усієї сенсорної мережі на декілька підмереж меншого розміру. Це має місце у випадку, коли виходить з ладу останній вузол, котрий з'єднує дві частини сенсорної мережі. В результаті підмережі можуть бути недоступні, сенсорні вузли в цій підмережі працюють вхолосту. Таким чином, основна задача полягає в зменшенні споживання енергії на сенсорних вузлах, котрі мають вирішальне значення для підтримки всієї мережі, де кожен вузол, може бути досягнутий за як мінімум один маршрут. Так, наприклад, за теоремою про максимальний потік та мінімальний розріз можна знайти такий мінімальний набір вузлів, видалення яких призведе до розділення мережі. Після визначення цих вирішальних вузлів протоколом маршрутизації можна збалансувати навантаження в сенсорній мережі.

Зокрема, вирішальним вузлом на рис. 1.4 вузол є D. Якщо батарея буде вичерпана, то вузли F, I, J будуть недоступні для інших вузлів в мережі.

При вживанні концепції мінімальної різниці у рівнях потужності вузлів, усі вузли мережі є однаково важливими, а задача полягає у розподіленні споживання енергії на всіх вузлах мережі максимально рівномірно. Ціль зазначе-

ного підходу – максимізувати термін служби мережі, унеможливити ситуацію, коли деякі вузли виснажувались раніше за інших, що зменшувало б постійно розмір мережі, тобто збереження більшого числа робочих вузлів максимально довго. В ідеальному випадку всі вузли мають вимкаються одночасно, але це практично нездійсненно.

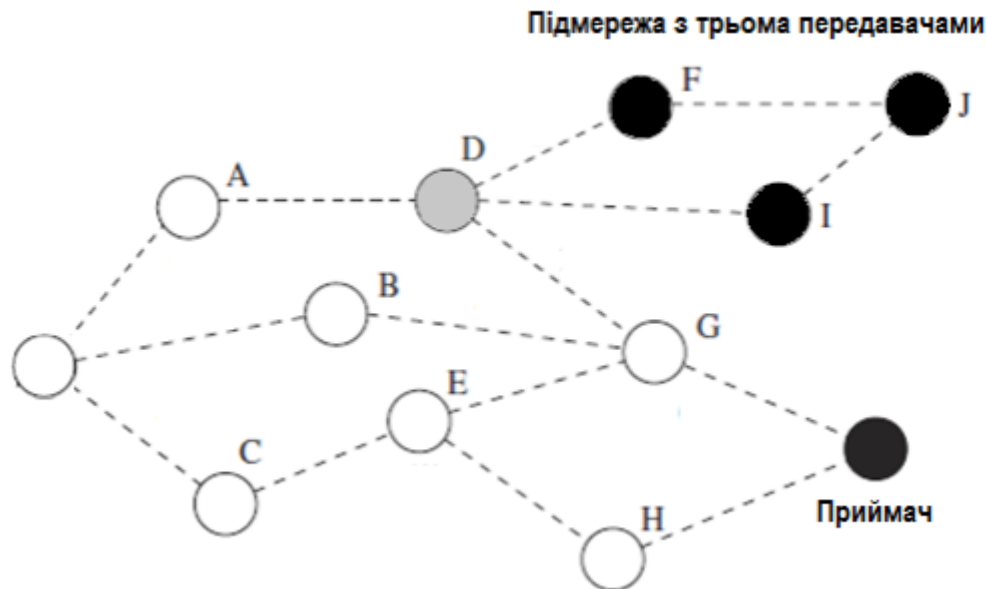


Рисунок 1.4 – Вибір маршруту згідно критерію максимального часу поділу мережі

Ще один підхід – визначення середньої енергоємності. Тут ключовим моментом буде не енергетична вартість поширення пакетів, а енергоємність вузлів. Протокол маршрутизації прокладає від джерела до одержувача маршрут, котрий має найбільшу сумарну енергоємність вузлів. На рис. 2.5 цифри під вузлами позначають енергоємність вузлів, а протокол маршрутизації може вибрати шлях С – Е – Н, котрий характеризується найбільшою сумарною потужністю. Такий протокол маршрутизації має бути ретельно розроблений так, аби не обирати надмірно довгі маршрути для максимізування загальною пропускну здатність енергії. Зміна цього показника виконується шляхом максимізування середньої енергоємності, що і дозволяє уникнути вказаної проблеми.

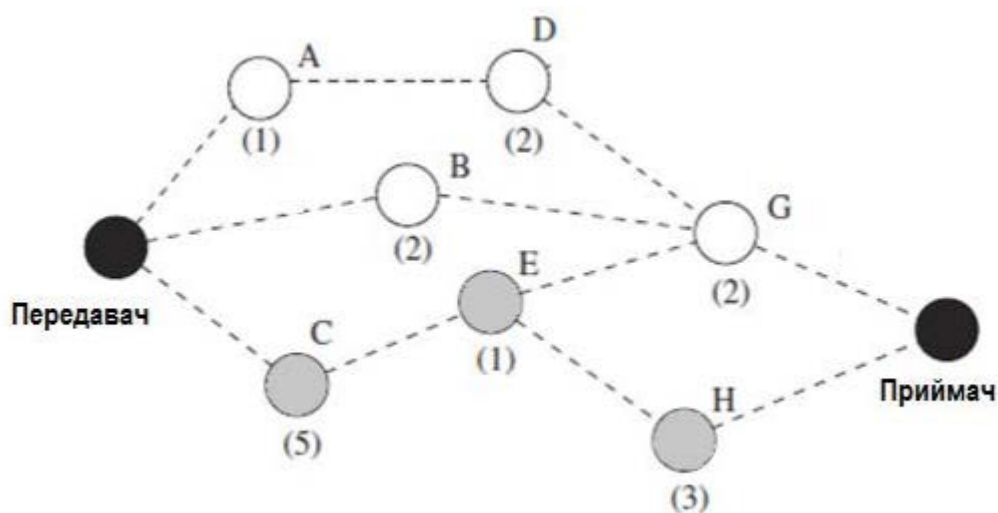


Рисунок 1.5 – Вибір маршруту за середньою енергоємністю

При застосуванні принципу мінімального обсягу енергії, а не в максимізації енергетичних потужностей по всьому шляху, мета маршрутизації – вибір шляху з мінімальною енергоємністю. Цей метод варто застосовувати на маршрутах з великими енергетичними запасами, при цьому вузли малої потужності захищаються від передчасного закінчення терміну дії. На рис. 2.6 протокол вибирає маршрут В – G, оскільки мінімальна ємність по цьому маршруту дорівнює 2, що є більшим, ніж мінімальна потужність вузлів у інших можливих маршрутах.

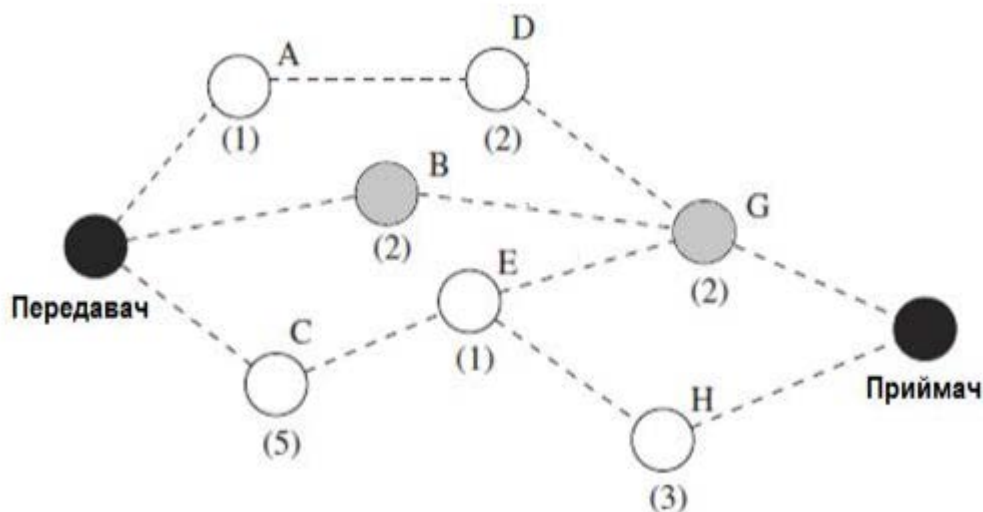


Рисунок 1.6 – Вибір маршруту за мінімальним обсягом енергії

Різні формулювання способів підвищити економії електроенергії призводять до досить відмінних реалізацій протоколів, вони відрізняються одна від одної за своїми результатами та витратами. Так, для визначення мінімальної енергії, споживаної для кожного пакету, від розміру пакету може залежати вартість для прийому і передачі цього пакета. Окрім того, енергетична потужність змінюється із часом, тобто протокол маршрутизації що застосовує метрики на основі ємності має ці дані періодично оновлювати.

Функція забезпечення енергоефективності записується так:

$$(R'', T'') = f(R', T', L),$$

де R'' – це вектор зв'язків між вузлами, який доповнено новими маршрутами,

T'' – це множина транзитних вузлів, що враховує змінені і додані на цьому етапі вузли,

$f(x)$ – це функція перерозподілення транзитних вузлів для забезпечення енергоефективності

$$y_e = g(R'', T'', Q),$$

де $y_e \in \{0, 1\}$ – це результат перевірки енергоефективності сенсорної мережі,

$g(x)$ – це функція перевірки на енергоефективність.

Наразі відсутнє універсального визначення поняття енергоефективності, адже воно залежить від предметної області, але досить часто уживають такий підхід, при якому енергоефективність визначається раціональністю використання наданої ззовні енергії.

Коефіцієнт енергоефективності можна визначити так:

$$E = \frac{W_p}{W_p + W_{NP}},$$

де W_p – енергія використана корисно;

W_{NP} – непродуктивні витрати.

Досить часто поняття часу автономної роботи не відрізняють від поняття енергоефективності. Зокрема вважається, що вища енергоефективність дозволяє забезпечити більший час автономної роботи. З метою спростування вказаного факту наведемо приклад: сенсорна мережа, в якій не здійснюється передавання корисних даних, енергія витрачається лише на паразитні процеси, матиме час автономної роботи на порядок більший, ніж та мережу, котра транслюватиме дані. При цьому, так як енергія не витрачається в корисних цілях, то коефіцієнт ефективності рівен нулю.

1.2.3 Надійність

У деяких випадках умови експлуатації сенсорної мережі можуть бути досить жорсткими, тому є певна ймовірність виходу з ладу вузлів та порушення зв'язків між вузлами. Таким чином, з метою забезпечення для всієї системи високої надійності, метод маршрутизації має формувати нові маршрути автоматично в обхід виключеним вузлам, при цьому витрачаючи якомога менші ресурси на переконфігурацію маршруту. У такому випадку у багатьох системах будуть обрані ті маршрути, котри протягом довгого періоду часу лишатимуться стабільними. Щоб цього досягти, цього вузол може змінювати та оцінювати якість каналу порівняно із сусідніми, а потім обирати сусіда для слідуючого хопу, це підвищує ймовірність успішної передачі. Протокол маршрутизації здатен ідентифікувати лише декілька шляхів для мінімального хопу, потім він вибрати той шлях, котрий гарантує вищу якість серед всіх інших маршрутів. Для мереж, які містять мобільні вузли, протокол маршрутизації застосовує метрику стійкого зв'язку, що дозволяє виміряти, наскільки доступним буде канал в майбутньому. Такі показники призначені для застосування при виборі серед більш надійних маршрутах та стаціонарних вузлів.

1.2.4 Якість обслуговування

Поняття якості обслуговування (Quality of Service – QoS) відноситься до показників ефективності в мережах, а саме – для виявлення затримки при передаванні пакету, пропускної здатності та коефіцієнта помилок. Зазвичай, вибір метрики QoS визначається типом програми. Безпроводні сенсорні мережі, котрі здійснюють виявлення і супроводження цілей потребують малих затримок коли передають термінових сенсорних даних, а мережі, які характеризуються інтенсивним обміном даними потребують високої пропускної здатності. При виборі оптимальний з точки зору деяких показників якості обслуговування маршрут передачі даних, метод маршрутизації в своїй оцінці покладається на набір параметрів стану вузлів та каналів зв'язку. Такі параметри відображають поточний розподіл у сенсорній мережі, тому їх аналіз сприяє вибору відповідних маршрутів передавання даних, наприклад, в обхід заторів трафіку або з мінімізацією затримки передавання пакету. Ресурсом мережі може бути любий ресурс, який витрачається при пошуку маршруту, встановлення та підтримки сесій передавання даних, підтримання таблиць маршрутизації.

Розглянемо класифікацію мережевих ресурсів, які необхідні для забезпечення якості маршрутизації:

- процесорний час. Незважаючи на те, що з мобільні пристрої кожним роком мають все більш і більш потужні процесори, вони обмежені у обчислювальних можливостях та не можуть конкурувати з стаціонарними комп'ютерами. Але цей фактор є найменш критичним, так як методи маршрутизації не створюють великого навантаження на процесор;

- обсяг пакетного буфера вузла. При роботі мережі декілька вузлів передають пакети даних одночасно або маршрут до вузла ще виявлений, і тоді потрібно тимчасово помістити пакети в буфер. При повному заповненні буфера всі вхідні пакети будуть відкидатися, що, в свою чергу, призведе до зростання частки втрачених пакетів;

– пропускна здатність каналу. Цей показник вимірюється в бітах на секунду і характеризує швидкість передачі даних та затримку. Але, так як велика кількість вузлів використовують канал зв'язку одночасно, постає необхідність виразити частку пропускної здатності, котра отримує кожен вузол. Спосіб вираження цієї частки визначається методом доступу до середовища передачі. У випадку використання змагального методу доступу, жодному вузлу не буде гарантовано отримання доступу до каналу у порівнянний йому момент, так як інші вузли одночасно з ним також можуть розпочати передавання даних. Тобто, доступ до середовища передавання може надаватися лише із певною ймовірністю. В той же час, більшість методів маршрутизації ґрунтуються на припущенні, що доступ до середовища передавання буде надаватися саме за змагальною схемою.

Для оцінювання ефективності функціонування методів маршрутизації за якістю обслуговування використовуються такі показники:

– середня затримка передавання пакету. Вона визначається як час, котрий минув із моменту відправлення пакета вузлом до моменту його прийому вузлом-одержувачем;

– частка втрачених пакетів. Вона обчислюється для всієї мережі за весь час її роботи і вимірюється у відсотках як доля втрачених пакетів відносно загального числа відправлених пакетів;

– частка прийнятих сесій передавання даних. Вона визначається у відсотках. У випадку, коли метод маршрутизації не зміг виявити потрібний маршрут для передавання даних із урахуванням якості обслуговування, тоді він може відмовити встановлювати сесію. Такий показник відображає, який саме відсоток сесій було прийнято успішно. Значення такого показника відображає ефективність методу маршрутизації та якість зв'язку. Але його неможливо використовувати для тих методів, котрі прагнуть поліпшити параметри якості обслуговування для цієї мережі;

– частка успішних сесій. Цей показник також визначається у відсотках і показує, який саме відсоток додатків було опрацьовано успішно після того, як

методом маршрутизації було встановлено сесію передачі даних. Цей показник а може бути важливіше за частку прийнятих сесій передачі даних;

- загальна пропускна здатність мережі. Це є обсяг даних, які були передані всією мережею за одиницю часу;

- пропускна здатність вузла. Це є середня пропускна здатність, яка досягається цим вузлом за час роботи мережі. Метод маршрутизації має визначати поточну пропускну здатність каналу зв'язку та оцінювати його придатність згідно цього параметру;

- затримка виявлення маршруту. Це середній час між моментом, коли вузол запитує на встановлення сесії та моментом, у який протокол здійснить цю сесію;

- енергоефективність протоколу маршрутизації. Цей показник визначається як заряд батареї живлення, що витрачається на оброблення і передавання одного пакета;

- нормалізоване навантаження маршрутизації. Цей показник визначає який є відсоток керуючих пакетів маршрутизації серед усіх пакетів даних і дає можливість оцінити непрямі витрати на маршрутизацію, а саме – на передачу контрольних повідомлень;

- час відновлення маршруту. Відображає час, котрий проходить між моментом збою або виходу з ладу проміжного вузла на маршруті і моментом, у який протокол маршрутизації встановлює обхідний маршрут для сесії. Зазвичай він характеризує стійкість протоколу маршрутизації до збоїв у мережі і можливість балансування навантаження.

Варто зазначити, що при розробленні сенсорної мережі потрібно знайти баланс між якістю обслуговування потрібних програм та енергоефективністю всієї мережі. При проектуванні методу маршрутизації для БСМ доводиться обирати між різними можливостями залежно від мети та призначення такої мережі. Дуже важливим є вибір між затримкою передачі пакету та пропускну здатністю мережі. У сенсорних мережах ці чинники є взаємовиключними. Якщо знизити вимоги до затримки передавання пакетів, збільшується загальний

обсяг трафіку переданого мережею, це досягається збільшенням розміру пакетів і резервуванням каналів зв'язку на більш тривалий час. Додатково можна використовувати наступний алгоритм маршрутизації, оскільки програма не накладає жодних обмежень на затримку передачі пакету. Джерело може розділяти пакети сеансу та надсилати їх на різні сусідні вузли. Ці вузли, увійшовши в зону прямої взаємодії з приймаючим вузлом, посилають йому збережені пакети.

За рахунок розділення маршрутів досягається висока щільність передачі даних, але пакети можуть надходити із абсолютно різними затримками.

Як іншу стратегію, ви можете спробувати зменшити затримку передачі, якщо надсилати пакети кількома маршрутами одночасно. Але такий метод знижує ефективність використання пропускної здатності мережі загалом, відправивши кілька примірників одного пакету. Очевидно, що такий процес також призводить до збільшення споживання енергії для транспортування повідомлення. Отже, з точки зору конструкції безпроводового датчика, мета оптимізації процесу маршрутизації полягає в тому, щоб максимально відповідати вимогам багатьох користувачів, тобто покращення показників якості обслуговування для всієї мережі або для окремих сеансів передачі даних.

2 ПРОТОКОЛИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Класифікація протоколів маршрутизації

Відомі різні способи класифікації протоколів маршрутизації. На рис. 2.1 подана класифікація протоколів маршрутизації за організацією мережі. Більшість протоколів маршрутизації явно належать до одного з трьох класи [8]. Плоскі протоколи маршрутизації припускають, що всі вузли мають рівні функції та ролі. В ієрархічних протоколах маршрутизації різні вузли мають різні ролі в процесі маршрутизації, тобто кілька вузлів можуть передавати дані від імені інших, тоді як інші вузли лише генерувати та поширювати дані, отримані від власних датчиків. Протокол маршрутизації на основі розташування залежить від місця розташування інформації, отриманої від вузлів, щодо якої необхідно прийняти рішення подальшої маршрутизації.



Рисунок 2.1 – Класифікація протоколів згідно способу організації мережі

Протоколи маршрутизації відповідають за визначення або ініціалізацію маршруту від відправника до потрібного одержувача. Цей процес можна використовувати для розрізнення різних типів протоколів маршрутизації. На рис. 3.2 наведена класифікація методів маршрутизації за методом пошуку маршруту. Наприклад, реактивні протоколи можуть створити так званий маршрут на вимогу, тобто коли відправник забажає надсилати дані одержувачу та ще не має

визначеного маршруту. Відкриття реактивного маршруту призводить до деяких затримок у передачі даних, протокол проактивної маршрутизації встановлює маршрути, перш ніж вони знадобляться. Деякі протоколи демонструють як характеристики реактивних так і проактивних протоколів і тому відносяться до категорії протоколів гібридної маршрутизації.

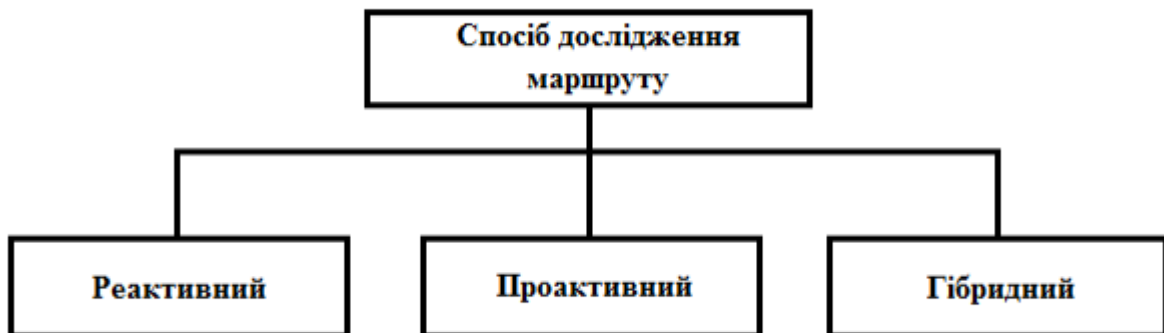


Рисунок 2.2 – Класифікація протоколів за способом дослідження маршруту

Також протоколи маршрутизації відрізняються за тими функціями, які вони реалізують (рис. 2.3). Так, метою протоколів, що засновані на узгодженні, буде зниження надлишкової передачі даних шляхом обміну узгоджених повідомлень між сусідніми вузлами до появи фактичної передачі даних. SPIN протоколи належать до цієї категорії. Багатопроменеві протоколи застосовують одночасно багато маршрутів для досягнення високої продуктивності та стійкості до помилок. У протоколах маршрутизації за запитами, дані відправляють вузлами тільки після одержання запиту від вузла приймача. Мета протоколів маршрутизації QoS – задоволення показників якості обслуговування, до яких відносяться затримка, низьке споживання енергії, малі втрати пакетів. Також, протоколи маршрутизації відрізняються способом підтримки оброблення даних в мережі. Когерентні протоколи здійснюють лише мінімальну частку оброблення до відправлення даних. А у некогерентних протоколах вузли виконувати

суттєву частку оброблення вихідних даних до передавання їх іншим вузлам для подальшої обробки.



Рисунок 2.3 – Класифікація протоколів за принципом роботи

Більша частина протоколів маршрутизації орієнтована на одноадресну маршрутизацію, це означає, що сенсорні дані спрямовуються до певного приймача. Багатоадресні і широкомовні протоколи маршрутизації поширюють дані на деяку кількість вузлів.



Рисунок 2.4 – Узагальнена класифікація протоколів маршрутизації

Кожен з протоколів є адаптованим для безпроводових мереж певного класу. Вибір протоколу маршрутизації впливає на продуктивність без-

провідної мережі, котра може бути визначена різними способами залежно від задачі, що необхідно розв'язати.

2.2 Маршрутизація, орієнтована на дані

Перша категорія протоколів маршрутизації – протоколи з плоским способом організації мережі. Для створення спеціалізованих методів маршрутизації в була врахована особливість БСМ: їх вузли виконують однаковий набір функцій та взаємодіють між собою для виконання однієї задачі – збору даних від багатьох датчиків. Якщо, сенсорні вузли вимірюють фізичні параметри навколишнього середовища, то з великою ймовірністю близько розташовані вузли зафіксують подібні значення. Тому недоцільно передавати до базової станції дані від кожного окремого вузла. В результаті з'явилася нова концепція маршрутизації, що має назву маршрутизація, орієнтована на дані.

У маршрутизації орієнтованої на дані основним є пошук та поширення інформації визначеного типу або на відміну від збору даних від ряду датчиків. Базова станція передає в певні частини території покриття мережею запити, де описано яка саме інформація її цікавить. Вузли, що розташовані в цих областях, зібравши необхідну інформацію обмінюються один з одним на локальному рівні наявними даними для підвищення достовірності та зниження надмірності, потім базовій станції передають лише одне повідомлення з узагальненими показниками. Подібний принцип дає змогу суттєво зменшити обсяг мережевого трафіку і, відповідно, знизити енергоспоживання. Класичні приклади такого підходу – протоколи Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) та Directed Diffusion (DD). Області застосування методів маршрутизації з орієнтації на дані обмежуються мережами із типом трафіку «багато-до-одного». Зокрема, їх можна вважати спеціалізованими рішеннями для мереж розподіленого збору даних із великою надмірністю вузлів. Саме тому, такі методи недоцільно застосовувати в тимчасових мережах із типом трафіку «багато-до-багатьох», та в мережах де повідомлення від кожного вузла є важливими.

2.2.1 Протокол SPIN

SPIN – це сімейство протоколів, котрі забезпечують доставку даних на базі процедури «переговорів». Вони належать до методів маршрутизації із одноранговими вузлами без гарантованої доставки повідомлень, при цьому здійснюється облік витрат енергії вузлів. Такі протоколи добре підходять для сенсорних мереж із динамічною топологією та мобільними вузлами. Також туж застосовується адаптивний варіант простої техніки лавинного розповсюдження, який дозволяє суттєво підвищити ефективність маршрутизації порівняно із прототипом. Для того, аби уникнути непотрібних повідомлень до передавання даних виконується опитування між сусідніми вузлами. Повідомлення від кожного вузла передаються по всій мережі, що дає можливість отримати інформацію за запитом з будь-якого вузла з негайною її доставкою. Механізм взаємодії ґрунтується на трьох типах повідомлень:

- ADV – для інформування про нові дані у вузлі, містить їх опис у вигляді метаданих;
- REQ – для запиту даних;
- DATA – для пересилання даних.

Алгоритму має три фази. При одержанні нових даних вузол виконує попередні «переговори» із сусідніми вузлами, надсилаючи повідомлення ADV і очікуючи на відповіді REQ. Після одержання ADV, вузол-приймач перевіряє, чи були ці дані отримані раніше. У випадку, якщо це не так, вузол-приймач відповідає із проханням передати повідомлення із даними за допомогою службового повідомлення REQ. Вузол-передавач, отримавши запит на передачу REQ, відсилає зібрані дані – це повідомлення DATA. Кожен сусідній вузол, отримавши нові дані, також веде переговори зі своїми сусідами і розсилає дані тим з них, котрі в них зацікавлені, тобто які їх ще не одержали і можуть транслювати їх далі мережею. Як показано на рис. 3.5, лише вузли, що ще не мають копію оголошених даних дають відповідь на повідомлення ADV. Окрім того, після отримання повідомлення DATA від вузла А, вузли В і D, можуть об'єднати ці дані зі своїми даними і розіслати всі зібрані дані своїм сусідам.

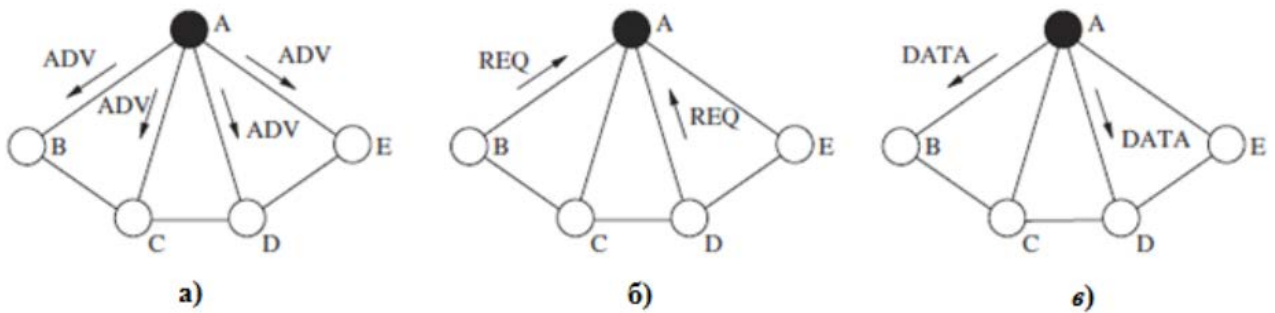


Рисунок 2.5 – Алгоритм протоколу SPIN: а – фаза інформування, б – фаза запиту, в – передавання інформації

Метадані є ідентифікатором реальних даних, на основі на яких вузол може уникнути повторної передачі одних і тих самих даних. Це призводить до зниження надмірності мережевого трафіку і зменшення витрата енергії порівняно з методом лавинної маршрутизації. Основні протоколи, які входять до сімейства SPIN – це SPIN-PP, SPIN-BC, SPIN-EC, SPIN-RL.

Протокол SPIN-EC є різновидом базового протоколу SPIN-PP. Основна відмінність – наявність контролю за енерговитратами. Доки всі вузли мають достатню енергію, вони приймають участь в трьохфазовому алгоритмі SPIN-PP. Але, як тільки енергія вузла наближається до деякого низького рівня, він знижує свою активність в роботі протоколу. Це означає, що вузол буде приймати участь у трьох фазах лише у випадку, що є гарантія того, що це не призведе до виснаження джерел живлення. Вузол відповідає на оголошення лише у тому випадку, якщо він має достатньо енергією для здійснення запиту і одержання запитаних даних. Також вузол ініціює обмін даними із сусідніми, лише якщо він гарантує, що зможе закінчити протокол, навіть коли всі сусідні вузли запросять копію даних.

Протокол SPIN-BC дозволяє покращити попередні протоколи за рахунок широкомовної передачі, де кожне повідомлення від відправника отримується усіма вузлами в діапазоні відправника. SPIN-BC здійснює досить дешевий

спосіб зв'язку «один-до-багатьох», а вузли можуть координувати та застосовувати свої ресурси ефективніше, так як вони можуть перехопити усі операції в своєму діапазоні. SPIN-BC використовує усі три фази обміну повідомлень ADV, REQ і DATA, але є три відмінності у порівнянні з алгоритмом SPIN-PP:

- всі повідомлення направлені на широкомовну передачу, це означає, що всі сенсорні вузли в межах діапазону передавання вузла-відправника отримують копію повідомлення.
- після отримання ADV повідомлення, сенсорний вузол перевіряє, чи хоче він мати копію даних, якщо це так, то він встановлює випадковий таймер. Тільки після того як таймер закінчиться, то вузол подає REQ повідомлення на широкомовну адресу. У випадку, якщо вузол-одержувач зчитує REQ повідомлення до того, як його власний таймер закінчиться, то вузол-відправник скасовує свій таймер і не буде відправляти своє власне повідомлення REQ. Випадковий таймер потрібен для уникнення колізій повідомлень REQ від сусідніх вузлів і для того, щоб вузли могли уникнути відправки REQ якщо інший вузол вже його відправив.
- вузол-відправник передає запит отримання даних на широкомовну адресу лише один раз, це означає, що він ігнорує дублікати повідомлень REQ для одних і тих самих даних.

Протокол SPIN-RL є остаточним варіантом. Він ґрунтується на модифікованій версії протоколу SPIN-BC з асиметричним зв'язком. Спочатку кожен вузол продовжує приймати повідомлення REQ і якщо він не одержує відповідне повідомлення DATA у визначений проміжок часу, то вважається, що повідомлення REQ або DATA не надходили. У такому випадку сенсорний вузол видає повторний запит на одержання даних, передаючи REQ повідомлення та вказавши ідентифікатор випадково обраного вузла серед тих, які раніше рекламували ці дані у заголовку повідомлення. Також протокол SPIN-RL обмежує частоту відправлення повідомлень DATA. Це означає, що, як тільки вузол

відправляє повідомлення DATA, він буде очікувати протягом заданого часу, перш ніж дати відповідь на інші запити для тих же самих даних.

Основна перевага протоколів SPIN – їх простота. Вузлу потрібно знати лише найближчі сусідні вузли, які знаходяться на відстані одного хопа. Цей протокол розроблено з метою зменшення втрат в середовищі із симетричними лініями зв'язку. Вузли здатні компенсувати втрати ADV повідомлень, повторно передаючи запити на наявність даних, а для втрачених повідомлень REQ і DATA виконується повторний запит даних, якщо ці дані не надходять через деякі інтервали часу.

2.2.2 Протокол Directed Diffusion

Протокол Directed Diffusion – це протокол, орієнтований на дані. Головна ідея алгоритму DD – вузли запитують дані, шляхом відправлення запиту. Таке поширення інтересів дозволяє встановити градієнти всередині мережі, що використовуються для направлення даних до одержувача, при цьому проміжні вузли вздовж шляхів передачі даних об'єднують дані від різних джерел для усунення надмірності і зменшення кількості передач.

На протокол DD не впливають глобально діючі ідентифікатори вузлів, замість них для опису задачі зчитування і управління процесом маршрутизації використовується пара атрибут-значення.

Кожен сенсорний вузол підтримує локальний кеш запитів, де зберігаються записи про стан активних запитів. Для кожного такого запиту в кеші знаходяться додаткові дані – тимчасова мітка (значення таймера, яке фіксує момент отримання запиту), градієнти на сусідні вузли (містять вказівку на швидкість обміну, тривалість існування і час життя). Градієнт вказує можливий напрямок маршрутизації і може мати вагу, котра затосовується в залежності від вимог до маршрутизації. Така структура кеша запитів є основою для здійснення оптимальної маршрутизації.

На рис. 2.6 подано процес передавання повідомлень за допомогою протоколу DD. Спочатку вузол-приймач поширює повідомлення про готовність прийняти дані. Між ним та сусідами встановлюються градієнти для прокладання маршруту. Алгоритм передачі повідомлень встановлює правила, направлені на підтримання вмісту кеша у реальному стані у процесі оброблення запитів. Запити від центрального вузла повторюються періодично для забезпечення надійності доставки і працездатності схеми маршрутизації при відмовах в безпроводній мережі.

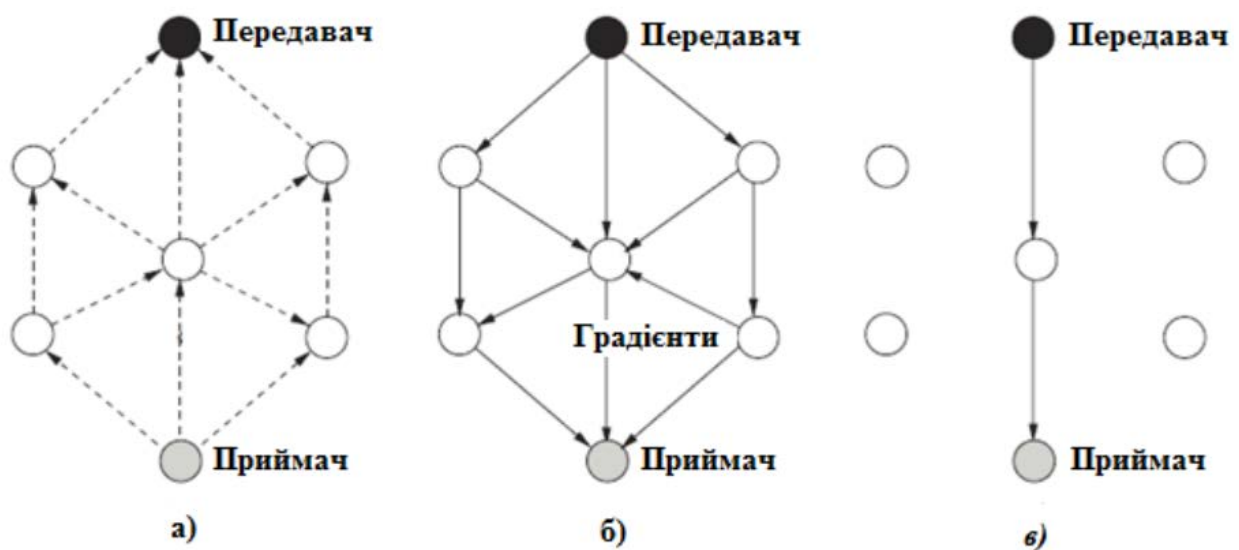


Рисунок 2.6 – Протокол DD:

а – поширення зацікавленості, б – встановлення градієнтів,
в – передача даних

При виникненні подій, у яких зацікавлений центральний вузол, здійснюється зворотна маршрутизація повідомлень – від джерела інформації до центрального вузла. При цьому повідомлення можуть надходити з деякою частотою протягом всього періоду існування запиту. Для даних, які передаються у відповідь, застосовують ті ж пари атрибут-значень, що і для запиту. Для зворотної трансляції застосовуються ті ж встановленні відомості, вони показують для кожного конкретного вузла оптимальний напрямок передавання. Як наслідок, для потоку повідомлень вибирається найбільш підходящий з точки зору

заданих критеріїв маршрутизації шлях, наприклад, найкоротший або з мінімальним енергоспоживанням.

2.2.3 Протокол Rumor Routing

Варіацією попереднього алгоритму DD є протокол Rumor routing. Він оптимізує схему маршрутизації для мереж з невеликою кількістю подій, але великою кількістю заяв. Алгоритм маршрутизації RR передбачає, що кожен вузол підтримує таблицю з інформацією про подію та список своїх сусідів. Усі події записуються в таблицю і створюються «агенти» (повідомлення), які містять інформацію про подію на місці. Агент — це тривалий пакет, який відправляється по мережі для розповсюдження інформації про цю подію та інші інциденти, які відбуваються на його шляху до віддалених вузлів. Коли у результаті отримання таких повідомлень віддалені вузли доповнюють свою таблицю подій і передають агента сусіднім вузлам до тих пір, поки він не використає всю тривалість своєї життя або TTL [11].

Наприклад, на рис. 2.7 показано, що таблиця вузла А містить інформацію про події E1 і E2, які відбувалися до прибуття агента з вузла Е. Коли агент приходить до вузла А (за допомогою вузла G), вузол А бачить, що прийняти дані від вузла Е можна за допомогою сусіда G шляхом, котрий є коротший, ніж той який наразі міститься в його таблиці. Таким чином, таблицю оновлює вузол А використовуючи інформацію агента Е.

Таким чином, вузол спочатку перевіряє, чи є у нього шлях до необхідного вузла, перш ніж подати запит, спрямований на певну подію. Якщо це так, він надсилає запит сусіду, зазначеному в таблиці подій. Якщо відсутні відомості про маршрут, випадковий сусід вибирається та запит надсилається йому. Кожен вузол виконує цю процедуру, причому у повідомлення запиту, щоб запобігти повторній передачі, слід включити список вузлів, які нещодавно були задіяні. Незважаючи на те, що вузол може не знати напрямку до потрібного вузла,

направляючи йому запит, цей запит може бути надісланий до вузла, який має доступ до випадкового сусіда та інформацію про передбачувану подію.

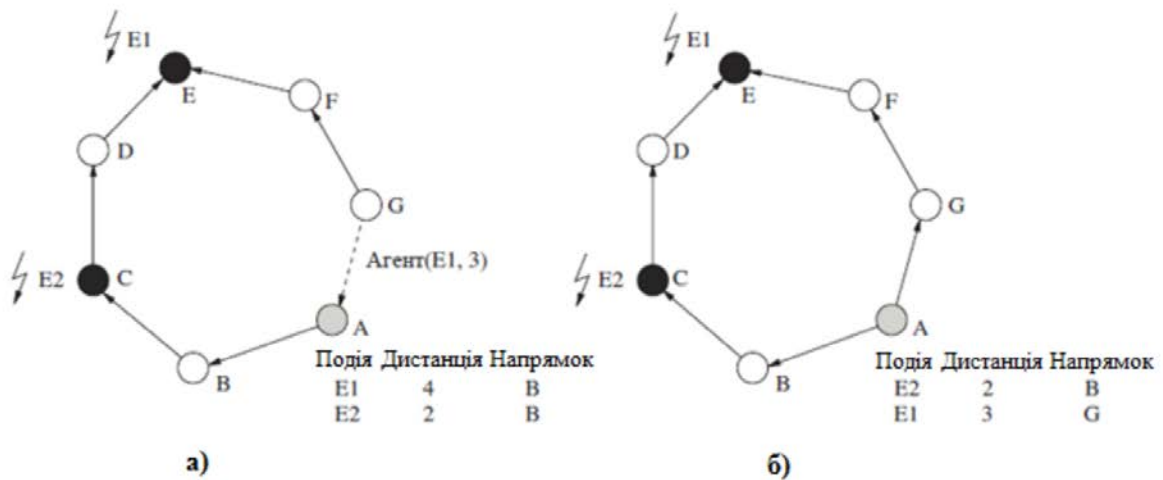


Рисунок 2.7 – Протокол RR:

а – маршрутизація до прибуття агента,

б – після прибуття агента

В цілому метод маршрутизації RR намагається поєднати запит і флудинг подій. Незважаючи на те, що цей алгоритм маршрутизації використовує підхід на основі запитів, він намагається встановити зв'язок лише з вузлами, які спостерігали конкретну подію, а не виконували флудинг про неї в мережі. Крім того, кількість подій, які містить таблиця вузла, збільшується, відповідно зростає вартість зберігання, тому буде важко підтримувати такі таблиці.

2.2.4 Протокол GBR

Метод маршрутизації за допомогою градієнтів Gradient-Based Routing (GBR) є варіантом алгоритму Directed Diffusion. Дані модифікації мають низку значних відмінностей. Кількість ретрансляцій від вузла до вузла враховується під час процесу поширення запиту з центрального вузла по всій мережі (хопи). Параметр «висота» вузла обчислюється для кожного вузла, який показує най-

менше можливе число хопів, які може мати ланцюжок маршруту від конкретного вузла до центрального. Для кожного сусіднього напрямку вузла градієнт, який визначається як різниця між висотою конкретного вузла та висотою його сусіда. Напрямок з найбільшим значенням вибирається для маршрутизації. Коли градієнти в різних напрямках рівні, вибір виконується рандомно.

Рекомендації щодо економії енергії можуть доповнити наведену маршрутизацію. Таким чином, коли поточний рівень запасу енергії в вузлі падає нижче певного значення, вузол може автоматично збільшити свою «висоту», щоб зменшити навантаження інших вузлів. Сусідні вузли спостерігають, що використовувати цей вузол для передачі повідомлень стає все менш вигідним, і відмовляються від цього напрямку, віддаючи перевагу більш оптимальним маршрутам. Такий механізм гарантує хорошу адаптивність алгоритму в плані оптимізації та балансування енергоживлення.

Крім того, за допомогою аналізу існуючих маршрутів алгоритм може забезпечити балансування навантаження трафіку. Нові потоки вимагають, щоб вузли, які не беруть участі в інших маршрутах, були включені до маршрута.

2.2.5 Протокол OLSR

Протокол Optimized Link State Routing (OLSR) – це проактивний протокол маршрутизації для БСМ. Таким чином, встановлення маршруту починається раніше, ніж потрібно. Вбудь-якому випадку існує готовий шлях до вузла призначення. Протокол працює для того, щоб зменшити кількість ширококомовних повідомлень у мережі, передаючи їх лише через спеціальні вузли, такі як багатоточкові ретранслятори (MPR).

Ідея полягає в тому, щоб зменшити кількість ширококомовних повідомлень, які надсилаються. Це робиться, обмежуючи кількість повідомлень, які надсилаються в межах однієї території. Кожен вузол мережі відповідає за передачу своїх пакетів, вибираючи набір сусідніх вузлів, які знаходяться найближче до одного хопу. Вони відомі як багатоточкові ретранслятори. Пакети даного вузла

читають і обробляють решта сусідніх вузлів, які не є частиною багатоточкового ретранслятора, але не передають їх далі. Для кожного центрального вузла вузли MPR вибираються таким чином, щоб вони покривали всі сусідні вузли в радіусі двох хопів від центрального вузла. Зменшення MPR означає менше керуючих повідомлень.

При маршрутизації пакетів, як і при передачі контрольних повідомлень, протокол OLSR покладається на вибрані багатоточкові ретранслятори і використовує ці вузли MPR для обчислення маршрутів до всіх вузлів призначення. Вони служать проміжними вузлами на шляху. Для досягнення цього кожен вузол зберігає інформацію про численні сусіди, які обрали його як MPR. Протокол OLSR містить два види керуючих повідомлень. Вузол регулярно розсилає повідомлення «Hello», щоб дізнатися, хто є його сусідами, і вузол може ідентифікувати сигнали від них. Повідомлення «Hello» розсилаються всім сусіднім вузлам широкомовно, але ці вузли не передають їх далі. Таким чином, повідомлення «Hello» дозволяє кожному вузлу дізнаватися про своїх сусідів у радіусі двох хопів. Вузол використовує цю інформацію для вибору багатоточкових ретрансляторів. Вони позначені особливим статусом у повідомленнях «Hello», щоб кожен вузол міг дізнатися, хто вибрав їх в якості багатоточкового. Після цього вузол записує адресу сусіднього вузла в таблицю інформації про найближчих сусідів, а також список вузлів, з якими можна зв'язатися через цей вузол, а також відмітку про те, чи є цей вузол багатоточковим ретранслятором. Кожен запис у таблиці має актуальний час. На рис. 2.8 показано, як працює протокол OLSR.

Кожен вузол продовжує надсилати керуючі повідомлення другого типу, тобто контроль топології (ТС), для підтримки маршрутизації пакетів. Кожному вузлу регулярно надсилаються повідомлення ТС, щоб повідомити, які вузли обрали в якості MPR. Ця інформація допомагає вузлам будувати таблиці маршрутизації та топологію мережі. Протокол OLSR може обчислювати маршрути передачі даних, використовуючи інформацію з таблиць маршрутизації. У цьому

випадку кількість проміжних вузлів служить єдиним показником для оцінки маршруту.

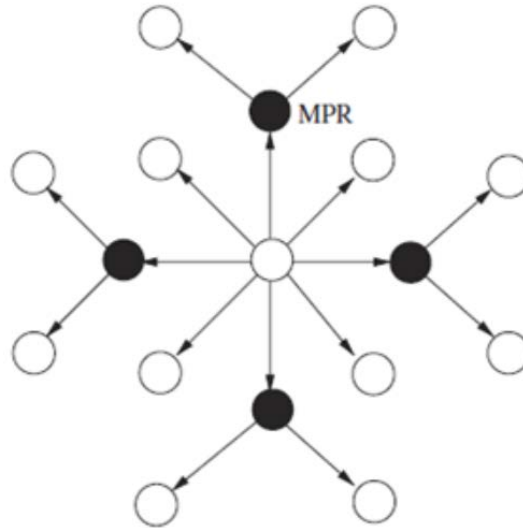


Рисунок 2.8 – Протокол OLSR

Завдяки тому, що кожен вузол завжди підтримує таблицю маршрутизації, яка містить маршрути до будь-якого вузла мережі, основною перевагою протоколу є миттєвість встановлення маршруту. З іншого боку, це збільшує кількість трафіку, необхідного для передачі контрольних повідомлень, і це також збільшує потребу в обсязі пам'яті вузлів.

Маршрути завжди проходять через вузли MPR, що робить їх не завжди найкращими з точки зору завантаження. Це головний недолік протоколу. Крім того, коли вузол стикається з проблемою на маршруті або іншим збоєм, інші вузли отримують контрольні повідомлення.

2.2.6 Протокол AODV

Протокол Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) – це проактивний протокол маршрутизації з встановленням з'єднання на вимогу. після запиту від центрального вузла починається процедура пошуку підходящого маршруту.

Маршрути будуть підтримуватися в таблиці маршрутизації до тих пір, поки вони будуть використовуватися.

AODV створює маршрути за допомогою циклу запит-відповідь. Коли програма створює запит на передачу даних до вузла, у якого ще немає маршруту в таблиці, вузол ширококомовно розсилає запит на пошук маршруту. Вузол, який отримав пакет, передає його далі ширококомовно, записуючи шлях до вузла-передавача в таблицю маршрутизації через вузол, від якого він отримав вихідний циркулярний запит. Таким чином, вузли передають запит один одному, поки він не досягне вузла призначення, а також дізнаються шлях до джерела. Якщо якийсь із проміжних вузлів вже знає шлях до вузла призначення, він відправляє повідомлення-відповідь до вузла-передавача, щоб припинити пересилання запиту.

Після отримання запиту вузол призначення відправляє відповідь вузлу-передавачу. Оскільки всі проміжні вузли вже знають, куди йти до джерела, вони просто пересилають пакет відповідно до записаних маршрутів. Таким чином, вони записують шлях до вузла-призначення через вузол, від якого вони нещодавно отримали пакет відповіді. Проміжні вузли записують маршрути до них через сусідні вузли, коли запит передається від передавача до вузла призначення, а відповідь передається від передавача до вузла призначення. Всі проміжні маршрутизатори вже знають шлях передачі даних в обидві сторони, коли відповідь досягає вузла-передавача. У цьому випадку вузол-передавач може отримати безліч відповідей. Вибирається шлях, який має найменше число проміжних вузлів.

Протокол AODV використовує спеціальні лічильники, щоб скоротити кількість контрольних повідомлень. Кожен запит має послідовний номер, який використовується проміжними вузлами для пошуку запитів, які вони вже передали далі. Рис. 2.9 показує обмін повідомленнями в протоколі AODV. Розсилаються повідомлення щодо запиту маршруту RREQ (Route Request) для моніторингу та виявлення сусідніх вузлів. Дані перенаправляються оптимальним ма-

ршрутом між джерелом і вузлом призначення після отримання відповідних повідомлень RREP (Route Response) від сусідніх вузлів.

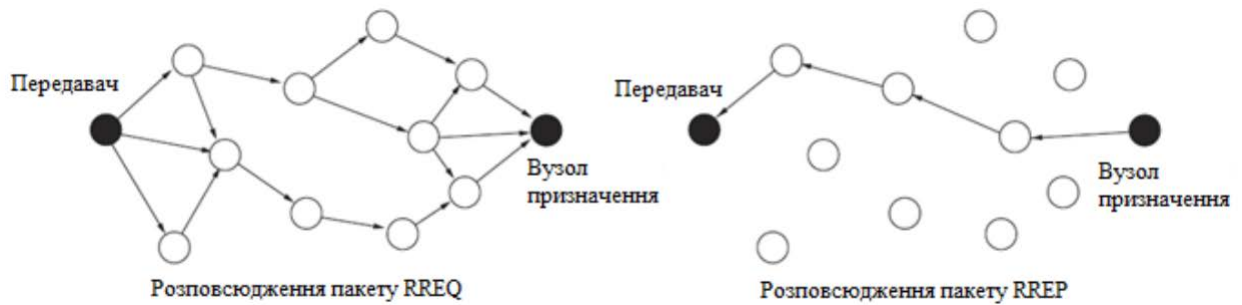


Рисунок 2.9 – Обмін повідомлень в протоколі AODV

Протокол AODV використовує спеціальні лічильники, щоб скоротити кількість контрольних повідомлень. Кожен запит має послідовний номер, який використовується проміжними вузлами для пошуку запитів, які вони вже передали далі. Основна перевага AODV полягає в тому, що він не створює додаткового трафіку в ситуаціях, коли немає передачі даних. З іншого боку, протокол AODV має низку значних недоліків. По-перше, у випадку, якщо виникає збій на маршруті, наприклад, коли вузол призначення недоступний, один із вузлів повинен розпочати видалення маршруту з усіх таблиць маршрутизації проміжних вузлів. Це може призвести до неактуальної маршрутної інформації. Крім того, послідовні номери використовуються для пошуку дублікатів контрольних повідомлень, тому кожен вузол повинен мати спеціальну таблицю, яка містить безліч нещодавно переглянутих номерів. Нарешті, кількість проміжних вузлів використовується для оцінки оптимального маршруту.

2.3 Ієрархічні протоколи маршрутизації

З метою збільшення масштабованості та ефективності мережі протоколи ієрархічної маршрутизації базуються на групуванні вузлів у кластери. Основний принцип ієрархічної маршрутизації полягає в тому, що сенсорні вузли можуть мати лише прямий зв'язок з головним вузлом кластера, який є центром кластера.

Звичайні сенсорні вузли, які відповідають за транспортування сенсорних даних приймача, не такі потужні та енергоємні, як ці основні вузли кластеру. Цей метод може значно зменшити зв'язок і навантаження на сенсорні вузли, але кластерні голови можуть витримати більше, ніж звичайні сенсорні вузли.

На рис. 2.10 показано два різні підходи до кластеризації. У першому варіанті всі кластерні голови пов'язані на пряму з вузлом приймача. В іншому варіанті, коли голови кластеру не пов'язуються напряму з приймачем протоколом маршрутизації заснованому на кластері, голови сусідніх кластерів повинні встановити мультихоп маршрути від усіх кластерних голів до приймача.

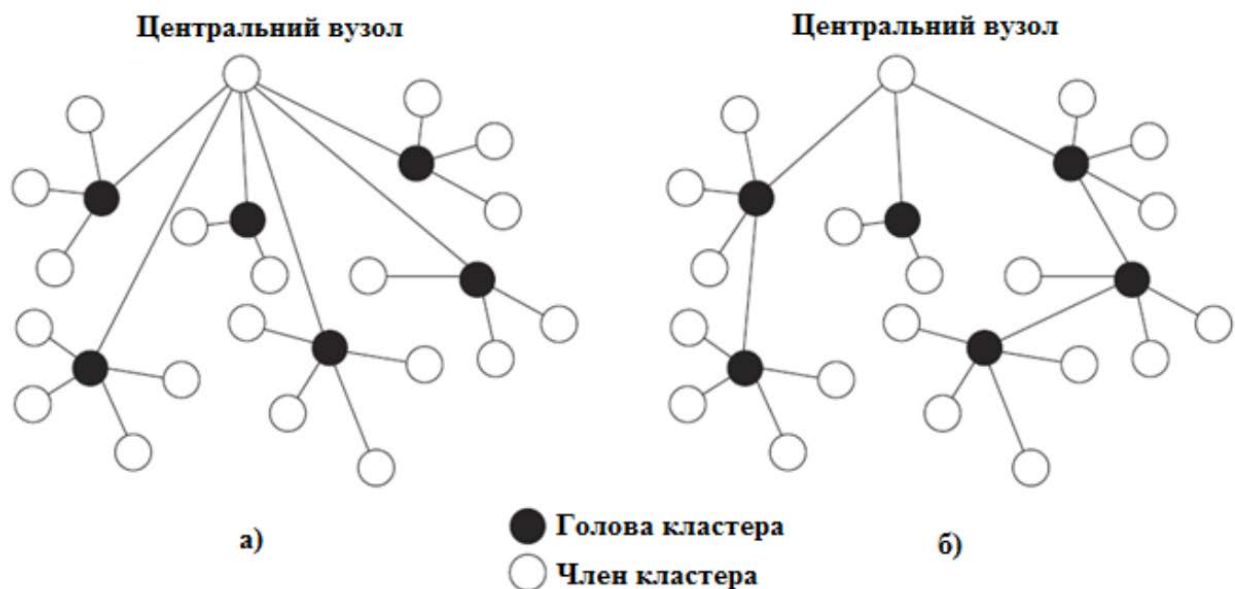


Рисунок 2.10 – Способи кластеризації:

а – з прямим зв'язком кластерних голів з центральним вузлом,

б – мультихоповий зв'язок кластерних голів з центральним вузлом

Вибір кластерних голів, формування кластерів і адаптація до динаміки мережі є проблемами, з якими стикаються протоколи ієрархічної маршрутизації. Ієрархічні рішення, порівняно з методом плоскої маршрутизації, можуть зменшити колізію в безпроводовому середовищі та спростити робочий цикл сенсорних вузлів для підвищення енергоефективності. Поділ на кластери також

може полегшити маршрутизацію, але може призвести до створення довгих маршрутів. Поділ на кластери також полегшує агрегацію сенсорних даних усередині мережі, оскільки дані від близьких сенсорів найімовірніше приходять на одну і ту саму голову кластера.

$$\text{МЧВЦ} = \text{ST} + \text{ТТ} + \text{RT} + \text{ІРТ}$$

де МЧВЦ – мінімальна тривалість виконання циклу;

ST – тривалість відправлення;

ТТ – тривалість передачі;

RT – тривалість отримання;

ІРТ – тривалість простою задачі.

Таким чином, ієрархічна маршрутизація може підтримувати всі види трафіку в БСМ, але доставка пакетів виконується не по оптимальним маршрутам, що призводить до додаткових витрат ресурсів, пов'язаних з організацією ієрархічної структури мережі.

2.3.1 Протокол LEACH

У класі ієрархічних методів маршрутизації з балансуванням енергетичного навантаження є протокол Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). LEACH є основним протоколом ієрархічної маршрутизації і закладає основні принципи алгоритму [13].

Маємо формулу:

$$t = \begin{cases} n \cdot t_r \cdot \text{int}_1, & n < n_1 \\ n_1 \cdot t_r \cdot \text{int}_1 + (n - n_1) \cdot t_r \cdot \text{int}_2, & n_1 < n < n_3 \\ n_1 \cdot t_r \cdot \text{int}_1 + (n_2 - n_1) \cdot t_r \cdot \text{int}_2 + (n - n_1 - n_2) \cdot t_r \cdot \text{int}_3, & n_2 < n < n_3 \\ \dots & \dots \end{cases}$$

де n_i – це число хопів зони,

int_i – це інтервал оновлення зони;

t_r – це мінімальний інтервал оновлення.

Сусідні вузли, котрі пеербувають знаходяться в одній зоні радіодоступу, об'єднують в кластер – окрему комунікаційну групу. Кластер містить звичайні вузли нижчого рангу (Cluster Members – CM) і один вузла вищого рангу (Cluster Head – CH), який здійснює функції маршрутизації для інших вузлів кластера. Множина головних вузлів є основою комунікаційної інфраструктури мережі.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot (r \bmod n)}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases}$$

де: r – це поточний раунд;

P – це ймовірність вибору вузла головним;

n – вказівник на поточний вузол.

Якщо згенерований символ є менше за $T(n)$, тоді цей вузол стає головним. Вузли, які були в нульовому раунді clusterhead, не зможуть бути ними ще раз протягом раундів $1/P$. Після $1/P - 1$, $T = 1$. Після цього всі вузли зможуть стати головним. Під час фази steady-state дані передаються базовій станції. Steady-state є більш тривалою у порівнянні з фазою setup, для того, аби мінімізувати витрату енергії.

Внутрішня взаємодія відбувається безпосередньо між звичайними вузлами та головою кластера. Потім глави кластерів відповідають за передачу повідомлень вузлам інших кластерів (рис. 2.10). Оскільки функції маршрутизації покладені на главу кластера вимагають великої кількості енергії для ретрансляції повідомлень від усіх вузлів кластера, голова кластера вибирається випадковим чином і періодично змінюється, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження по всіх вузлах мережі. Зазвичай кількість голів кластера становить 5% від загальної кількості вузлів кластера.

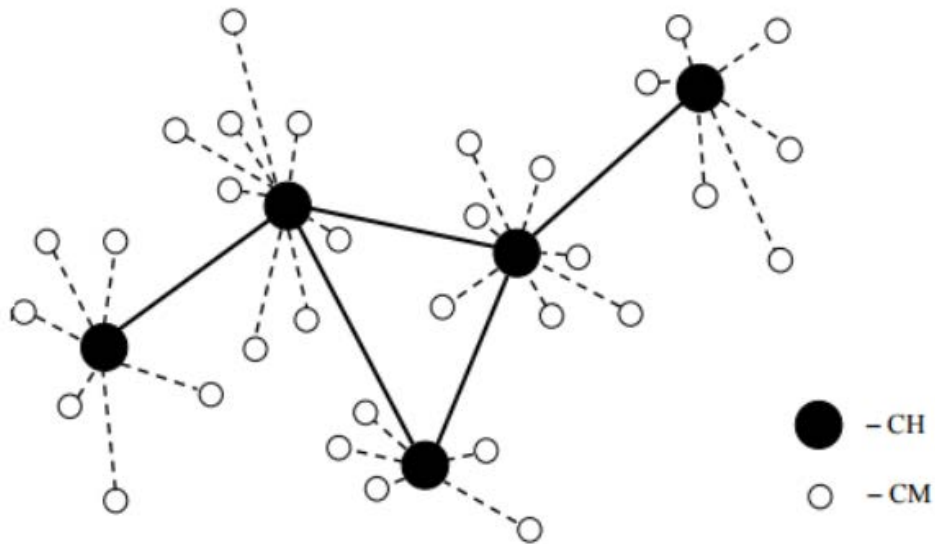


Рисунок 2.11 – Протокол LEACH

Маршрутизація проводиться в два етапи. По-перше, кінцеві вузли передають пакети головному вузлу свого кластера, після чого він збирає дані та відправляє результати безпосередньо базовій станції. Це значно скорочує потенційний обсяг трафіку. Голова кластера встановлює тимчасовий поділ каналів для використання доступу всередині кластера, що зменшує споживання енергії. Крім того, кодове розділення каналів використовується для зменшення конфліктів між кластерами.

З іншого боку, протокол LEACH має низку недоліків. По-перше, передбачається, що вибрані головні вузли кластера можуть безпосередньо передавати дані базовій станції. Однак через обмежену відстань безпроводових каналів зв'язку це зазвичай неможливо. По-друге, випадковий вибір головних вузлів не гарантує, що вони рівномірно розподіляються по мережі. Це може призвести до появи кінцевих вузлів у радіусі, де немає головного вузла кластера. По-третє, ефект від методів зниження енергоспоживання зменшується накладними витратами на періодичне формування кластерів.

2.3.2 Протокол PEGASIS

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) є протоколом енергоефективного збору інформації в БСМ. Версія протоколу LEACH оптимізована на основі ланцюгів.

Основною відмінністю протоколу LEACH є те, що кожен вузол відповідає за передачу пакетів базових станцій і обмін пакетами з близькими сусідами [14]. Таким чином, вузли організуються в ланцюги. Одним із способів досягти цього є використання жадібних алгоритмів, які ініціюються певним вузлом або базовою станцією, а потім передають інформацію ланцюга до решти вузлів мережі. Дані можуть бути об'єднані з іншими даними для подальшої передачі на базову станцію під час розподілу по ланцюгу. Згідно з протоколом, всі вузли можуть зв'язуватися з базовою станцією.

Протокол PEGASIS дозволяє значно продовжити життя кожного вузла. Протокол PEGASIS має два рази більший час роботи мережі, ніж протокол LEACH [15]. За рахунок того, що кожен вузол взаємодіє лише з найближчим сусідом, а іноді використовується як передавач до базової станції, PEGASIS досягає високої енергетичної ефективності. Це дозволяє вузлу зменшити потужність передачі, необхідну йому для досягнення його сусідів у ланцюзі.

Недолік PEGASIS полягає в тому, що пакети можуть передаватися з великими затримками, особливо коли вони надходять від віддалених вузлів у ланцюзі.

2.4 Маршрутизація на основі місця розташування

Маршрутизація на основі інформації про місцезнаходження використовує координати вузлів у просторі для визначення шляху передачі пакета. На кожному кроці процесу маршрутизації поточний вузол передає пакет даних своєму сусідньому вузлу, який найближче розташований до вузла призначення.

Ми використовуємо деякі метрики для визначення відстані між двома вузлами на основі їхніх координат. Поки пакет не досягне вузла призначення або поки серед сусідів поточного вузла не буде вузла ближче до вузла призначення, процес послідовної мінімізації відстані закінчується.

У маршрутизації, заснованій на локалізації, пакети відправляються безпосередньо в одне визначене місце призначення. Отже, відправник повинен знати своє місце розташування та місце призначення. Можна отримати це місце розташування або за допомогою запиту (наприклад, можна подати запит з проханням отримати відповідь від місця призначення) або за допомогою брокера місцезнаходження, тобто служби, яка показує ідентичність вузла до місця розташування. Один і той же пакет повинен бути відправлений в декількох напрямках при широкомовній передачі або багатоадресній маршрутизації на основі відомостей про географічне місцезнаходження вузлів. Багатоадресні протоколи використовують відомості про розташування місця призначення, щоб скоротити споживання ресурсів за рахунок зменшення надлишкових зв'язків [16].

Як правило, ідентичність сенсорного вузла менш важлива, ніж його розташування; отже, дані можна передавати всім вузлам, розташованим у межах певної географічної зони. Цей метод може бути використаний для поширення запитів у конкретній зоні інтересів, а не по всій мережі, що значно знижує пропускну здатність і енергетичні витрати вузлів. Пакет повинен бути поширений на всі вузли в цій мережі, коли він досягає цільової зони.

Коли використовується алгоритм маршрутизації на основі місцезнаходження, вузли не повинні зберігати нічого, крім географічного розташування сусідніх вузлів в межах одного хопу. Це означає, що їм не потрібно підтримувати таблиці маршрутизації або створювати маршрути між усіма вузлами, що робить їх надзвичайно масштабованими. Тому вартість послуг не залежить від кількості вузлів у мережі. Таким чином, принцип геометричної маршрутизації розглядається як найбільш ефективний метод реалізації маршрутизації типу «багато-до-багато» в БСМ. Це відрізняє їх від інших типів мереж великих масштабів при дуже обмежених ресурсах вузлів.

Однак важливо відзначити, що при географічній маршрутизації не гарантовано, що маршрути є ідеально оптимальними; на практиці знайдені маршрути дуже близькі до найкращих, і ступінь цієї близькості між вузлами є одним із критеріїв ефективності.

2.4.1 Протокол GAF

Ще один протокол маршрутизації, заснований на визначенні місця розташування, відомий як Geographic Adaptive Fidelity (GAF). Але він спочатку розроблений для мереж з мобільними вузлами.

У віртуальній мережі кожен квадрат мережі має один пристрій, який може виступати як передавальний вузол у будь-який момент часу. У той час як всі інші вузли можуть перейти в сплячий режим, цей вузол продовжує передачу даних до базової станції. Крім того, згідно з протоколом GAF, у двох суміжних квадратах А і В всі вузли в квадраті А можуть зв'язуватися з усіма вузлами в квадраті В і навпаки (рис.2.12). Розміри сітки та квадрата можна заздалегідь визначити, що дозволяє кожному вузлу, якщо він знає, куди він належить, визначити квадрат до якого він належить [17]. Це означає, що у більшості вузлів мережі будуть сусіди у всіх чотирьох напрямках.

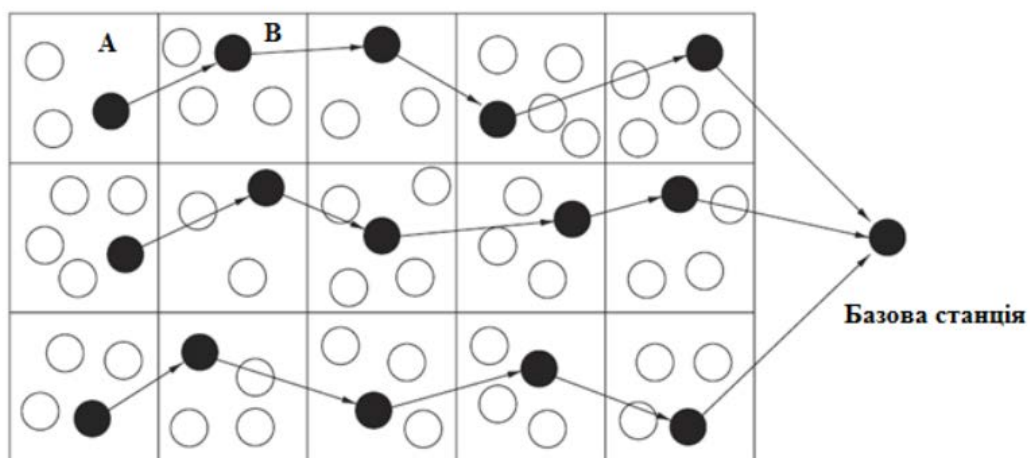


Рисунок 2.12 – Принцип віртуальної сітки в протоколі GAF

Вузли GAF передають в три різні точки. Спочатку кожен вузол перебуває в стані виявлення. У цьому стані він може слухати повідомлення, які передають інші вузли в своєму квадраті. Крім того, він встановлює таймер на певний проміжок часу. Коли таймер спрацює, вузол передає повідомлення про виявлення та входить в активний стан. Як тільки спрацює другий таймер, вузол використовує інший таймер, щоб повторно увійти в стан виявлення. Вузол періодично перетворює своє повідомлення про входження в стан виявлення, коли він перебуває в активному стані. Якщо інший вузол може обробляти пакети, цей вузол також може перейти в сплячий режим. Це досягається за допомогою процедур узгодження на основі очікуваного терміну служби вузла, наприклад. Узгодження краще працює з активними вузлами, ніж з вузлами, які знаходяться у процесі виявлення. Вузли, що перебувають у сплячому режимі, час від часу переходять у стан виявлення, щоб повторити процес передачі даних.

$$C(r) = \sum_{i=0}^{k-1} (p(u_i, u_{i+1}) + c)$$

де $u = u_0$;

$p(u, v)$ – це потужність, необхідна для передачі даних за допомогою цього протоколу маршрутизації.

Алгоритм GAF дозволяє мережі економити енергію, дозволяючи вузлам тимчасово перебувати у сплячому режимі.

2.4.2. Протокол GEAR

Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) – це енергозберігаючий та географічний протокол, обмежують передачу пакетів у межах конкретної цільової зони.

Протокол GEAR ділить процес передачі даних на дві частини. Спочатку пакети передаються до цільової області за допомогою алгоритмів енергоефективного вибору сусіднього вузла та географічного алгоритму.

Таким чином, вибирається вузол поблизу, який споживає найбільшу кількість енергії; потім алгоритм рекурсивно-географічної передачі використовується для розподілу пакетів між вузлами в цільовій області.

Проста схема флудингу з придушенням дублікатів може поширити пакети серед усіх вузлів у цільовій зоні, як тільки вони досягнуть її. Однак GEAR покладається на процес рекурсивно-географічної передачі, показаний на рис. 2.13, через значні енерговитрати та неефективність флудингу [18]. Припустимо, що цільова зона складається з великого прямокутника, а вузол S містить пакет цільової зони. Тоді створює S чотири нові копії, пов'язані з чотирма меншими підобластями великої цільової зони. GEAR повторює процес передачі та поділу для кожної підобласті до тих пір, поки пакет не досягне вузла, який є єдиним у своїй підобласті.

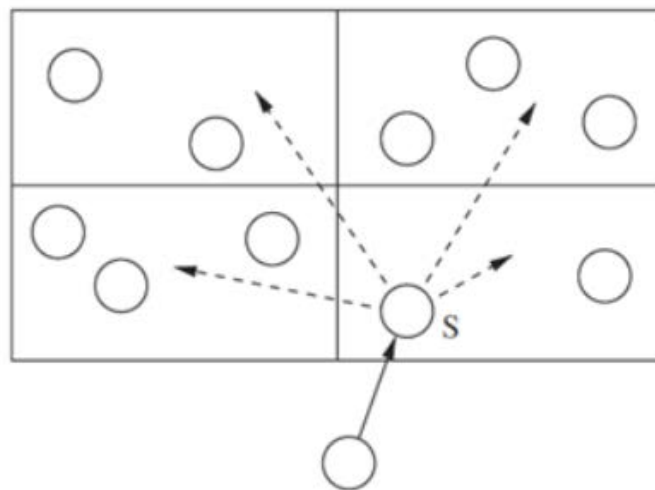


Рисунок 2.13 – Процедура рекурсивної маршрутизації, яка використовується в протоколі GEAR.

Перевага протоколу GEAR полягає в тому, що він зменшує кількість запитів, використовуючи запити, орієнтовані на конкретний регіон, замість того, щоб надсилати запити всій мережі, що сприяє економії енергії.

2.5 Порівняльний аналіз протоколів маршрутизації

Були розглянуті найбільш відомі способи маршрутизації безпроводових сенсорних мереж.

Кожен із протоколів буде оптимальним для конкретної мережі, враховуючи її призначення та особливості розгортання. Таким чином, критеріями порівняння є показники енергоефективності та якості обслуговування. Розробники методів маршрутизації безпроводових сенсорних мереж розглядають можливості для підвищення кількох показників якості обслуговування, щоб забезпечити доставку пакетів і ефективно працювати з точки зору якості. З іншого боку, важливо пам'ятати, що зменшення витрат енергії призводить до погіршення інших показників і обмежує ефективність мережі [19].

Отже, рішення щодо методу маршрутизації не є універсальним для кожної мережі.

3 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

3.1 Простий генетичний алгоритм

Дж. Г. Холланд був першим, хто сформулював основи теорії генетичних алгоритмів (ГА) [2]. Монографія Д. Голдберга, яка зараз є найвідомішою та найчастіше цитується, містить основні результати та широкий спектр практичного застосування ГА.

ГА використовують принципи та термінологію з генетики та біології. Кожен член ГА має потенційне рішення будь-якої проблеми. У класичному ГА хромосома, кожен біт якої називається геном, кодує особину рядком двійкових символів. Популяція складається з поточних рішень. Еволюція популяції передбачає пошук оптимального або субоптимального рішення проблеми шляхом кросинговеру, мутації та генетичних операторів репродукції, які перетворюють кінцевий набір рішень в інший.

Наступні принципи лежать в основі механізмів природної еволюції, які використовуються в еволюційних обчисленнях (ЕО). Перший принцип базується на ідеї, що найсильніші форми природного відбору можуть вижити. Генетичні алгоритми мають рішення для кожної проблеми. За аналогією з цим принципом особини з кращою цільовою функцією (фітнес) мають більші шанси вижити і репродукувати. Оператор репродукції відповідає за формуалізацію цього принципу.

Той факт, що частини хромосоми батьків утворюють хромосому нащадка, пояснює другий принцип. Його формалізація є основою для оператора схрещування, також відомого як кросинговер.

Концепція мутації є основою для третього принципу. Цей механізм дозволяє генетичним алгоритмам змінювати властивості нащадків, підвищуючи різноманітність (мінливість) особин у популяції (наборі рішень).

Ядро ЕО складається з цих трьох принципів. У них еволюціонує популяція (набір варіантів розв'язання проблеми) від покоління до покоління.

Алгоритм еволюції штучної популяції, який формально описує пошук множини рішень для конкретної проблеми, показаний на рисунку 3.1.

Множина параметрів оптимізаційної проблеми отримується ГА і кодується їх послідовностями кінцевої довжини в певному алфавіті, найчастіше "0" і "1".

Початкова популяція хромосом або стрінгів утворюється випадковим чином простим ГА. Згодом алгоритм використовує три основні генетичні оператори: оператор репродукції (ОР); оператор схрещування (ОК); оператор мутації (ОМ).

Генетичні алгоритми — це більше, ніж просто випадковий пошук; вони ефективно використовують інформацію, яку вони накопичили протягом свого розвитку.

У процесі пошуку рішень важливо дотримуватися балансу між розширенням простору пошуку та «експлуатацією» кращих рішень, які були отримані зараз. Пошук вирішує цю проблему по-різному.

Наприклад, градієнтні методи здебільшого базуються на використанні кращих поточних рішень, що підвищує швидкість збіжності з одного боку, але створює проблему локальних екстремумів з іншого. Випадкові методи пошуку використовують весь простір пошуку в полярному підході, але вони мають низьку швидкість збіжності. ГА намагаються об'єднати переваги цих двох протилежних стратегій. При цьому оператори кросинговеру та репродукції роблять пошук спрямованим. Широта пошуку гарантує, що процес використовує оператор мутації та ведеться на множині рішень популяції.

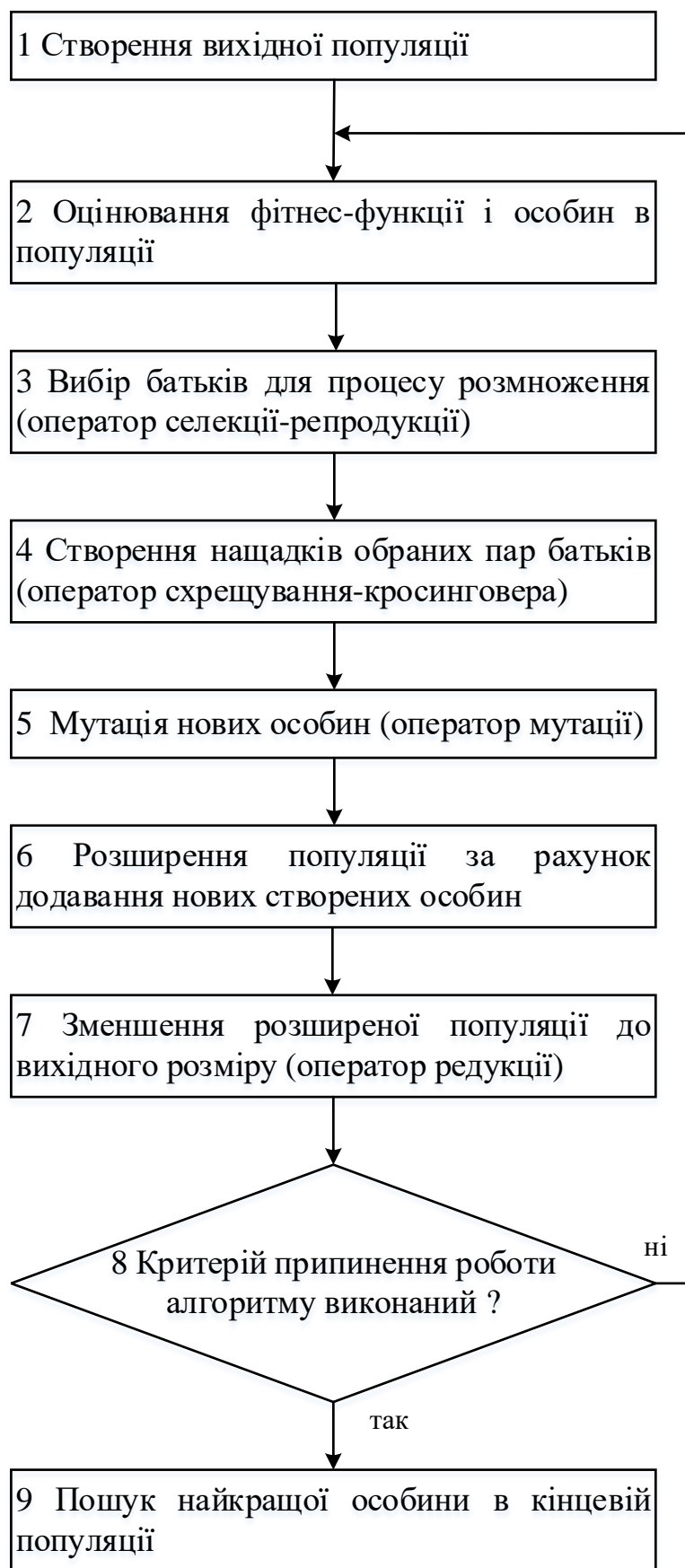


Рисунок 3.1 – Простий генетичний алгоритм

На відміну від інших методів оптимізації, ГА оптимізують кілька областей простору рішень одночасно. Вони також більш здатні створювати нові області з найкращими значеннями цільової функції, використовуючи квазіоптимальні рішення з різних популяцій.

Наведені вище три основні принципи природної еволюції математично формалізовано за допомогою згадуваних генетичних операторів. Функціональні блоки ГА, показані на рис. 3.1., можуть бути реалізовані різними способами. Але спочатку ми розглянемо приклад класичного ГА.

3.2 Генетичні оператори

Для пошуку цілочисельного значення x на відрізку від $[0,31]$, при якому функція $y = x^2$ отримує максимальне значення (рис. 3.2), використовується популярна монографія Голдберга [3].

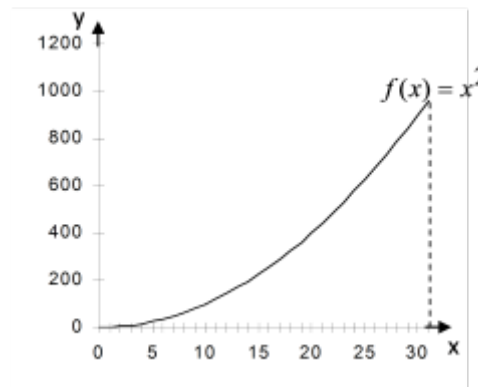


Рисунок 3.2 – Приклад функції G

Таблиця 3.1 показує початковий етап роботи ГА для цього прикладу. Особини початкової популяції були створені випадковим чином, використовуючи двайкові коди значень змінних x у стовпці 2. Хромосома, яка представляє генотип, має двійковий код значення x . Популяція створює множину можливих рішень проблеми. Їх фенотип (десяткові значення) міститься у третьому стовпці. Таблиці 3.2 і 3.3 показують роботу двох інших операторів.

Таблиця 3.1 – Репродукція

| № хромо-соми | Початкова популяція | Десяткове значення x | Значення $f(x)$ | $\frac{f(x_i)}{\sum f(x_j)}$ | Середнє значення $\bar{f}(x)$ | Максимальне значення $f_{\max}(x)$ |
|--------------|---------------------|------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 01101 | 13 | 169 | 0,14 | 293 | 576 |
| 2 | 11000 | 24 | 576 | 0,49 | | |
| 3 | 01000 | 8 | 64 | 0,06 | | |
| 4 | 10011 | 19 | 361 | 0,31 | | |

Таблиця 3.2 – Кросинговер

| № хромо-соми | Популяція після репродукції | Пари хромосом для кросинговера | Популяція після кросинговера | Значення $f(x)$ | Середнє значення $\bar{f}(x)$ | Максимальне значення $f_{\max}(x)$ |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 01101 | 1-2 | 01100 | 144 | 439 | 729 |
| 2 | 11000 | 1-2 | 11001 | 625 | | |
| 3 | 11000 | 3-4 | 11011 | 729 | | |
| 4 | 10011 | 3-4 | 10000 | 256 | | |

Таблиця 3.3 – Мутація

| № хромо-соми | Популяція після кросинговера | Нова популяція після мутації | Десяткове значення x | Значення $f(x)$ | Середнє значення $\bar{f}(x)$ | Максимальне значення $f_{\max}(x)$ |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 01100 | 01100 | 12 | 144 | 496,5 | 961 |

3.2.1 Репродукція

У процесі репродукції хромосоми копіюються в проміжну популяцію для подальшого «розмноження» відповідно до їх фізичної функції. У цьому випадку

ку хромосоми з найвищими значеннями цільової функції мають більшу ймовірність дати один або більше нащадків наступному поколінню.

Оператор репродукції (ОР) очевидно є штучною версією природної селекції, яка забезпечує виживання найсильніших організмів. Цей оператор можна представити в алгоритмічній формі кількома способами. Використання колеса рулетки, в якому кожна хромосома має сектор, пропорційний площі цільової функції, є найпростішим і найпоширенішим методом відновлення ОР. Для нашого прикладу «колесо рулетки» має такий вигляд, як показано на рис. 3.3.

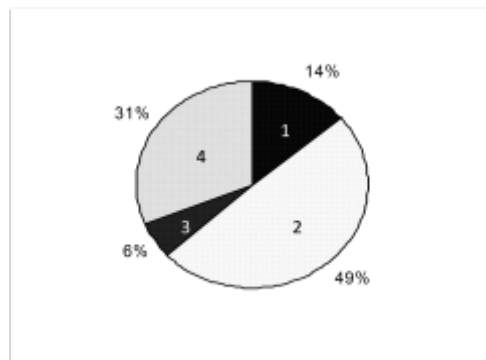


Рисунок 3.3 – Колесо рулетки

Для вибору хромосом використовується метод випадкового пошуку, який базується на колесі рулетки. У цьому випадку колесо рулетки обертається, а покажчик визначає хромосому для селекції в проміжну популяцію або батьківський пул після зупинки рулетки.

Хромосоми, які відповідають більшому сектору рулетки, очевидно, більш ймовірні потрапити в наступне покоління. За допомогою оператора репродукції створюється проміжна популяція, хромосоми якої будуть використані для схрещування покоління.

У нашому прикладі ми обертаємо колесо рулетки чотири рази, щоб вибрати хромосоми для проміжної популяції, що відповідає потужності початкової популяції.

Позначаємо величину $\frac{f(x_i)}{\sum f(x_j)}$ як $P(x_i)$, тоді очікувана кількість копій i -

ої хромосоми буде визначається так

$$M = P(x_i) \cdot N ,$$

тут N – це потужність популяції.

Кількість копій хромосоми, котрі переходять в наступне покоління можна визначається таким чином:

$$\tilde{M} = \frac{f(x_i)}{\bar{f}(x)} ,$$

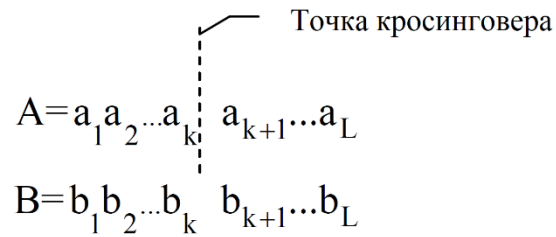
де $\bar{f}(x)$ – це середнє значення хромосоми у популяції.

За наведеною формулою обчислено числа копій хромосом: хромосома 1 – 0,56; хромосома 2 – 1,97; хромосома 3 – 0,22; хромосома 4 – 1,23. Отже, в проміжну популяцію перша хромосома потрапляє в одному екземплярі, друга – в двох, третя – не потрапляє, четверта – в одному екземплярі. Одержана проміжна популяція буде вихідною для подальшої реалізації операторів кросинговеру і мутації.

3.2.2 Оператор кросинговера

У три етапи виконується однотонний або простий оператор кросинговера (ОК) із заданою вірогідністю P_c .

Перший етап: дві хромосоми, які відомі як батьки, вибираються випадково з проміжної популяції, створеної за допомогою оператора репродукції (ОР), або вони вибираються за допомогою іншого підходу, який розглядається далі.



Другий етап: рандомно обирається точка схрещування – число k з діапазону $[1, 2, \dots, n-1]$, де n – це довжина хромосоми.

Дві нових хромосоми-нащадки A' і B' формуються з хромосом A і B шляхом обміну підрядками після точки схрещування:

$$A' = a_1 a_2 \dots a_k b_{k+1} \dots b_L$$

$$B' = b_1 b_2 \dots b_k a_{k+1} \dots a_L$$

Розглянемо виконання операції кросинговеру для хромосом 1 і 2 із проміжної популяції:

$$A = 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1$$

$$B = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0$$

$$1 \leq k \leq 4, \quad k=4$$

$$A' = 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$$

$$B' = 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1$$

Зокрема, ОК виконується з заданою вірогідністю P_c (так як відібрані два батьки не обов'язково створюють нащадків). У більшості випадків величина ймовірності вважається рівною $P_c \approx 0,5$.

Таким чином, оператори схрещування та репродукції дуже прості, оскільки вони можуть копіювати особини та частково обмінювати частини хромосом.

Друга таблиця (кросинговер) містить продовження нашого прикладу, як показано на рис. 1.3.

Всі показники популяції, включаючи середнє і максимальнє значення цільової функції (ЦФ), покращилися після схрещування в проміжній популяції, як показано в порівнянні з попередньою таблицею.

3.2.3 Мутація

Далі виконується оператор мутації згідно зі схемою класичного ГА із заданою ймовірністю P_m . Цей оператор іноді виконує другорядну функцію. Ймовірність мутації була зазвичай низькою, і значення P_m було приблизно 0,001.

1-й крок. У хромосомі $A = a_1 a_2 \dots a_L$ вибирається випадковим чином k -та позиція ($1 \leq k \leq n$).

2-й крок. Значення гена інвертується в k -позиції $a'_k = \bar{a}_k$.

Наприклад, хромосома 11011 має $k = 3$, і після інверсії значення третього біта виникає нова хромосома, яка називається 11111. Третя таблиця (мутація) на рис.1.3 показує продовження нашого першого прикладу. Таким чином, оптимальне рішення $x = 31$ було знайдено за допомогою використання генетичних операторів.

Ми знайшли ідеальне рішення за одну ітерацію в цьому випадку, оскільки приклад був штучно підібраний. У більшості випадків ГА працює до тих пір, поки не буде виконано критерій завершення процесу пошуку та найкраща особа буде обрана як рішення проблеми.

4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ У БСМ

4.1 Енергоефективна маршрутизація

Енергоефективна маршрутизація в безпроводових сенсорних мережах привернула увагу багатьох дослідників в останні роки. У роботах [8,9] наведено короткий огляд останніх результатів досліджень у галузі енергоефективної маршрутизації даних у сенсорних мережах. Для збільшення терміну служби мережі, побудова ефективного протоколу маршрутизації є дуже важливою. В [10] освітлений підхід і виконано аналіз продуктивності цих схем, який орієнтований на використання існуючих схем маршрутизації з урахуванням типів даних, що пересилаються. Еволюційні алгоритми можуть бути ефективно використані для пошуку енергоефективних шляхів пересилання даних у безпроводових сенсорних мережах [11]. Простий підхід до мінімізації середньої довжини шляху пропонується в [12], де використовується генетичний алгоритм та інформація про простий розподіл вузлів БСС. Слід зазначити, що кожен із вузлів складається з відносно простого приймача/передавача (антена, приймач та передавач).

Мета оптимізації, як правило, полягає в мінімізації середньої довжини шляху від джерела до місця призначення таким чином, щоб мінімізувати передану потужність. Крім того, метод, запропонований в [13] використав протокол маршрутизації для багатьох шляхів для підвищення надійності БСМ. Ця методика використовує багато шляхів у мережі та відправляє через них самі субпакети. Це збільшує мережевий трафік (звичайно, не енергетичний), але на активність мережі при цьому збільшується. На жаль, це може скоротити термін служби сенсорної мережі. Облік енергії при маршрутизації багатьох шляхів розглядається в [14,15] з урахуванням максимізації терміну служби мережі. Цей протокол використовує ідею маршрутизації пакетів через шляхи, де вузли мають максимальну залишкову енергію. Шлях змінюється щоразу, коли знайдено найкращий шлях.

4.1.1 Модифікація алгоритму маршрутизації

В даний час СТР є базовим протоколом для більшості сенсорних мереж, які реалізуються з використанням TinyOS. Безпроводові сенсорні мережі під керування цього протоколу утворюють деревоподібну структуру, в якій шлюзи є корінням, а сенсорні вузли – листям [1-3]. Тут для генерації маршрутів вузли використовують градієнт маршрутизації – ЕТХ. Корінь має значення ЕТХ рівне 0. Параметр ЕТХ вузла розраховується як сума ЕТХ його батьківського вузла та ЕТХ зв'язку з ним. При виборі батьківського вузла перевага надається тим, де значення ЕТХ менше. Незважаючи на те, що СТР є базовим протоколом у технології безпроводових сенсорних мереж, він має суттєві недоліки. Один з таких недоліків – це те, що протокол не враховує завантаженість вузлів при ретрансляції пакетів. Таким чином, у мережі виникає постійне навантаження деяких вузлів, що призводить до їх швидкому виходу з ладу, тим самим зменшуючи час функціонування мережі. Незважаючи на те, що питанням оптимізації протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах присвячується безліч робіт зарубіжних авторів [2, 3], завдання є актуальним. Підхід на основі генетичного алгоритму має переваги, тому що в ньому при виборі вузла ретрансляції враховується завантаженість вузлів.

Еволюційні обчислення [4] досить широко застосовуються в САПР комп'ютерних систем та мереж, зокрема для оптимізації протоколів маршрутизації [5-7]. Нагадаємо [4], що для вирішення деякої задачі за допомогою генетичних алгоритмів (ГА) необхідно:

- 1) вибрати або розробити схему кодування хромосоми – потенційного рішення;
- 2) відповідно до схеми розробити (або вибрати) генетичні оператори кросинговера та мутації;
- 3) для кожної особи визначити фітнес-функцію, яка дозволяє оцінити якість рішення.

Крім цього, необхідно встановити параметри ГА, такі як потужність популяції, значення ймовірностей кросинговера та мутації тощо.

Далі наведено рішення цих етапів для завдання маршрутизації БСМ.

4.1.2 Схема кодування хромосоми

В даному випадку потенційне рішення (хромосома) можна уявити масивом цілим чисел, де кожен ген відповідає вузлу схеми. Тому довжина масиву дорівнює числу вузлів у схемі. Наприклад, для схеми рис.1а на тому ж рис.1.б показано потенційне рішення – схема маршрутизації цієї схеми.

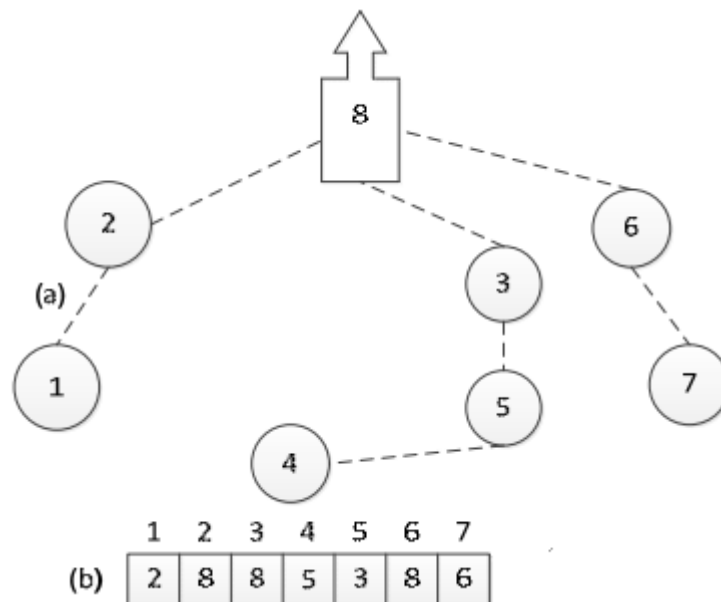


Рисунок 4.1 – Подання хромосоми для графа схеми

У цьому прикладі значення гена в позиції 1 дорівнює 2 вказує, що вузол 1 передає інформацію у вузол 2. Аналогічно, значення гена 8 в позиції 3 означає, що вузол 3 передає у вузол 8 (базову станцію).

Кожна хромосома представляє правильний маршрут. Таким чином, буде створена маршрутизація на основі відповідних положень вузлів у мережі. Базова станція створює список N_i , $1 \leq i \leq n$, який містить усі найближчі сусіди маршру-

ту j з i , такі, що зв'язок $i \rightarrow j, j \in N_i$ може бути використаний для маршрутизації даних від вузла i до бази станції через вузол j . Наприклад, вузол 1 рисунка 1 має $N_i = \{2, 4\}$ (де $i = 1$), які є найближчими сусідами сусідів вузла 1.

Використовуючи цю інформацію, подібний підхід використовується для створення маршрутів для вихідної популяції шляхом випадкового підбору сусіднього вузла $j \in N_i$ для кожного вихідного вузла i . Очевидно, що при цьому простір пошуку вирішення проблеми величезний. Якщо кожен вузол має d найближчих дійсних сусідів, то число шляхів/маршрутів для схеми з n вузлами визначається $O(d_n)$. Для того щоб вибрати оптимальний маршрут, з великої кількості можливих допустимих рішень, у межах обмеженої кількості часу, пропонується використати генетичний алгоритм.

Відбір батьківських особин використовується при генерації нових особин (потенційних рішень). У даному випадку використовується турнірний метод відбору батьківських особин [4]. У цьому випадку всі особини популяції розбиваються на підгрупи розміру m з наступним вибором у кожній з них особини з кращим значенням фітнес-функції. Параметром цієї процедури є розмір туру m , який приймає значення з діапазону $2 \leq m < N$. Використовуються два способу вибору: детермінований та випадковий. При детермінованому способі вибір виконується з ймовірністю, що дорівнює 1; детермінованому способі вибір виконується з ймовірністю, що дорівнює 1. При випадковому методі вибір здійснюється з ймовірністю P_t менше 1. Найчастіше популяція розбивається на підгрупи по 2-3 особини у кожній ($m=2,3$).

Оператор кросинговера використовується для побудови нової особини – нащадка батьківських особин та спрямований на покращення якості рішення, оскільки як батьки виступають найкращі в деякому сенс особини. Практично будь-який оператор кросинговера зводиться до обміну генетичного матеріалу батьків. Це можна зробити по-різному. В даному випадку використовується 2-точковий оператор кросинговера, де у кожному з батьків випадково вибираються 2 точки кросинговера, які виділяють фрагменти генів, якими потім обмінюються батьки. Розглянемо, наприклад, двох батьків (4 2 3 1 5) і (5 1 3 2 4), для

яких обмін генів здійснюється у позиціях 2 і 4. У результаті цього кросинговеру виробляється два нащадка (4 1 3 2 5) та (5 2 3 1 4). Гени, що повторюються, при цьому видаляються. Кросинговер виконується з ймовірністю кросинговера P_c ($0 < P_c < 1$).

Оператор мутації використовується для підтримки різноманітності в популяції і щоб уникнути попадання в локальний оптимум. Тут операція мутації змінює значення гена у випадково обраній позиції на випадкове число від 1 до N , з невеликою ймовірністю P_m .

Фітнес-функція визначає якість потенційної особини. В даному випадку фітнес-функцію логічно визначити на основі критеріїв, запропонованих у [16]. Якість протоколу маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах повинна враховувати наступні фактори. По-перше – це середня кількість ретрансляції пакетів. Очевидно, що чим менше кількість ретрансляцій, тим менша витрата енергії загалом у мережі. Однак середнє значення не враховує те, наскільки сильно значення індивідуальних вузлів можуть відрізнятиметься від середнього значення для цих вузлів. Тому критерій повинен враховувати розкид, мірою якого може виступити, наприклад, дисперсія. У іншому випадку може виявитися так, що навантаження на якийсь окремих вузол може виявитися не передбачувано високим і цей вузол відмовить набагато раніше, ніж решта вузлів. Це може привести до втрати мережі і таким чином частина мережі може виявитися непрацездатною. Тому пропонується використовувати поряд із середнім значенням ще й міру розкиду. У найпростішому випадку величину разів кидання значень завантаженості індивідуальних вузлів можна оцінювати за дисперсією. Однак дисперсія не дає уявлення про перевантажені вузли. Відхилення в обидві сторони від середнього значення трактуються однаково. Однак у нашому випадку необхідно прагнути до того, що в мережі не буде вузлів, навантаження на що перевищує середнє значення. Незавантажені вузли не повинні враховуватись критерієм. Для того, щоб мати можливість аналізувати подальшу роботу модифікованого протоколу СТР та порівнювати з роботою стандартного протоколу СТР введемо параметр оцінки якості розподілу числа ретрансляцій. У да-

ному випадку відповідним параметром оцінки якості розподілу є середньо квадратичне відхилення від середньої кількості ретрансляцій. При оцінці якості необхідні дані виходять з об'єктно-орієнтованої моделі БСМ [17] з використанням відповідного програмного забезпечення [18].

4.1.3 Структура підсистеми оптимізації БСМ

В цілому підсистема оптимізації безпроводових сенсорних мереж складається з окремих елементів, які взаємодіють між собою як показано на рис. 2. Кожен компонент підсистеми виконує встановлений йому список завдань. Компонентна структура підсистеми значно спрощує роботу підсистеми, її проектування, модифікацію тощо.

Усі частини об'єднані односпрямованими або двоспрямованими зв'язками. Розглянемо представлені компоненти та їх зв'язки: модель топології мережі представляє собою текстовий файл, який зберігає інформацію про вузли мережі, про їх зв'язки, рівні затухання сигналу між вузлами. У моделі зв'язки між вузлами описуються двома рядками, так як зв'язки між вузлами двоспрямовані та мають різні рівні згасання сигналу.

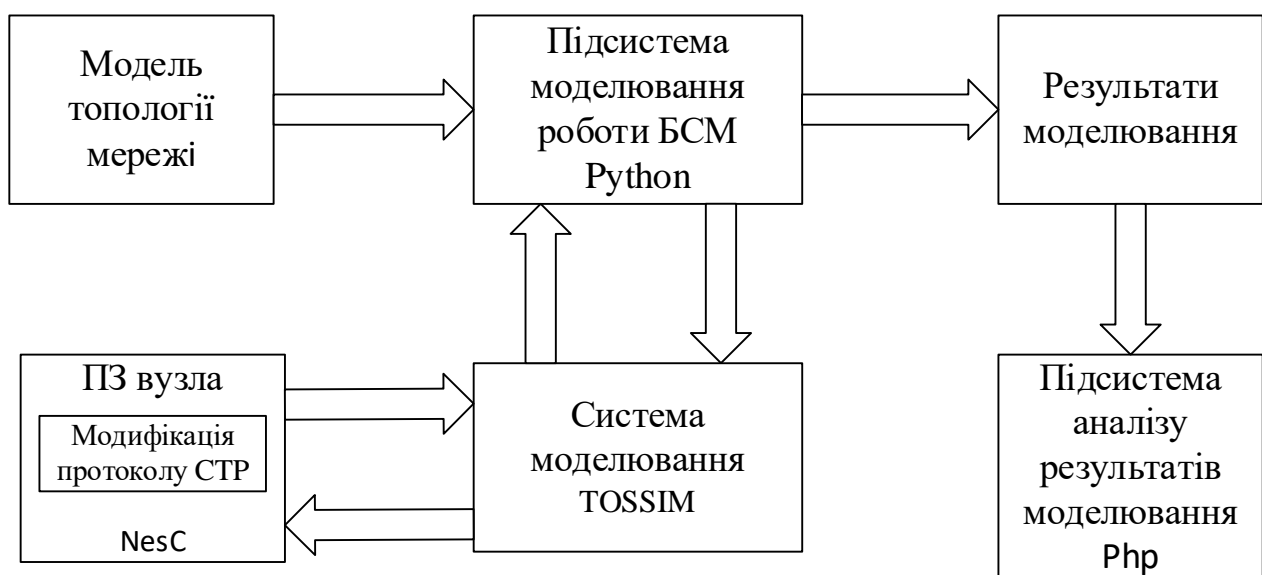


Рисунок 4.2 – Структура ПЗ підсистеми оптимізації БСМ

4.1.4 Генетичний алгоритм маршрутизації

Отже, у роботі розроблено генетичний алгоритм оптимізації протоколу маршрутизації, псевдокод якого наведено нижче.

```

Генетичний_алгоритм(Розмір Популяції, Число ітерацій)
{
  // Підготовка початкової популяції
  Ініціалізація початкової популяції ();
  Об'єктно-орієнтоване моделювання БСМ;
  Оцінка особин (початкова популяція);
  Номер популяції = 0;
  While (не_досягнуто_критерій_зупинки)
  {
    for( i=0 ; i<Розмір Популяції ; i++)
    {
      Операція відбору (Батько А, Батько Б);
      if(rand() < Pc)
        Операція Схрещування (Батько А, Батько Б, Нащадки);
      if(rand() < Pm)
        Операція Мутації (Нащадок);
      Поповнення проміжної популяції (Нащадок, Нова позиція);
      Нова Позиція;
    }
    Оцінка особин (Проміжна Населення);
    Побудова нової популяції (Розмір Популяції);
    Номер популяції ++;
  }
}

```

Тут оцінка особин виконується на основі об'єктно-орієнтованого моделювання, представленого вище. Операція відбору заснована на використанні методу турнірного відбору особин. Функції схрещування та мутації описують описані вище модифіковані генетичні оператори кросинговера та мутації.

4.1.5 Моделювання

Об'єкти для експериментальних досліджень надають моделі БСМ. Для отримання найбільш достовірних результатів тестування модифікованого протоколу СТР можна використати кілька різних мереж. Для цих цілей використаємо 2 невеликі моделі БСМ, які дозволили проаналізувати отримані результати тестування. Третя мережа є базовою у складі TinyOS, вона має досить великий розмір і є контрольною для перевірки роботи алгоритму. Розглянемо моделі мереж більш детально.

Перша модель мережі складається із 6 вузлів (рис.4.3), всі зв'язки між вузлами однакові та мають рівень згасання сигналу дорівнює -50.

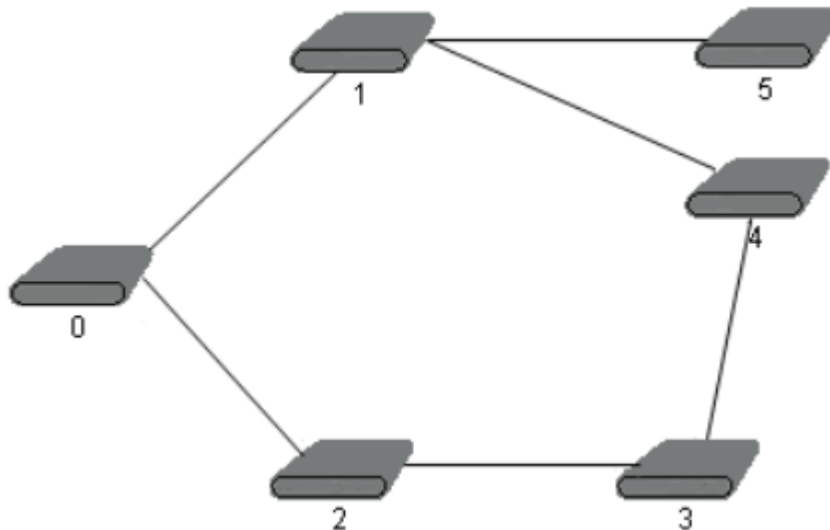


Рисунок 4.3 – Топологія першої моделі мережі

Друга модель мережі складається з 15 вузлів (рис.4.4), усі зв'язки між вузлами теж однакові та мають рівень згасання сигналу дорівнює -50. Топології

уявленнях моделей мереж побудовані таким чином, щоб більш віддалені вузли мали можливість вибору вузла, якому необхідно передавати дані, оскільки це дозволяє повною мірою оцінити роботу модифікованого СТР. Зв'язки між вузлами були встановлені однаковими, щоб при виборі маршруту уникнути додаткових впливів на вибір.

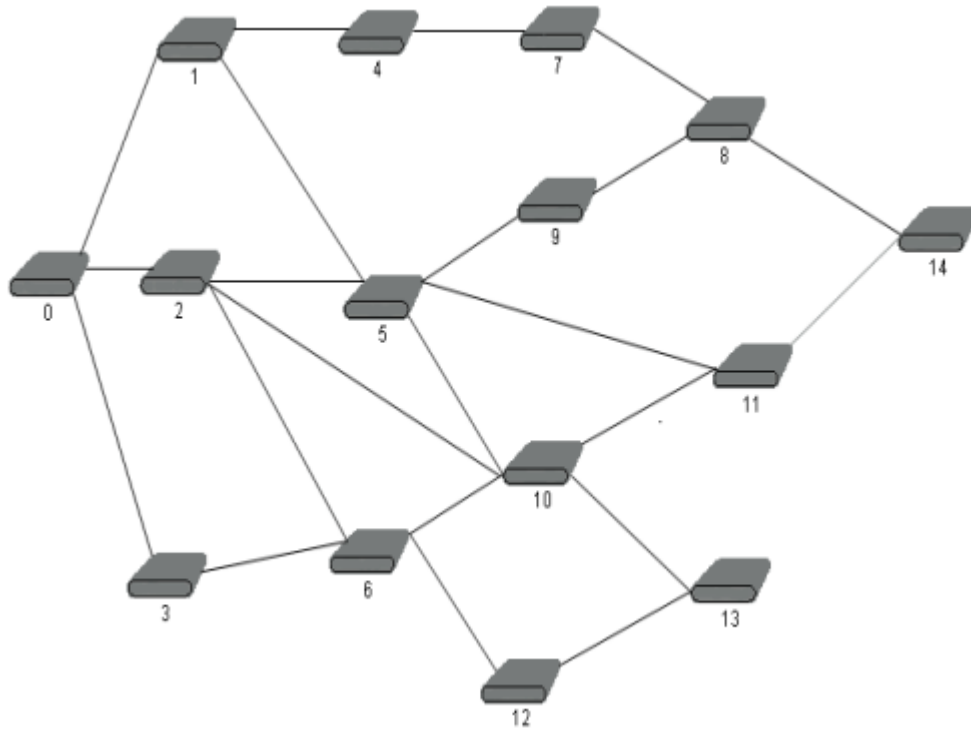


Рисунок 4.4 – Топологія другої моделі мережі

Третя модель мережі є базовою і постачається разом з TinyOS та TOSSIM. Модель складається з 226 вузлів, зв'язки яких мають різні втрати згасання сигналу. Дана модель мережі використовується як контрольна, оскільки є базовою моделлю. Усі моделі описуються за допомогою текстових файлів і по суті є набором рядків.

Тестування виконується на останньому етапі за допомогою системи моделювання роботи протоколу.

На рис.4.5–4.6. представлені гістограми розподілу числа ретрансляцій для моделей під керуванням стандартного та модифікованого протоколу СТР.

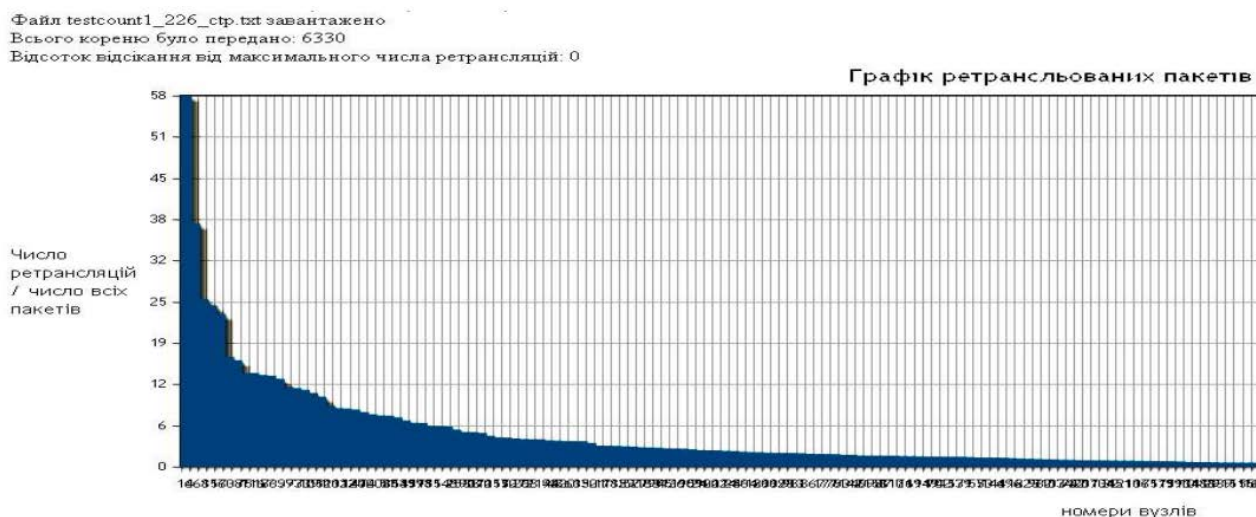


Рисунок 4.5 – Графік відсоткового співвідношення числа ретрансльованих пакетів у мережі з 226 вузлів під керуванням СТР

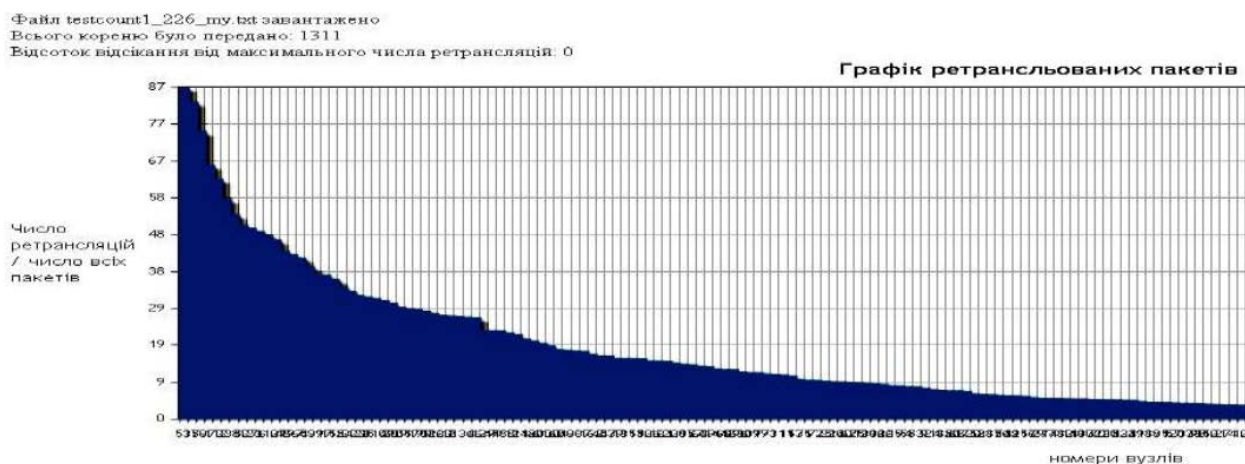


Рисунок 4.6 – Графік відсоткового співвідношення числа ретрансльованих пакетів у мережі з 226 вузлами під керуванням модифікованого СТР

Результати моделювання мережі, що складається з 225 вузлів показують, що модифікований протокол СТР дає позитивні результати. Рівень спаду числа ретрансляцій на другому графіку має пологий спуск.

Модифікований метод оптимізації роботи для протоколу СТР на основі генетичного алгоритму, для якого визначено проблемно-орієнтовані генетичні оператори кросингвера та мутації.

Виконано програмну реалізацію модифікованого алгоритму СТР шляхом інтеграції нових функцій, операцій та змінних у вже існуючий програмний код протоколу СТР. Проведено серію експериментів з моделювання БСМ різної складності за допомогою програмного забезпечення. Отримані результати показали достатньо високу ефективність запропонованого методу.

4.2 Динамічна маршрутизація

4.2.1 Постановка задачі

Розглянемо БСМ, котра містить сенсорні вузли, вузли-актуатори та один вузол-координатор. Як основний обчислювальний вузол будемо розглядати вузол-координатор. Потрібно враховувати граничну дальність d^* передачі між вузлами і організувати маршрути в такий спосіб, щоб підвищити загальну енергетичну ефективність мережі.

Маршрутом у графі БСМ називатимемо послідовність вершин і ребер:

$$v_0, e_1, v_1, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n,$$

де v_0 – стартова вершина (вузол приймач чи передавач);

v_n – кінцева вершина (вузол передавач або приймач).

Для кожного i -го сенсорного вузла мережі можна знайти масив маршрутів передачі r_i даних на вузол-координатор з урахуванням граничної дальності d^* . Очевидно, що безліч найкоротших маршрутів між сенсорними вузлами та вузлом-координатором забезпечують оптимальну енергетичну ефективність БСМ тільки у разі розміщення всіх вузлів на відстані меншій за d^* від вузла-координатора. У цьому випадку в БСМ реалізується зірка топології. Якщо ця умова не виконується, то деякі сенсорні вузли будуть використовуватися як ретранслятори до вузла-координатора i , отже, найкоротші маршрути не забезпечуватимуть оптимальної енергетичної ефективності БСМ.

Припустимо, сформовані масиви маршрутів передачі даних на вузол-координатор для всіх вузлів БСМ. У цьому випадку потрібно вибрати такий набір маршрутів для кожного вузла, щоб забезпечити найкращу енергетичну ефективність БСМ, що визначає максимальну «живучість» мережі. Як критерій енергетичної ефективності, можна запропонувати вираз:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i}{m} \rightarrow \min$$

де E – енергетичні витрати на передачу даних у БСМ;

n_i – кількість ретрансляцій пакетів даних через i -й вузол з інших вузлів;

\bar{p}_i – Середня споживана потужність в одиницю часу.

Оптимізаційну задачу з цільовою функцією (2) можна вирішити із застосуванням генетичного алгоритму. Для спрощення викладок обмежимося сенсорними вузлами БСМ, т.к. для вузлів-актуаторів завдання вирішуватиметься аналогічно. В даному випадку, генетичний алгоритм дозволяє знайти комбінацію маршрутів від вузлів-сенсорів до вузла-координатора, що забезпечує мінімум критерію (2) з використанням генетичного пошуку. Розглянемо етапи генетичного алгоритму стосовно маршрутизації в БСМ.

4.2.2 Розроблення алгоритму

До кожного сенсорного вузла можливий шлях до вузлу-координатору, так як інакше вузлу нічого очікувати взаємодіяти з іншими вузлами БСМ. Максимальна кількість маршрутів $r_{i\max}$ для i сенсорного вузла визначається всілякими шляхами до вузла-координатора з урахуванням граничної дальності d^* передачі інформації між вузлами. Таким чином, гранична кількість маршрутів до БСМ для i -го вузла визначається інтервалом $[1, r_{i\max}]$.

Початкова популяція генетичного алгоритму маршрутизації буде представляти собою вектор випадкових маршрутів $r = [r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0m-1}]$, які задовольняють умові: $r_{0i} \in [1, r_{i\max}]$.

Для пошуку маршруту необхідно порівнювати рішення між собою. Залежно від порівняння індивіди поділяються на слабо пристосовані та добре пристосовані. У разі маршрутизації БСМ індивідом є сукупність маршрутів від усіх сенсорних вузлів до вузла-координатора. Ступінь пристосованості у даному випадку оцінюється цільовою функцією (2).

Оператори вибору батьків та селекції. На основі обраних батьків здійснюється генерація нащадків, а на основі селекції виконується виключення індивідів із популяції. Як батьків вибираються індивіди, які можуть дати більш пристосованих нащадків, а в результаті селекції відбираються індивіди, які уповільнюють розвиток популяції і, як наслідок, збіжність до раціонального рішення. В основі операторів вибору батьків та селекції використовуватимемо оцінки ймовірності.

Оператор схрещування. Цей оператор дозволяє створювати нащадків у популяції з урахуванням обраних батьків. У нашому випадку оператор схрещування створює нові сукупності маршрутів до БСМ. Функцією даного оператора є створення нащадків, які перевершували б своїх батьків і показували кращий рівень пристосованості.

Оператор мутації. Функцією оператора мутації є корекція генів нащадків з відновлення популяції. Цей оператор розширює область пошуку, порівняно лише з операторами вибору батьків та селекції. Цей оператор працює на основі ймовірнісного методу зміни генів. Слабкий оператор мутації призводить до зменшення різноманітності популяції, а занадто сильний навпаки може знизити ефективність операторів батьків і селекції. Очевидно, що оператор мутації може призводити до погіршення нащадків, але при цьому підтримувати чи збільшувати різноманітність у популяції.

Зупинення генетичного пошуку. При пошуку рішення необхідно визначити критерії зупинки, за яких пошук зупиняється і рішення вважається оптимальним. Можна виділити такі умови зупинення генетичного пошуку:

- досягнуто необхідної точності рішення;
- зниження (зупинка) змін у популяції;
- досягнення ліміту поколінь;
- досягнення ліміту відведеного часу.

У разі пошуку маршрутів у БСМ використовуємо всю сукупність умов зупинення генетичного пошуку.

На підставі викладеного вище пропонується наступний метод маршрутизації до БСМ:

Етап 1. Передача інформації з кожного вузла на вузол-координатор інформації про зв'язки із сусідніми вузлами мережі.

Етап 2. У обчислювачі вузла-координатора для кожного вузла БСМ формується масив r_i маршрутів передачі на вузол-координатор з урахуванням граничної дальності d^* у вигляді послідовностей:

$$v_0, e_1, v_1, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n,$$

Етап 3. Визначається гранична кількість маршрутів до БСМ кожному за вузла як інтервалу $[1, r_{i\max}]$.

Етап 4. Генерація початкової популяції як вектора випадкових маршрутів $r = [r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0m-1}]$, які задовольняють умові: $r_{0i} \in [1, r_{i\max}]$.

Етап 5. Визначення цільової функції у вигляді:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i}{m} \rightarrow \min$$

Етап 6. Запуск генетичного алгоритму маршрутизації та пошук сукупності оптимальних маршрутів для енергетичної ефективності мережі:

$$R = [r_1^* \cup r_2^* \cup \dots \cup r_{m-1}^*].$$

Етап 7. Передача знайдених маршрутів від вузла-координатора до сенсорних вузлів та вузлів-актуаторів.

Слід зазначити, що цей метод може використовуватися для довільної кількості вузлів БСМ, а також для різних типів вузлів. У зв'язку з цим можливі чотири сценарії передачі даних у БСМ:

- 1) усі вузли можуть передавати пакети даних один одному;
- 2) вузли одного типу пересилають інформацію між собою та не можуть передавати пакети даних через вузли іншого типу;
- 3) вузли одного типу можуть поєднуватися в кластери для енергетичного балансування мережі;
- 4) вузли різного типу можуть поєднуватися в кластери для енергетичного балансування мережі.

У цій роботі відпрацюємо другий сценарій передачі в БСМ, тим паче, що він дозволяє виробити різні технології передачі між вузлами різних типів.

4.2.3 Результати моделювання

Для проведення дослідження у БСМ використовують різні симулятори [10], у яких важко тестувати нові методи маршрутизації. У зв'язку з цим використаємо програму мовою Python, що дозволяє моделювати різномірні сенсорні мережі та досліджувати методи маршрутизації пакетів даних між вузлами.

У програмній моделі створювалася БСМ, що включає 10 сенсорних вузлів, 10 вузлів-актуаторів та один вузол-координатор.

Для всіх вузлів використана початкова та поточна енергія на 100%, витрата енергії – 0,04, ймовірність перешкоди у каналі зв'язку – 0,9, ймовірність виходу вузла з ладу – 0,98.

Середовище представляє собою область розміром 200 на 200 метрів, з температурою повітря 26 градусів, температурою ґрунту 18 градусів, початковою вологістю ґрунту 100%, граничною дистанцією зв'язку 100 м.

При запуску моделювання сенсорні вузли та вузли-актуатори розміщуються в середовищі випадковим чином і нумеруються, наприклад, як на рис. 4.7.

Для моделі БСМ, що представлена на рис. 1, знайдені масиви шляхів між вузлом-координатором та сенсорними вузлами: 0-1: 145 шляхів, 0-2: 39 шляхів, 0-3:169 шляхів, 0-4: 115 шляхів, 0-5: 88 шляхів, 0- 6: 213 шляхів, 0-7: 39 шляхів, 0-8: 137 шляхів, 0-9: 77 шляхів, 0-10: 144 шляхи.

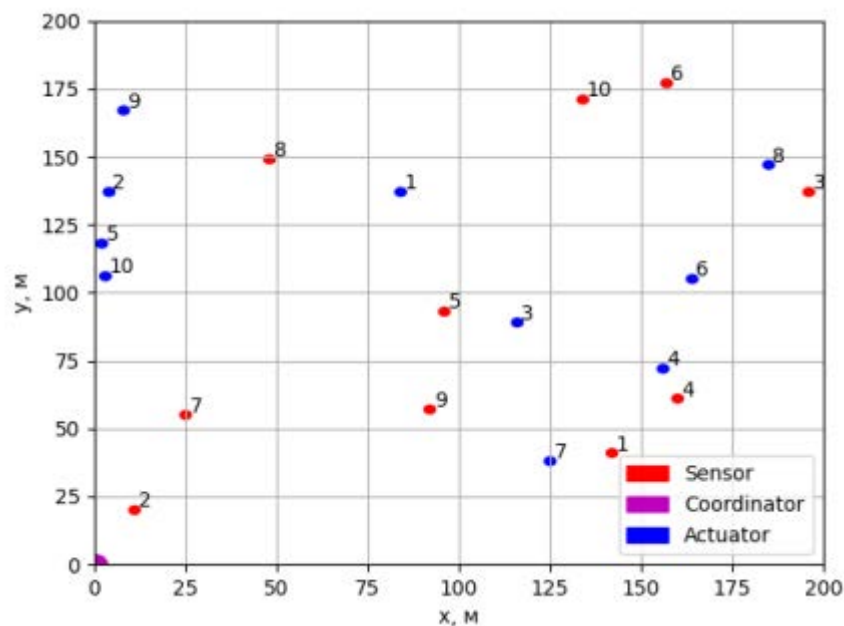


Рисунок 4.7 – Графічне уявлення БСМ

Сукупність шляхів є ланцюжками переходів між вузлами БСМ, наприклад, як представлено нижче:

0-1: [0, 2, 9, 1], [0, 2, 9, 4, 1], [0, 2, 9, 4, 3, 10, 8, 5, 1]...

0-2: [0, 2], [0, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 9, 2], [0, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 5, 9, 2]...

0-3: [0, 2, 9, 1, 4, 3], [0, 2, 9, 1, 4, 5, 8, 10, 3]...

0-4: [0, 2, 9, 1, 4], [0, 2, 9, 1, 5, 8, 10, 3, 4]...

0-5: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 5], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 7, 5]...

0-6: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 6], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 6]...

0-7: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 5, 7], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 7]...

0-8: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 5, 8]...

0-9: [0, 2, 9], [0, 2, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 9], [0, 2, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 5, 9]...

0-10: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 6, 10].

На основі кількості знайдених шляхів сформовано обмеження для генетичного алгоритму. Генетичний пошук виконувався за наступних вихідних даних:

- максимальна кількість ітерацій (max_num_iteration): 400,
- розмір популяції (population_size): 200,
- можливість мутації (mutation_probability): 0.1,
- ймовірність елітизації (elit_ratio): 0.01,
- можливість схрещування (crossover_probability): 0.5,
- ймовірність перенесення батьків до наступної популяції (parents_portion): 0.3,
- тип схрещування (crossover_type): 'uniform'.

Генетичний пошук знайшов таку сукупність маршрутів передачі в БСМ, які забезпечують 35 передач між вузлами. За результатами генетичного пошуку було знайдено такі маршрути передачі пакетів даних:

0-1:[0, 7, 9, 1], 0-2:[0, 2], 0-3:[0, 7, 8, 10, 3], 0-4:[0, 2, 9, 4], 0-5: [0, 7, 5],

0-6: [0, 7, 8, 10, 6], 0-7: [0, 7], 0-8: [0, 7, 8], 0-9: [0, 2, 9], 0-10: [0, 7, 5, 10].

Декілька прикладів роботи генетичного алгоритму представлено на рис. 4.8.

Як видно з результатів моделювання генетичним пошуком, знайдено маршрути передачі пакетів через мінімальну кількість вузлів. При цьому кількість передач пакетів для кожного з сенсорних вузлів представлена в таблиці 4.1.

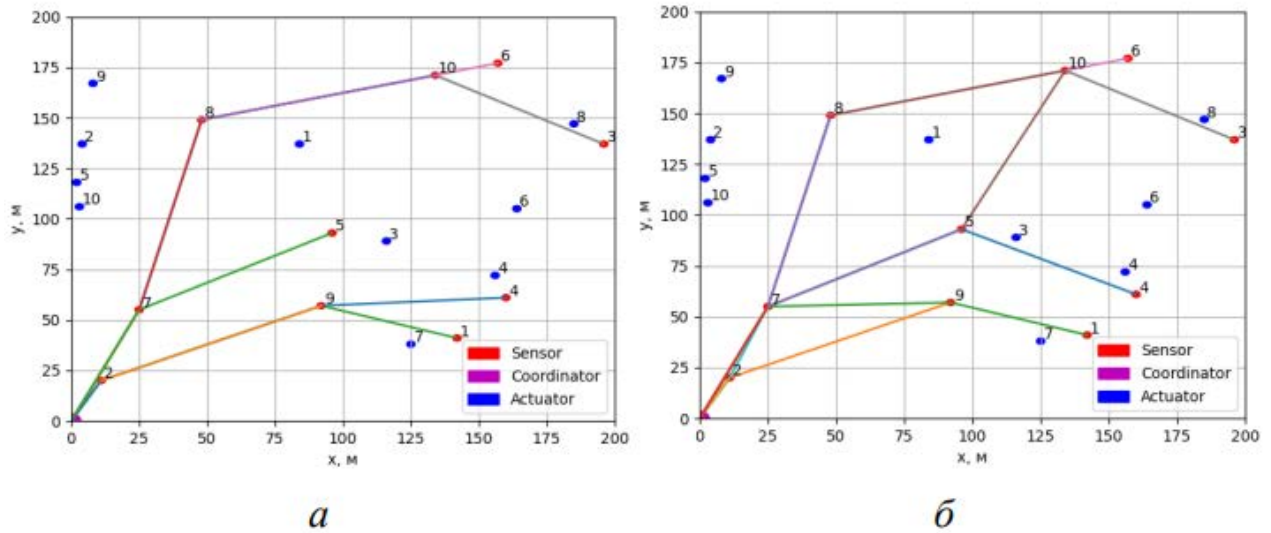


Рисунок 4.8 – Варіанти маршрутизації пакетів у БСМ

Таблиця 4.1 – Приклад розрахунку кількості передач пакетів через вузли БСМ

| | Вузол-координатор | Номера сенсорних вузлів | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Число передач | 10 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 8 | 3 | 2 | 3 |

Як видно з таблиці, основне навантаження припадає на 7 сенсорний вузол і, отже, він визначає енергетичну ефективність БСМ. Для більш рівномірного розподілу навантаження введемо в цільову функцію (2) "штрафну" компоненту, яка збільшуватиме її значення при підвищенні числа передач:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i + \delta_i(\bar{n})}{m} \rightarrow \min$$

де \bar{n} – гранична кількість передач пакетів через вузол.

Результати моделювання з модифікованою цільовою функцією представлені у таблиці 4.2, а карта маршрутизації представлена на рис. 4.9.

Таблиця 4.2 – Розрахунок кількості передач пакетів через вузли БСМ із модифікованою цільовою функцією

| | Вузол-координатор | Номера сенсорних вузлів | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Число передач | 10 | 2 | 5 | 1 | 4 | 4 | 1 | 6 | 1 | 5 | 3 |

Згідно з отриманими даними, кількість передач через 7-й сенсорний вузол зменшилася на дві передачі, але збільшилася на 2-му вузлі. Фактично обидва вузли є «пляшковою шийкою» в БСМ і генетичний пошук з модифікованою цільовою функцією більш рівномірно розподілив маршрути передачі даних.

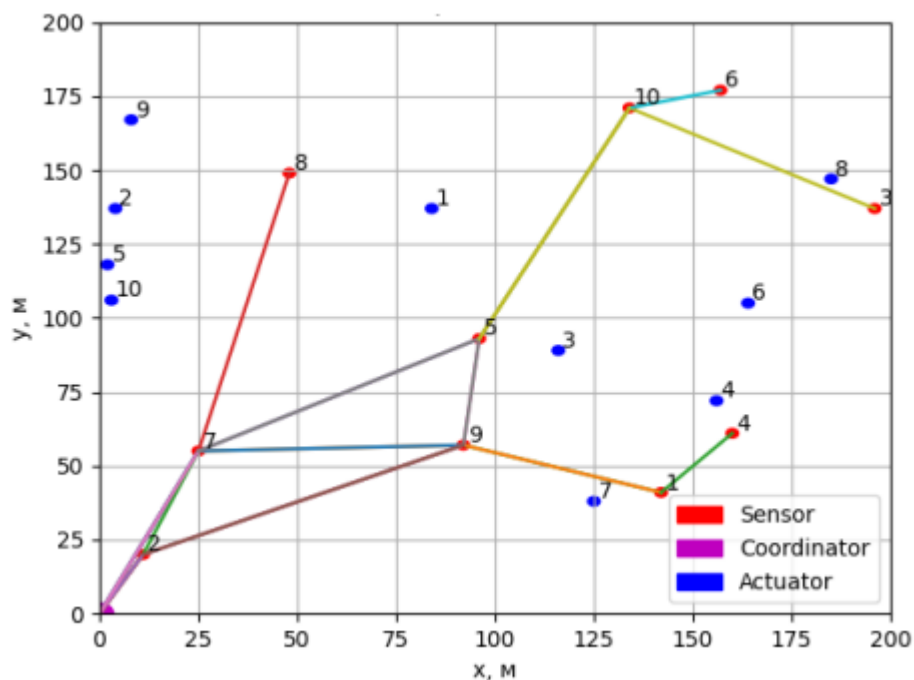


Рисунок 4.9 – Карта маршрутизації з модифікованою цільовою функцією

Надалі кількість сенсорних вузлів було розширено до двадцяти. При цьому на відміну від попереднього експерименту відпрацьовувалося обмеження на максимальну кількість вузлів на маршруті. У таблиці 4.3 представлені результати моделювання з цільовою функцією та обмеженням на граничну довжину маршруту із 7 вузлів.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання з обмеженням на довжину маршруту із 7 вузлів для цільової функції

| | Вузол-координатор | Номера сенсорних вузлів | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Число передач | 20 | 4 | 13 | 8 | 8 | 7 | 1 | 5 | 2 | 9 | 2 |
| | | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Число передач | | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 6 | 3 | 4 | 3 |

Виходячи з результатів моделювання видно, що основне навантаження в БСМ лежить на 2-му та 9-му вузлах. При цьому фіксуються 104 передачі даних в мережі. У таблиці 4.4 представлені результати моделювання з цільовою функцією та обмеженням на граничну довжину маршруту із 7 вузлів.

Таблиця 4.4 – Результати моделювання з обмеженням на довжину маршруту із 7 вузлів для цільової функції

| | Вузол-координатор | Номера сенсорних вузлів | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Число передач | 20 | 7 | 9 | 7 | 3 | 8 | 2 | 10 | 3 | 6 | 3 |
| | | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Число передач | | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 9 | 5 | 6 | 4 |

Як видно з результатів моделювання з модифікованою цільовою функцією, навантаження на сенсорні вузли розподілилося більш рівномірно і загальна кількість передач досягла 114.

Таким чином, запропоновано метод маршрутизації пакетів у БСМ на основі генетичного алгоритму, орієнтований на підвищення енергетичної ефективності мережі. Запропонований метод маршрутизації та програмна модель дозволяють:

- поступово розподілити навантаження на вузли в БСМ;

- використовувати різні сценарії передачі в БСМ, залежно від стану вузлів, шляхом призначення різних «штрафних» компонент у цільової функції;
- реалізувати сценарій роботи БСМ із кластерами вузлів, у якому деякі вузли використовуються для збору даних.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи ви-
ставлені експертами

| Ступінь новизни | Характеристика ступеня новизни | Значення ступеня новизни, бали | | |
|-----------------|---|--------------------------------|----|----|
| | | Експерти (ПІБ, посада) | | |
| | | 1 | 2 | 3 |
| Принципово нова | Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод | 0 | 63 | 0 |
| Нова | Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів | 55 | 0 | 53 |
| Відносно нова | Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни) | 0 | 0 | 0 |
| Традиційна | Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайде- | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|----------------------------------|---|------|---|---|
| | но новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим | | | |
| Не нова | Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам | 0 | 0 | 0 |
| Середнє значення балів експертів | | 57,0 | | |

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

| Характеристика рівня теоретичного опрацювання | Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали | | |
|--|---|----|----|
| | Експерт (ПІБ, посада) | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| Відкриття закону, розробка теорії | 0 | 0 | 0 |
| Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу | 61 | 63 | 60 |
| Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини | 0 | 0 | 0 |
| Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо | 0 | 0 | 0 |
| Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо | 0 | 0 | 0 |
| Середнє значення балів експертів | 61,3 | | |

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке

опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [22]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ – показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 57,0$, $k_{\text{теор}} = 61,3$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 57,0 + 0,4 \cdot 61,33 = 58,73 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

| Досягнутий рівень показника | Кількість балів |
|---------------------------------|-----------------|
| Високий | 70...100 |
| Середній | 50...69 |
| Достатній | 15...49 |
| Низький (помилкові дослідження) | 1...14 |

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах», даний рівень становить 58,73 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [22]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 14900,00 \cdot 32 / 22 = 21672,73 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

| Найменування посади | Місячний посадовий оклад, грн | Оплата за робочий день, грн | Число днів роботи | Витрати на заробітну плату, грн |
|--|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Керівник науково-дослідної роботи з дослідження маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах | 14900,00 | 677,27 | 32 | 21672,73 |
| Науковий співробітник | 14000,00 | 636,36 | 24 | 15272,73 |
| Інженер-дослідник безпроводних мереж | 13850,00 | 629,55 | 15 | 9443,18 |
| Технік | 7150,00 | 325,00 | 22 | 7150,00 |
| Всього | | | | 53538,64 |

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [22];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 56,53 \cdot 4,55 = 257,22 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

| Найменування робіт | Тривалість роботи, год | Розряд роботи | Тарифний коефіцієнт | Погодинна тарифна ставка, грн | Величина оплати на робітника грн |
|--|------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Установка обладнання для проведення досліджень | 4,55 | 2 | 1,10 | 56,53 | 257,22 |
| Підготовка робочого місця дослідника | 5,50 | 2 | 1,10 | 56,53 | 310,92 |
| Встановлення програмного забезпечення ведення аналітичних досліджень | 4,40 | 4 | 1,50 | 77,09 | 339,19 |
| Підготовка бази даних | 10,10 | 3 | 1,35 | 69,38 | 700,73 |
| Монтаж компонентів безпроводної сенсорної мережі | 6,34 | 5 | 1,70 | 87,37 | 553,90 |
| Випробування компонентів експериментальних блоків | 8,20 | 4 | 1,50 | 77,09 | 632,12 |
| Налагодження системи | 4,75 | 4 | 1,50 | 77,09 | 366,17 |
| Технічна підтримка експериментів | 11,00 | 3 | 1,35 | 69,38 | 763,17 |
| Всього | | | | | 3923,42 |

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{дод}} = (53538,64 + 3923,42) \cdot 11 / 100\% = 6320,83 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (53538,64 + 3923,42 + 6320,83) \cdot 22 / 100\% = 14032,23 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і дос-

ліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,0 \cdot 177,00 \cdot 1,04 - 0 \cdot 0 = 368,16 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт | Ціна за 1 кг, грн | Норма витрат, кг | Величина відходів, кг | Ціна відходів, грн/кг | Вартість витраченого матеріалу, грн |
|--|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Білий офісний папір OFFICE-500 A4 | 177,00 | 2,0 | 0 | 0 | 368,16 |
| Папір для записів OFFICE 70 A5-250 | 117,00 | 3,0 | 0 | 0 | 365,04 |
| Органайзер офісний OFFICE 100 | 222,00 | 4,0 | 0 | 0 | 923,52 |
| Набір офісний DATUM 300 | 201,00 | 3,0 | 0 | 0 | 627,12 |

| | | | | | |
|-------------------------------|---------|-----|---|---|---------|
| Картридж для принтера HP-5500 | 1099,00 | 1,0 | 0 | 0 | 1142,96 |
| Інші матеріали | 250,00 | 1,0 | 0 | 0 | 260,00 |
| Всього | | | | | 3686,80 |

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 3 \cdot 200,00 \cdot 1,04 = 624,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

| Найменування комплектуючих | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн | Сума, грн |
|----------------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Радіомодем | 3 | 200,00 | 624,00 |
| Блок живлення | 3 | 325,00 | 1014,00 |
| Блок візуалізації | 3 | 5000,00 | 15600,00 |
| Блок вводу | 3 | 2500,00 | 7800,00 |
| Інтерфейсний блок | 3 | 3500,00 | 10920,00 |
| Всього | | | 35958,00 |

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 4350,00 \cdot 1 \cdot 1,04 = 4524,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

| Найменування устаткування | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|--|---------------|----------------------|---------------|
| Маршрутизатор бездротової сенсорної мережі | 1 | 4350,00 | 4524,00 |
| Серверна система | 1 | 15800,00 | 16432,00 |
| Ноутбук ASUS E410 14"HD, 8/256GB | 1 | 21399,00 | 22254,96 |
| Всього | | | 43210,96 |

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7646,00 \cdot 1 \cdot 1,04 = 7951,84 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

| Найменування програмного засобу | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|--|---------------|----------------------|---------------|
| Прикладний пакет моделювання процесів MatLab | 1 | 7646,00 | 7951,84 |
| Всього | | | 7951,84 |

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{\bar{o}}}{T_{\bar{e}}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\bar{o}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\bar{e}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (33499,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1861,06 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування обладнання | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|--|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Електронний комплекс системи проведення досліджень | 33499,00 | 3 | 2 | 1861,06 |
| Персональний комп'ютер розробника бездротової сенсорної мережі | 24599,00 | 3 | 2 | 1366,61 |
| Спеціалізоване | 7799,00 | 5 | 2 | 259,97 |

| | | | | |
|--|-----------|----|---|---------|
| робоче місце розробника | | | | |
| Вольтметр цифровий | 6510,00 | 5 | 2 | 217,00 |
| Осцилограф цифровий | 7856,00 | 5 | 2 | 261,87 |
| Пристрій виводу текстової інформації | 6547,00 | 4 | 2 | 272,79 |
| Оргтехніка | 8760,00 | 4 | 2 | 365,00 |
| Приміщення лабораторії досліджень | 422000,00 | 25 | 2 | 2813,33 |
| ОС Windows 11 | 5700,00 | 3 | 2 | 316,67 |
| Прикладний пакет Microsoft Office 2019 | 5399,00 | 3 | 2 | 299,94 |
| Всього | | | | 8034,24 |

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{vni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{vni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{vni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 576,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Сума, грн |
|--|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Електронний комплекс системи проведення досліджень | 0,32 | 240,0 | 576,00 |
| Персональний комп'ютер розробника | 0,08 | 240,0 | 144,00 |
| Спеціалізоване робоче місце розробника | 0,08 | 240,0 | 144,00 |
| Вольтметр цифровий | 0,10 | 45,0 | 33,75 |
| Осцилограф цифровий | 0,12 | 45,0 | 40,50 |
| Пристрій виводу текстової інформації | 0,20 | 3,0 | 4,50 |
| Оргтехніка | 0,45 | 2,2 | 7,43 |
| Маршрутизатор бездротової сенсорної мережі | 0,06 | 45,0 | 20,25 |
| Серверна система | 0,10 | 15,0 | 11,25 |
| Ноутбук ASUS E410 14"HD, 8/256GB | 0,04 | 240,0 | 72,00 |
| Всього | | | 1053,68 |

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 55\%$.

$$I_e = (53538,64 + 3923,42) \cdot 55 / 100\% = 31604,13 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 110\%$.

$$B_{нзв} = (53538,64 + 3923,42) \cdot 110 / 100\% = 63208,27 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (5.15)$$

$$B_{заг} = 53538,64 + 3923,42 + 6320,83 + 14032,23 + 3686,80 + 35958,00 + 43210,96 + 7951,84 + 8034,24 + 1053,68 + 0,00 + 0,00 + 31604,13 + 63208,27 = 272523,03 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$3B = 272523,03 / 0,9 = 302803,37 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.17)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Приймемо $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Приймемо $T_c = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Приймемо $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 302803,37$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [25].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 302,8 \cdot 0,17 = 10,15.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» складають 302803,37 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

У приміщенні, де відбувалася розробка підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах присутні такі шкідливі та небезпечні фактори [24]:

- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- відсутність чи нестача природного світла;
- фізичні перевантаження (статичні);
- нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час виконання роботи.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Широке промислове та побутове використання ПК актуалізувало питання охорони праці його користувачів. Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з ПК, зокрема можливість зорових, нервово-емоційних переживань, серцево-судинних захворювань.

Виходячи з цього, роботодавець повинен забезпечити гігієнічні й ергономічні вимоги щодо організації робочих приміщень для експлуатації ПК, робочого середовища, робочих місць з ПК, режиму праці і відпочинку при роботі з ПК тощо, які викладені у Правилах.

Основні вимоги до виробничого приміщення для експлуатації ПК:

- приміщення не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;

– площа на одне робоче місце в такому приміщенні повинна становити не менше $6,0\text{ м}^2$, а об'єм не менше $20,0\text{ м}^3$;

– приміщення повинно мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [28];

– необхідно щоденно проводити вологе прибирання;

– поруч з приміщенням для роботи з ПК мають бути обладнані: побутова кімната для відпочинку під час роботи; кімната психологічного розвантаження.

Організація робочого місця користувача комп'ютера повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам. Виконуючи практичні завдання щодо використання робочої пози, потрібно:

– зменшувати величину статичних напружень;

– розподіляти статичні напруження;

– передбачати можливість змін пози під час роботи.

Для роботи операторів ПК у положенні сидячи рекомендовані такі параметри робочого простору: ширина - не менше 700 мм, глибина - не менше 400 мм, висота робочої поверхні над підлогою – 700 ... 750 мм. Під робочою поверхнею необхідно передбачити простір для ніг: висота - менше 600 мм, ширина - не менше 500 мм, глибина - не менше 400 мм. За необхідності огляду робочого місця його висота не повинна перевищувати 1200 мм

Під час роботи сидячи нижня частина корпусу розслаблена, а основне статичне навантаження припадає на м'язи шиї, спини, таза, стегон. Неправильна сидяча поза може викликати застій крові в ногах, а якщо виконується великий обсяг роботи для пальців рук – запалення суглобів.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

– висота столу повинна бути обрана з урахуванням можливості сидіти вільно, у зручній позі, при необхідності спираючись на підлокітники;

– нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб оператор міг зручно сидіти, не був змушений підбирати ноги;

- поверхня столу повинна мати властивості, що виключають появу відблисків у поле зору оператора;

- конструкція столу повинна передбачати наявність висувних шухляд (не менш 3-х для збереження документації, канцелярського приладдя, особистих речей).

На робочому місці розробка підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах існує небезпека поразки електричним струмом. Електричний струм, впливаючи на тіло людини, може заподіяти йому явні чи приховані пошкодження, в тому числі опіки всього тіла або окремих його ділянок; електричні удари характерні внутрішніми ушкодженнями тощо.

Приміщення, де виконується робота, згідно ПУЕ «Правила влаштування електроустановок» класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки [34].

Безпечна експлуатація електроустановок здійснюється у відповідності з вимогами ПУЕ [12] та «Правила безпечної експлуатації електроустановок» [30] і передбачає такі заходи та засоби:

- недоступність струмоведучих частин, прокладання електрокабелів під підлогою, в спеціальних каналах, скрите виконання освітлювальної проводки, ізоляцію струмо-провідних елементів ($R_{із} \geq 0.5 \text{ МОм}$);

- захисне заземлення всіх металевих струмопровідних частин електроустановок та ПК ($R_{з \text{ доп}} \leq 4 \text{ Ом}$);

- використання пониженої напруги 36 В (для аварійного освітлення щита) в операторському пункті та виробничому приміщенні;

- застосування попереджувальної сигналізації, написів, плакатів при проведенні планово-попереджувальних ремонтів і профілактичних випробувань електрообладнання;

- проведення організаційних заходів (спеціальне навчання, атестація та переатестація осіб електротехнічного персоналу, інструктажі тощо).

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Температура, відносна вологість, швидкість руху повітря біля тіла людини, а також температура стін і навколишніх предметів утворюють мікроклімат на робочому місці. Температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря вимірюють на висоті 1,0 м від підлоги або робочої площадки при роботах, що виконуються сидячи, і на висоті 1,5 м – при роботах, що виконуються стоячи, і не ближче 1 м від нагрівальних приладів і зовнішніх стін.

Робота, яка виконується розробником підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [23]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.6.1.

Таблиця 6.1 – 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 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).

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ згідно ДСН 3.3.6.042-99 [32]. Джерелами запиленості повітря в приміщенні є одяг людей і пил, що проникає з вулиці. У

приміщенні немає значного виділення шкідливих газів. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – 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 | 4 |

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

| Рівні | Кількість іонів в 1 см ³ | |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------|
| | n+ | n- |
| Мінімально необхідні | 400 | 600 |
| Оптимальні | 1500-3000 | 3000-5000 |
| Максимально необхідні | 50000 | 50000 |

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

Правильно спроектоване освітлення, яке відповідає вимогам санітарних норм здійснює позитивний психологічний вплив на працівника, знижує втому, створює оптимальні умови для роботи органів зору, і тим самим підвищує безпеку праці і знижує травматизм.

Освітлення створюється природним сонячним світлом (природне) і світлом від електричних ламп (штучне). Природне освітлення є найсприятливішим для людини, так як сонячне світло має оптимальний спектр, в ньому наявна достатня кількість ультрафіолетових променів. Штучне освітлення передбачається у приміщеннях, де недостатньо природного світла, і для освітлення у вечірні та нічні години.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.4 (за ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення [28]):

Таблиця 6.4 - 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 |
| Високої точності | 0,3 – 0,5 | III | г | великий | світлий | 700 | 300 | 5 | 2 | 3 | 1,2 |

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду.
- 3) Використання жалюзі на вікнах для регулювання кількості природного світла у приміщенні.
- 4) Загальне штучне освітлення створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

6.2.4 Виробничий шум

Шум визначають як сукупність аперіодических звуків різної інтенсивності та частоти. Шум заважає роботі, знижує працездатність і продуктивність праці, при тривалій і інтенсивній дії викликає захворювання організму.

У закритих приміщеннях шум, багаторазово відбиваючись від стін та стелі, посилюється. Тому рекомендується проводити їх акустичну обробку за допомогою звукопоглинальних облицювань з пористих матеріалів, які мають великий коефіцієнт звукопоглинання.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [31].

Таблиця 6.5 - Рівень звукового тиску

| Характер робіт | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц) | | | | | | | | | Допустимий 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 зменшення шуму здійснюють своєчасний ремонт та профілактику обладнання.

6.2.5 Виробничі випромінювання

На робочому місці розробника підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах у зв'язку із експлуатацією електричної апаратури, існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного випромінювання.

Ступінь біологічного впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від частоти коливань, напруженості та інтенсивності поля, тривалості його впливу.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань шкодить здоров'ю людини. Від цього страждає передусім нервова і серцево-судинна системи, виникають головний біль і перевтома, знижується точність робочих рухів, порушується сон. Електромагнітне випромінювання викликає зміни тиску крові, гіпотонію або гіпертонію.

Рівні електромагнітних випромінювань моніторів, які вважаються безпечними для здоров'я користувачів, регламентуються нормами MPR II 1990:10 Шведського національного комітету з вимірювань та досліджень (табл.6.6) [33, с.348].

Таблиця 6.6 - Допустимі рівні випромінювань моніторів ПК

| Вид поля | ТСО | MPR II |
|---|--|---|
| Змінне електричне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц | 10 В/м 1 В/м на відстані 0,3 м від центра екрана і 0,5 м навколо монітора | 2,5 В/м 2,5 В/м на відстані 0,5 м навколо монітора |
| Змінне магнітне поле 5 Гц – 2 кГц 2 кГц – 400 кГц | 250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на від- стані 0,3 м від центра ек- рана і 0,5 м навколо мо- нітора | 250 нТл 200 мА/м 25 нТл 20 мА/м на від- стані 0,5 м навколо моні- тора |

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань використовують обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні та встановлюють раціональні режими експлуатації ПК і роботи працюючого персоналу.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження області працездатності РЕС в умовах дії загрозливих чинників НС

6.3.1 Дія іонізуючих випромінювань на радіоелектронні системи

Основним об'єктом ядерних досліджень є структура атома. Ядра всіх атомів складаються з дрібних частинок – протонів і нейтронів, які міцно з'єднані одна з одною. Число протонів суворо визначено, а кількість нейтронів у ядрі може бути різною у атомів одного хімічного елемента. Тому можуть існувати різновиди атомів одного й того ж елемента, які відрізняються один від одного масою. Такі атоми називаються ізотопами елемента. Для більшості ізотопів характерна радіоактивність, яка може бути природною і штучною. Природна радіоактивність - це довільний розпад ядер елементів у природному стані. Штучна радіоактивність викликається людиною в лабораторіях, на реакторах АЕС, тощо.

Під час радіоактивного розпаду з ядра виділяється величезна кількість енергії у вигляді іонізуючих випромінювань. Розрізняють кілька видів іонізуючого випромінювання. Гамма-випромінювання (γ) є найнебезпечнішим джерелом енергії, воно проникає у повітрі на відстань сотень метрів. Бета-випромінювання (β) проникає в повітрі на відстань кількох метрів, а в живих тканинах кількох міліметрів. Альфа-частинки мають найкоротший радіус дії (кілька сантиметрів у повітрі, 0,1 мм у тканинах), а тому небезпечні лише у разі безпосереднього контакту з слизовими оболонками.

В залежності від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища в значній мірі залежить дія радіації на матеріали та деталі апаратури [36].

В перелік матеріалів, з яких виготовляють елементи радіоелектронних систем (РЕС) відносять: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли тощо). При цьому метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Робота РЕС в умовах дії радіоактивних випромінювань має такі особливості: РЕС може раптово втратити працездатність при певних рівнях радіації (критичних); в елементах схем РЕС можуть початись зворотні і незворотні процеси.

Для запобігання цього проводяться розрахунки з безпеки роботи в умовах дії радіації та приймаються рішення щодо захисту елементів РЕС.

Для зниження рівня забруднення радіоактивними речовинами використовують дезактивацію.

6.3.2 Визначення області працездатності РЕС приладу в умовах дії іонізуючих випромінювань

Вихідні дані: $K_{\text{носл}} = 3$, $t_n = 1$ год.

Проводимо аналіз і визначаємо радіоелектронні елементи, від яких залежить її функціонування: діоди, резистори, конденсатори, напівпровідники, мікросхеми, інтегральні схеми, діелектрики.

Знаходимо максимально допустимі рівні радіації, при яких в елементах можуть виникнути незворотні зміни [36].

Дані заносимо в таблицю 6.7.

Прийmemo час закінчення опромінення рівним терміну служби приладу

$$t_k = 5 \text{ (років)} = 43800 \text{ (год)}.$$

Проаналізувавши дані, визначаємо межу стійкості P_{gp} роботи РЕС, враховуючи коефіцієнт послаблення радіації

$$P_{gp} = \frac{D_{gp} K_{\text{носл}}}{2(\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})} \text{ [P/год];} \quad (6.1)$$

$$P_{гр} = \frac{10^4 \cdot 3}{2(\sqrt{43800} - \sqrt{1})} = 72,02 \text{ (Р/год)}.$$

Таблиця 6.7 – Максимально допустимі рівні радіації елементів РЕС

| № | Елементи РЕС | $D_{грi}, \text{Р}$ | $D_{гр}, \text{Р}$ |
|---|-------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | Діоди | 10^5 | 10^4 |
| 2 | Резистори | 10^6 | |
| 3 | Конденсатори | 10^6 | |
| 4 | Напівпровідники | – | |
| 5 | Мікросхеми | 10^4 | |
| 6 | Інтегральні схеми | 10^5 | |
| 7 | Діелектрики | 10^4 | |

Отже, область працездатності РЕС приладу в умовах дії іонізуючих випромінювань обмежена рівнем радіації від 0 до 72,02 Р/год.

Отже, досліджено область працездатності РЕС в умовах впливу загрозливих факторів надзвичайних ситуацій. Із дослідження дії іонізуючих випромінювань на область працездатності РЕС можна сказати, що область працездатності РЕС приладу в умовах дії іонізуючих випромінювань обмежена рівнем радіації від 0 до 72,02 Р/год.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було розглянуто та досліджено основні особливості здійснення маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах.

Безпроводні сенсорні мережі набули досить широкого застосування у різноманітних галузях завдяки власній багатofункціональності, практичності, дешевизні, а також спроможності функціонувати у віддалених місцевостях із незадовільними кліматичними умовами.

Були розглянуті найбільш відомі способи маршрутизації безпроводових сенсорних мереж. Розглянуто класифікація протоколів маршрутизації безпроводних сенсорних мереж та описано принципи їх функціонування.

При розробленні сенсорної мережі потрібно знайти баланс між якістю обслуговування потрібних програм та енергоефективністю всієї мережі. При проектуванні методу маршрутизації для БСМ доводиться обирати між різними можливостями залежно від мети та призначення такої мережі.

Кожен із протоколів буде оптимальним для конкретної мережі, враховуючи її призначення та особливості розгортання. Таким чином, критеріями порівняння є показники енергоефективності та якості обслуговування. Розробники методів маршрутизації безпроводових сенсорних мереж розглядають можливість для підвищення кількох показників якості обслуговування, щоб забезпечити доставку пакетів і ефективно працювати з точки зору якості. З іншого боку, важливо пам'ятати, що зменшення витрат енергії призводить до погіршення інших показників і обмежує ефективність мережі.

Отже, рішення щодо методу маршрутизації не є універсальним для кожної мережі.

Таким чином, запропоновано метод маршрутизації пакетів у БСМ на основі генетичного алгоритму, орієнтований на підвищення енергетичної ефективності мережі. Запропонований метод маршрутизації та програмна модель дозволяють:

- поступово розподілити навантаження на вузли в БСМ;
- використовувати різні сценарії передачі в БСМ, залежно від стану вузлів, шляхом призначення різних «штрафних» компонент у цільової функції;
- реалізувати сценарій роботи БСМ із кластерами вузлів, у якому деякі вузли використовуються для збору даних.

Було запропоновано модифікований метод оптимізації роботи для протоколу СТР на основі генетичного алгоритму, для якого визначено проблемно-орієнтовані генетичні оператори кросингвера та мутації.

Виконано програмну реалізацію модифікованого алгоритму СТР шляхом інтеграції нових функцій, операцій та змінних у вже існуючий програмний код протоколу СТР. Проведено серію експериментів з моделювання БСМ різної складності за допомогою програмного забезпечення. Отримані результати показали достатньо високу ефективність запропонованого методу.

В економічній частині роботи були розрахована вартість проведення досліджень, виробнича собівартість, ціна реалізації та термін окупності.

В розділі "Безпека життєдіяльності" проаналізовані умови праці в лабораторії для досліджень, виконано організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні заходи та протипожежні заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жураковський Б. Ю. Обробка інформації в сенсорних мережах / Б. Ю. Жураковський, І. Р. Пархомей, В. А. Дружинін // Адаптивні системи автоматичного управління. - 2018. - № 1. - С. 42-57. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asau_2018_1_7
2. Климаш М.М. Підвищення ефективності розподілу ресурсів телекомунікаційної мережі шляхом зміни маршрутів передавання даних [Електронний ресурс] / М.М. Климаш, Б.А. Бугиль, О.А. Лаврів, І.В. Демидов // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 4 (9). – С. 32 – 44.
3. Климаш Ю.В. Комплексний метод маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах / Ю.В. Климаш, О.М. Шпур, М.В. Кайдан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації №885 – Львів. – 2017. – С.76-87
4. Куліш Є.Б. Використання адаптивної динамічної маршрутизації на мульти-сервісних мережах зв'язку / Є.Б. Куліш, А.Г. Ложковський, В.В. Кичак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. - №1. – С. 198-201.
5. Захарченко С. М. Метод вдосконалення одношляхових протоколів динамічної маршрутизації / С. М. Захарченко, К. І. Шевчук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. - 2018. - № 2. - С. 16-25. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itki_2018_2_5
6. Лемешко О. В., Єременко О. С. Розробка та дослідження лінійної оптимізаційної моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах. Радиоелектроника и информатика. 2017. № 4 (79). С. 18–25.
7. Лемешко О. В., Єременко О. С. Динамічна модель маршрутизації при забезпеченні якості обслуговування за показником ймовірності своєчасної доставки пакетів. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2017: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 18–21

- квітня 2017). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 285–287.
8. Dargie W., Poellabauer C. *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice.* — John Wiley and Sons, 2010. — 330 p.
 9. Стрихалюк Б.М. Підвищення ефективності динамічної маршрутизації у гетерогенних сервісно-орієнтованих системах з використанням гіперболічних потоків Річчі / Б.М. Стрихалюк, І.Ю.В. Климаш, І.Б. Стрихалюк, Б. В. Коваль // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» №818. Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2015.– С. 189-194
 10. Schurgers, C. *Energy Efficient Routing in Sensor Networks* / C. Schurgers, M. Srivastava // *The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean VA, 2001. – P. 357–361.
 11. Буханько О. М. Метод маршрутизації на основі багатокритеріальної оптимізації та нечіткої логіки / О. М. Буханько // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* - 2012. - № 3(4). - С. 45-49.
 12. Погорілий С.Д. Генетичний алгоритм розв'язання задачі маршрутизації в мережах / С.Д. Погорілий, Р.В. Білоус// *Пробл. програмув.* — 2010. — № 2-3. — С. 171-177.
 13. Nitaigour, P. M. *Sensor networks and configuration fundamentals, standards, platforms, and applications* / P. M. Nitaigour. – Springer, 2007. – 510 p.
 14. Biradar, R. *Inter-Intra Cluster Multihop-LEACH Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks* / R. Biradar, S. R. Sawant, R. Mudholkar, V. C. Patil // *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS).* – 2011. – March. – V. 2, № 1. – P. 124–130.
 15. Семко О.В. *Управління маршрутизацією в бездротових сенсорних мережах. Інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Колективна монографія за матеріалами XVII Міжнародної науково-практичної конференції (м.Київ, 25-26 вересня 2018 р.).* м.Київ. 2018.С.103-106.

16. Семко О. Логіко-семантична модель управління маршрутизацією потоків даних в сенсорних мережах. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. №52. С.135-139.
17. Семко О., Семко В., Бурячок В., Складанний П. Методологія інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології. Сучасна спеціальна техніка. 2018. №55. С.64-76.
18. Семко О.В., В.В.Семко. Розробка формальної моделі інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології. Математичне моделювання в економіці. 2019. № 1. С.5-19.
19. Bondarchuk, A., Brzhevskaya, Z., Dovzhenko, N., Makarenko, A., & Sobchuk, V. (2019). Дослідження проблематики функціонування алгоритму передачі інформації при наявності прихованих вузлів в безпроводових сенсорних мережах. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 4(4), 54–61. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2019.4.5461>
20. Karpenko, A. ., Bondarenko, T. ., Ovsianikov, V. ., & Martyniuk, V. (2020). Забезпечення інформаційної безпеки в бездротових сенсорних мережах. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2(10), 54–66. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.10.5466>
21. Штойко, О. О. ., & Лисенко, О. І. (2021). Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій»*, 307–309. вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/231302>
22. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
23. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
24. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018,

- IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.
25. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>
26. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>
27. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>
28. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
29. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с
30. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с
31. 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>
32. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
33. Охорона праці та промислова безпека: навч. посіб. [К.Н.Ткачук, В.В.Зацарний, Р.Н.Сабарно та ін.]; за ред. К.Н.Ткачука, В.В.Зацарного. – К.: Основа. – 2009. – 454 с.
34. Правила улаштування електроустановок. URL: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

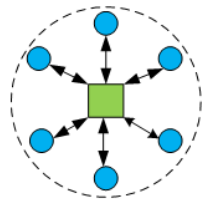
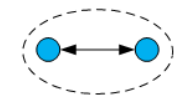
35. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
36. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.

ДОДАТКИ

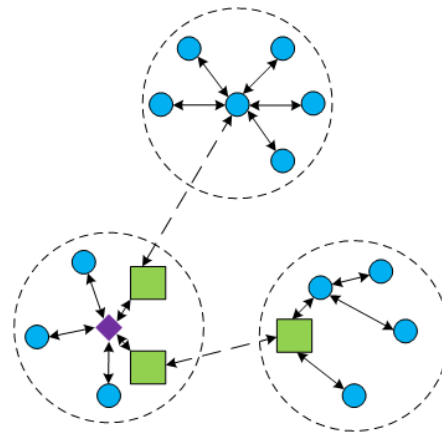
Додаток А

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТИЗАЦІЇ
В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

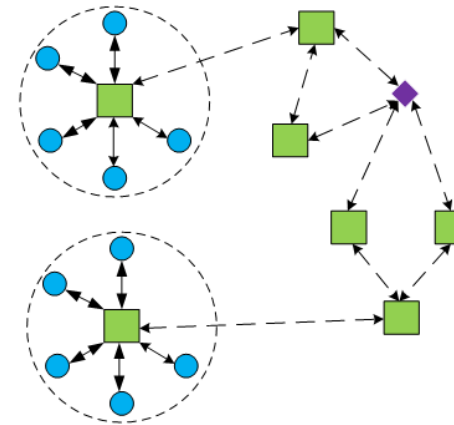
назва магістерської кваліфікаційної роботи



а) децентралізовані



б) централізована



в) гібридна

| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|--------|------|---------------------------------------|-------------------------|-----------|---------|
| | | | | | | 08-34.МКР.016.00.001 Е8 | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Безпроводні сенсорні мережі Плакат | Літ. | Маса | Масштаб |
| Розроб. | | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| Перевір. | | Михалевський | | | | | | |
| Т.Контр. | | | | | | | | |
| Реценз. | | Семенов А.О. | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| Н.Контр. | | Михалевський | | | ВНТУ, ТКС-22М | | | |
| Затверд. | | Кичак В.М. | | | | | | |



| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|--------|------|-------------------------|---------------|-----------|---------|
| | | | | | 08-34.МКР.016.00.002 Е8 | | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Класифікація БСМ | Літ. | Маса | Масштаб |
| Розроб. | | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| Перевір. | | Михалевський | | | Плакат | | | |
| Т.Контр. | | | | | | | | |
| Реценз. | | Семенов А.О. | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| Н.Контр. | | Михалевський | | | | ВНТУ, ТКС-22м | | |
| Затверд. | | Кичак В.М. | | | | | | |



| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|--------|------|---------------------|-------------------------|-----------|---------------|
| | | | | | | 08-34.МКР.016.00.003 Е8 | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Генетичний алгоритм | Літ. | Маса | Масштаб |
| Розроб. | | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| Перевір. | | Михалевський | | | Плакат | | | |
| Т.Контр. | | | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| Реценз. | | Семенов А.О. | | | | | | |
| Н.Контр. | | Михалевський | | | | | | |
| Затверд. | | Кичак В.М. | | | | | | ВНТУ, ТКС-22М |

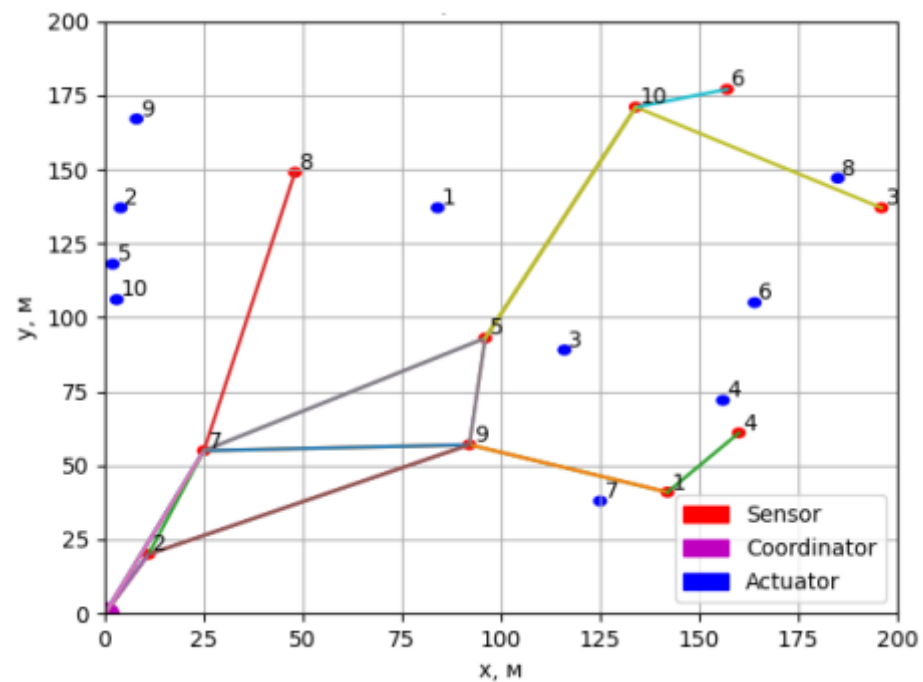
Генетичний_алгоритм (Розмір Популяції, Число ітерацій)

```

{
// Підготовка початкової популяції
Ініціалізація початкової популяції ();
Об'єктно-орієнтоване моделювання БСМ;
Оцінка особин (початкова популяція);
Номер популяції = 0;
While (не_досягнуто_критерій_зупинки)
{
for (i=0; i<Розмір Популяції; i++)
{
Операція відбору (Батько А, Батько Б);
if (rand () <Pc)
Операція Схрещування (Батько А, Батько Б, Нащадки);
if (rand () <Pm)
Операція Мутації (Нащадок);
Поповнення проміжної популяції (Нащадок, Нова позиція);
Нова Позиція;
}
Оцінка особин (Проміжна Населення);
Побудова нової популяції (Розмір Популяції);
Номер популяції ++;
}

```

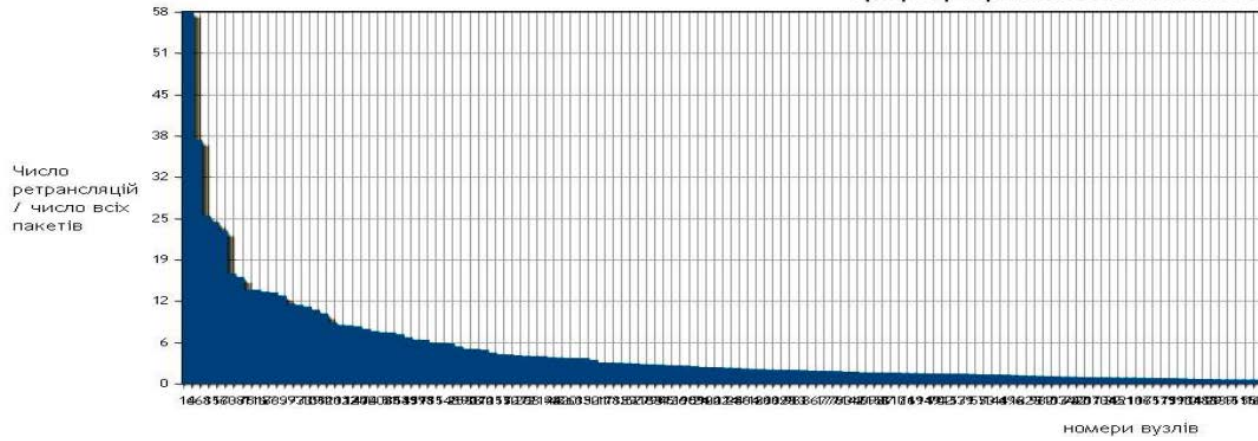
| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|--------|------|-------------------------------------|--------|-----------|---------|
| | | | | | 08-34.МКР.016.00.004 Е8 | | | |
| Змн | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Код генетичного алгоритму Плакат | Літ. | Маса | Масштаб |
| Розроб. | | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| Перевір. | | Михалевський | | | | | | |
| Т.Контр. | | | | | | | | |
| Реценз. | | Семенов А.О. | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| Н.Контр. | | Михалевський | | | ВНТУ, ТКС-22м | | | |
| Затверд. | | Кичак В.М. | | | | | | |



| | | | | | | | | |
|------|----------|--------------|--------|------|-------------------------|--------|-----------|---------|
| | | | | | 08-34.МКР.016.00.005 Е8 | | | |
| Змін | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Карта маршрутизації | Літ. | Маса | Масштаб |
| | Розроб. | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| | Перевір. | Михалевський | | | | | | |
| | Т.Контр. | | | | | | | |
| | Реценз. | Семенов А.О. | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| | Н.Контр. | Михалевський | | | ВНТУ, ТКС-22М | | | |
| | Затверд. | Кичак В.М. | | | | | | |

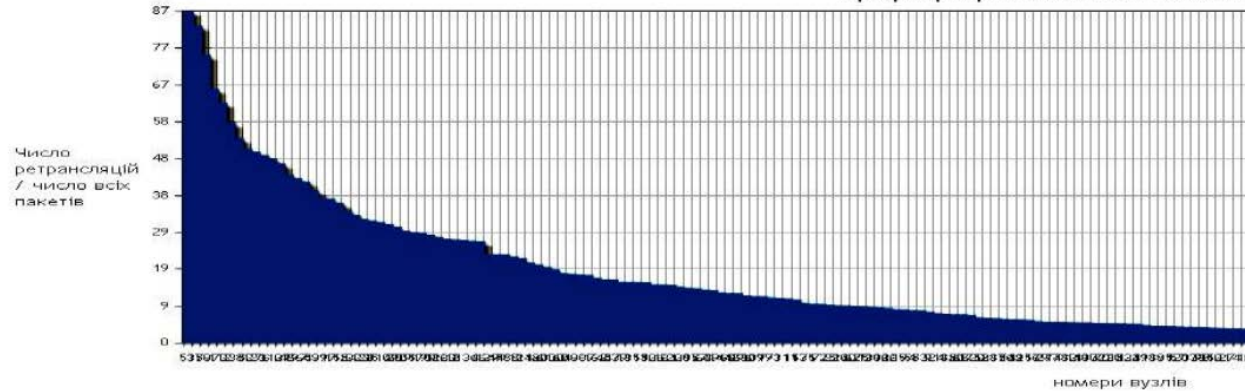
Файл testcount1_226_ср.txt завантажено
 Всього кореню було передано: 6330
 Відсоток відсікання від максимального числа ретрансляцій: 0

Графік ретрансльованих пакетів



Файл testcount1_226_пу.txt завантажено
 Всього кореню було передано: 1311
 Відсоток відсікання від максимального числа ретрансляцій: 0

Графік ретрансльованих пакетів



| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|--------|------|-------------------------------------|--------|-----------|---------|
| | | | | | 08-34.МКР.016.00.006 Е8 | | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Результати моделювання Плакат | Літ. | Маса | Масштаб |
| Розроб. | | Осіпов А.Д. | | | | | | |
| Перевір. | | Михалевський | | | | | | |
| Т.Контр. | | | | | | | | |
| Реценз. | | Семенов А.О. | | | | Арк. 1 | Аркушів 1 | |
| Н.Контр. | | Михалевський | | | ВНТУ, ТКС-22М | | | |
| Затверд. | | Кичак В.М. | | | | | | |

Додаток Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності маршрутизації в безпроводних сенсорних мережах

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

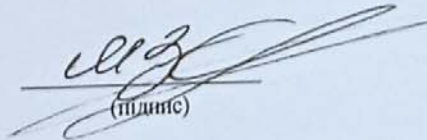
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 96,57 % Схожість 3,43 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

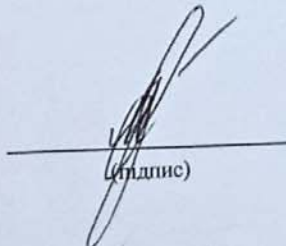
Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

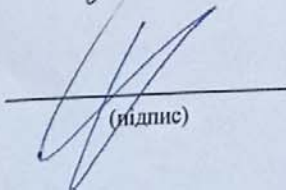
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Осіпов А.Д.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.
(прізвище, ініціали)