

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПИРІГ ЯРОСЛАВ РОМАНОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВІДНИХ
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ**

172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

17 «Електроніка та телекомунікації»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____/ Пиріг Ярослав Романович /

Науковий керівник

Климаш Михайло Миколайович д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

ЛЬВІВ – 2025

АНОТАЦІЯ

Пиріг Я.Р. Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж на основі генетичного алгоритму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

У дисертаційній роботі розв’язано науково-практичне завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розміщення сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різного радіусу дії.

Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розташування сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різного радіусу дії.

Об’єктом дослідження є процес просторового розміщення вузлів та пошуку маршрутів у безпроводних сенсорних мережах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми просторового розташування сенсорних вузлів і маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі генетичного алгоритму.

У процесі дослідження застосовано методи теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії графів, імітаційного моделювання, об’єктно-орієнтованого програмування.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її мету та сформовано завдання для її досягнення. Наведено зв’язок проведеного дослідження з науковими програмами та темами, сформовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації.

Перший розділ **«Аналіз особливостей функціонування генетичного алгоритму у безпроводних сенсорних мережах»** присвячено аспектам застосування принципів генетичної еволюції у сучасних мережах. Показано, що генетичний алгоритм (ГА) є одним із найбільш дієвих інструментів оптимізації процесів функціонування мереж у динамічних умовах, що зумовлені зростанням обсягів трафіку, кількості мережевих вузлів та варіативністю їх просторового розташування.

Визначено, що ефективність застосування ГА суттєво залежить від їх параметричного налаштування з урахуванням специфіки задачі, архітектури мережі та обчислювального середовища. Це зумовлює необхідність адаптивного підходу до вибору генетичних операторів і параметрів їх функціонування. Запропонована класифікація ГА за критеріями налаштування параметрів, типами фітнес-функцій, видами алгоритмів та сферами їх застосування у мережевих задачах, що сприяє більш глибокому розумінню факторів, які визначають їхню результативність.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують доцільність і перспективність застосування ГА для підвищення ефективності функціонування БСМ.

У другому розділі **«Метод адаптивного визначення маршруту мінімальної довжини між сенсорними вузлами із використанням генетичного алгоритму»** представлено удосконалений метод визначення маршруту у безпроводній сенсорній мережі, який використовує динамічну адаптацію імовірності схрещування та мутації на основі значення фітнес-функції та сукупність генетичних операторів для автоматичної перебудови маршруту при зміні топології та мінімізації його довжини.

На основі результатів імітаційного моделювання показано, що розроблений ГА забезпечує суттєве скорочення довжини маршруту – на 47,14% порівняно з жадібним (ЖА) та на 28,39% порівняно з мурашиним алгоритмами (МА) у сценарії з однаковими радіусами дії вузлів, а також у 3 та 2 рази відповідно зменшує кількість переходів. Для топологій із трьома радіусами дії розроблений алгоритм демонструє стабільні переваги: на 32.10 – 48.80% порівняно з ЖА та на 4.62 – 26.67% порівняно з МА, залежно від метрики відстані. У сценаріях динамічних змін мережі ГА перевищує МА в середньому на 16.14% при видаленні вузлів і забезпечує

скорочення маршруту на 8.72 - 22.87% при додаванні нових вузлів, тоді як ЖА у п'яти випадках не зміг сформувати маршрут.

Таким чином, запропоноване рішення демонструє високу стійкість, адаптивність та ефективність оптимізації в усіх розглянутих сценаріях топологічних змін БСМ.

У третьому розділі **«Багатокритеріальний метод для маршрутизації даних у децентралізованих мережах із динамічно змінною топологією»** наведено модель БСМ у двовимірному просторі із вузлами різного радіусу дії. Набув подальшого розвитку багатокритеріальний метод маршрутизації в БСМ, який, на відміну від існуючих, використовує еволюційний механізм пошуку маршруту із фітнес-функцією, побудованою на основі нормалізованих значень мережових параметрів: Евклідової відстані, рівня втрат даних, затримки передачі даних, та характеристик вузла: рівня заряду батареї, рівня сигналу, вхідного/вихідного ступеня, з урахуванням їх вагових коефіцієнтів, для адаптації утвореного оптимального маршруту та множини резервних маршрутів до обмежених мережових ресурсів та динамічно змінної топології.

Для перевірки ефективності розробленого багатокритеріального ГА (БГА) здійснено його порівняння із модифікованими ЖА та МА, використовуючи імітаційне моделювання. На основі отриманих результатів показано, що для комплексного критерію, який об'єднує 6 окремих, розроблений БГА формує оптимальний маршрут, який є на 15.75% коротшим порівняно з МА, при цьому ЖА не здійснює успішне формування маршруту. Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність застосування запропонованого рішення для задач маршрутизації в БСМ, зокрема для динамічно змінної топології.

Подальше застосування багатокритеріального методу розглянуто у контексті «розумного міста» для формування маршрутів транспортних засобів (ТЗ) з урахуванням трьох ключових критеріїв: довжини маршруту, рівня завантаженості та недоступності доріг, що дозволило забезпечити зменшення часу руху ТЗ на 15.28% порівняно із МА, тоді як застосування ЖА не призвело до успішного досягнення

точки прибуття. Це підтверджує універсальність розробленого методу та його придатність як для задач БСМ, так і для інтелектуальних транспортних систем.

Четвертий розділ **«Програмна реалізація методів просторового розміщення сенсорних вузлів та визначення маршрутів для безпроводних сенсорних мереж»** присвячено розв'язанню проблеми розміщення сенсорних вузлів на площині при мінімізації перекриття зон їх дії. Вперше запропоновано метод просторового розміщення вузлів БСМ на основі модифікованого ГА, що здійснює оцінку площини через щільність розміщення вузлів із застосуванням штрафів та врахуванням мінімальної міжвузлової відстані для визначення їх оптимальних конфігурацій у процесі еволюційного відбору, що дало змогу мінімізувати надлишкове перекриття із урахуванням різних радіусів дії як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

Реалізовано програмний модуль, який являє собою спеціалізоване програмне забезпечення, що призначене для моделювання та симуляційних досліджень функціонування БСМ з урахуванням динамічно змінної топології та обмеженості енергетичних і мережевих ресурсів.

На основі результатів моделювання встановлено, що запропонований метод забезпечує ефективний баланс між максимальною кількістю встановлених вузлів та мінімізацією їх просторового перекриття, зокрема:

- для сценаріїв зі однаковим радіусом дії вузлів кількість встановлених вузлів перевищує показники жадібного пошуку у діапазоні від 1 до 4 вузлів, випадкового пошуку – від 1 до 6; порівняно з рівномірним пошуком, забезпечує суттєве зменшення площі перекриття: від 2,85% до 13,23% у залежності від кількості вже існуючих вузлів;

- для сценаріїв зі різним радіусом дії вузлів забезпечило розміщення максимальної кількості сенсорних вузлів (25 одиниць), що перевищує результати жадібного пошуку на 2 - 4 вузли (збільшення ефективності при використанні розробленого методу становить від 8% до 16%); випадкового пошуку – на 6 вузлів (збільшення ефективності при використанні розробленого методу становить 24%); а

також усунуло проблему перекриття вузлів (0% – для розробленого методу проти 12% – для рівномірного пошуку).

Отже, використання розробленого методу просторового розміщення вузлів БСМ дозволяє суттєво підвищити ефективність їх розгортання у порівнянні з розглянутими підходами, забезпечуючи повноту розміщення вузлів та відсутність перекриття, що є ключовим чинником для продовження часу життя БСМ.

Результати, отримані в ході виконання дисертаційного дослідження, були інтегровані у робочі програми кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема дисциплін «Архітектура інформаційно-комунікаційних мереж» для студентів спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка», дисципліни «Технології машинного навчання та штучного інтелекту» для студентів спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», що підтверджено відповідним актом.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення ефективності функціонування сучасних мереж в ТОВ «МаксіТех» та Львівській філії АТ «Укртелеком», що підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, генетичний алгоритм, маршрутизація, резервні маршрути, метрики відстані, топологія, мінімальна міжвузлова відстань, багатокритеріальність.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Я. Пиріг, М. Климаш, Ю. Пиріг, О. Лаврів, "Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2023, №3(2), с. 95-107.

Особистий внесок здобувача: дослідження та оцінка впливу параметрів генетичного алгоритму на ефективність його застосування для визначення оптимального маршруту.

2. Я. Пиріг, "Оцінка обчислювальної складності генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, № 4 (1), с. 52-60.

Особистий внесок здобувача: дослідження та оцінка впливу розміру популяції та кількості поколінь на асимптотичну складність генетичного алгоритму.

3. Y. Pyrih, A. Masiuk, Yu. Pyrih, O. Urikova, "Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem," In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024, vol 1198. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_24. (Scopus Q3)

Особистий внесок здобувача: дослідження ефективності застосування турнірного та елітного оператор відбору у розробленому генетичному алгоритмі для знаходження найкоротшого маршруту.

4. Я. Пиріг, "Пошук маршруту у безпроводній сенсорній мережі із використанням генетичного алгоритму," Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, вип. 4, №2, с. 72-81.

Особистий внесок здобувача: розробка методу визначення маршруту за критерієм мінімальної довжини у безпроводній сенсорній мережі на основі генетичного алгоритму.

5. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Багатокритеріальний підхід на основі генетичної еволюції для пошуку оптимального маршруту передачі даних у безпроводних сенсорних мережах", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, вип. 3, с. 88–94, 2024.

Особистий внесок здобувача: розробка багатокритеріального методу маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі принципів генетичної еволюції із врахуванням динамічно змінної топології та радіусів дії вузлів.

6. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 341, №5, с. 87-91, 2024.

Особистий внесок здобувача: розробка методу просторового розміщення сенсорних вузлів на площині на основі удосконаленого генетичного алгоритму.

7. Y. Pyrih, Yu. Pyrih, T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Klymash, "Genetic Algorithm based Routing in Wireless Sensor Networks with Various Distance Metrics", International Journal of Computing, 23(4), 715-725. (Scopus Q3)

Особистий внесок здобувача: здійснення імітаційного моделювання для оцінки ефективності розробленого генетичного алгоритму при визначенні маршруту із використанням різних метрик відстані в БСМ з вузлами, які мають різний радіус дії.

8. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Дослідження розміщення сенсорних вузлів на площині на основі генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2025, №5(1), с. 82-88.

Особистий внесок здобувача: моделювання та дослідження ефективності використання розробленого методу розташування сенсорних вузлів для випадкової топології.

9. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз аспектів застосування генетичного алгоритму у сучасних мережах", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 349, №2, с. 327-331, 2025.

Особистий внесок здобувача: бібліографічний та бібліометричний огляд робіт із бібліотеки IEEEExplore щодо застосування генетичного алгоритму та представлення класифікації генетичних алгоритмів.

10. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 351, №3.1, с. 410-414, 2025.

Особистий внесок здобувача: аналіз переваг та недоліків застосування стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж.

11. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод еволюційної оптимізації структури безпроводної сенсорної мережі", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, вип. №3, с.71-75, 2025.

Особистий внесок здобувача: моделювання та дослідження ефективності використання розробленого методу розташування сенсорних вузлів при різних значеннях радіусів їх дії та зміні обмеження на мінімальну міжвузлову відстань.

12. Y. Pyrih, M. Klymash, Yu. Pyrih, O. Hordiichuk-Bublivska, "Genetic Algorithm for Routing in Sensor Networks with Dynamic Topology", In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Gütter, D. (eds) Networks and Sustainability. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2025, vol 1473. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_30.

Особистий внесок здобувача: моделювання та дослідження ефективності використання розробленого методу визначення маршруту між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини при послідовному додаванні та видалення вузлів з мережевої топології.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, Y. Pyrih, Yu. Pyrih, "Method for Estimating the Topological Structure of Self-Organized Networks," 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 14-17. (Scopus)

Особистий внесок здобувача: формування та дослідження особливостей задачі розміщення безпроводних сенсорних вузлів на площині.

14. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Investigating the Efficiency of Tournament Selection Operator in Genetic Algorithm for Solving TSP," 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 170-173, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452423. (Scopus)

Особистий внесок здобувача: моделювання та дослідження ефективності застосування оператора турнірного відбору в модифікованому генетичному алгоритмі.

15. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, O. Hordiichuk-Bublivska and L. Nodzhak, "Investigating the Computational Complexity of the Genetic Algorithm with Variations in Population Size and the Number of Generations," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755729. (Scopus)

Особистий внесок здобувача: математичний апарат для оцінки обчислювальної складності генетичного алгоритму, моделювання для дослідження впливу розміру популяції та кількості поколінь на функціонування генетичного алгоритму.

ABSTRACT

Pyrih Y. R. Improving the Efficiency of Wireless Sensor Networks Using a Genetic Algorithm. – Qualification research paper as a manuscript.

The thesis for the Doctor of Philosophy Degree in the specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation addresses the scientific and practical task of improving the operational efficiency of wireless sensor networks by developing methods for sensor node deployment and determining a primary route along with a set of backup routes based on a genetic algorithm, under conditions of node mobility and varying transmission ranges.

The aim of the dissertation is to enhance the operational efficiency of wireless sensor networks through the development of sensor node placement methods and techniques for determining the main route and a set of redundant routes using a genetic algorithm, taking into account network mobility and different coverage radii.

The object of the study is the process of spatial node deployment and route discovery in wireless sensor networks.

The subject of the study is the methods and algorithms for spatial placement of sensor nodes and data routing in wireless sensor networks based on a genetic algorithm.

The research applies methods of probability theory and mathematical statistics, graph theory, simulation modelling, and object-oriented programming.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, defines its aim, and formulates the tasks required to achieve it. It outlines the relationship between the research and existing scientific programmes and projects, presents the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and specifies the author's individual contribution and the approbation of the dissertation outcomes.

The first chapter «**Analysis of the Functional Characteristics of Genetic Algorithms in Wireless Sensor Networks**» is devoted to the application of evolutionary principles in modern network environments. It is shown that the genetic algorithm (GA) is one of the most effective optimization tools for network operation in dynamic conditions

driven by increasing traffic volumes, a growing number of nodes, and variability in their spatial distribution.

It is established that the efficiency of GA implementations significantly depends on parameter tuning that considers task-specific features, network architecture, and the computational environment. This highlights the need for an adaptive approach to selecting genetic operators and their operational parameters. A classification of GAs is proposed based on parameter-tuning criteria, types of fitness functions, algorithm categories, and areas of application in networking tasks, thus contributing to a deeper understanding of the factors influencing their performance.

Overall, the results of the conducted analysis confirm the feasibility and strong potential of employing genetic algorithms to enhance the performance of wireless sensor networks (WSNs).

In the second chapter, «**A Method for Adaptive Determination of the Minimum-Length Route Between Sensor Nodes Using a Genetic Algorithm**», an enhanced routing method for wireless sensor networks is presented. This method employs dynamic adaptation of crossover and mutation probabilities based on the fitness function value, together with a set of genetic operators for automatic route reconfiguration in response to topology changes and for minimizing route length.

Simulation results show that the developed GA achieves a substantial reduction in route length – by 47.14% compared with the greedy algorithm (GA) and by 28.39% compared with ant colony optimization (ACO) in scenarios with identical node transmission ranges. It also reduces the number of hops by factors of 3 and 2, respectively. For topologies with three transmission ranges, the algorithm demonstrates consistent advantages: 32.10 - 48.80% over the greedy approach and 4.62 - 26.67% over ACO, depending on the distance metric. In scenarios with dynamic network changes, the GA outperforms ACO by an average of 16.14% during node removal and achieves a reduction of 8.72 - 22.87% during node addition, whereas the greedy algorithm failed to construct a route in five cases.

Thus, the proposed solution exhibits high robustness, adaptability, and optimization efficiency across all examined scenarios of topological variation in wireless sensor networks.

In the third chapter, «**A Multi-Criteria Method for Data Routing in Decentralized Networks with Dynamically Changing Topology**», a model of a WSN in a two-dimensional space with nodes of varying transmission ranges is presented. The multi-criteria routing method for WSNs has been further developed and, unlike existing approaches, employs an evolutionary route-search mechanism with a fitness function constructed from normalized values of network parameters – Euclidean distance, data loss rate, and transmission delay – as well as node characteristics, including battery charge level, signal strength, and in-degree/out-degree. These parameters, weighted accordingly, enable the adaptation of the optimal route and the set of backup routes to limited network resources and a dynamically changing topology.

To verify the effectiveness of the developed multi-criteria genetic algorithm (MCGA), it was compared with modified greedy and ant colony algorithms using simulation modelling. The results show that, for a composite criterion integrating six individual metrics, the MCGA constructs an optimal route that is 15.75% shorter than that produced by the ant colony algorithm, while the greedy algorithm fails to construct a valid route. These findings confirm the suitability of the proposed solution for routing tasks in WSNs, particularly under dynamic topology conditions.

Further application of the multi-criteria method is examined in a smart city context for vehicle routing, taking into account three key criteria: route length, traffic congestion level, and road inaccessibility. This enabled a 15.28% reduction in travel time compared with the ant colony algorithm, whereas the greedy algorithm again failed to reach the destination. This confirms the universality of the developed method and its applicability both to WSN tasks and to intelligent transportation systems.

In the fourth chapter, «**Software Implementation of Spatial Deployment Methods for Sensor Nodes and Route Determination in Wireless Sensor Networks**», the focus is on solving the problem of deploying sensor nodes on a plane while minimizing the overlap of their coverage areas. For the first time, a spatial deployment method for WSN

nodes based on a modified genetic algorithm is proposed. This method evaluates the deployment plane by analysing node placement density, applying penalty functions, and enforcing a minimum inter-node distance to determine optimal configurations during evolutionary selection. This approach enables the minimization of redundant overlap for nodes with different transmission ranges, both when creating a new network and when integrating additional nodes into an existing topology.

A software module has been developed that functions as dedicated software for modelling and simulation studies of WSN performance, taking into account dynamically changing topology and limited energy and network resources.

Simulation results show that the proposed method ensures an effective balance between maximizing the number of deployed nodes and minimizing spatial overlap:

- for scenarios with the same node radius, the number of installed nodes exceeds the greedy search results in the range from 1 to 4 nodes, and the random search results – from 1 to 6; Compared to uniform search, it provides a significant reduction in overlap area: from 2.85% to 13.23%, depending on the number of existing nodes.

- for scenarios with different node radii, it ensured the placement of the maximum number of sensor nodes (25 units), which exceeds the results of greedy search by 2-4 nodes (the increase in efficiency when using the developed method is from 8% to 16%); random search – by 6 nodes (the increase in efficiency when using the developed method is 24%); and also eliminated the problem of node overlap (0% for the developed method versus 12% for uniform search).

Thus, the use of the developed method for spatial deployment of WSN nodes significantly enhances deployment efficiency compared with the approaches considered, ensuring complete node placement and absence of overlap – factors essential for extending the operational lifetime of a WSN.

The results obtained during the course of the dissertation research have been integrated into the curricula of the Department of Information and Communication Technologies at Lviv Polytechnic National University. In particular, they have been incorporated into the courses «Information and Communication Network Architecture» for students majoring in G5 – Electronics, Electronic Communications, Instrumentation, and

Radio Engineering, and «Machine Learning and Artificial Intelligence Technologies» for students majoring in 126 – Information Systems and Technologies, as confirmed by the corresponding official report.

The main results of the dissertation have been applied and implemented to improve the operational efficiency of modern networks at “MaxiTech” LLC and the Lviv branch of JSC “Ukrtelecom”, which is confirmed by the implementation reports.

Keywords: wireless sensor network, genetic algorithm, routing, backup routes, distance metrics, topology, minimum inter-node distance, multi-criteria approach.

The list of author’s publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published

1. Ya. Pyrih, M. Klymash, Yu. Pyrih, O. Lavriv, "Genetic algorithm as a tool for solving optimisation problems", Infocommunication Technologies and Electronic Engineering, 2023, vol. 3, no. 2, pp.95-107.

Author contribution: research and assessment of the impact of genetic algorithm parameters on the effectiveness of its application for determining the optimal route.

2. Y. Pyrih, "Computational complexity evaluation of a genetic algorithm", Infocommunication Technologies and Electronic Engineering, 2024, vol. 4, no. 1, pp. 52-60.

Author contribution: research and assessment of the impact of population size and number of generations on the asymptotic complexity of a genetic algorithm.

3. Y. Pyrih, A. Masiuk, Yu. Pyrih, O. Urikova, "Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem, " In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024, vol 1198. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_24.

Author contribution: research on the effectiveness of using tournament and elite selection operators in genetic algorithms for finding the shortest route.

4. Y. Pyrih, " Search for a data transmission route in a wireless sensor network using a genetic algorithm," Infocommunication Technologies and Electronic Engineering, 2024, vol. 4, no. 2, pp. 72-81.

Author contribution: розробка методу визначення маршруту за критерієм мінімальної довжини у безпроводній сенсорній мережі на основі генетичного алгоритму.

5. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, "A multi-criteria approach based on genetic evolution for finding the optimal data transmission route in wireless sensor networks ", Measuring and Computing Devices in Technological Processes, vol. 3, pp. 88-94, 2024.

Author contribution: development of a multi-criteria method for data routing in wireless sensor networks based on the principles of genetic evolution, taking into account dynamically changing topology and node ranges.

6. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, " An optimal sensor node placement method based on genetic evolution", Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 341, no. 5, pp. 87-91, 2024.

Author contribution: development of a method for spatial placement of sensor nodes on a plane based on an improved genetic algorithm.

7. Y. Pyrih, Yu. Pyrih, T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Klymash, "Genetic Algorithm based Routing in Wireless Sensor Networks with Various Distance Metrics", International Journal of Computing, 23(4), 715-725. <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3774>.

Author contribution: simulation modelling to assess the effectiveness of the developed genetic algorithm in determining the route using different distance metrics in a BSM with nodes that have different ranges.

8. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, " Investigation of sensor node placement on a plane using a genetic algorithm", Infocommunication Technologies and Electronic Engineering, 2025, vol. 5, no.1, pp. 82-88.

Author contribution: modelling and research into the effectiveness of the developed method for placing sensor nodes for random topology.

9. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, " Analysis of genetic algorithm application aspects in modern networks", Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 349, no. 2, pp. 327-331, 2025.

Author contribution: bibliographic and bibliometric review of works from the IEEEExplore library on the application of genetic algorithms and the presentation of the classification of genetic algorithms.

10. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, "Analysis of data routing strategies for wireless sensor networks", Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 351, no. 3.1, pp.410-414, 2025.

Author contribution: analysis of the advantages and disadvantages of using data routing strategies for wireless sensor networks.

11. Ya. Pyrih, Yu. Pyrih, "Evolutionary optimisation method for the structure of a wireless sensor network", Measuring and Computing Devices in Technological Processes, vol. 3, pp.71-75, 2025.

Author contribution: modelling and researching the effectiveness of the developed method for positioning sensor nodes at different radii of their action and changing the restriction on the minimum inter-node distance.

12. Y. Pyrih, M. Klymash, Yu. Pyrih, O. Hordiichuk-Bublivska, "Genetic Algorithm for Routing in Sensor Networks with Dynamic Topology", In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Gütter, D. (eds) Networks and Sustainability. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2025, vol 1473. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_30.

Author contribution: modelling and researching the effectiveness of the developed method for determining the route between sensor nodes based on the criterion of minimum length when sequentially adding and removing nodes from the network topology.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials

13. M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, Y. Pyrih, Yu. Pyrih, "Method for Estimating the Topological Structure of Self-Organized Networks," 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 14-17, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076498. (Scopus)

Author contribution: formulation and investigation of the characteristics of the problem of placing wireless sensor nodes on a plane.

14. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Investigating the Efficiency of Tournament Selection Operator in Genetic Algorithm for Solving TSP," *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 170-173, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452423. (Scopus)

Author contribution: modelling and researching the effectiveness of using the tournament selection operator in a modified genetic algorithm.

15. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, O. Hordiichuk-Bublivska and L. Nodzhak, "Investigating the Computational Complexity of the Genetic Algorithm with Variations in Population Size and the Number of Generations," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755729.

Author contribution: mathematical apparatus for assessing the computational complexity of a genetic algorithm, modelling to study the impact of population size and number of generations on the functioning of a genetic algorithm.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	30
1.1. Огляд існуючих робіт щодо використання принципів генетичної еволюції у мережах зв'язку	30
1.2. Характеристики безпроводної сенсорної мережі.....	38
1.3. Особливості функціонування генетичного алгоритму.....	43
1.4. Класифікація генетичних алгоритмів.....	57
1.5. Концептуальні напрями підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж	59
Висновки до розділу 1	67
РОЗДІЛ 2. МЕТОД АДАПТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТУ МІНІМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ МІЖ СЕНСОРНИМИ ВУЗЛАМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ	68
2.1. Розроблення методу із використанням еволюційного пошуку та динамічної адаптації імовірності схрещування та мутації.....	68
2.2. Модифікований генетичний алгоритм визначення адаптивного маршруту для безпроводних сенсорних мереж	69
2.3. Оцінка обчислювальної складності генетичного алгоритму.....	71
2.4. Метрики відстані для маршрутизації даних.....	74
2.5. Дослідження ефективності застосування генетичного алгоритму для визначення маршруту за критерієм мінімальної відстані.....	77
Висновки до розділу 2	115
РОЗДІЛ 3. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ ДАНИХ У МЕРЕЖАХ ІЗ ДИНАМІЧНО ЗМІННОЮ ТОПОЛОГІЄЮ	118
3.1. Імітаційна модель безпроводної сенсорної мережі.....	118
3.2. Багатокритеріальний метод маршрутизації даних на основі генетичного алгоритму.....	120

3.3. Генетичний алгоритм багатокритеріального пошуку оптимального маршруту для безпроводної сенсорної мережі.....	127
3.4. Дослідження ефективності застосування багатокритеріального генетичного алгоритму для визначення оптимального маршруту між сенсорними вузлами ...	129
3.5. Дослідження ефективності застосування розробленого генетичного алгоритму для транспортної задачі у «розумному місті»	155
Висновки до розділу 3	168
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТІВ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	170
4.1. Розроблення методу просторового розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму	170
4.2. Модифікований генетичний алгоритм для розміщення сенсорних вузлів на площині.....	172
4.3. Дослідження особливостей функціонування відомих алгоритмів розміщення сенсорних вузлів.....	177
4.4. Розробка програмного модуля для моделювання та дослідження розроблених методів.....	180
4.5. Дослідження ефективності застосування методу просторового розміщення сенсорних вузлів.....	184
4.6. Технічні рекомендації для налаштування запропонованих генетичних алгоритмів.....	232
Висновки до розділу 4	235
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	238
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	243
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень	263
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	268

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БСМ – безпроводна сенсорна мережа

ГА – генетичний алгоритм

МА – мурашиний алгоритм

ЖА – жадібний алгоритм

СВ – сенсорний вузол

БА – багатокритеріальний алгоритм

ВСТУП

Актуальність теми. Для розвитку телекомунікаційних технологій важливе місце займають безпроводні сенсорні мережі (БСМ) як інфраструктурна основа для реалізації задач моніторингу, управління та збору даних у розподілених середовищах. На відміну від класичних централізованих мережових архітектур, де основна обробка і маршрутизація даних здійснюється централізованим вузлом або сервером, БСМ функціонують за принципами децентралізації. Така архітектура забезпечує високу адаптивність до змін мережевої топології та підвищує масштабованість системи.

БСМ також характеризуються обмеженими обчислювальними ресурсами, енергонезалежністю вузлів, динамічністю структури (внаслідок мобільності або втрати вузлів), що зумовлює потребу у впровадженні ефективних механізмів прийняття рішень щодо динамічної маршрутизації та оптимізації функціонування мережі. Маршрутизація даних є одним з ключових аспектів, що впливає на надійність і продуктивність БСМ. Традиційні методи маршрутизації, хоча й ефективні у певних умовах, часто не враховують комплексність та динамічність реальних застосувань, що може призвести до підвищених витрат енергії, втрат даних та зниження якості надання послуг. З розвитком обчислювальних методів виникла необхідність у впровадженні нових підходів до маршрутизації, які могли б адаптуватися до змін у мережі та забезпечувати оптимальні рішення. Обмеженість ресурсів БСМ, радіусу дії вузлів, значно впливає на процес маршрутизації даних, що зумовлює потребу в розробці надійних алгоритмів. Оптимізація маршрутизації з урахуванням цих обмежень є ключовим фактором для забезпечення ефективного та стабільного функціонування БСМ. Конфігурація вузлів впливає на покриття території, зв'язність мережі, надійність і стабільність передачі даних. Визначення їх оптимального розташування є нетривіальним завданням через складність середовища, в якому діють БСМ, а також обмежені ресурси вузлів. Неправильне або неефективне розташування сенсорів може призвести до утворення «мертвих зон», де відсутнє покриття, або ж до надмірної концентрації вузлів у певних зонах, що знижує загальну ефективність мережі.

У зв'язку з цим доцільним є застосування сучасних еволюційних обчислень, що дають можливість вирішувати складні та багатокритеріальні задачі. Генетичні алгоритми забезпечують високу гнучкість та адаптивність, що дозволяє враховувати різноманітні критерії, такі як затримку передачі даних, рівень сигналу, втрат даних, а також зберігати баланс між ними.

Отже, застосування генетичних алгоритмів, основою функціонування яких є еволюційні принципи, є доцільним для розміщення сенсорних вузлів та пошуку оптимальних маршрутів у БСМ в умовах різних радіусів дії вузлів та динамічно змінної топології.

Проблематика оптимального розташування вузлів та ефективної маршрутизації даних у сучасних БСМ активно досліджувались такими провідними українськими та зарубіжними вченими як М. Климаш, М. Бешлей, О. Лемешко, К. Колесніков, Н. Гулаєва, О. Семко, Т. Царенко, К. Khan, S. Gupta, K. Przystupa, J. Su, N. Lin, D. Sharma, J. Al-Karaki, T. Sabbah та багатьма іншими. Однак, незважаючи на наявність значного наукового доробку, у сфері оптимізації структури та функціонування БСМ недостатньо розробленими залишаються підходи, засновані на еволюційних методах, зокрема генетичних алгоритмах (ГА). Задачі розміщення вузлів та маршрутизації в БСМ, як правило, належать до класу NP-складних, мають велику кількість допустимих рішень, численні взаємозалежні обмеження (енергоспоживання, радіус дії тощо), що зумовлює високу складність їх аналітичного розв'язання. У таких умовах генетичні алгоритми, як різновид еволюційних методів, демонструють високу ефективність завдяки своїй здатності здійснювати глобальний пошук у великих і нерегулярних просторах рішень, обходити локальні мінімуми та адаптуватися до змін у параметрах системи.

Застосування ГА дозволяє реалізувати багатокритеріальну оптимізацію, що є надзвичайно важливим для задач маршрутизації та розміщення вузлів у динамічних, розподілених та ресурсно-обмежених умовах БСМ.

Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розміщення сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних

маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різних радіусів дії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційного дослідження виконувалась у відповідності до наукового напрямку кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» – «Інфокомунікаційні системи та мережі», зокрема в межах наукових досліджень в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості» (№ держреєстрації 0122U000817) (2022-2024 рр.), «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України» (№ держреєстрації 0123U100232) (2023-2025 рр.), «Розробка методів і засобів побудови мобільних кіберфізичних систем із штучним інтелектом для соціальних, безпекових та оборонних завдань» (№ держреєстрації 0125U000645) (2025-2027 рр.); госпдоговірної роботи «Розробка модуля моніторингу інформаційних сервісів для розподілених інфокомунікаційних систем» (ГД №0726 Н-109) (2025 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розташування сенсорних вузлів та визначення маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різних радіусів дії.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Здійснити аналіз особливостей функціонування БСМ та основних концептуальних напрямів, які дозволяють забезпечити її ефективне функціонування в умовах обмеженості енергетичних та мережевих ресурсів.

2. Узагальнити та систематизувати існуючі підходи щодо класифікації генетичних алгоритмів для формалізації знань про їх особливості та принцип роботи.

3. Розробити метод формування маршруту за критерієм мінімальної довжини між вузлами БСМ із використанням генетичного алгоритму з урахуванням різних радіусів їх дії та дослідити ефективність його застосування.

4. Розробити метод багатокритеріальної маршрутизації даних для пошуку оптимального маршруту і множини резервних маршрутів із врахуванням динамічно змінної топології БСМ, обмежених мережевих ресурсів, та дослідити ефективність його застосування.

5. Розробити метод розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму для мінімізації їх надлишкового перекриття при різних радіусах дії на площині та дослідити ефективність його застосування.

6. Реалізувати програмний модуль для моделювання та симуляційних досліджень функціонування БСМ із застосуванням методів еволюційної оптимізації.

Об'єктом дослідження є процес просторового розміщення вузлів та пошуку маршрутів у безпроводних сенсорних мережах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми просторового розташування сенсорних вузлів і маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі генетичного алгоритму.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано методи теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії графів, імітаційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод визначення маршруту між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини, який, на відміну від існуючих, використовує динамічну адаптацію імовірності схрещування та мутації на основі значення фітнес-функції та сукупність генетичних операторів, що дало змогу автоматично перебудовувати маршрут при зміні топології, забезпечуючи стабільність функціонування БСМ.

2. Набув подальшого розвитку багатокритеріальний метод маршрутизації, який, на відміну від існуючих, використовує еволюційний механізм пошуку маршруту із фітнес-функцією, побудованою на основі нормалізованих значень

мережевих параметрів (Евклідової відстані, рівня втрат даних, затримки передачі даних) та характеристик вузла (рівня заряду батареї, рівня сигналу, вхідного/вихідного ступеня) з урахуванням їх вагових коефіцієнтів, що дало змогу визначити оптимальний маршрут та множину резервних маршрутів в умовах обмежених мережевих ресурсів та динамічно змінної сенсорної топології.

3. Вперше запропоновано метод просторового розміщення сенсорних вузлів на основі удосконаленого генетичного алгоритму, який здійснює оцінку щільності їх розподілу на площині із застосуванням обмежень та врахуванням мінімальної міжвузлової відстані для визначення оптимальних конфігурацій у процесі еволюційного відбору, що дало змогу мінімізувати надлишкове перекриття із урахуванням різних радіусів дії як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

1. Застосування удосконаленого генетичного алгоритму для формування маршруту між сенсорними вузлами:

– із однаковим радіусом дії дозволило суттєво скоротити довжину утвореного шляху (на 47,14% порівняно з ЖА та на 28,39% порівняно з МА) та зменшити кількість переходів між вузлами (у 3 рази відносно ЖА та у 2 рази відносно МА).

– із трьома радіусами дії дозволило сформувати маршрути, довжина яких менша від 32,10% до 48,80% порівняно з ЖА, та від 4,62% до 26,67% порівняно з МА залежно від типу використаної метрики відстані (Евклідова, Манхеттенська, Чебишова, Мінковського).

– в умовах змін мережевої топології дозволило формувати оптимізовані маршрути: при видаленні вузлів перевищує результати МА в середньому на 16,14% за довжиною маршруту; при додаванні нових вузлів скорочує довжину маршруту в діапазоні 8,72% - 22,87% порівняно з МА в залежності від розглянутого сценарію.

2. Застосування багатокритеріального алгоритму маршрутизації із комплексним критерієм на основі поєднання мережевих параметрів та характеристик сенсорного вузла, дозволило успішно сформувати маршрут з врахуванням особливостей функціонування БСМ,

- на відміну від ЖА, який зупинився на одному із проміжних вузлів, не досягнувши вузла-отримувача;
- який є на 15.75% коротшим порівняно з МА.

3. Застосування багатокритеріального алгоритму визначення маршрутів транспортних засобів на основі еволюційного пошуку по трьох ключових критеріях: довжина маршруту, рівень завантаженості та недоступності доріг, дозволило забезпечити зменшення часу руху автомобіля для «розумного міста» на 15.28% порівняно із МА, тоді як застосування ЖА не призвело до успішного досягнення точки прибуття.

4. Використання розробленого методу просторового розміщення сенсорних вузлів на площині дозволило здійснити покриття цільової території при мінімізації перекриття зон їх дії та уникненні надмірних витрат ресурсів:

- для сценаріїв зі однаковим радіусом дії вузлів кількість встановлених вузлів перевищує показники жадібного пошуку у діапазоні від 1 до 4 вузлів, випадкового пошуку – від 1 до 6; порівняно з рівномірним пошуком, забезпечує суттєве зменшення площі перекриття: від 2,85% до 13,23% у залежності від кількості вже існуючих вузлів;

- для сценаріїв зі різним радіусом дії вузлів забезпечило розміщення максимальної кількості сенсорних вузлів (25 одиниць), що перевищує результати жадібного пошуку на 2 - 4 вузли (збільшення ефективності при використанні розробленого методу становить від 8% до 16%); випадкового пошуку – на 6 вузлів (збільшення ефективності при використанні розробленого методу становить 24%); а також усунуло проблему перекриття вузлів (0% для розробленого методу проти 12% для рівномірного пошуку).

Все це у сукупності сприяло підвищенню ефективності функціонування БСМ.

Результати, отримані в ході виконання дисертаційного дослідження, були інтегровані у робочі програми кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема дисциплін «Архітектура інформаційно-комунікаційних мереж» для студентів спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»,

«Технології машинного навчання та штучного інтелекту» для студентів спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», що підтверджено відповідним актом.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення ефективності функціонування сучасних мереж в ТОВ «МаксіТех» та Львівській філії АТ «Укртелеком», що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях (Додаток Б), опублікованих у співавторстві, внесок Пирога Я.Р. є вирішальним, зокрема авторові належать: у роботі [1] – оцінка впливу параметрів генетичного алгоритму на ефективність його застосування для визначення оптимального маршруту; у [2, 15] – дослідження впливу розміру популяції та кількості поколінь на асимптотичну складність генетичного алгоритму; у [3,14] – дослідження ефективності застосування турнірного та елітного оператор відбору у генетичному алгоритмі для знаходження найкоротшого маршруту; у [4, 7, 12] – метод пошуку маршруту за критерієм довжини у безпроводній сенсорній мережі на основі генетичного алгоритму та здійснення моделювання для оцінки ефективності пропонованого рішення; у [5] – багатокритеріальний метод маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі принципів генетичної еволюції із врахуванням динамічно змінної топології та радіусів дії вузлів та здійснення моделювання для оцінки ефективності пропонованого рішення; у [6, 8, 11,13] – метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму та здійснення моделювання для оцінки ефективності пропонованого рішення для mesh та випадкової топологій; у [9] – бібліографічний та бібліометричний огляд робіт із бібліотеки IEEEExplore щодо застосування генетичного алгоритму та представлення класифікації генетичних алгоритмів; у [10] – аналіз стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж.

Іншим авторам спільних публікацій належить: постановка задач досліджень [1, 7, 12-15] (М. Klymash, Т. Maksymyuk); аналітичний огляд літератури та обґрунтування вибору методів [1, 2, 7, 12, 15] (О. Lavriv, А. Masiuk, О. Hordiichuk-

Bublivska, O. Urikova); проєктування топологій БСМ [7, 13] (S. Dumych, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, Yu. Pyrih); аналіз теоретичних підходів щодо обчислювальної складності алгоритмів [14, 15] (M. Kaidan, B. Strykhalyuk); участь у редагуванні публікацій, підготовка тез конференцій, організація апробації результатів [1, 3, 5, 6, 8-13, 15] (Yu. Pyrih, L. Nodzhak).

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації були представлені, доповідались та обговорювались на 3-ох міжнародних науково-технічних конференціях: 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023; 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2023; 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024.

Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена та обговорена на наукових семінарах кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття – у науковому періодичному виданні України, що входить до наукометричної бази Scopus, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав (з яких 1 входить до наукометричної бази Scopus), 3 – у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних конференцій, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 3.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 269 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 221 сторінка основного тексту, 154 рисунки, 41 таблиця, список використаних джерел із 154 найменувань, 2 додатки на 7 сторінках. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Огляд існуючих робіт щодо використання принципів генетичної еволюції у мережах зв'язку

У сучасному високотехнологічному світі, де мережеві процеси пронизують усі сфери нашого життя, від бізнесу та науки до побутових аспектів, виникає необхідність не тільки в ефективному управлінні цими процесами, але й у пошуку інноваційних методів для їхнього вдосконалення та оптимізації [1].

Генетична еволюція (ГЕ) є ключовою властивістю природи, яка дозволяє живим організмам адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, що знаходить своє застосування в різних сферах [2-6]. Іншими словами, це природний процес, який визначає еволюційний розвиток видів у природі через покоління.

ГЕ передбачає природний відбір, мутації та схрещування генетичного матеріалу для передачі спадковості та адаптації до змін у середовищі. Її доцільно використовувати у сучасних мережах зв'язку, оскільки вона володіє наступними характеристиками [7-9]:

- адаптивність: здатність змінюватися та пристосовуватися до змін в оточуючому середовищі або певних умов, забезпечуючи гнучкість мережевих рішень.
- паралельна обробка: можливість використання паралельних обчислень, що особливо актуально для мереж із великою кількістю вузлів.
- глобальний пошук: ефективне дослідження простору можливих рішень при наявності великої кількості параметрів.
- оптимізація ресурсів: знаходження найкращого рішення із урахуванням певних обмежень та умов.

Для вивчення тематичних зв'язків та розвитку наукової області ГЕ на основі аналізу ключових слів та їх взаємозв'язків у дослідницьких роботах вибрано VOS Viewer, який є інструментом для аналізу і візуалізації наукометричних даних шляхом побудови відповідного графу.

На рис. 1.1 представлено отриману карту для ключового слова «genetic evolution», побудовану на основі бази даних Scopus. При цьому використовувалось 5000 документів за період з 2015 по 2023 роки, з додатковими обмеженнями щодо галузі досліджень (інженерія та комп'ютерні науки).

Розмір кожного кола відображає частоту використання ключового слова, тоді як відстань і лінії відображають взаємозв'язок між ключовими словами. Відповідно ключові слова, позначені найбільшими колами, характеризуються найбільшою частотою використання у розглянутих літературних джерелах [1].

Рис. 1.1. Карта бібліометричного аналізу ключових слів «evolution»

Аналіз даних, представлених на рис.1.1, показав, що найсильніші взаємозв'язки для «evolution» є із ключовими словами: «genetic algorithm», «genetic algorithms», «genetic programming» і «optimization».

Генетичні алгоритми (ГА) протягом останніх десятиліть є широко використовуваним інструментом для оптимізації різних процесів у сучасних мережах. Вони забезпечують ефективний та гнучкий підхід до розв'язання різноманітних завдань, сприяючи швидшому та більш ефективному пошуку оптимальних рішень.

Потенціал ГА в оптимізації мережевих маршрутів, управлінні ресурсами та підтримці якості обслуговування зробив їх ключовим компонентом для створення ефективних та надійних мережевих структур.

ГА можуть використовуватися для:

- оптимізації топології мережі, що включає в себе розташування обладнання, вибір маршрутів і управління ресурсами [10-12]. Це дозволяє забезпечити ефективне використання мережевих ресурсів та зменшити затрати.

- оптимізації управління пропускнуою здатністю мережі, розподілу ресурсів для забезпечення ефективної роботи мережі [13-15],

- розробки механізмів, які оптимізують використання енергії в мережевих структурах, зокрема в безпроводних мережах [16-19].

Отже, застосування ГА дозволяє досягти оптимальності та адаптивності в управлінні та оптимізації мережевих структур, що важливо для забезпечення їхньої ефективності та відповідності вимогам як вендорів, так і кінцевих користувачів.

На рис. 1.2 представлено бібліометричну карту для ГА, побудовану на основі бази даних Scopus по ключовому слову «genetic algorithm».

Результати пошуку становили 16 703 документи за період з 2010 по 2024 роки, з додатковими обмеженнями щодо галузі досліджень (інженерія та комп'ютерні науки).

Для кращого представлення основних тематичних напрямків у вибраній області наукових досліджень їх виділено на рис. 1.3.

Рис. 1.3. Основні тематичні напрямки щодо ГА на основі здійсненого бібліографічного аналізу [1]

Пошук здійснювався по ключовому слову «genetic algorithm», джерела, які містили два і менше параметрів, вказаних у таблиці 1.1, та не відносились до мереж зв'язку, не розглядались.

Таблиця 1.1

Дані для опису роботи ГА, наведені в різних джерелах [1]

Джерело	Розмір популяції	К-сть поколінь	Вид відбору	Вид схрещування	Вид мутації	Імовірність мутації	Імовірність схрещування
[20]	не вказано	1000	ранговий	рівномірне	не вказано	0.1	0.9
[21]	100	1200	елітизм	двоточкове	обмін	0.1	0.7
[22]	не вказано	21	рулетковий	двоточкове	обмін	0.3-0.8	0.3-0.8
[23]	4000-6000	50	турнірний	одноточкове	модифікована	0.05	не вказано
[24]	50	100	ранговий	одноточкове	одноточкова, двоточкова	0.9, 0.05, 0.2	не вказано
[25]	30	30	не вказано	не вказано	не вказано	0.006	0.8
[26]	60	200	рулетковий	модифіковане одноточкове	не вказано	0.05	0.75
[27]	не вказано	не вказано	рулетковий	перехресне	одноточкова	не вказано	не вказано
[28]	10	50	турнірний	одноточкове	обмін	0.1	0.95
[29]	не вказано	не вказано	елітизм	не вказано	не вказано	0.1	0.5
[30]	10-100 із кроком 10	25, 50, 75, 100	не вказано	модифіковане багатобатькове	не вказано	0.5	0.5
[31]	20	200	ранговий	одноточкове	одноточкова	0.02	0.8
[32]	100	100	випадковий	багатоточкове	обміну	не вказано	не вказано
[33]	не вказано	200	рулетковий	одноточкове	перемішування	не вказано	не вказано
[34]	N, де N -к-сть вузлів	2N, де N -к-сть вузлів	елітизм	не вказано	не вказано	0.5	0.5
[35]	не вказано	500-3000 з кроком 500	турнірний	одноточкове	не вказано	не вказано	не вказано
[36]	100	200	не вказано	одноточкове	випадкова	0.2	0.6
[37]	20	1000-10000	турнірний	циклічне	інверсія	0.8	не вказано
[38]	60	100	турнірний	одноточкове	не вказано	0.003	0.7
[39]	20	20	не вказано	одноточкове	не вказано	0.1	0.5
[40]	35; 40	200; 10000	рулетковий	одноточкове	перемикання біта	0.02	0.8
[41]	100	не вказано	рулетковий	двоточкове	рівномірна	не вказано	не вказано
[42]	не вказано	не вказано	комбінація рулеткового та елітизму	не вказано	не вказано	0.23	0.75
[43]	20	10	рулетковий; авторський динамічний	полігамне (багатобатькове)	не вказано	0.03	не вказано

Продовження таблиці 1.1

[44]	200	100	не вказано	не вказано	не вказано	не вказано	0.8
[45]	200	1000	не вказано	не вказано	не вказано	0.1; 0.01	0.9; 0.6
[46]	200	500	рулетковий	впорядковане	інверсія	0.5	0.8
[47]	не вказано	60	рівномірний	модифіковане; багатоточкове	не вказано	0.01	0.8
[48]	30	100	рулетковий	не вказано	не вказано	0.1	0.8
[49]	100	50	рулетковий	часткове відображення	двоточкова	0.1	початкова 0.6, зміна в межах [0.8; 0.05]
[50]	50	1000	турнірний	рівномірне	одноточкова	0.1	0.9
[51]	10	не вказано	турнірний	не вказано	не вказано	0.1	0.95
[52]	50	500	елітизм	не вказано	не вказано	0.2	0.9
[53]	50	10	не вказано	не вказано	не вказано	0.1	0.9
[54]	50	100	рулетковий	одноточкове	інверсія	0.11	0.7
[55]	100	100	турнірний	одноточкове	модифікація перестановки бітів	0.5	0.6
[56]	10	1000	рулетковий	одноточкове	не вказано	0.5	0.5
[57]	100	100; 200	рулетковий	двоточкове	обміну	0.01	0.8
[58]	400	15	рулетковий	багатоточкове	не вказано	0.0008	0.8
[59]	50	100	ранговий	авторське на основі банку генів	авторське на основі банку генів	0.1	0.8
[60]	60	500	рулетковий	не вказано	не вказано	0.01	0.9
[61]	200	100 - 200	турнірний	авторське проблемно- орієнтоване	обміну	0.1	0.9
[62]	20	30	рулетковий	не вказано	не вказано	0.01	0.85
[63]	20	100	рулетковий	не вказано	не вказано	0.02	0.85
[64]	50	150	не вказано	одноточкове	інверсія	0.5	0.8
[65]	100	50	не вказано	не вказано	не вказано	0.2	0.8
[66]	100	500	не вказано	не вказано	не вказано	0.06	0.8
[67]	100	1500	не вказано	не вказано	обміну	0.2; 0.4	0.4; 0.7
[68]	30; 50	200; 500	рулетковий	авторське	не вказано	0.1	0.8
[69]	500	100	рулетковий	багатоточкове	не вказано	0.01	0.8

Примітка. «Не вказано» використовується для випадків, коли у роботі чітко не вказана назва використовуваного оператора чи відповідне значення параметра, також у розглянутих роботах не враховувались посилання на інші джерела, які могли містити таку інформацію (назву оператора ГА чи відповідне значення).

Таким чином, проаналізувавши роботи, наведені у таблиці 1.1, можна зробити наступні висновки [1]:

1. ГА є ефективними для вирішення різноманітних завдань в мережевих структурах, таких як локалізація вузлів (пристроїв), розподіл ресурсів, оптимізація траєкторій руху, енергоспоживання тощо. Вони дозволяють досягти високої точності, ефективності та швидкості збіжності, що робить їх важливим інструментом для покращення мережевих процесів в умовах зростаючого обсягу трафіку, кількості мережевих вузлів та зміни їх розташування.

2. Вибір операторів і параметрів в ГА має фундаментальний вплив на їхнє функціонування та здатність до розв'язання конкретних завдань. Ефективне використання ГА потребує їх налаштування відповідно до особливостей задачі та обчислювального середовища, зокрема:

- оператор відбору впливає на різноманітність та збіжність популяції;
- оператор схрещування дозволяє зберігати корисні ознаки батьківських рішень, сприяючи передачі корисної інформації між поколіннями;
- оператор мутації вносить випадкові зміни в генетичний матеріал, що сприяє дослідженню нових рішень, дозволяє виходити з локальних максимумів та визначати більш глобальні оптимальні рішення.

3. Автори більшості розглянутих робіт не порівнювали ефективність використання різних операторів ГА для вирішення своїх задач, вибір цих операторів ґрунтувався на посиланні на інші роботи. Значення імовірності мутації та схрещування у більшості робіт було вибрано авторами неекспериментальним шляхом, а у роботах, у яких досліджувався певний діапазон цих значень, він був вузьким та стосувався одного параметру.

Важливо враховувати, що оптимальні параметри можуть суттєво відрізнятися для різних задач та типів даних. Ефективне налаштування вимагає ретельного

експериментування та адаптації параметрів під конкретні умови, тому використання параметрів із інших робіт не завжди є доцільним.

Усі ці аспекти демонструють те, що вибір оптимальних операторів і параметрів є важливим етапом ефективної роботи ГА для вирішення різноманітних завдань у мережах.

1.2. Характеристики безпроводної сенсорної мережі

Безпроводна сенсорна мережа характеризується здатністю до самоорганізації, локальної обробки даних, гнучкою масштабованістю та стійкістю до відмов. Її децентралізована архітектура дозволяє ефективно працювати в умовах обмежених ресурсів та забезпечує високу надійність і адаптивність до динамічних умов середовища.

Безпроводна сенсорна мережа (БСМ) - це розподілена мережа, яка складається з великої кількості сенсорних вузлів, розташованих у просторі для збору та обробки інформації про навколишнє середовище. Основним елементом такої мережі є сенсорний вузол (СВ), який здійснює вимірювальну, обчислювальну та комунікаційну функції (рис. 1.4) [70].

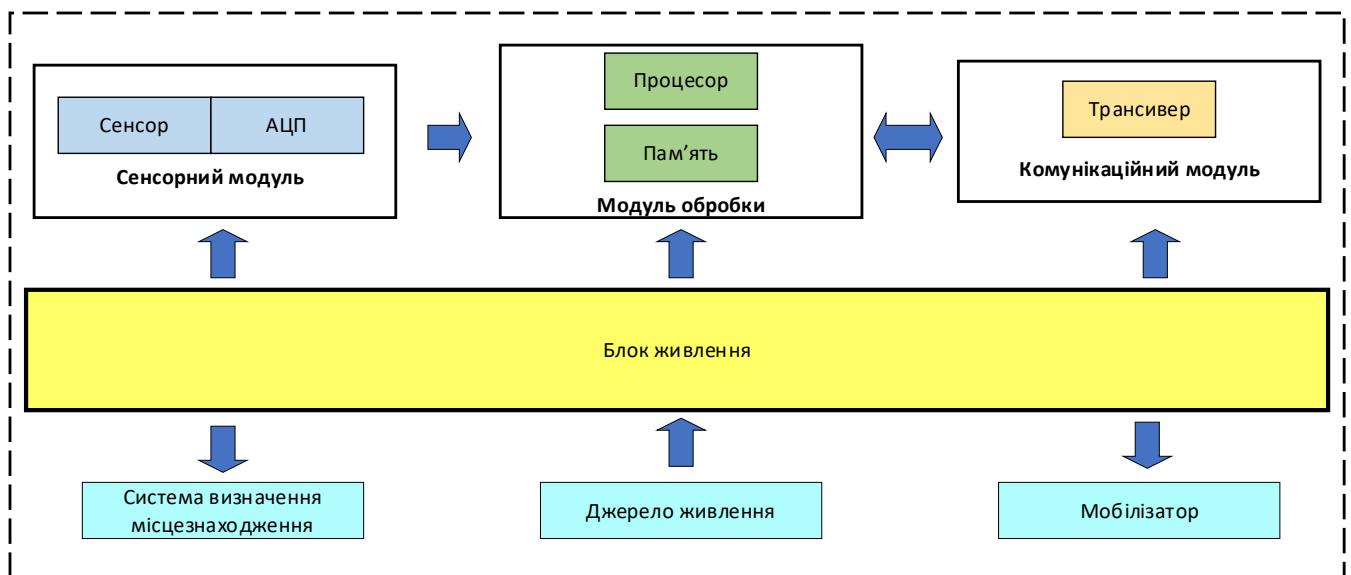


Рис. 1.4. Структура сенсорного вузла

Сенсор здійснює вимірювання фізичних / хімічних параметрів, наприклад температуру, вологість, освітленість тощо, та генерує дані, які потрібно зібрати та передати. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) виконує функцію перетворення аналогових сигналів, які отримуються від сенсора, у цифровий

формат, зрозумілий для обробки цифровими пристроями. Процесор відіграє ключову роль у керуванні роботою вузла, обробці отриманих даних від сенсора і виконанні вбудованих програм чи алгоритмів. Пам'ять використовується для зберігання вимірювань, програмного забезпечення та інших даних. Трансивер (приймопередавач) забезпечує обмін даними між СВ і іншими вузлами в мережі. Блок живлення постачає енергією усі компоненти СВ. Джерело живлення являє собою акумулятор, батарею чи інше джерело енергії.

Отже, блок живлення - це конкретний пристрій, який забезпечує безперервне живлення СВ, тоді як джерело живлення вказує на загальний механізм, з якого отримується енергія для всього вузла.

Мобілізатор - це компонент, який може забезпечувати рухливість або переміщення сенсорного вузла. Він дозволяє вузлові змінювати своє положення для оптимального збору даних або виконання конкретних завдань. Система визначення місцезнаходження надає можливість визначати точне географічне положення СВ в мережі. Це важливо для багатьох застосувань, де точність інформації про місцезнаходження має суттєве значення. Наприклад інформація про розташування вузлів може бути використана для вибору оптимального маршруту передачі даних або активації конкретних вузлів у визначених областях.

Варто зауважити, що система визначення місцезнаходження і мобілізатор є додатковими складовими СВ, крім них можуть використовуватись і інші складові у залежності від потреб.

Розглянемо основні особливості БСМ, які впливають на якість наданого сервісу [71- 74].

Обмежені ресурси

СВ через технічні особливості своєї будови володіють обмеженими обчислювальними ресурсами, такими як обсяг пам'яті, потужність трансивера, обмежений ресурс батареї тощо. Саме тому досі актуальним напрямком досліджень є протоколи доставки інформації, використання яких дозволяє ефективно застосовувати ресурси вузлів БСМ, що в свою чергу позитивно впливає на тривалість часу життя такої мережі.

Масштабованість

Масштабованість відноситься до здатності мережі працювати з великою кількістю вузлів, що безпосередньо залежить від області застосування. Якщо мережа може масштабуватись – охоплювати велику кількість вузлів та площу, наприклад система моніторингу пожеж на території України, то вона буде характеризуватись:

- збільшенням кількості певних вимірювань, дані про які мають бути передані у певний вузол, що здійснює обробку. Це в свою чергу збільшує навантаження на канал передачі даних.

- збільшенням довжини маршрутів, оскільки при масштабуванні зростає кількість вузлів, які не можуть прямо (без використання транзитних вузлів) взаємодіяти із вузлом-координатором, що впливає на збільшення кількості багатохопових маршрутів. Це відповідно збільшує імовірність втрати даних. Використання повторної передачі даних збільшує як навантаження на канал, так і енергоспоживання.

- збільшенням конкуренції за доступ до каналу. Чим ближче СВ знаходиться до шлюзу, тим більша кількість інформації буде передаватись через нього та тим більше буде займатись радіоканал в радіусі його дії. Збільшення конкуренції за радіоканал спричиняє зростання величин затримок та імовірності втрат у процесі передачі даних, що негативно впливає на енергоспоживання.

Самоорганізація

Самоорганізована мережа – це мережа, яка може змінювати свою структуру і конфігурацію, щоб краще відповідати вимогам навколишнього середовища і забезпечувати ефективну передачу даних. У такій мережі вузли можуть взаємодіяти між собою і приймати рішення в автономному режимі, не потребуючи центру управління.

Важливими властивостями самоорганізованих мереж є масштабованість і гнучкість, що робить їх застосування особливо доцільним для середовищ із складною та динамічною структурою.

Відзначимо основні функції, які впливають із поняття «самоорганізації» мережі:

- автоматичне налаштування мережевих параметрів, наприклад IP-адреси, безпеки тощо, що дозволяє спростити та пришвидшити конфігурацію мережі;
- швидка адаптація до нових умов, наприклад, зростання об'єму трафіку або відмова пристроїв.
- розподілена обробка інформації, при якій обчислення та обробка даних розподіляються між різними вузлами мережі, замість того, щоб централізовано виконуватися в одному центральному вузлі. Це сприяє більш ефективному використанню ресурсів, зменшує затримки в процесі передачі даних та підвищує масштабованість мережі.
- автоматична координація роботи різних пристроїв і вузлів мережі для оптимізації використання ресурсів і забезпечення надійності зв'язку.
- виявлення та усунення помилок шляхом здійснення діагностики роботи мережі та перенаправлення трафіку через альтернативні маршрути при втраті з'єднання.
- оптимізація використання ресурсів, наприклад завдяки розподілу трафіку між різними каналами зв'язку або використовуючи інші підходи (ефективні протоколи передачі даних тощо).

Отже, самоорганізація є важливою для сучасних мереж зв'язку, оскільки дає змогу адаптовуватись до постійно мінливих умов, швидко й ефективно обслуговувати зростаючу кількість користувачів і забезпечувати надійність зв'язку, формуючи при цьому однорангову мережеву архітектуру з динамічно змінною топологією.

Структуру однорангової самоорганізованої БСМ утворює множина СВ, які розміщені певним чином на деякій території (площі покриття мережі), та одна або декілька точок доступу до зовнішніх мереж (рис. 1.5).

Під час доставки даних від СВ, розташованого, наприклад, на межі БСМ до пристрою, розташованого в центрі мережі, відбувається процес передавання пакета даних через транзитні вузли, який характеризується кількістю «хопів». Таким чином, кожен транзитний вузол розширює площу дії БСМ.

Мобільність вузлів

Сенсорні вузли можуть бути мобільними, тобто їхнє місце розташування може змінюватися. У протоколі маршрутизації необхідно враховувати цю особливість, оскільки змінюватимуться координати вузлів і відстані між ними, що своєю чергою впливає на значення часу доставки даних та імовірність здійснення успішної передачі.

Таким чином, ця властивість впливає на процес побудови маршрутів у БСМ.

Зв'язність вузлів

Під цією властивістю розуміється можливість взаємодії та обміну інформацією між різними вузлами в мережі. Зв'язність вузлів є ключовою характеристикою, оскільки вона визначає доступність шляхів для передачі даних та комунікації в мережі. Зв'язок між вузлами в мережі відбувається через радіохвилі або інші безпроводні технології (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi тощо). Забезпечення стабільного та надійного зв'язку між вузлами є важливим для забезпечення зв'язності мережі.

Вибір топології здійснюється із урахуванням конкретних вимог та характеристик системи. Найбільш поширеними видами топологій для БСМ є зірка, mesh (коміркова) та дерево (рис. 1.5), також можливе використання лінійної та гібридної топологій [75-78].

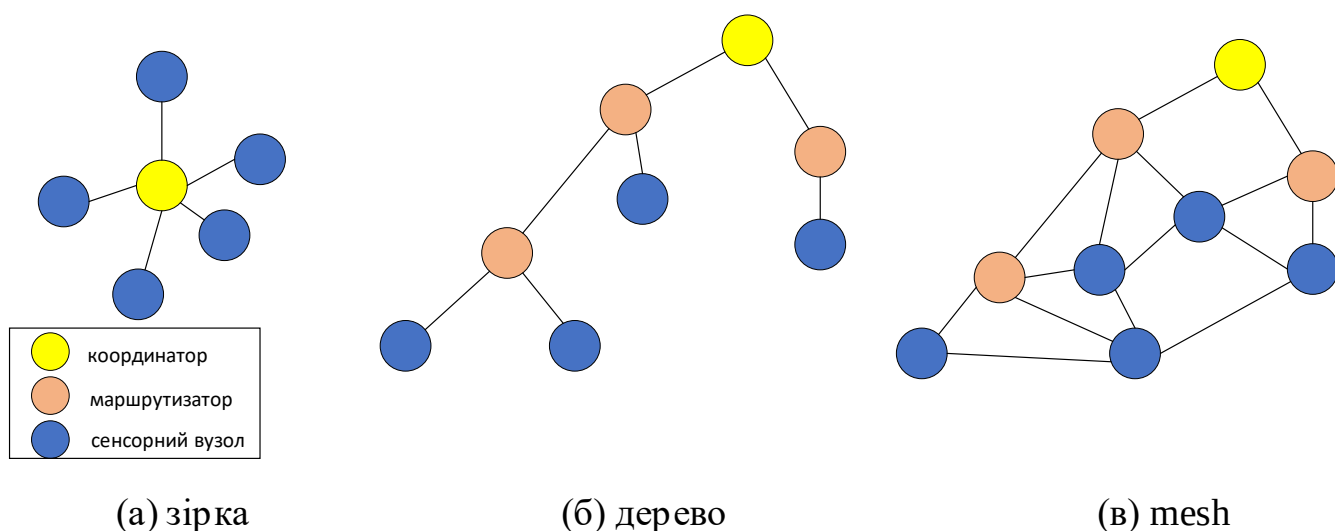


Рис. 1.5. Найбільш поширені види топологій БСМ

Варто зауважити, що для однорангових БСМ використовується коміркова топологія. Її особливістю є створення маршруту між двома довільними вузлами, використовуючи транзитні вузли. Таким чином реалізується багатохопова концепція

для формування маршруту, відповідно до якої кожний наступний вузол здійснює вибір сусіднього вузла із доступної множини для здійснення переходу (хопу) на основі надійності каналу і показників якості сусіднього вузла. Якщо необхідний вузол недоступний, то здійснюється побудова нового маршруту із використанням тих вузлів, які доступні.

Час життя БСМ визначається періодом, протягом якого мережа може ефективно функціонувати. До основних факторів, які впливають на час життя мережі відносять:

- енергію, яку витрачають СВ на передачу даних, обробку інформації, знаходження в режимі очікування;
- втрату якості / зносу матеріалів / пристроїв під впливом фізичних сил, механічних або природних процесів.

Таким чином, вибір стратегії маршрутизації може значно впливати на різні мережеві характеристики, зокрема час доставки даних, час життя мережі тощо. Аналіз стратегій маршрутизації в БСМ наведено в [79-84].

Отже, різноманітність стратегій маршрутизації відображає різні вимоги та виклики для БСМ, зокрема обмежені ресурси, динамічно змінну топологію, вимоги до якості обслуговування. Вибір певної стратегії важливий для забезпечення ефективної та надійної роботи мережі [89]. Правильно обрана стратегія дозволить оптимально використовувати мережеві ресурси та відповідати вимогам конкретної області застосування БСМ (наприклад, моніторингу навколишнього середовища, вимірювання параметрів у виробничих процесах тощо) [84].

1.3. Особливості функціонування генетичного алгоритму

Генетичні алгоритми (ГА) – це імовірнісні методи пошуку, засновані на ідеях природної еволюції та дарвінівського принципу виживання найбільш пристосованих.

ГА використовує популяції хромосом (індивідів), щоб досягати певного оптимального рішення шляхом еволюції. Для цього застосовуються оператори кросинговеру (схрещування), селекції (відбору) та мутації, що дозволяє створювати «нащадків» від поточних «батьків» у популяції [85].

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботах [86 - 89].

«Нащадки» успадковують характеристики «батьків» і будуть додані до наступного покоління, якщо вони матимуть краще значення фітнес-функції (функції пристосованості) порівняно з «батьками». Процес природної еволюції починається з набору індивідів, який називається популяцією. Кожна особина в популяції (хромосома, індивід) характеризується набором параметрів (змінних), відомих як гени (рис. 1.6).

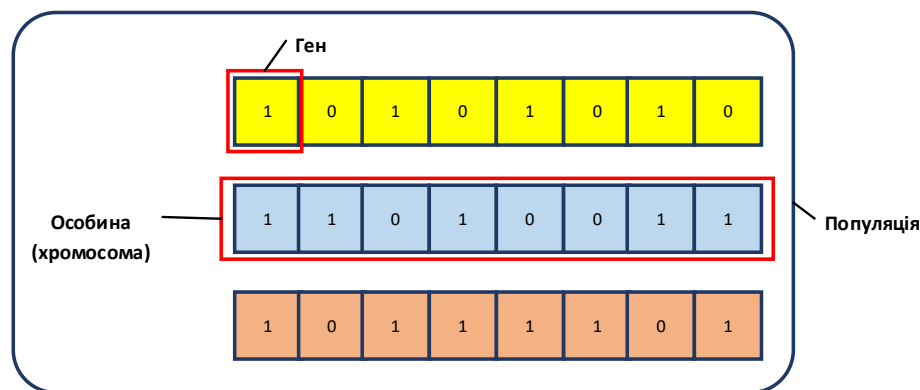


Рис. 1.6. Основні поняття процесу генетичної еволюції

Для позначення певної групи особин, які існують в певний момент часу під час еволюційного процесу, використовується поняття «покоління». Кожне нове покоління включає індивідів з різними характеристиками та значеннями пристосованості. Це дозволяє алгоритму взаємодіяти з різними областями простору параметрів і ефективно адаптуватися до змін у середовищі.

В основі функціонування ГА можна виділити 4 основні етапи [89]:

- Початкова популяція, яка представляє набір особин, що є можливими рішеннями розв’язуваної задачі. Мета цього етапу полягає у забезпеченні початкової різноманітності популяції, що дозволить досліджувати широкий діапазон можливих рішень.

Отже, початкова популяція є стартом для еволюційного процесу, під час якого до особин будуть застосовуватись генетичні оператори.

- Відбір, що здійснює вибір особин з поточної популяції для формування наступного покоління. На цьому етапі кожній особині присвоюється оцінка, яка відображає її якість. Після того, як всі особини оцінені, ГА використовує певний

оператор відбору для вибору кращих з них. Це дозволяє уникнути занадто швидкої збіжності до локальних мінімумів і зберігає різноманіття в популяції, що сприяє збільшенню імовірності знаходження глобально оптимального рішення.

- Схрещування, яке відтворює природний процес генетичної рекомбінації, що сприяє еволюції, підвищуючи шанси на виживання більш пристосованих особин. Метою цього етапу є створення нових особин на основі комбінації більш якісних батьківських особин, що сприяє уникненню застрягання в локальних оптимумах, які можуть виникати внаслідок обмеженого дослідження простору можливих рішень.

- Мутація, яка здійснює випадкове внесення змін у генетичні характеристики потенційних рішень для розвитку різноманітності, що є важливим для забезпечення ефективного пошуку оптимального рішення.

Для налаштування роботи ГА є 4 основні параметри [89]:

- розмір популяції N – це загальна кількість особин, які формують популяцію. Кожна така особина в популяції представляється хромосомою. Отже, цим параметром задається кількість особин, які будуть досліджуватись ГА одночасно для вирішення задачі.

Вибір розміру популяції залежить від складності розв'язуваної задачі та доступних обчислюваних ресурсів, відповідно його значення обирається експериментальним шляхом. При цьому більша кількість особин у популяції дозволяє краще досліджувати простір пошуку і підвищує імовірність знаходження глобально оптимального розв'язку.

- кількість поколінь G – це величина, яка визначає кількість ітерацій, протягом яких відбувається еволюція особин популяції. Вибір її значення залежить від складності задачі, обсягу вхідних даних, обчислювальних ресурсів та бажаної точності розв'язку, зокрема більша кількість поколінь дає можливість алгоритму знаходити більш оптимальні розв'язки.

- імовірність схрещування p_{cross} є величиною в діапазоні від 0.0 до 1.0, яка показує як часто відбувається обмін генетичним матеріалом між хромосомами в популяції. Якщо імовірність схрещування становить 0.0, то це означає, що нове

покоління буде створено копіюванням усіх особин із поточного покоління, крім тих, які виникнуть внаслідок мутації (у випадку її застосування).

- імовірність мутації p_{mut} є величиною в діапазоні від 0.0 до 1.0, яка визначає мутацію хромосом в одному поколінні.

На рис. 1.7 представлено узагальнену блок-схему ГА, відповідно до якої основними операціями еволюції є відбір, схрещування і мутація. Детально розглянемо ці операції у наступних підпунктах.

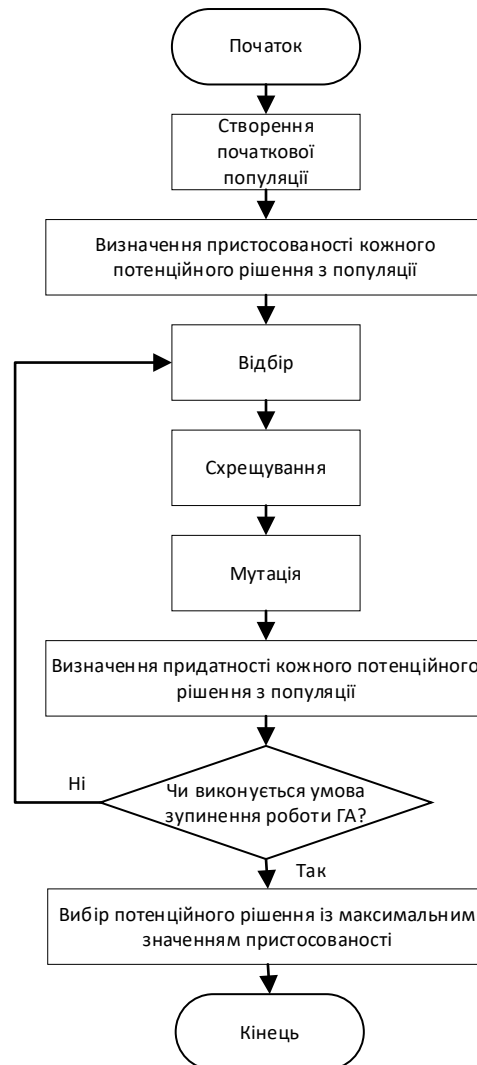


Рис. 1.7. Узагальнена блок-схема функціонування ГА [86]

Оператори відбору

Одним із основних етапів роботи ГА є відбір – процес вибору особин у популяції, які створять нащадків для наступного покоління. Метою є виділення найбільш пристосованих особин у популяції, щоб їхні нащадки мали ще вищий рівень пристосованості.

Відбір має бути збалансований з операторами схрещування і мутацій, щоб забезпечити різноманітність, необхідну для подальших змін і прогресу.

Оператори селекції призначені для відбору особин з поточної популяції, які будуть використовуватися для створення нащадків у наступному поколінні [90]. Ці оператори дозволяють вибирати більш пристосовані особини для передачі їхньої генетичної інформації в майбутні покоління. Кожній особині в популяції призначається значення фітнес-функції, яка визначає її пристосованість до вирішення конкретної задачі оптимізації. Чим більше це значення, тим більша імовірність, що особина внесе свій внесок у наступне покоління [91].

Фітнес-пропорційний відбір (рулеткова селекція) полягає у виборі особин для участі у еволюції на основі значення імовірності, яке є пропорційне їхній пристосованості (фітнес-функції). У цьому методі для вибору особини використовується колесо рулетки, яка складається з секторів, розміри яких пропорційні значенням фітнес-функції кожної особини. Таким чином, чим більше значення пристосованості, тим більша імовірність вибору певної особини.

Імовірність вибору особини i можна визначити як [92]:

$$p_i = \frac{val_{fitness_i}}{\sum_{j=1}^N val_{fitness_j}}, \quad (1.1)$$

де N – кількість особин в популяції,

$val_{fitness_i}$ – пристосованість (значення фітнес-функції) особини i .

Вибрані особини стають батьками для створення нащадків за допомогою застосування подальших генетичних операторів (кросоверу, мутації). Особини з більшими значеннями пристосованості займають більший сектор на рулетці, тому їхня імовірність бути обраними є вищою, проте менш пристосовані особини також мають шанс на вибір. Відповідно рулеткова селекція надає можливість вибору менш пристосованих особин для збереження різноманітності популяції.

Стохастична універсальна вибірка, як і рулеткова селекція, розглядає індивідів, розташованих у секторах, пропорційних до індивідуального значення пристосованості. Колесо рулетки має N точок відбору, розташованих на однаковій

відстані і воно обертається лише один раз, щоб вибрати всі N особин, які будуть використані для формування нової популяції.

На рис. 1.8 показано розгорнутий вигляд колеса рулетки, де особини віднесені до відрізків прямої, так що розмір кожного відрізка відповідає пристосованості [92]. Для вибору N особин, над лінією розміщується масив з N рівновіддалених точок відбору, при цьому відстань між двома такими точками становить F/N , де F – загальна довжина лінії.

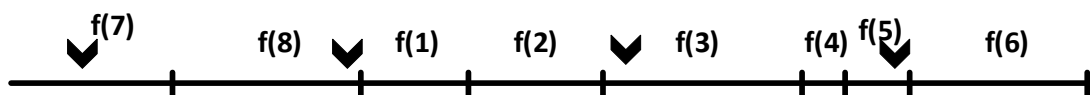


Рис. 1.8. Розгорнутий вигляд колеса рулетки при стохастичній універсальній вибірці

Отже, стохастична універсальна вибірка розподіляє точки відбору рівномірно, що сприяє збереженню різноманітності в популяції. Це особливо важливо у випадках, коли потрібно зберегти різноманітність для забезпечення дослідження різних частин простору рішень.

Рангова селекція базується на застосуванні масиву рангів, які присвоюються індивідам на основі значень придатності. Для призначення рангів первинного (невідсортованого) масиву використовується відповідна функція. Якщо в масиві наявні декілька однакових елементів, то ранги їм присуджуються як середньоарифметичні ранги цих елементів у відсортованому масиві. Далі для вибору особин використовується механізм рулеткової селекції

Ранговану селекцію доцільно використовувати у випадку наявності декількох особин із найкращими значеннями пристосованості, ніж інші. Застосування рангу перешкоджає таким особинам зайняти всю популяцію. Для випадку, коли декілька особин мають практично однакове значення пристосованості, цей вид селекції також ефективний, оскільки присвоєння рангу дозволяє їх розділити.

Турнірна селекція полягає у «змаганні» між собою двох або більше випадково вибраних особин. Кількість таких особин визначає розмір турніру, якщо $k=3$, відповідно вибираються із поточної популяції 3 особини. Переможцем такого «змагання» є індивідуум із найкращою пристосованістю, що переходить до наступного покоління.

На практиці, перевага надається невеликому розміру турніру, оскільки це дозволяє підтримувати різноманітність у популяції. Розмір турніру є параметром, який може бути налаштований для досягнення оптимального балансу між різноманітністю та удосконаленням існуючих рішень [89].

Селекція на основі масштабування пристосованості використовує лінійне перетворення значень пристосованості особин відповідно до (1.2). Отримані масштабовані значення пристосованості f_{scal} використовуються для визначення імовірностей вибору кожної особини. Чим менше масштабоване значення пристосованості, тим більшою буде імовірність вибору.

Цей метод дозволяє більше уваги приділяти менш пристосованим особинам, щоб підтримувати різноманітність в популяції та уникати передчасної збіжності до локальних оптимумів [92].

$$f_{scal} = a \cdot val_{fitness} + b, \quad (1.2)$$

де a, b – коефіцієнти лінійної функції; $val_{fitness}$ – значення пристосованості певної особини.

Для знаходження коефіцієнтів a та b потрібно розв'язати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} a \cdot val_{fitness_min} + b = f_{scal_min} \\ a \cdot val_{fitness_max} + b = f_{scal_max} \end{cases}. \quad (1.3)$$

Елітна селекція (елітизм) дозволяє зберігати певну кількість найкращих особин у кожному поколінні. Такі особини можуть бути втрачені, якщо їх не буде відібрано для розмноження або якщо вони будуть знищені внаслідок схрещування або мутації. Проте частка елітних особин у популяції не може бути надто високою, оскільки це негативно вплине на різноманітність, зменшить шанси на дослідження нового простору пошуку та, як наслідок, зупинить прогрес [92].

Оператори схрещування

У кожному поколінні ГА, оператор схрещування діє після відбору на парах індивідуумів із заздалегідь визначеною ймовірністю схрещування. Найбільш відомими операторами схрещування є одноточковий, двоточковий, k -точковий,

рівномірний та впорядкований оператор схрещування [92-95]. Детально розглянемо особливості функціонування кожного із них.

Одноточковий оператор - це найпростіший і найбільш використовуваний оператор схрещування в ГА, який дозволяє комбінувати корисні характеристики обох «батьків» у нащадка, сприяючи тим самим оптимізації еволюційного процесу. Основний принцип цього оператора полягає у виборі однієї випадкової точки (точки розрізу) у генетичних послідовностях батьківських особин. Частини хромосоми, розташовані по одну сторону від точки розрізу, обмінюються між батьківськими особинами, утворюючи двох нових нащадків.

Процес роботи одноточкового оператора схрещування представлено на рис. 1.9.

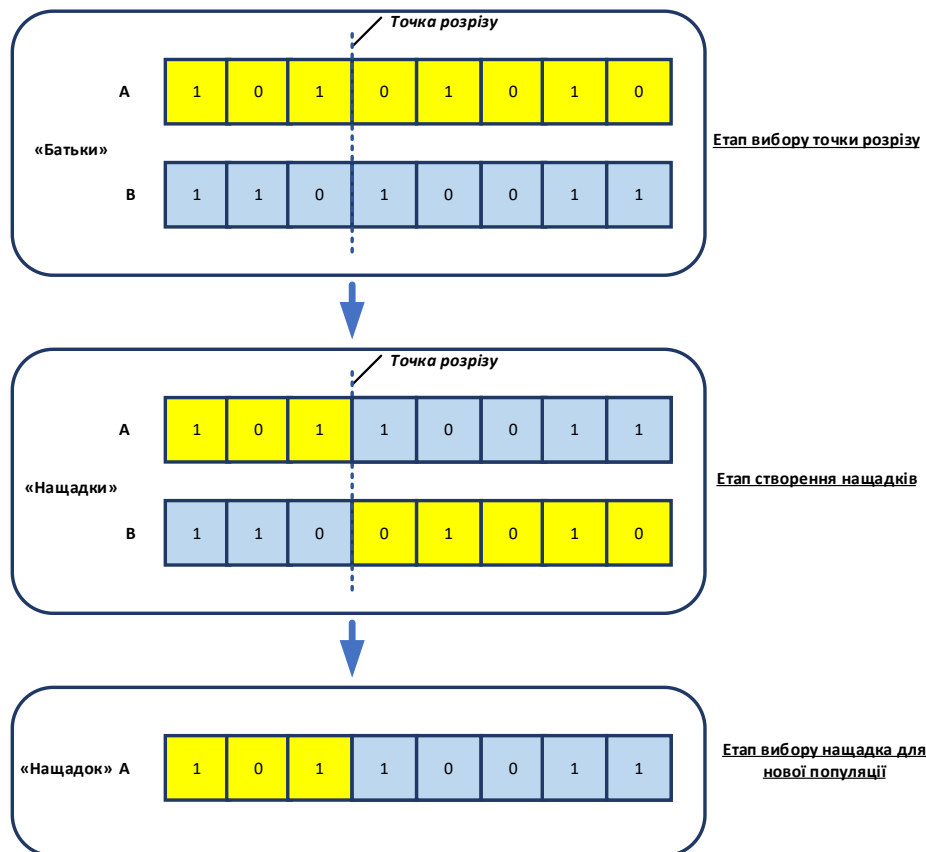


Рис. 1.9. Процес роботи одноточкового оператора схрещування

Двоточковий оператор, на відміну від одноточкового, використовує дві точки розрізу, вибрані випадковим чином, для обміну генами. Ці точки визначають діапазон, який буде використовуватись для обміну між батьківськими особинами.

Генетичні послідовності, розташовані поза цим діапазоном, залишаються незмінними. Отримані нащадки складаються з поєднання генетичних частин обох батьківських особин, які знаходяться за межами визначеного діапазону. Цей процес створює двох нових нащадків, кожен з яких успадковує частини генетичної інформації від обох батьків. Двоточковий кросовер вводить додатковий рівень гнучкості порівняно з одноточковим, дозволяючи обмінювати більше однієї частини генетичної інформації між батьківськими особинами. Відзначимо, що вибір точок розрізу випадковий, що в свою чергу сприяє забезпеченню різноманітності популяції ГА. Процес роботи двоточкового оператора схрещування представлено на рис. 1.10.

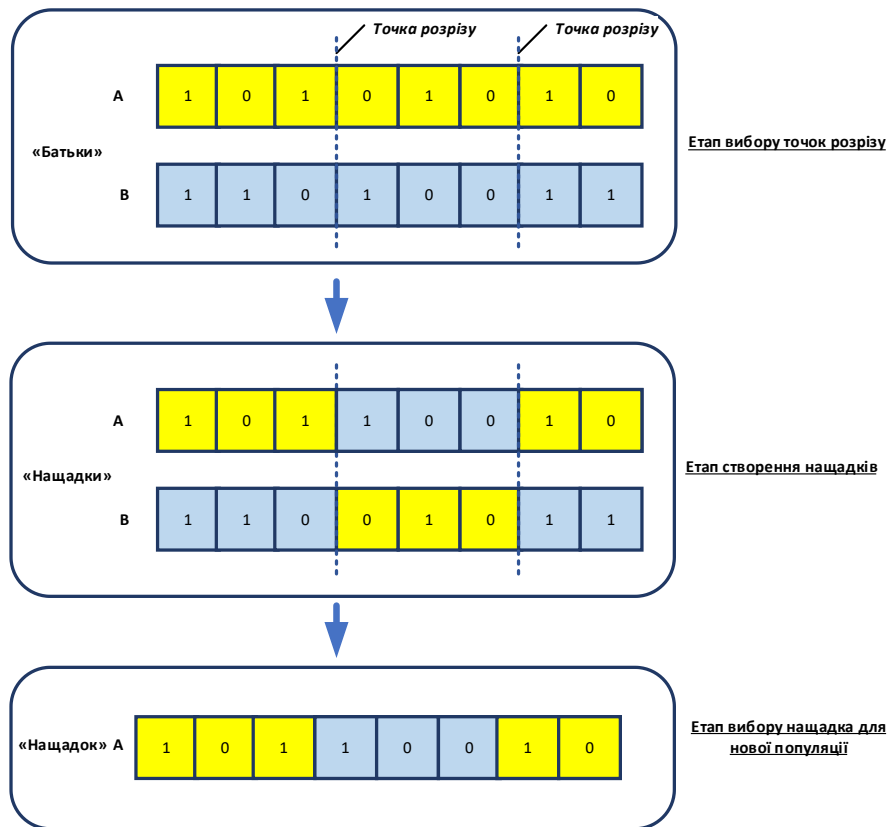


Рис. 1.10. Процес роботи двоточкового оператора схрещування

При використанні більшої кількості точок розрізу застосовується k -точковий оператор схрещування (k – кількість точок розрізу), процес роботи якого представлено на рис. 1.11.

Цей метод може бути корисним для здійснення більш глобального обходу простору рішень, оскільки дозволяє обмінювати більшими фрагментами генетичного матеріалу у порівнянні із одноточковим та двоточковим, що потенційно

призводить до відкриття нових та ефективних особин. Кількість точок k можна регулювати залежно від складності задачі оптимізації.

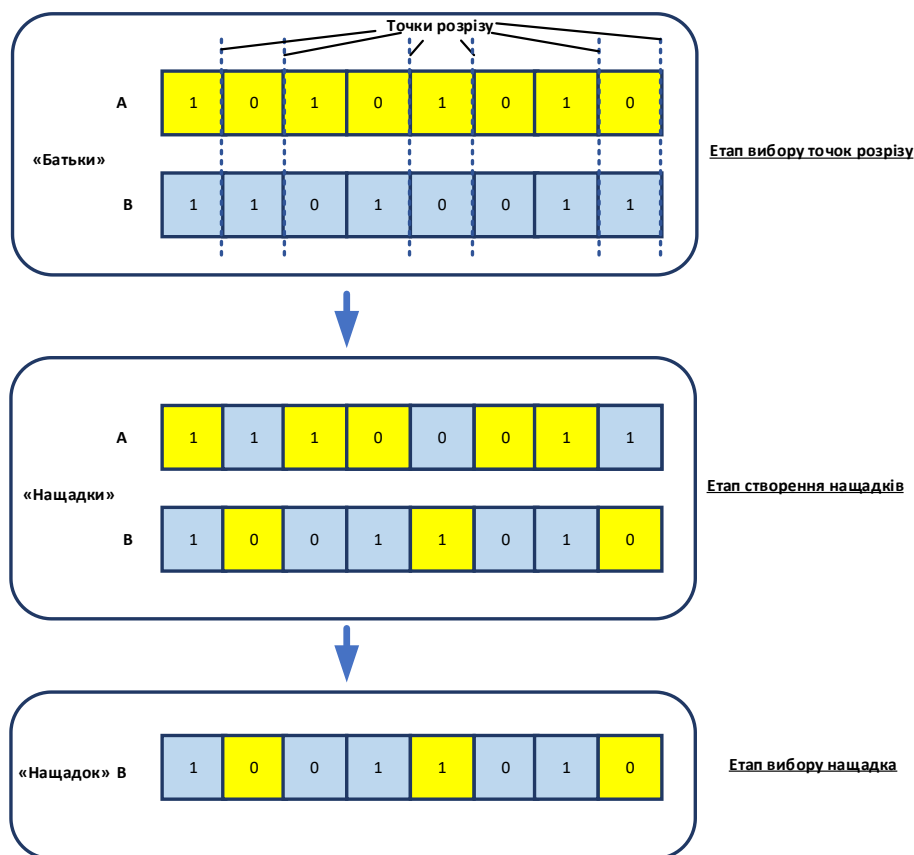


Рис. 1.11. Процес роботи k -точкового оператора схрещування

Оператор схрещування змішуванням є універсальним, оскільки може застосовуватись до широкого діапазону задач оптимізації, включаючи ті, що мають неперервні, дискретні або змішані типи змінних.

Цей метод використовує випадковий ваговий коефіцієнт α у попередньо визначеному діапазоні для визначення частки генетичного матеріалу, успадкованого від кожного з батьків. Коефіцієнт α дозволяє регулювати розкид значень для генів, зазвичай приймають $\alpha=0.5$. Після вибору 2 батьківських особин відбувається формування нового діапазону значень генів для кожного з них по такому принципу:

$$\left[P_{1_min_i} - (P_{2_max_i} - P_{1_min_i})\alpha; P_{2_max_i} + (P_{2_max_i} - P_{1_min_i})\alpha \right] \quad \text{при} \quad P_1 \leq P_2, \quad \text{де} \quad P_{1_min_i} -$$
 мінімальне значення i -ого гену батьківської особи 1, $P_{2_max_i}$ — максимальне значення i -ого гену батьківської особи 2 [92]. Для визначення значення гена нащадка вибирається випадкове число у обчисленому діапазоні.

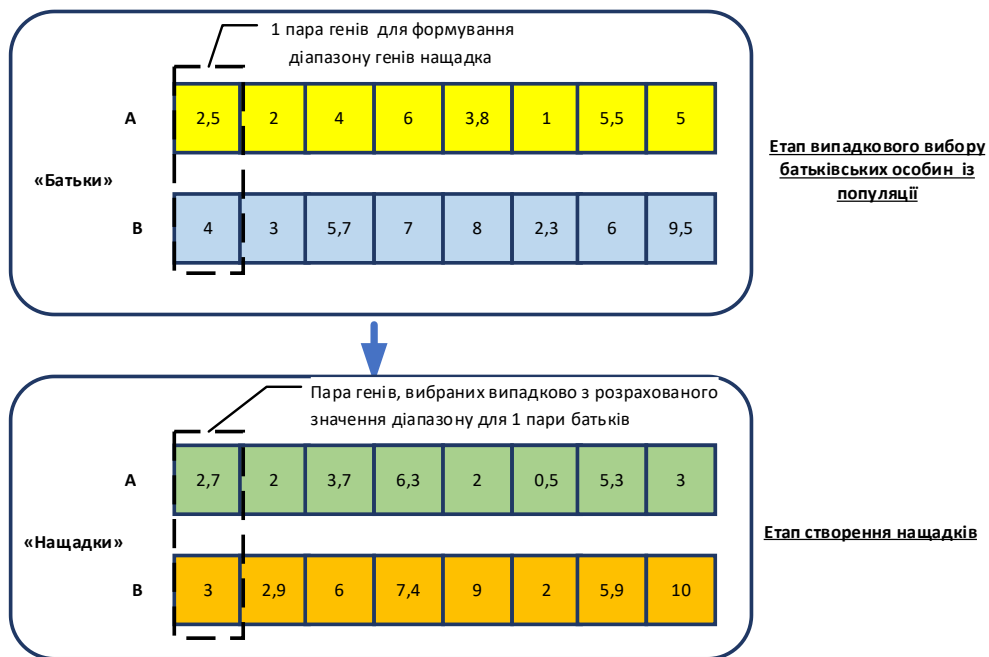


Рис. 1.12. Приклад роботи оператора схрещування змішуванням

Рівномірний оператор використовується для обміну генетичною інформацією між батьківськими особинами, що дозволяє отримати нащадка, який складається із сукупності випадково обраних генів батьківських особин на відповідних позиціях.

$$Crossover(P^A, P^B, Pr_c) = O, O = Random(P_i^A, P_i^B), i = \overline{1, n}. \quad (1.4)$$

Визначення участі у процесі схрещування для кожного гену батьківських особин здійснюється на основі бінарного шаблону, довжина якого є рівна кількості генів хромосоми. Якщо біт у шаблоні схрещування вказує на обмін (1), то відповідний ген нащадка береться від одного з батьків, в протилежному випадку (0) ген береться від іншого батька. У результаті такого обміну формується новий нащадок [92].

Рівномірний оператор дозволяє зберігати більше різноманітності у популяції, оскільки забезпечує випадковий обмін генів без обмежень на кількість генів, що можуть обмінюватись. Процес роботи цього оператора схрещування представлено на рис. 1.13.

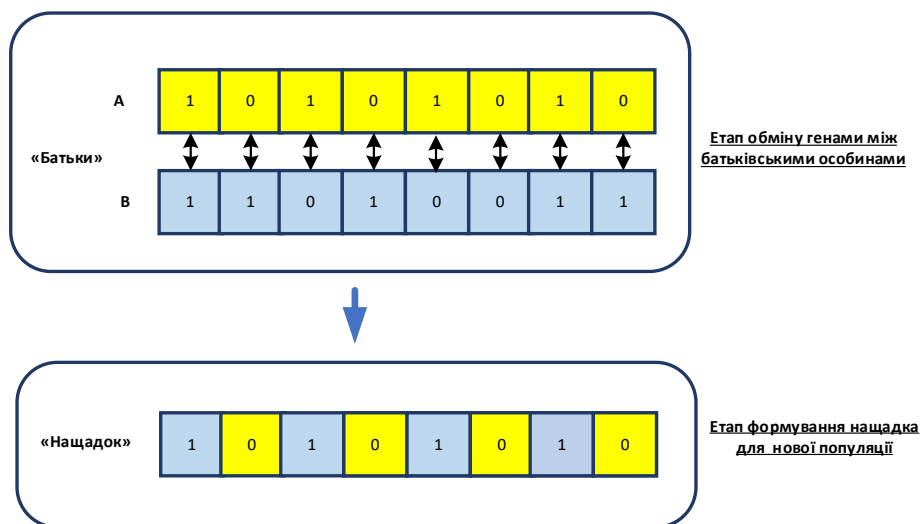


Рис. 1.13. Процес роботи рівномірного оператора схрещування

Впорядкований оператор характеризується зберіганням порядку генів у батьківських особинах. Це може бути корисно, наприклад, у випадках, коли порядок генів важливий для правильної інтерпретації генетичної інформації, зокрема в задачах, пов'язаних з послідовностями, рядками, тощо. У батьківських особинах визначається одна чи кілька точок схрещування, які розділяють відповідні генетичні послідовності на частини для обміну. Ці частини обмінюються між батьківськими особинами, а інші частини залишаються незмінними [89].

Таким чином, порядок генів у кожній з генетичних послідовностей залишається впорядкованим. Процес роботи впорядкованого оператора схрещування представлено на рис. 1.14 [89, 92].

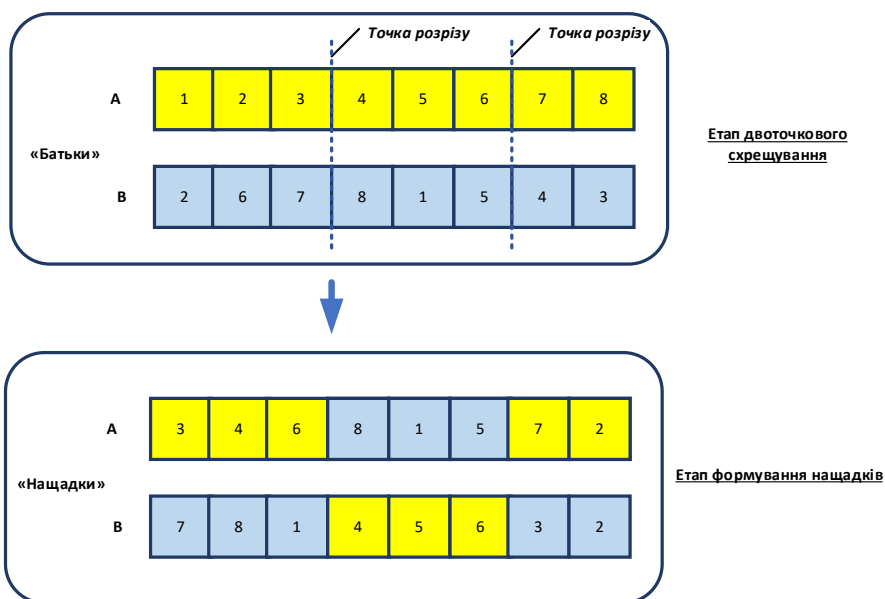


Рис. 1.14. Процес роботи впорядкованого оператора схрещування

Першим етапом є застосування двоточкового схрещування зі випадково вибраними точками розрізу. Після цього відбувається заповнення генів кожного нащадка шляхом обходу генів батьківських особин в їх первинному порядку, починаючи з наступного після другої точки розрізу. У першому з батьків A у цій позиції перебуває 7, цього числа ще немає в нащадку, тому додаємо його. Наступним числом розглянутої батьківської хромосоми є 8, проте дане число уже є в нащадку A , тому переходимо до числа 1, яке також уже є у нащадку. Наступним числом є 2, оскільки його немає у нащадку, то записуємо його. Аналогічно заповнюємо решту вільних генів нащадків. В підсумку отримуємо хромосоми нащадків, що представлені на рис. 1.14 [89].

Оператори мутації

Мутація – це оператор ГА, що застосовується до нащадка, створеного в результаті операцій відбору та схрещування. Метою застосування цього оператора є збільшення різноманіття розглянутих індивідів.

Кожен ген кожного індивіда з деякою заданою ймовірністю Pr_{mut} мутує, тобто змінює своє значення, при цьому значення Pr_{mut} є невеликим, щоб не спричинити погіршення якості розглянутого індивіда. Зазвичай у ГА ймовірність мутації обирається з трьох варіантів: слабка, середня і сильна мутація. Відповідно Pr_{mut} можна визначити як [96, 97]:

$$Pr_{mut} = \begin{cases} 1/3n, & \text{якщо мутація слабка,} \\ 1/n, & \text{якщо мутація середня,} \\ \min(1, 3/n), & \text{якщо мутація сильна,} \end{cases} \quad (1.5)$$

де n – довжина (кількість генів) особини.

Оператор інверсія характеризується інвертуванням одного або декількох бітів. Для цього вибирається хромосома, у якій випадково або на основі певного критерію задаються одна або декілька точок інверсії. Відповідно гени, які розміщені між цими точками, будуть інвертуватись у зворотньому порядку. Процес роботи інверсійного оператора мутації представлено на рис. 1.15.

Як бачимо з рис. 1.15, область інверсії, яка формується між точками інверсії, обертається так, що перший елемент стає її останнім, другий - передостаннім тощо. Це призводить до створення особи з певною зміною в її генетичному коді.

Інверсія здатна зберігати локальні особливості в генетичних послідовностях, оскільки вона не стирає всю інформацію про структуру. Це може бути корисно при оптимізації завдань з локальними оптимумами. Також цей оператор відносно простий у реалізації, потребує невеликої кількості обчислювальних ресурсів [92].

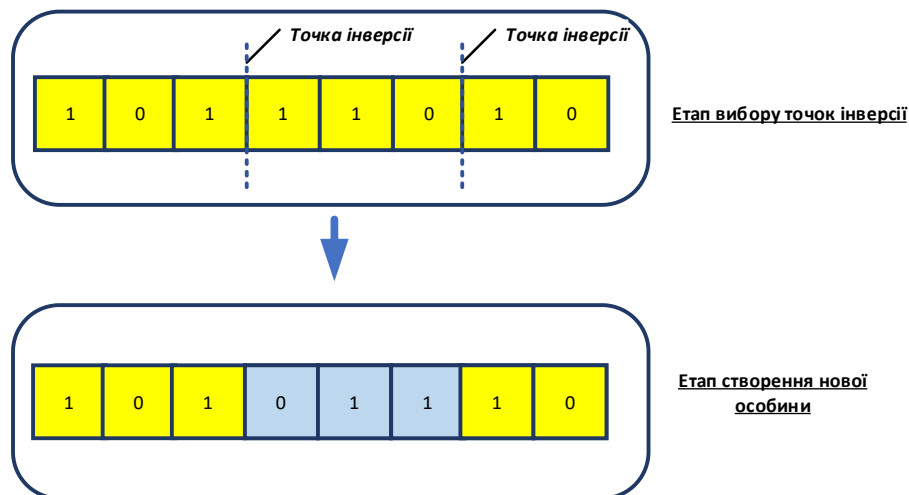


Рис. 1.15. Процес роботи інверсійного оператора мутації

Оператор обміну (оператор переміщення) здійснює переміщення (обмін) частини генетичної послідовності в інше місце. Процес роботи оператора обміну представлено на рис. 1.16 [92]. Випадковим чином було вибрано 2 позиції генів, які внаслідок застосування даного оператора помінялись місцями відповідно до рис. 1.16.

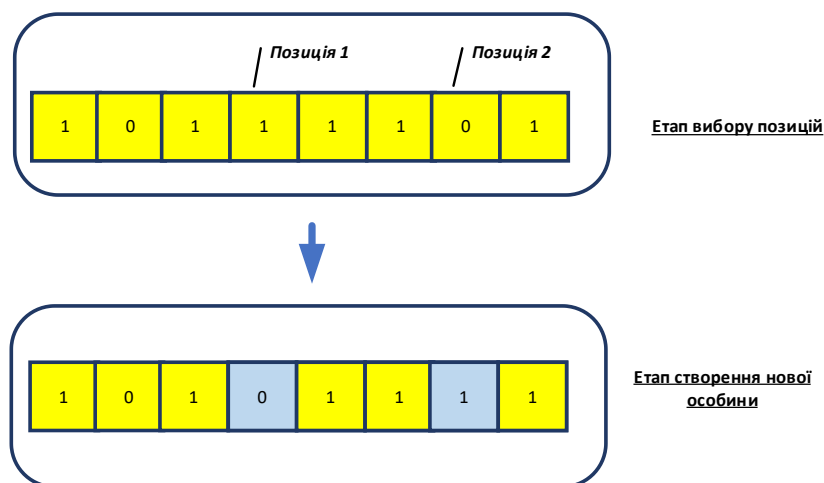


Рис. 1.16. Процес роботи оператора обміну

Оператор обертання здійснює вибір послідовності генів, у якій він змінює їх порядок на протилежний. Процес роботи цього оператора представлено на рис. 1.17 [92].

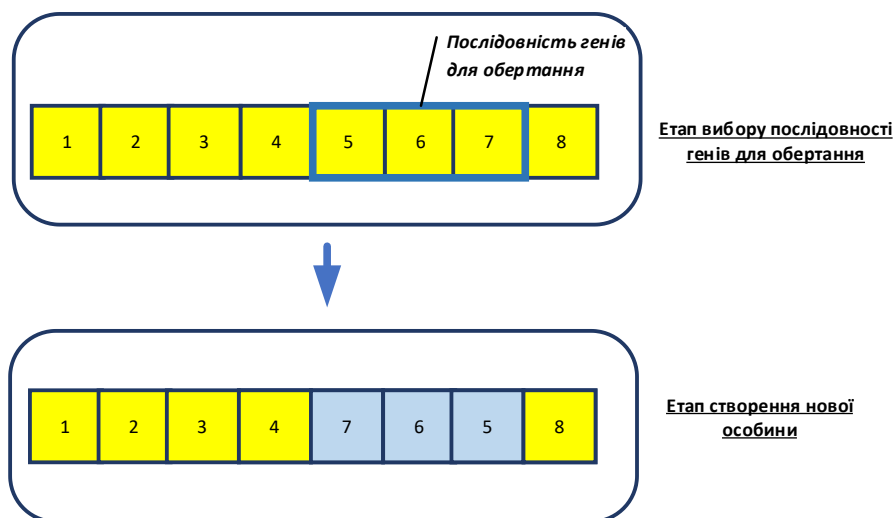


Рис. 1.17. Процес роботи оператора обертання

Оператор перемішування (перетасування) змінює порядок генів у вибраній послідовності випадковим чином. Процес роботи цього оператора представлено на рис. 1.18 [89, 92].

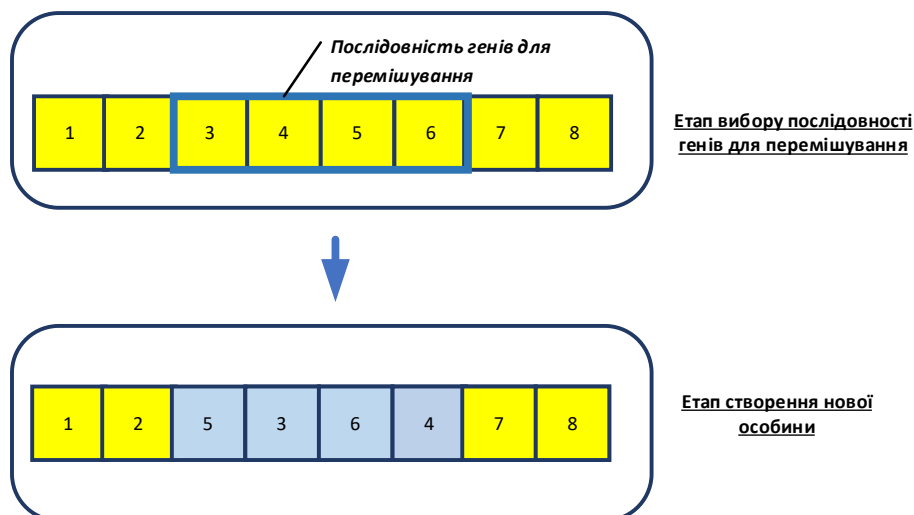


Рис. 1.18. Процес роботи оператора перемішування

1.4. Класифікація генетичних алгоритмів

Для систематизації знань про особливості, принцип роботи ГА та покращення розуміння факторів, що впливають на їх ефективність в контексті сучасних мережеских умов, запропоновано відповідну класифікацію, представлену на рисунку 1.19.

Розглянемо критерії класифікації.

За принципом задання параметрів мутації та схрещування їх можна поділити на [1]:

- динамічні: ймовірність схрещування і мутації може змінюватися в процесі оптимізації в заданому діапазоні залежно від певних умов. Наприклад, ймовірність може зростати, якщо оптимальне рішення не може бути знайдене протягом кількох поколінь, або зменшуватися з часом, щоб зменшити ризик втрати оптимальних рішень.

- статичні: значення ймовірності є постійним протягом усього еволюційного процесу.

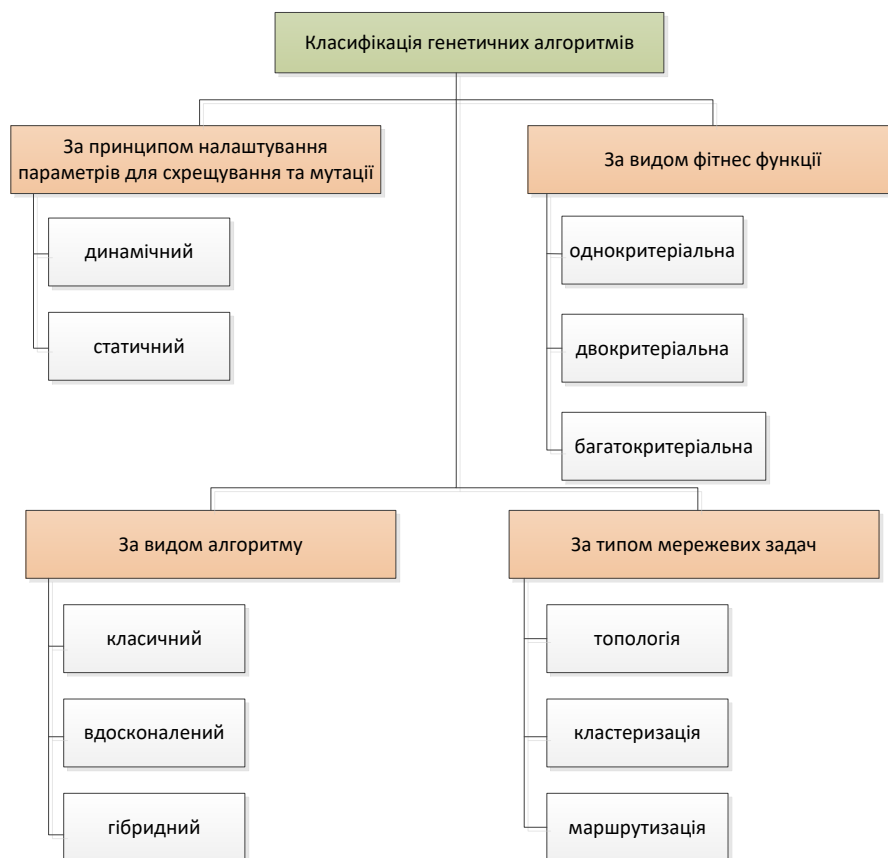


Рис. 1.19. Авторська класифікація ГА на основі аналізу літературних джерел [1]

За типом фітнес-функції:

- однокритеріальні: кожна особина оцінюється лише за одним критерієм, який може бути максимізований або мінімізований залежно від завдання;

- двокритеріальні: кожна особина оцінюється за двома критеріями;

- багатокритеріальні: традиційно ГА використовують одноцільові функції пристосованості, які фокусуються на оптимізації одного параметра, але багато реальних проблем вимагають врахування декількох, часто суперечливих, критеріїв. У таких випадках використовуються багатоцільові фітнес-функції, які поєднують кілька окремих критеріїв для забезпечення більш гнучкого та адаптивного підходу до оптимізації.

За типом алгоритму:

- класичний: базова модель еволюційного алгоритму, що імітує природний процес еволюції і складається зі стандартного набору генетичних операторів;

- вдосконалений: базується на класичному ГА, але додає нові елементи та механізми для підвищення його ефективності, такі як використання нових операторів, методів паралелізації, теорії хаосу тощо;

- гібридний: поєднує ГА з іншими методами оптимізації/машинного навчання, зокрема, заснованими на процесах біологічної еволюції (ройові (на основі рою бджіл, частинок, косяка риб), колонії мурах тощо), законах фізики - симуляція відпалу тощо).

Було виділено три найбільш поширені типи мережевих задач: проєктування топології мережі, маршрутизація та кластеризація.

Таким чином, запропонована класифікація ГА допомагає розкрити основні принципи їх функціонування, що дозволяє підвищити ефективність використання для вирішення практичних завдань, сприяє систематизації відповідних знань [1].

1.5. Концептуальні напрями підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж

БСМ є складними системами, які складаються з сенсорних вузлів, що взаємодіють між собою для збору, обробки та передачі даних. Раціональне розміщення сенсорних вузлів у є фундаментальним кроком для забезпечення ефективної роботи мережі. Врахування покриття мережі, енергоспоживання, зв'язності, затримки передачі даних та інтерференції дозволяє створити надійну та енергоефективну систему. Це забезпечує стабільну роботу мережі та підвищує її ефективність для різних областей застосувань [149].

У сучасних умовах часто виникає потреба в додаванні нових вузлів, що може бути викликано такими причинами [98, 149]:

- збільшення площі покриття мережі, внаслідок чого забезпечується більш детальний і точний збір даних з нових ділянок, що сприяє покращенню якості моніторингу.

- підвищення щільності вузлів, що дозволяє покращити точність і надійність зібраних даних. Це особливо доцільно для середовищ, які характеризуються високою ймовірністю перешкод і втрат даних.

- заміна несправних вузлів або вузлів із застарілими функціональними можливостями, що є необхідною для підтримки роботи мережі із наданням відповідних послуг.

- підвищення продуктивності мережі з точки зору маршрутизації даних. Проміжні вузли, встановлені між існуючими, можуть зменшити кількість переходів між вузлами, що сприяє зниженню затримки передачі даних.

Розміщення нових вузлів у місцях, де існують прогалини в покритті – так звані «мертві зони», дозволяє забезпечити безперервну передачу даних по всій мережі. Це знижує ризик втрати даних та покращує якість зв'язку, що є критичним для додатків, де необхідна висока надійність і точність, таких як моніторинг здоров'я або військові операції. Також для відстеження забруднення повітря важливо уникати перекриття зон дії вузлів, щоб отримати чітку карту концентрацій забруднюючих речовин у різних частинах міста.

Наукова спільнота активно працює над вирішенням задачі оптимального просторового розміщення сенсорних вузлів, що підтверджується низкою актуальних публікацій, зокрема [99–102].

У дослідженні [99] авторами була вирішена багатокритеріальна задача розгортання БСМ, що включала оптимізацію як розміщення, так і призначення потужностей вузлів. Для досягнення цієї мети було застосовано еволюційний алгоритм, який використовував спеціалізовані генетичні оператори, евристики локального пошуку та інноваційну схему кодування. Результати імітаційного

моделювання продемонстрували, що розроблений алгоритм MOEA/D має перевагу над MOGA як за якістю отриманих рішень, так і за швидкістю збіжності.

Автори [100] зосередилися на енергоефективному керуванні топологією БСМ, запропонувавши рішення на основі меметичних алгоритмів. Їхній алгоритм ToCMA досліджує простір рішень шляхом комбінування операторів генетичного алгоритму та ефективної техніки локального пошуку. Під час імітаційного моделювання було використано популяцію з 30 хромосом, турнірний оператор відбору з розміром турніру 16 та одноточковий оператор схрещування. Порівняльний аналіз ToCMA з алгоритмом MST для мереж різної щільності підтвердив високу ефективність запропонованого меметичного підходу.

Дослідження [101] присвячено розробці енергоефективного алгоритму покриття у БСМ. Метою рішення є забезпечення моніторингу цільової зони та ефективна передача даних за рахунок мінімізації числа активних вузлів. В основі його роботи лежить навчання з підкріпленням, застосоване до алгоритму Неша, що дозволяє досягти мінімального часу збіжності системи. Запропонований підхід забезпечує підтримання необхідного рівня покриття та зв'язку, використовуючи активні сенсорні елементи зі змінними радіусами дії в кожному циклі планування топології. Моделювання, проведене в середовищах OMNeT та Python, підтвердило ефективність розробленої методики за такими критеріями, як середня кількість активних сенсорних вузлів, щільність зон покриття, загальний рівень покриття та рівень енергоспоживання.

У [102] представлено дві авторські методики розміщення проміжних (релейних) вузлів, основна мета яких — гарантувати k -зв'язність сенсорних вузлів. Перша методика базується на принципах ГА (де застосовано популяцію розміром 60, рулетковий оператор відбору та одноточкове схрещування), тоді як друга використовує жадібну стратегію. Для порівняння ефективності було проведено імітаційне моделювання у середовищі Matlab для мереж з розмірами 100×100 та 300×300 метрів. Отримані результати показали, що рішення на основі ГА потребує меншої кількості проміжних вузлів для забезпечення необхідного рівня k -зв'язності, ніж жадібний підхід.

На основі аналізу розглянутих робіт, варто відзначити ефективність використання еволюційних алгоритмів [149]. Крім цього, у проблемі оптимізації розташування СВ у БСМ можна виділити два основні аспекти:

- знаходження оптимального розташування СВ по критерію покриття мережі радіусами дії вузлів;
- знаходження оптимального розташування СВ з точки зору оптимізації передачі інформаційних потоків у мережі по певному критерію, наприклад енергоспоживання, затримка передачі даних тощо.

Маршрутизація даних є критично важливою для забезпечення ефективного функціонування децентралізованих мереж. Традиційні однокритеріальні алгоритми маршрутизації не враховують усі аспекти динамічно змінного середовища передавання даних, що призводить до зниження загальної продуктивності мережі.

Вибір між однокритеріальними та багатокритеріальними алгоритмами маршрутизації залежить від конкретних умов та вимог БСМ. Однокритеріальні алгоритми підходять для простіших та більш стабільних середовищ, де один параметр є критично важливим. Багатокритеріальні алгоритми (БА), хоча і складніші в реалізації, надають значні переваги в адаптивності та оптимізації продуктивності в умовах складних та динамічних мереж.

Перевагами використання БА є:

- комплексний підхід, який дозволяє враховувати різні параметри для оптимізації маршрутів, зокрема затримку, рівень заряду батареї вузла, відношення сигнал / шум, пропускну здатність, втрати даних тощо.
- висока адаптивність до зміни умов, що забезпечує більш збалансоване й ефективне функціонування мережі.

Основним недоліком БА є складність реалізації та використання більшої кількості обчислювальних ресурсів для обробки декількох критеріїв одночасно.

ГА є потужним інструментом для розв'язання складних задач оптимізації завдяки своїй здатності шукати глобально оптимальні рішення в динамічно змінних умовах.

Доцільність огляду існуючих робіт з багатокритеріальної маршрутизації в БСМ обумовлена необхідністю систематизації та критичного аналізу наукових підходів, спрямованих на підвищення ефективності функціонування в умовах обмежених ресурсів та динамічно змінної топології. Пошук релевантних публікацій здійснювався у бібліотеці IEEE за ключовими словами «multi-criteria routing in wireless sensor networks». Враховуючи обмежену кількість безпосередньо знайдених результатів, для забезпечення повноти аналізу було додатково розглянуто частину досліджень, що наведені у списках літератури відповідних IEEE-публікацій. Такий підхід дав змогу сформулювати цілісне уявлення про сучасний стан проблеми та ідентифікувати напрями, які потребують подальшого розвитку.

У роботі [103] представлено кооперативний багатокритеріальний енергоощадний алгоритм для маршрутизації у безпроводних ad-hoc мережах. В якості критеріїв використано залишкову енергію вузлів та потужність передавання даних. Алгоритм здійснює вибір маршруту для кожної пари джерело-приймач у вигляді послідовності груп вузлів, що співпрацюють між собою. На основі отриманих результатів при моделюванні 20 сенсорних вузлів із різною та сталою потужністю передавання даних показано, що запропонований алгоритм дозволяє зменшити енергоспоживання та збільшити кількість доставлених пакетів.

Автори [104] здійснили дослідження практичних особливостей багатокритеріального підходу до вирішення задачі оптимальної маршрутизації в мережах зв'язку на основі поєднання таких показників якості: часу затримки при передачі пакетів, рівня втрат переданих пакетів, вартість використання лінії зв'язку. При використанні запропонованого рішення отримано вигрaш у три рази за показником втрат пакетів і у півтора рази за показником вартості використання ліній зв'язку порівняно зі скалярним підходом.

Робота [105] присвячена протоколу багатошляхової QoS-маршрутизації на основі стабільності маршруту. Авторами запропонована метрика маршрутизації для маршруту з i переходів, яка поєднує функцію, що базується на стабільності витрат, з такими метриками QoS як пропускна здатність та затримка. Представлені результати моделювання запропонованого рішення продемонстрували його

ефективність по критерію середньої наскрізної затримки, ймовірності втрати пакетів та пропускної здатності.

У [106] представлено схему маршрутизації в БСМ із використанням багатокритеріального режиму прийняття рішень, яка динамічно знаходить наступний вузол зі списку сусідів на основі залишкового заряду батареї, частоти передачі пакетів та кількості хопів його сусідів. При цьому параметри визначаються як критерії і кожному з них присвоюється певна вага. Результати роботи запропонованої схеми демонструють рівномірне використання вузлів з ефективним використанням заряду батареї вузлів.

Робота [107] описує поєднання показників центральності та багатокритеріальні алгоритми, щоб підвищити продуктивність БСМ шляхом впровадження підходу динамічної багатокритеріальної маршрутизації. Реалізовано основну концепцію, засновану на методах багатоатрибутного прийняття рішень (MADM) для вибору найкращих альтернативи (маршрути між кожним вузлом і приймачем, а також вузли маршрутизації) для створення дерева маршрутизації відповідно до вимог користувача та зміни стану мережі. Даний процес включає кілька параметрів, які впливають на споживання енергії: вартість зв'язку від сенсорного вузла до батьківського та залишкову енергію батьківського, що допомагає сенсорним вузлам досягти збалансованого розсіювання енергії в мережі. Використовуючи середовище Matlab, здійснено імітаційне моделювання, на основі якого показано, що розроблений алгоритм дозволяє зменшити енергоспоживання та збільшити термін служби мережі.

Автори [108] розробили енергоефективний алгоритм маршрутизації, який приймає рішення про наступний крок, використовуючи метод прийняття рішень за багатьма критеріями (MCDM). При цьому враховуються три фактори, які впливають на час життя мережі та передачу пакетів: відстань до вузла-отримувача та сусідніх вузлів, залишкова енергія та довжина черги на кожному вузлі. На основі результатів моделювання показано, що розроблений алгоритм суттєво збільшує час життя мережі та зменшує швидкість втрати пакетів у порівнянні із Energy Aware Routing (EAR) та Multipath Routing (MR).

У [109] представлено вдосконалення протоколу маршрутизації AOMDV для БСМ, що спрямоване на покращення відмовостійкості. Для цього вводиться додаткова метрика відсоток втрат пакетів, що додається до таблиці маршрутизації вузлів. На основі результатів моделювання, отриманих у NS-2, показано ефективність використання пропонованого рішення по критерію втрати пакетів. Вдосконалений алгоритм здійснює вибір маршруту на основі значення втрати пакетів і кількості переходів, при цьому основний критерій – втрата пакетів. Таким чином, алгоритм маршрутизації обирає маршрути з меншими втратами пакетів, проте вони будуть довшими.

Робота [110] описує три алгоритми для передачі даних у БСМ, при цьому тільки третій алгоритм є багатокритеріальним. Третій алгоритм враховує два критерії: залишкову енергію вузла та відстань від між вузлами. Кожний критерій має однакову вагу: 50% для залишкової енергії і 50% для відстані. Моделювання здійснено у середовищі Matlab. Отримані результати показали, що використання декількох критеріїв для вибору наступного вузла дозволяє збільшити час життя мережі. При цьому для оцінки використовувались такі метрики: загальна кількість енергії, витрачена на успішну передачу пакета; кількість раундів до першої відмови вузла; кількість нефункціонуючих вузлів.

Автори [111] пропонують нову схему, що підтримує багатокритеріальну маршрутизацію у БСМ на основі 4 критеріїв: семантики, QoS, місцезнаходження та безпеки. Критерій «семантика» включає такі атрибути як тип наступного датчика, тип/зміст даних рівень деталізації представлених даних, група датчиків тощо. Кожен критерій має вагу, пропорційну своєму ступеню важливості. Для моделювання використано симулятор GTSNeTS, протокол маршрутизації – Multipath Ring Routing. Отримані результати продемонстрували можливість використання пропонованої схеми для існуючого протоколу маршрутизації у БСМ.

У [112] представлено схему ГА для пошуку маршруту передачі даних по декільком критеріям. Наведено математичну постановку задачі багатокритеріальної оптимізації. Описано формалізовану задачу пошуку оптимального шляху на графі

для k -критеріїв оптимізації. Проте у роботі не наведено результатів імітаційного моделювання, що б підтверджували ефективність роботи розробленого ГА.

Сучасні наукові публікації підтверджують зростаючий інтерес до використання еволюційних та інтелектуальних методів (зокрема, ГА, машинного навчання) у задачах маршрутизації, однак у більшості випадків вони застосовуються локально й без глибокого аналізу ефективності для різних сценаріїв мереж.

Багатокритеріальна маршрутизація даних у БСМ є однією з ключових і водночас складних задач, оскільки вона потребує одночасного врахування низки взаємопов'язаних параметрів - енергоспоживання, затримки передачі, рівня втрат пакетів тощо. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, більшість існуючих підходів орієнтовані на використання класичних алгоритмів маршрутизації або методів, що оптимізують лише два / три критерії. Це обмежує їхню практичну ефективність у складних умовах функціонування сенсорних мереж із динамічно змінною топологією та обмеженими ресурсами.

У цьому контексті слід зазначити, що дослідження можливостей застосування еволюційних стратегій для вирішення задач маршрутизації залишаються недостатньо розробленими. Це створює наукову нішу для подальших досліджень, спрямованих на розроблення методів маршрутизації, здатних забезпечити баланс між енергетичною ефективністю, затримками передачі та надійністю зв'язку.

Отже, оптимальне розміщення вузлів у БСМ та маршрутизація тісно взаємопов'язані, оскільки якість топології безпосередньо визначає ефективність процесів передачі даних. Невдале або нераціональне розташування вузлів призводить до виникнення «вузьких місць», підвищення затримок та надмірного енергоспоживання, що у свою чергу ускладнює забезпечення стабільних маршрутів у мережі. Водночас навіть за умови оптимального розміщення вузлів ефективність функціонування БСМ значною мірою залежить від вибору маршрутів передачі даних.

У цьому контексті застосування ГА є перспективним, оскільки він може ефективно вирішувати задачі з великою кількістю змінних, що мають конфліктні критерії, та знаходити компромісні рішення у складних багатовимірних просторах.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі здійснено огляд робіт щодо використання генетичної еволюції для підвищення ефективності доставки даних у безпроводних сенсорних мережах, на основі чого зроблено такі висновки:

- ГА є важливим інструментом для покращення мережевих процесів в умовах зростаючого обсягу трафіку, кількості мережевих вузлів та зміни їх розташування;
- ефективне використання ГА потребує його налаштування відповідно до особливостей задачі та обчислювального середовища.

Розглянуто структуру та особливості функціонування безпроводної сенсорної мережі. Проаналізовано особливості функціонування основних видів генетичних операторів: операторів відбору, схрещування та мутації. Запропоновано авторську класифікацію ГА за такими критеріями: принцип налаштування параметрів для схрещування та мутації, вид фітнес-функції, вид алгоритму та тип мережевих задач, що дозволяє систематизувати знання про особливості, принцип роботи ГА та покращити розуміння факторів, які впливають на їх ефективність в контексті сучасних мереж.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують доцільність і перспективність застосування ГА для підвищення ефективності функціонування сучасних мереж зв'язку.

РОЗДІЛ 2. МЕТОД АДАПТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТУ МІНІМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ МІЖ СЕНСОРНИМИ ВУЗЛАМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

2.1. Розроблення методу із використанням еволюційного пошуку та динамічної адаптації імовірності схрещування та мутації

У БСМ задача визначення маршруту мінімальної довжини між сенсорними вузлами є важливою для забезпечення енергоефективності, зниження затримки передавання та підвищення надійності передачі даних. Особливої актуальності вона набуває в умовах динамічно змінної топології, коли вихід з ладу вузлів або їх додавання потребують автоматичного оновлення маршрутів.

З огляду на складність оптимізаційної задачі та її залежність від множини факторів (щільність мережі, неоднорідні радіуси дії), доцільним є застосування еволюційних підходів, зокрема ГА, здатних ефективно обробляти складні простори рішень.

Розроблений метод базується на використанні еволюційного пошуку в просторі конфігурацій маршрутів, де кожна особина популяції (шлях між заданими вузлами мережі) є послідовністю генів, кожен з яких відповідає за конкретну вершину (вузол) маршруту.

Замість статичного налаштування операторів еволюції пропонується застосовувати динамічну адаптацію імовірності схрещування та мутації, що підлаштовує їх інтенсивність під поточний стан популяції. Таке адаптивне регулювання параметрів ГА є ключовим компонентом запропонованого методу, оскільки воно забезпечує баланс між інтенсивністю глобального пошуку та здатністю до локального вдосконалення маршруту у сенсорній мережі зі змінною топологією.

Отже, запропонований метод передбачає формування маршруту мінімальної довжини за критерієм мінімізації сумарної ваги шляху між сенсорними вузлами з використанням динамічно адаптивних параметрів, що дає змогу підвищити збіжність процесу, уникнути передчасної конвергенції та зберегти різноманіття у популяції рішень.

2.2. Модифікований генетичний алгоритм визначення адаптивного маршруту для безпроводних сенсорних мереж

Ефективність роботи ГА значною мірою залежать від виду використаного генетичного оператора та значення імовірності схрещування та мутації [113 - 117].

Для покращення збіжності ГА пропонується використовувати динамічне корегування значення імовірності схрещування на основі оцінки значення фітнес-функції $F(x)_{set_r}$ для множини маршрутів та i -ого маршруту $F(x)_{r_i}$ у певному поколінні на основі (2.1). Таким чином, здійснюється порівняння цих двох значень, на основі чого визначається рівень якості певної особини.

Динамічну зміну p_{cross} можна представити як [135]:

$$p_{cross} = \begin{cases} \frac{a + (b - a)(F(x)_{\max_set_r} - F(x)_{r_i})}{F(x)_{\max_set_r} - F(x)_{aver}}, \text{ при } F(x)_{r_i} \succ F(x)_{aver} \\ \frac{a + b}{2}, \text{ при } F(x)_{r_i} = F(x)_{aver} \\ b, \text{ при } F(x)_{r_i} \prec F(x)_{aver} \end{cases}, \quad (2.1)$$

де a, b – числа, які позначають нижню та верхню межу заданої імовірності схрещування відповідно; $F(x)_{\max_set_r}$ – максимальне значення фітнес-функції маршрутів для покоління; $F(x)_{aver}$ – середнє значення фітнес-функції, отримане для поточного покоління; $F(x)_{r_i}$ – значення фітнес-функції, яке отримується на основі вибору кращого значення при розгляді двох значень вибраних особин для схрещування.

Принцип динамічної адаптації p_{cross} побудований на наступному:

- зменшення p_{cross} при високій якості фітнес-функції (значення, які відповідають кращим маршрутам на основі певного критерію), оскільки такі маршрути уже мають певні позитивні характеристики, а схрещування може призвести до їх втрати. Крім цього схрещування таких маршрутів з більшою ймовірністю призведе до повторення вже існуючих маршрутів та зменшення

різноманіття у популяції. Дане рішення призначене для мінімізації погіршення характеристик маршрутів шляхом зменшення p_{cross} .

- при середній якості фітнес-функції розглядається застосування середнього арифметичного значень діапазону імовірності схрещування, що дозволяє балансувати процес пошуку оптимального маршруту;

- збільшення p_{cross} при низькій якості фітнес-функції, оскільки такі маршрути (значення, які відповідають гіршим маршрутам на основі певного критерію) мають потенціал для покращення. Таким чином, збільшення p_{cross} прискорює пошук оптимального маршруту.

Аналогічний принцип динамічної адаптації використано для p_{mut} . На основі (2.1), можна сказати, що значення p_{mut} є меншим для більш пристосованих особин і більшим – для менш пристосованих.

Проаналізувавши параметри ГА 50-ти робіт, представлених у 1 розділі цієї дисертації, для динамічного корегування відповідно до (2.1) вибрано такі діапазони:

$p_{cross_adapt} = [0.5; 0.8]$, $p_{mut_adapt} = [0.05; 0.2]$. Вибір видів генетичних операторів здійснено на основі аналізу робіт [87, 118-120].

Блок-схема розробленого ГА із використанням динамічної адаптації імовірності схрещування та мутації представлена на рис. 2.1.

Оцінка пристосованості особини $F(r)_i$ визначається як [89]:

$$F(r)_i = 1 / \sum_{j=1}^{l_i-1} r_i(j, j+1), \quad (2.2)$$

де l_i – довжина особини, що відповідає кількості генів; r_i – особина, яка являє собою маршрут для передачі даних; $(j, j+1)$ – вага ребра між двома сусідніми вершинами.

Відповідно до (2.2) пристосованість особини обернено пропорційна вазі маршруту.

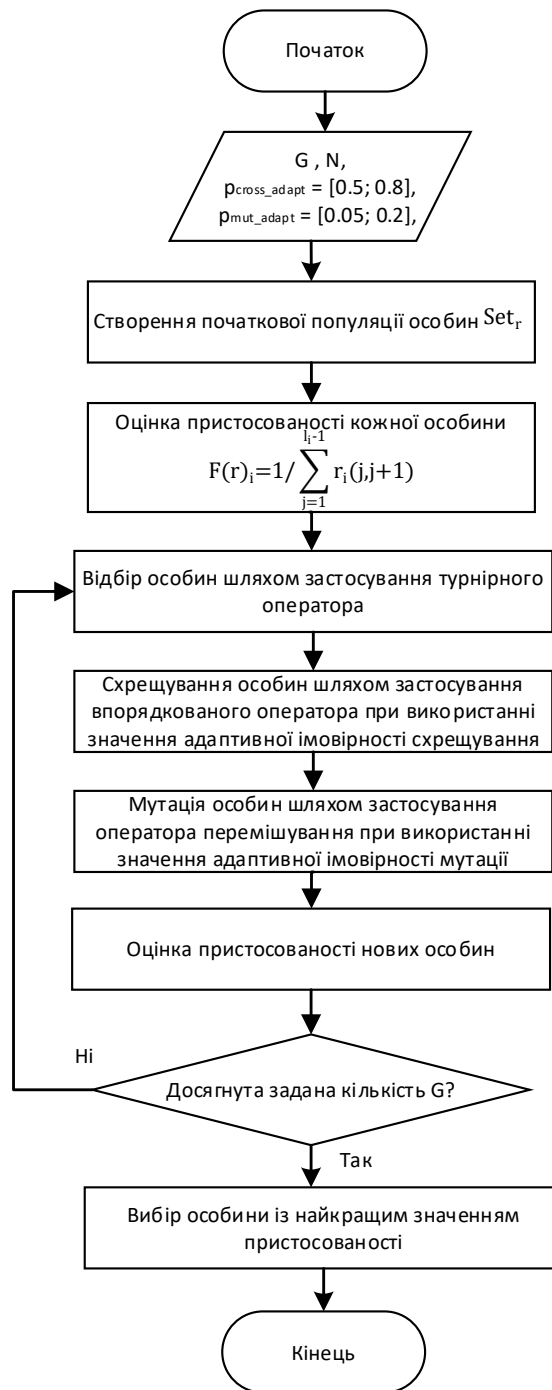


Рис. 2.1. Узагальнена блок-схема розробленого ГА [89]

2.3. Оцінка обчислювальної складності генетичного алгоритму

Під вхідними даними (ВД) для ГА будемо розуміти розмір особини, розмір популяції, кількість поколінь тощо. Оскільки цю функцію, як правило, важко обчислити точно, а час виконання ВД малої розмірності зазвичай не має жодного значення, то зосереджуються на поведінці складності при збільшенні розміру ВД, тобто на асимптотичній поведінці.

Асимптотична складність являє собою О-нотацію, позначається як O та застосовується для опису верхньої межі часової або просторової складності алгоритму. Вона дозволяє оцінити швидкість зростання часу виконання або використання ресурсів при зміні розмірності ВД [121].

Здійснимо оцінку асимптотичної складності ГА, що вказує на те, як змінюється продуктивність алгоритму при збільшенні розміру популяції, розміру хромосоми та інших параметрів, а також при наближенні до великих розмірів вхідних даних. Саме асимптотична складність найчастіше використовується для визначення загальної тенденції алгоритму при збільшенні розміру вхідних даних, а не конкретних значень для певного розміру [121].

Обчислювальна складність для ГА визначається витратами на формування початкової популяції та витратами на виконання еволюції [121, 122]:

$$T_{sum} = P \cdot T_{sol} + \sum_{i=1}^G T_i, \quad (2.3)$$

де P - розмір популяції; T_{sol} - середній час побудови рішень; T_i - час виконання еволюції для i -го покоління; G - загальна кількість поколінь.

Еволюція ГА відбувається через ітерації, під час яких покоління індивідів піддаються певним операціям з метою знаходження оптимального рішення. Розрахунок T_i проводиться на основі часу, витраченого на схрещування хромосом, часу виконання мутації, а також часу декодування хромосом, яке по суті полягає в формуванні рішень для розглянутої множини даних.

Таким чином, T_i можна визначити як [121]:

$$T_i = P \cdot p_{cross} \cdot 2T_{cross_i} + P(1 + p_{cross} \cdot 2) \cdot p_{mut} \cdot T_{mut_i} + P(1 + p_{cross} \cdot 2) \cdot T_{decod_i}, \quad (2.4)$$

де p_{cross} - імовірність виконання схрещування для кожної особини (оскільки при цьому утворюється два нащадки, ймовірність у формулі теж подвоюється); p_{mut} - імовірність мутації особин у популяції (застосовується не тільки для вихідної популяції, а й для нових утворених особин); T_{cross_i} - час схрещування однієї пари

хромосом; T_{mut_i} – час мутації однієї хромосоми; T_{decod_i} – час декодування хромосоми для розглянутої множини даних.

Часова складність оператора схрещування залежить від кількості вузлів обраних хромосом. Оператор мутації полягає в зміні значення деяких евристик (перемішування, вставки, заміни, тощо). Обидві перелічені операції мають часову складність, нехтувано малу порівняно з часом побудови рішень, тому її можна розглядати як константу, а час виконання етапу (покоління) еволюції можна оцінити за часом декодування хромосоми [121]:

$$T_i = O(P \cdot T_{decod_i}). \quad (2.5)$$

Час декодування хромосоми залежить від часу обчислення відстаней між вузлами, побудови маршруту та при наявності – оптимізаційних технік (застосування попередньо обчислених відстаней, оптимізованих структур даних тощо). Час декодування T_{decod_i} зростає пропорційно зі збільшенням кількості вузлів, відповідно можна визначити як [121]

$$T_{decod_i} = O(T_{dist} \cdot N_{numb_n_r} + C), \quad (2.6)$$

де T_{dist} – час обчислення відстані між вузлами; $N_{numb_n_r}$ – кількість вузлів у маршруті; C – константа, що представляє додаткові обчислення і операції, які можуть залежати від методу декодування, оптимізаційних технік тощо.

Декодування хромосоми в контексті задачі маршрутизації означає перетворення генетичного коду (хромосоми) в фактичний маршрут, який проходить через всі вузли без повторень. Хромосома складається з генів, які відповідають індексам вузлів в послідовності. Процес декодування полягає в перетворенні послідовності генів в послідовність вузлів, яка відповідає оптимальному маршруту.

Декодування може включати розрахунок відстаней між вузлами та визначення послідовності вузлів, що дає найкоротший шлях. Чим більше вузлів, тим більше часу може зайняти декодування хромосоми. Це пов'язано зі збільшенням кількості операцій порівняння та доступу до даних при відтворенні маршруту.

Варто зауважити, що (2.6) є спрощеною моделлю і не враховує всі можливі фактори, які впливають на час декодування. Додаткові параметри, такі як швидкодія

алгоритмів обчислення відстаней та наявність оптимізаційних методів, також можуть бути включені в формулу для більш точного визначення часу декодування [120]. Для ГА час декодування хромосоми залежить від кількості вузлів у задачі маршрутизації, відповідно можна оцінити цей час як лінійний [121].

Загальну часову складність декодування хромосом $T_{\sum_{\text{decod}_i}}$ на всіх етапах еволюції можна представити як:

$$T_{\sum_{\text{decod}_i}} = T_{\text{init}_p} + \sum_{l=1}^R P \cdot \sum_{j=1}^N T_j, \quad (2.7)$$

де T_{init_p} – час формування початкової популяції; R – множина маршрутів; N – кількість вузлів, які утворюють маршрут.

$$T_{\text{init}_p} = \sum_{l=1}^R X_l, \quad (2.8)$$

де X_l – розмір l -ої особини (маршруту) із початкової популяції.

Аналізуючи вищенаведені формули та дані, представлені у роботах [123-125], можна зробити висновок, що час виконання ГА має лінійну залежність від розміру розглянутих вхідних даних. В підсумку, загальну асимптотичну складність ГА можна представити як $O(P \cdot G \cdot T_{\text{evol}})$.

2.4. Метрики відстані для маршрутизації даних

Метрики відстані є ключовими елементами алгоритмів маршрутизації даних у СМ, визначаючи ефективність передачі даних та використання відповідних ресурсів.

У контексті маршрутизації метрика використовується для визначення найкращого маршруту для передачі даних. У цьому розділі розглядається визначення найкоротшого маршруту даних, відповідно розглянемо особливості функціонування основних метрик відстані [126-129].

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботі [130].

Евклідова відстань d_E являє собою прямолінійну відстань між двома точками в Евклідовому просторі.

У двовимірному просторі d_E між двома точками із координатами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) можна визначити як

$$d_E = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (2.9)$$

При розгляді простору із більшою кількістю вимірів d_E визначається як

$$d_E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (2.10)$$

де n – розмірність простору.

У топології мережі вузли можуть бути представлені як точки в геометричному просторі. Евклідова відстань між цими точками може бути метрикою для прийняття рішень про певний маршрут. У БСМ мінімізація d_E дозволяє зменшити енергоспоживання, оскільки коротші відстані зазвичай потребують менше енергії для передачі даних. Проте d_E не враховує фізичні перешкоди чи інші мережеві обмеження (технічні, ресурсні), які можуть вплинути на фактичну довжину маршруту. Також перед використанням даної метрики потрібно здійснити нормування даних. Отже, Евклідова відстань є простим засобом для проєктування мереж зв'язку, оцінки маршрутів у БСМ тощо.

Манхеттенська відстань d_{MT} , також відома як відстань L_1 або метрика таксі, вимірює відстань між двома точками в просторі, де дозволені рухи тільки по вертикалі або горизонталі. Назва «метрика таксі» пов'язана із представленням процесу вимірювання найкоротшого шляху, яким проїде таксі між кварталами міста, координати яких є на сітці.

На відміну від Евклідової відстані, яка обчислює найкоротший шлях по прямій, d_{MT} вимірює суму абсолютних різниць їхніх декартових координат. Ця метрика особливо корисна для маршрутизації в мережевих топологіях, в яких вузли розташовані у вигляді сітки, де кожен вузол з'єднаний із сусідніми. d_{MT} між двома точками із координатами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) можна визначити як

$$d_{MT} = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|. \quad (2.11)$$

Для n -вимірного простору d_{MT} визначається як

$$d_{MT} = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (2.12)$$

На відміну від Евклідової метрики, d_{MT} працює за великих розмірностей, але є менш інтуїтивно зрозумілою.

Відстань Чебишова d_{CH} (метрика шахової дошки, відстань максимального значення) застосовується у випадках, коли два об'єкти відрізняються між собою однією координатою, тобто відстань між двома точками є найбільшою з їхніх різниць уздовж певного координатного виміру. Назва «метрика шахової дошки» пов'язана із мінімальною кількістю ходів, які потрібно здійснити королю у будь-якому напрямку (зокрема по діагоналі) для переходу від одного ігрового поля до іншого. d_{CH} для точок із координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ можна визначити як

$$d_{CH} = \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|). \quad (2.13)$$

У порівнянні із Манхеттенською відстанню, відстань Чебишова є меншою. Дану метрику доцільно використовувати у мережах, для яких характерне переміщення вузлів у всіх напрямках, включно із діагоналями.

Відстань Мінковського d_M між двома точками в n -вимірному просторі – це узагальнення таких відстаней як Манхеттенська, Евклідова та Чебишова. Цю метрику ще називають вектором p -норми, оскільки додається параметр p , який дозволяє обчислювати різні вимірювання відстані. d_M між двома точками $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ та $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ можна визначити як

$$d_M = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p}, \quad (2.14)$$

при цьому якщо $p = 1$, то це Манхеттенська метрика; якщо $p = 2$, то це Евклідова метрика; якщо $p = \infty$, то це метрика Чебишова; якщо $p < 1$, то отримана величина не є метрикою, оскільки порушується аксіома трикутника.

Відстань Мінковського застосовується у багатьох напрямках завдяки своїй гнучкості в адаптації до обчислень відстані на основі різних критеріїв.

Підсумовуючи розглянуті метрики відстані, варто відзначити наступне:

- Евклідову метрику доцільно використовувати для БСМ, які розгорнуті на рівнинних територіях або у приміщеннях, де відстані між вузлами можна вимірювати прямолінійно.

- метрика Чебишова дозволяє враховувати прямолінійну відстань та обхід перешкод на шляху, внаслідок чого її доцільно використовувати для мереж, вузли яких розташовані у формі решітки, наприклад, в міських умовах.

- Манхеттенську метрику доцільно використовувати для мереж, розгорнутих у міських умовах, де маршрути часто є прямокутними через міську забудову.

- метрика Мінковського може адаптуватися до різних умов і топологій мережі шляхом зміни параметра p , що дозволяє оптимізувати маршрутизацію із врахуванням специфічних умов експлуатації мережі.

2.5. Дослідження ефективності застосування генетичного алгоритму для визначення маршруту за критерієм мінімальної відстані

Працездатність представленого ГА перевірялася в ході імітаційного експерименту з використанням розробленого програмного продукту, написаного на Python з інтеграцією бібліотеки DEAP.

Для моделювання використано 25 сенсорних вузлів, місцезнаходження яких задано випадковим чином, при цьому мережа розглядається у фіксований момент часу. Вважається, якщо вузол віддалений від іншого вузла на більшу відстань, ніж заданий радіус його дії, то передача даних неможлива.

У зв'язку з цим для такого випадку використовувався штраф, використання якого стимулювало ГА вибирати маршрути із меншою відстанню.

Для порівняння ефективності роботи ГА вибрано ЖА, який є потужним інструментом для пошуку маршрутів завдяки простоті реалізації, швидкості обчислень та невеликим вимогам до об'єму необхідної пам'яті [129, 130]. Кожен вузол приймає рішення щодо наступного кроку на основі мінімальної відстані до

наступного доступного вузла, що зменшує складність алгоритму і зменшує використання обчислювальних ресурсів.

На рис. 2.2 представлено блок-схему роботи ЖА при пошуку маршруту передачі даних у мережі.

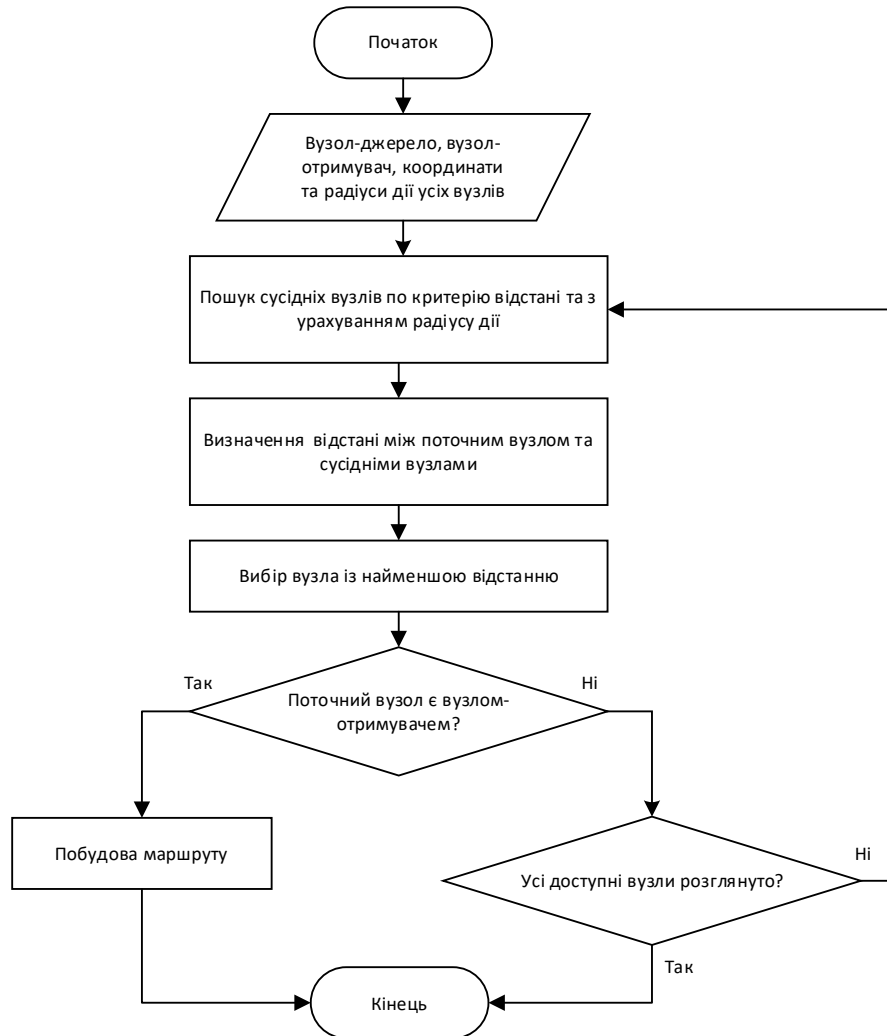


Рис. 2.2. Узагальнена блок-схема роботи ЖА

ЖА характеризується локальним пошуком, відповідно до якого вузли не мають інформації про глобальну структуру мережі або про всі можливі маршрути. Вони працюють з обмеженою інформацією, що дозволяє знизити складність виконуваних обчислень.

Локальний характер прийняття рішень дозволяє цьому алгоритму здійснювати оперативне реагування на зміни в мережі, зокрема на вихід з ладу / додавання вузлів. При цьому немає необхідності у глобальному переформуванні маршруту передачі даних. Кожен вузол може незалежно приймати нові рішення на основі

актуальної інформації про сусідні, що позитивно впливає на загальну надійність мережі [131].

Однією із основних переваг жадібного алгоритму є масштабування, що робить його доцільним для використання у великих мережах.

Таким чином, цей вид алгоритмів можна застосовувати для маршрутизації даних у мережах із динамічно змінною топологією, зокрема для БСМ.

Цей алгоритм може завершувати свою роботу у двох випадках:

- 1) при досягненні вузла-отримувача, внаслідок чого формується маршрут;
- 2) при неможливості отримати зв'язок із наступним транзитним вузлом або вузлом-отримувачем, що спричиняє відсутність встановлення успішного маршруту.

У якості другого алгоритму для порівняння вибрано мурашиний (МА) як один із найбільш ефективних евристичних для маршрутизації в БСМ [132] (рис. 2.3).

Його основна ідея полягає у формуванні маршруту шляхом колективної взаємодії агентів – «мурашок», які поступово накопичують інформацію про якість шляхів у вигляді феромонних слідів.

Такий механізм добре відповідає сутності маршрутизації в БСМ, оскільки вузли можуть використовувати локальні дані, прийняття рішень відбувається децентралізовано, внаслідок чого алгоритм добре працює в умовах нестабільності та збоїв. Саме ці характеристики роблять МА адекватним для порівняння з розробленим ГА.

Розглянута реалізація МА складається з трьох основних процедур:

- побудови маршруту окремою мурашкою,
- оновлення матриці феромонів,
- ітеративного циклу колонії, що визначає глобально найкращий шлях.

На початковому етапі задається кількість мережевих вузлів, радіус їх дії, вузол-джерело та вузол-отримувач, радіус дії вузлів, кількість мурах M , кількість ітерацій T , ініціалізується рівномірний розподіл феромонів між сусідніми вузлами.

Для мурашки задаються параметри руху: коефіцієнти впливу феромону α та евристичної інформації β , швидкість випаровування феромону ρ , константа для відкладення феромону q .

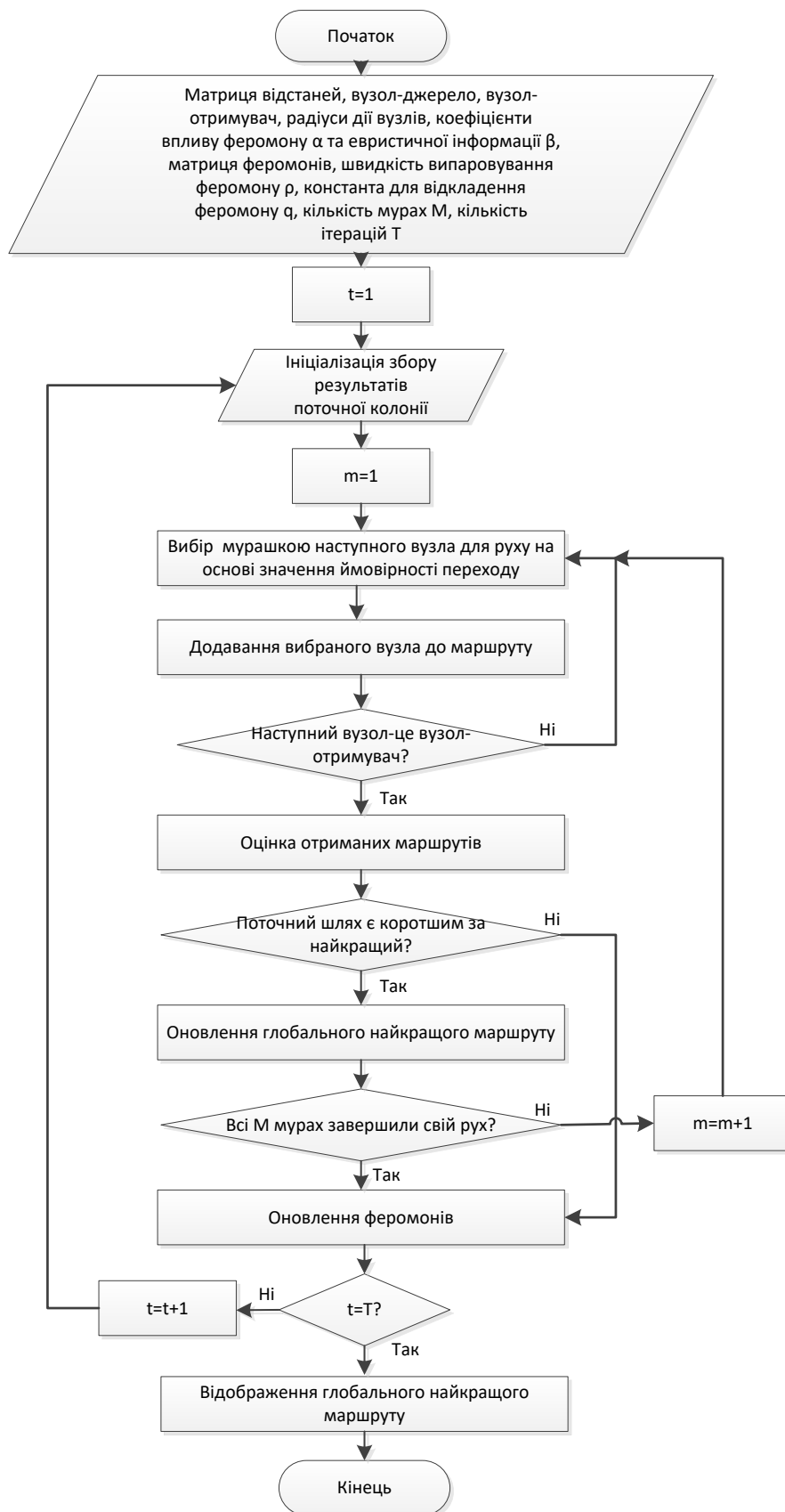


Рис. 2.3. Узагальнена блок-схема роботи МА

Для наведеного алгоритму на рис. 2.3 під час реалізації задано такі параметри:

$$M = 10, T = 100, \rho = 0.5, q = 100, \alpha = 1, \beta = 2.$$

На початку кожної ітерації ініціалізується збір результатів поточної колонії – структура, яка зберігає знайдені мурахами маршрути, їх довжини та інші метрики (наприклад, кількість переходів тощо).

Процес побудови маршруту для кожної мурахи m починається із встановлення її в стартовий вузол (вузол-джерело). Далі відбувається ітеративний вибір наступного вузла для руху. Вибір базується на значеннях ймовірності переходу, яка комбінує два чинники:

- поточний рівень феромону на ребрі (історичний досвід інших мурах),
- евристичну інформацію (наприклад, обернена відстань, поточна якість каналу, залишок енергії проміжних вузлів тощо).

Вплив цих складових регулюється ваговими коефіцієнтами (α – для феромонів, β – для евристики).

Для мурахи, що знаходиться у вузлі i та має обрати наступний вузол j зі множини допустимих переходів Ω_i , ймовірність переходу P_{ij} визначається правилом [133]:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in \Omega_i} \tau_{ik}^{\alpha} \eta_{ik}^{\beta}}, & \text{якщо } j \in \Omega_i, \\ 0, & \text{якщо } j \notin \Omega_i \end{cases}, \quad (2.15)$$

де Ω_i – множина доступних сусідніх вузлів, у які мураха може перейти з вузла i ;
 τ_{ij} – поточний рівень феромону на ребрі між вузлами i та j , що відображає колективну пам'ять колонії. Чим більший рівень феромону, тим більша ймовірність, що маршрут є кращим;

η_{ij} – евристична інформація, що описує привабливість переходу $i \rightarrow j$. Для маршрутизації в БСМ: $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, де d_{ij} – відстань між вузлами або вагова метрика;
 α – параметр ваги феромону, що визначає, наскільки сильно мураха враховує досвід інших;

β – параметр ваги евристики, що визначає, наскільки рішення залежить від локальних характеристик (наприклад, відстані);

$\sum_{k \in \Omega_i} \tau_{ik}^\alpha \eta_{ik}^\beta$ – загальна привабливість всіх можливих наступних вузлів, яка нормалізує всі ймовірності як $\sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 1$, що сприяє стохастичному характеру вибору та забезпечує конкуренцію між можливими шляхами.

Практична реалізація етапу побудови мурахою маршруту включає:

- множину допустимих сусідів (щоб запобігти поверненню у вже відвідані вузли),
- обчислення нормалізованих ймовірностей для всіх допустимих переходів,
- стохастичну вибірку наступного вузла відповідно до цих ймовірностей.

Після вибору вузол додається до поточного маршруту мурахи.

Така побудова триває до досягнення вузла-одержувача або досягнення іншого критерію зупинки (перевищення максимальної довжини шляху або відсутності допустимих переходів). Якщо наступний вузол – вузол-одержувач, то маршрут вважається побудованим. В іншому випадку процес повертається до вибору наступного вузла.

Після завершення маршруту кожна мураха отримує оцінку придатності (якість маршруту). Оцінка може бути одно- або багатокритеріальною, у цьому розділі розглядається однокритеріальна на основі загальної довжини маршруту.

Після оцінки кожного маршруту проводиться порівняння з поточним глобальним (за ітерацію або за весь час виконання) найкращим маршрутом. Якщо поточний шлях виявився кращим за збережений (за заданою метрикою), глобальний найкращий маршрут оновлюється.

Після побудови і оцінки маршруту поточною мурахою перевіряється, чи всі M мурах завершили свій рух у межах поточної ітерації. Якщо ні – індекс мурахи збільшується і виконується побудова маршруту наступною мурахою. Якщо всі мурахи завершили свою роботу, відбувається перехід до етапу оновлення феромонів.

Оновлення феромонів є ключовим механізмом зворотного зв'язку, що дозволяє накопичувати інформацію про якість знайдених шляхів. Процедура має два основні компоненти:

– Випаровування феромону: на кожному ребрі поточні значення феромону зменшуються в пропорції, визначеній параметром випаровування ρ . Це запобігає надмірному підсиленню старих рішень і дозволяє новим маршрутам впливати на пошук.

– Обкладення (депонування) феромону: на ребра, що входять в побудовані маршрути (часто саме на ребра глобально найкращого або кращих маршрутів певного циклу), додається кількість феромону, пропорційна якості маршруту (наприклад, обернено пропорційна довжині). Константа q регулює абсолютний обсяг феромону, що відкладається.

Після оновлення феромонів перевіряється, чи досягнуто заданої кількості ітерацій $t = T$ (термінальний критерій). Якщо ні, інкрементується лічильник ітерацій i і процес повторюється. Якщо так, то виконується фінальна обробка та відображення (збереження) глобального найкращого маршруту і завершення алгоритму.

– для вузлів із однаковим радіусом дії

Для моделювання використано 25 вузлів, розміщених випадковим чином в умовах вільного простору на ділянці, розміром 100×100 м (рис. 2.4). Радіус дії кожного вузла – 30 м, якщо вузол віддалений від іншого вузла на більшу відстань, то передача даних неможлива, що спричиняє введення штрафу на відстань – 1000 м [89].

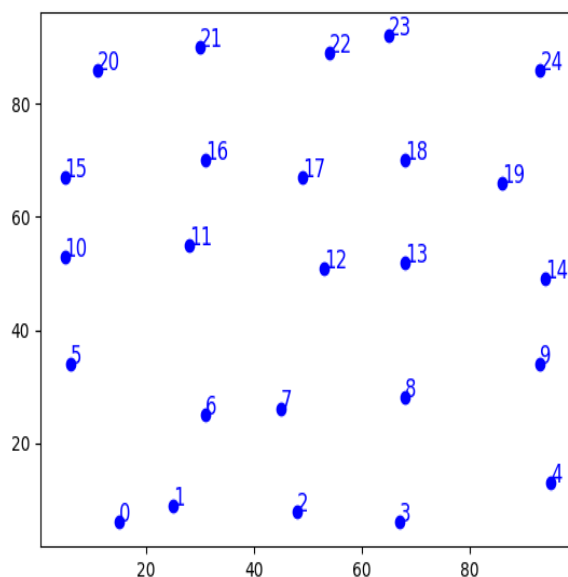


Рис. 2.4. Топологія досліджуваної сенсорної мережі

Здійснено моделювання процесу встановлення маршруту між вузлами 4 і 20 при використанні Евклідової метрики для представленого ГА, жадібного (ЖА) та мурашиного (МА) алгоритмів. На рис. 2.5 – 2.7 представлено матриці вузлів розглянутої мережі, що містить інформацію про взаємозв'язки між сенсорними вузлами при застосуванні авторського ГА, ЖА та МА відповідно. Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботі [130].

GA Distance Matrix																												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
1	0	10	1000	1000	1000	29	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
2	10	0	23	1000	1000	1000	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
8	1000	26	18	29	1000	1000	14	0	23	1000	1000	1000	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
9	1000	1000	28	22	30	1000	1000	23	0	25	1000	1000	27	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000			
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	26	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000			
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000			
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	29	1000	1000	26	0	18	1000	1000	25	20	29	1000	1000			
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	1000	1000	29	22	29	1000			
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29			
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	21			
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000	1000			
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000			
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000			
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	11	0	28			
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	21	1000	1000	1000	28	0			

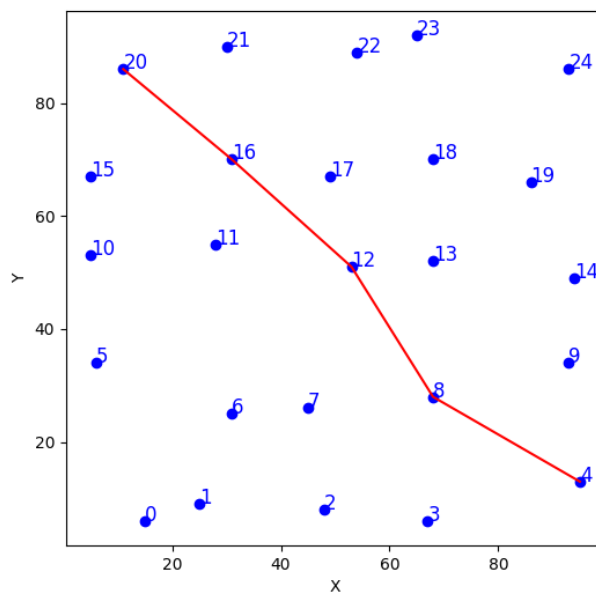
Рис. 2.5. Матриця відстаней для авторського ГА

Greedy Distance Matrix																											-	□	×
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
1	0	10	1000	1000	1000	29	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
2	10	0	23	1000	1000	1000	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
8	1000	26	18	29	1000	1000	14	0	23	1000	1000	1000	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
9	1000	1000	28	22	30	1000	1000	23	0	25	1000	1000	27	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000				
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	26	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000				
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000				
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	29	1000	1000	26	0	18	1000	1000	25	20	29	1000	1000				
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	1000	1000	29	22	29	1000				
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29				
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	21				
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000				
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000				
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000				
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	11	0	28				
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	21	1000	1000	1000	28	0				

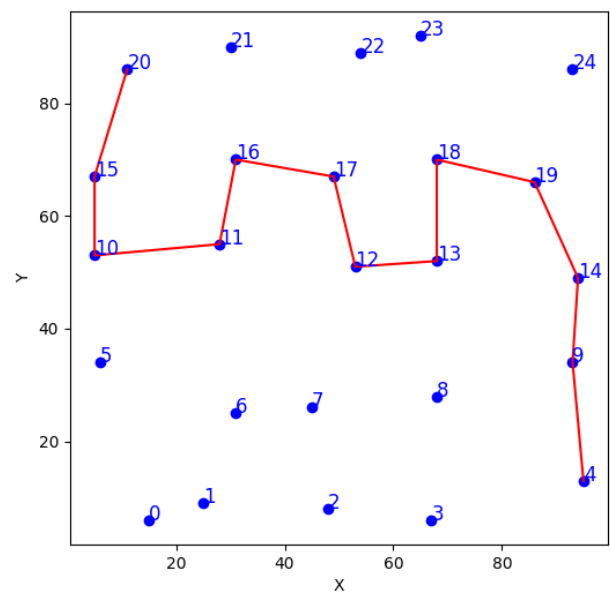
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	10	1000	1000	1000	29	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	10	0	23	1000	1000	1000	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	19	0	28	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	26	18	29	1000	1000	14	0	23	1000	1000	1000	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	28	22	30	1000	1000	23	0	25	1000	1000	27	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	26	0	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	29	1000	1000	26	0	18	1000	1000	25	20	29	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	1000	1000	29	22	29	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29	1000
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	21	1000
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	11	0	28	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	21	1000	1000	1000	28	0	1000

Рис. 2.7. Матриця відстаней для МА

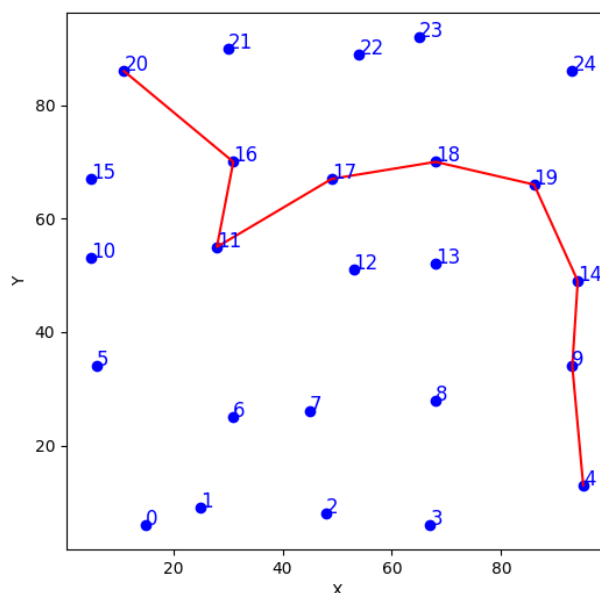
Рис. 2.8 демонструє сформований маршрут передачі даних між розглянутими вузлами при застосуванні трьох алгоритмів.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2.8. Отриманий маршрут при використанні (а) авторського ГА,
(б) ЖА, (в) МА

Отримані результати моделювання роботи розглянутих алгоритмів (рис. 2.8) представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняння утворених маршрутів при використанні авторського ГА, ЖА та МА для мережі із 25 вузлів із однаковим радіусом дії

Алгоритм	Утворений маршрут із номерами вузлів	Довжина маршруту
Розроблений генетичний	{4, 8, 12, 16, 20}	111
Жадібний	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	210
Мурашиний	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 11, 16, 20}	155

На основі даних, представлених у таблиці 2.1, можна зробити такі висновки:

– застосування авторського ГА забезпечує формування маршруту з істотно меншою довжиною порівняно з альтернативними підходами. Зокрема, отримана довжина маршруту є на 47,14% меншою, ніж у випадку використання ЖА, та на 28,39% – для МА.

– кількість переходів (хопів) у маршруті, сформованому за допомогою ГА, також є суттєво меншою: у три рази порівняно з ЖА та у два рази порівняно з МА. Зменшення кількості хопів безпосередньо сприяє підвищенню ефективності процесу

маршрутизації в БСМ, оскільки нижча кількість ретрансляцій позитивно впливає на енергоспоживання та затримку передавання даних.

Визначення оптимальної кількості поколінь та розміру популяції для ГА експериментальним шляхом є критично важливим для його успішного застосування в задачах маршрутизації даних у БСМ. Експериментальний підхід дозволяє врахувати специфіку конкретної мережі та умов експлуатації.

У зв'язку з цим було здійснено серію експериментів із різними комбінаціями кількості поколінь та розміру популяції, при цьому визначалась ефективність алгоритму за критеріями відстань / час. Для дослідження було вибрано діапазон N від 300 до 600 із кроком 100, діапазон G від 50 до 600 із кроком 50.

У таблиці 2.2 представлено експериментальні дані, отримані при пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для розглянутого випадку [130].

Ці дані дозволили визначити оптимальні значення кількості поколінь та розміру популяції для ефективного розв'язання поставленої задачі, що сприяло досягненню найкращого балансу між швидкістю виконання та якістю пошуку маршруту передачі даних у сенсорній мережі.

Таблиця 2.2

Результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для різних значень розміру популяції та кількості поколінь

Кількість поколінь	Розмір популяції			
	300	400	500	600
50	1000 / 7.674	1000 / 9.769	1000 / 11.716	1000 / 14.106
100	1000 / 13.775	1000 / 17.990	121 / 22.007	1000 / 26.025
150	111 / 18.477	111 / 25.339	121 / 30.317	111 / 36.875
200	111 / 24.222	111 / 32.643	116 / 40.696	111 / 48.393
250	111 / 30.230	111 / 41.328	116 / 52.776	111 / 61.160
300	111 / 37.335	111 / 48.937	116 / 60.752	111 / 72.612
350	111 / 42.361	111 / 56.537	116 / 70.739	111 / 85.025
400	111 / 49.483	111 / 65.444	116 / 80.583	111 / 97.175
450	111 / 55.017	111 / 73.323	116 / 91.222	111 / 110.051
500	111 / 62.742	111 / 81.001	116 / 100.910	111 / 121.410
550	111 / 67.932	111 / 88.989	116 / 111.296	111 / 134.318
600	111 / 72.875	111 / 100.076	116 / 121.602	111 / 145.762

Як бачимо із даних таблиці 2.2, найбільш оптимальними параметрами для визначення маршруту найменшої довжини для СМ є $N = 300, G = 150$. Після цих значень величина довжини маршруту не покращувалась, при цьому час роботи алгоритму лінійно зростає. Отримані результати часової складності ГА представлено на рис. 2.9.

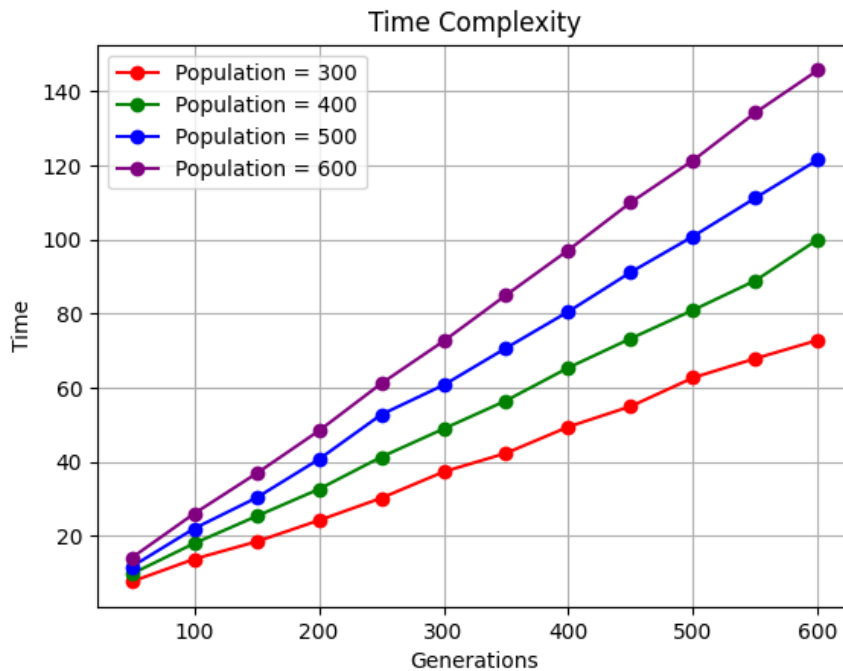


Рис. 2.9. Залежність часу виконання ГА від розміру популяції та кількості поколінь
Обґрунтуємо важливість вибору розглянутих параметрів.

Недостатня кількість поколінь може призвести до передчасної зупинки алгоритму, коли ще не знайдено оптимальне рішення.

На основі аналізу даних із таблиці 2.2, бачимо, що при $G = 50; 100$ ГА не визначив оптимальний маршрут. Тому важливо експериментально визначити мінімальну кількість поколінь, необхідну для стабілізації результатів.

Надмірно велика кількість поколінь може призвести до перенавчання, де алгоритм буде занадто довго оптимізувати рішення, що може бути неефективним з точки зору витрат часу і ресурсів. У розглянутому випадку перенавчання ГА починається при значеннях $G = 200 \div 600$.

Малий розмір популяції може призвести до недостатньої різноманітності, що збільшує ризик застрягання у локальних мінімумах, тому для дослідження

мінімальне значення $N = 300$. Важливо експериментально визначити розмір популяції, який забезпечує достатню різноманітність.

Як бачимо, при $N = 400 \div 600$ відбувається збільшення обчислювальної складності ГА без покращення результату для розв'язання розглянутої задачі. Оптимізація параметру N дозволяє балансувати між різноманітністю рішень та ефективністю обчислень.

– для вузлів із різними радіусами дії при використанні різних метрик відстані

Сенсорні вузли (СВ) можуть мати різні радіуси дії з ряду причин, які обумовлені технічними, експлуатаційними та економічними факторами.

Різні функціональні вимоги до СВ у межах однієї мережі можуть спричиняти використання вузлів з різними радіусами дії. Наприклад, деякі вузли можуть виконувати роль центральних вузлів або шлюзів, які потребують великого радіусу дії для зв'язку з іншими вузлами, що мають менший радіус дії.

Під час процедури моделювання для спрощення було прийнято, що СВ мають три радіуси дії, які для наочності представлено на рис. 2.10.

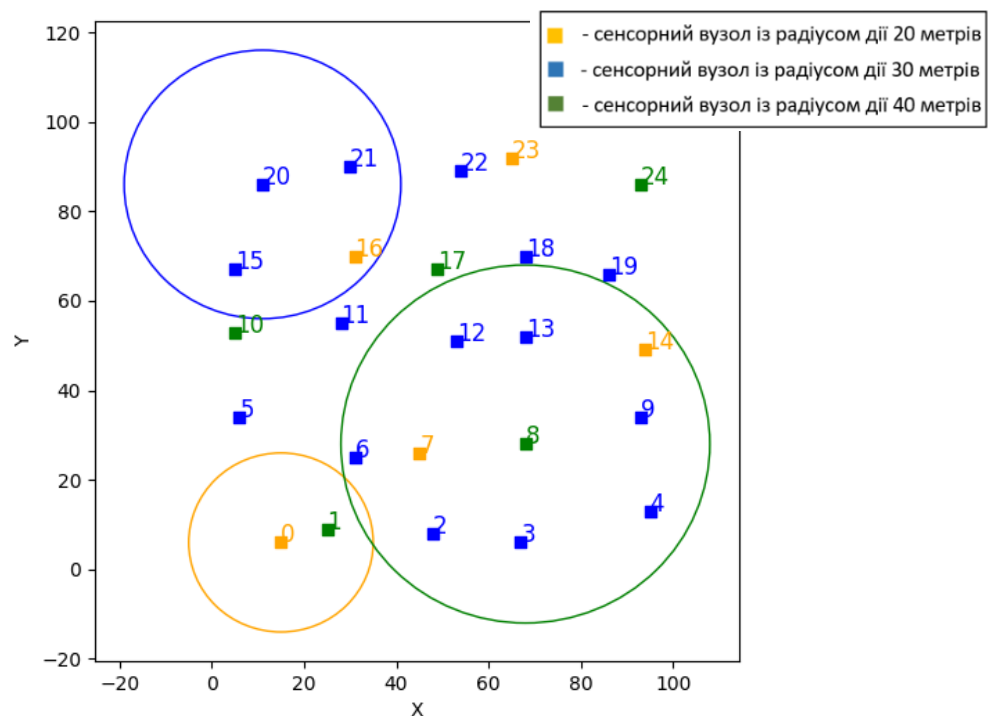


Рис. 2.10. Радіуси дії СВ [130]

У таблицях 2.3 – 2.6 представлено результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні ГА для розглянутих у п. 2.3 цієї роботи метрик

відстані [130]. Для оцінки часової складності ГА використано математичний апарат, представлений автором у роботі [121].

Таблиця 2.3

Результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для Евклідової метрики

Кількість поколінь	Розмір популяції			
	300	400	500	600
50	1000 / 8.312	1000 / 10.162	1000 / 12.191	1000 / 14.433
100	125 / 14.167	125 / 18.295	125 / 22.331	125 / 26.505
150	121 / 20.286	121 / 26.343	121 / 32.488	121 / 38.770
200	121 / 26.214	121 / 34.542	121 / 42.850	121 / 50.771
250	121 / 32.424	121 / 42.456	121 / 52.631	121 / 63.041
300	121 / 38.884	121 / 50.811	121 / 63.190	121 / 75.216
350	121 / 45.981	121 / 58.992	121 / 73.030	121 / 87.868
400	121 / 50.800	121 / 66.940	121 / 85.210	121 / 99.362
450	121 / 57.066	121 / 75.115	121 / 93.403	121 / 111.633
500	121 / 62.801	121 / 83.196	121 / 103.259	121 / 125.376
550	121 / 68.878	121 / 91.515	121 / 113.974	121 / 137.115
600	121 / 74.806	121 / 99.438	121 / 124.220	121 / 149.217

Таблиця 2.4

Результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для Манхеттенської метрики

Кількість поколінь	Розмір популяції			
	300	400	500	600
50	1000 / 8.291	1000 / 10.395	1000 / 12.402	1000 / 14.239
100	1000 / 14.487	1000 / 18.264	1000 / 22.327	1000 / 26.378
150	165 / 20.387	165 / 26.291	165 / 32.387	165 / 38.595
200	165 / 26.629	165 / 34.573	165 / 42.552	165 / 51.356
250	165 / 32.444	165 / 42.642	165 / 52.632	165 / 63.091
300	165 / 38.797	165 / 50.957	165 / 62.983	165 / 75.115
350	165 / 44.819	165 / 58.933	165 / 73.064	165 / 87.385
400	165 / 50.766	165 / 67.109	165 / 83.110	165 / 99.908
450	165 / 57.015	165 / 76.080	165 / 93.307	165 / 111.732
500	165 / 62.920	165 / 83.541	165 / 103.977	165 / 124.172
550	165 / 69.139	165 / 91.426	165 / 113.799	165 / 140.285
600	165 / 75.400	165 / 99.463	165 / 124.020	165 / 150.152

Таблиця 2.5

Результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для метрики Чебишова

Кількість поколінь	Розмір популяції			
	300	400	500	600
50	1000 / 8.177	1000 / 10.134	1000 / 12.190	1000 / 14.333
100	111 / 14.302	111 / 18.387	111 / 22.2350	111 / 26.436
150	107 / 20.626	107 / 26.419	107 / 32.291	107 / 39.175
200	107 / 27.305	107 / 34.486	107 / 42.507	107 / 51.653
250	107 / 32.803	107 / 42.785	107 / 53.526	107 / 63.518
300	107 / 38.445	107 / 51.010	107 / 63.438	107 / 75.316
350	107 / 44.758	107 / 59.871	107 / 73.725	107 / 87.623
400	107 / 51.334	107 / 67.232	107 / 84.117	107 / 99.535
450	107 / 57.550	107 / 75.274	107 / 94.002	107 / 111.867
500	107 / 63.053	107 / 83.405	107 / 105.489	107 / 124.033
550	107 / 69.860	107 / 91.598	107 / 114.604	107 / 136.397
600	107 / 75.711	107 / 100.531	107 / 124.744	107 / 150.412

Таблиця 2.6

Результати пошуку маршруту (відстань/час) між 4 та 20 вузлом при застосуванні авторського ГА для метрики Мінковського

Кількість поколінь	Розмір популяції			
	300	400	500	600
50	1000 / 8.183	1000 / 10.515	1000 / 12.283	1000 / 14.426
100	116 / 14.231	116 / 18.393	116 / 22.429	116 / 26.547
150	113 / 20.663	113 / 26.578	113 / 32.508	113 / 39.257
200	113 / 26.496	113 / 35.059	113 / 42.590	113 / 51.222
250	113 / 32.529	113 / 42.818	113 / 53.174	113 / 63.284
300	113 / 39.072	113 / 51.052	113 / 63.505	113 / 75.902
350	113 / 45.027	113 / 59.266	113 / 72.974	113 / 87.948
400	113 / 50.941	113 / 67.429	113 / 83.768	113 / 99.938
450	113 / 58.171	113 / 75.881	113 / 93.825	113 / 113.169
500	113 / 63.266	113 / 84.240	113 / 105.692	113 / 124.890
550	113 / 69.812	113 / 92.394	113 / 113.868	113 / 137.669
600	113 / 75.674	113 / 100.777	113 / 124.327	113 / 149.971

Таким чином, аналізуючи експериментальні дані, представлені у таблиці 2.3 – 2.6, визначено, що оптимальне значення параметрів ГА для знаходження маршруту найменшої довжини при мінімальних часових затратах є $G=150, N=300$, що є аналогічними оптимальним параметрам, які були встановлені експериментальним шляхом у п. 2.4.1 при розгляді сенсорних вузлів із однаковими радіусами дії.

Для кращої наочності часових затрат при знаходженні маршруту дані із вищенаведених таблиць представлено на рис. 2.11.

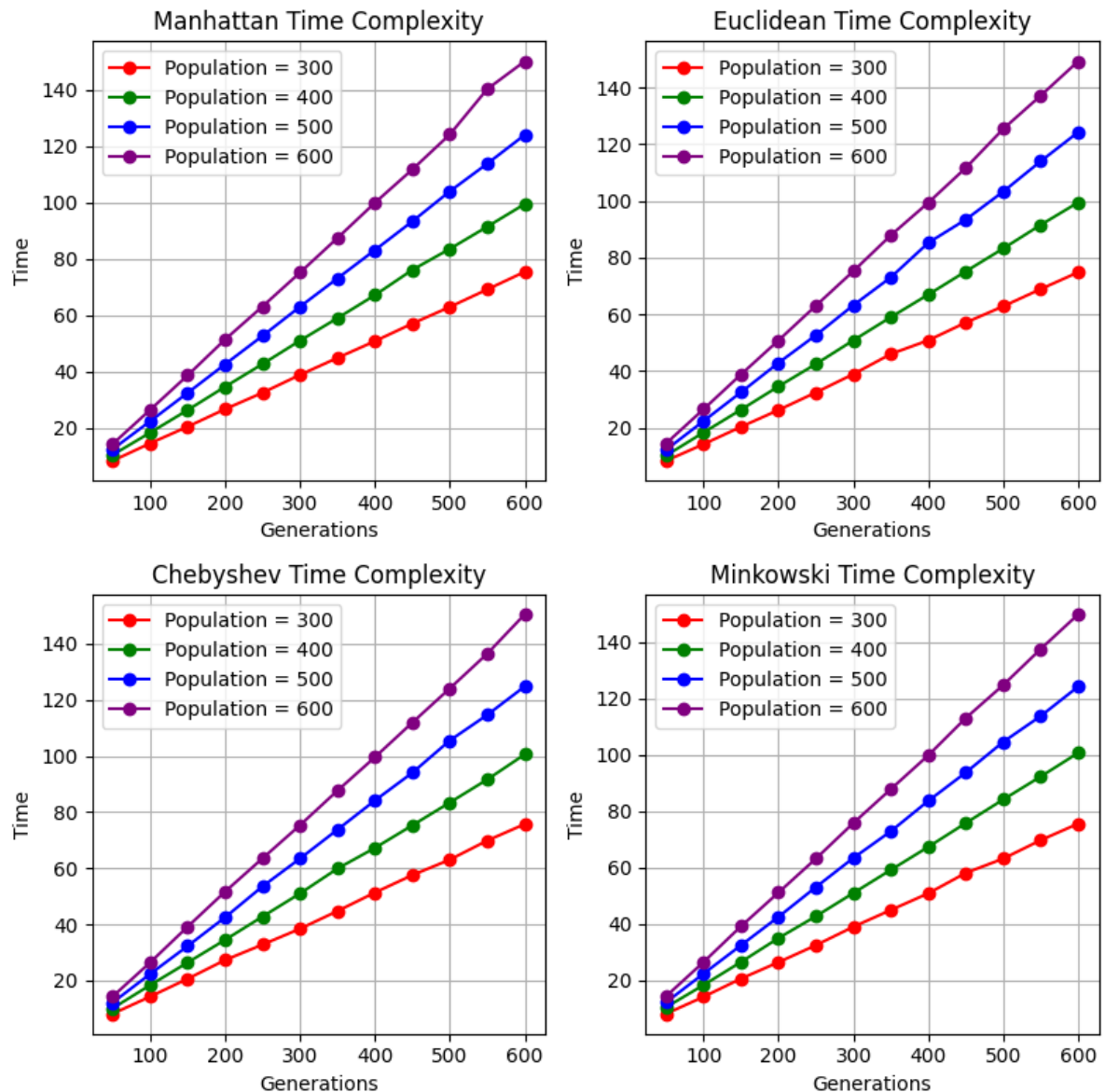


Рис. 2.11. Часові затрати на знаходження маршруту при використанні ГА для різних метрик відстаней

На основі аналізу даних, представлених на рис. 2.11, можна відзначити, що часові затрати на знаходження маршруту при використанні ГА зростають лінійно при збільшенні кількості поколінь та розміру популяції.

Більш детально розглянемо утворені маршрути з точки зору вузлів, які стали його складовими при використанні розглянутих алгоритмів. Спочатку розглядаємо отримані маршрути при використанні ГА.

На рис. 2.12 представлено сформований маршрут при використанні авторського ГА для таких метрик: Евклідової, Манхеттенської, Чебишова та Мінковського.

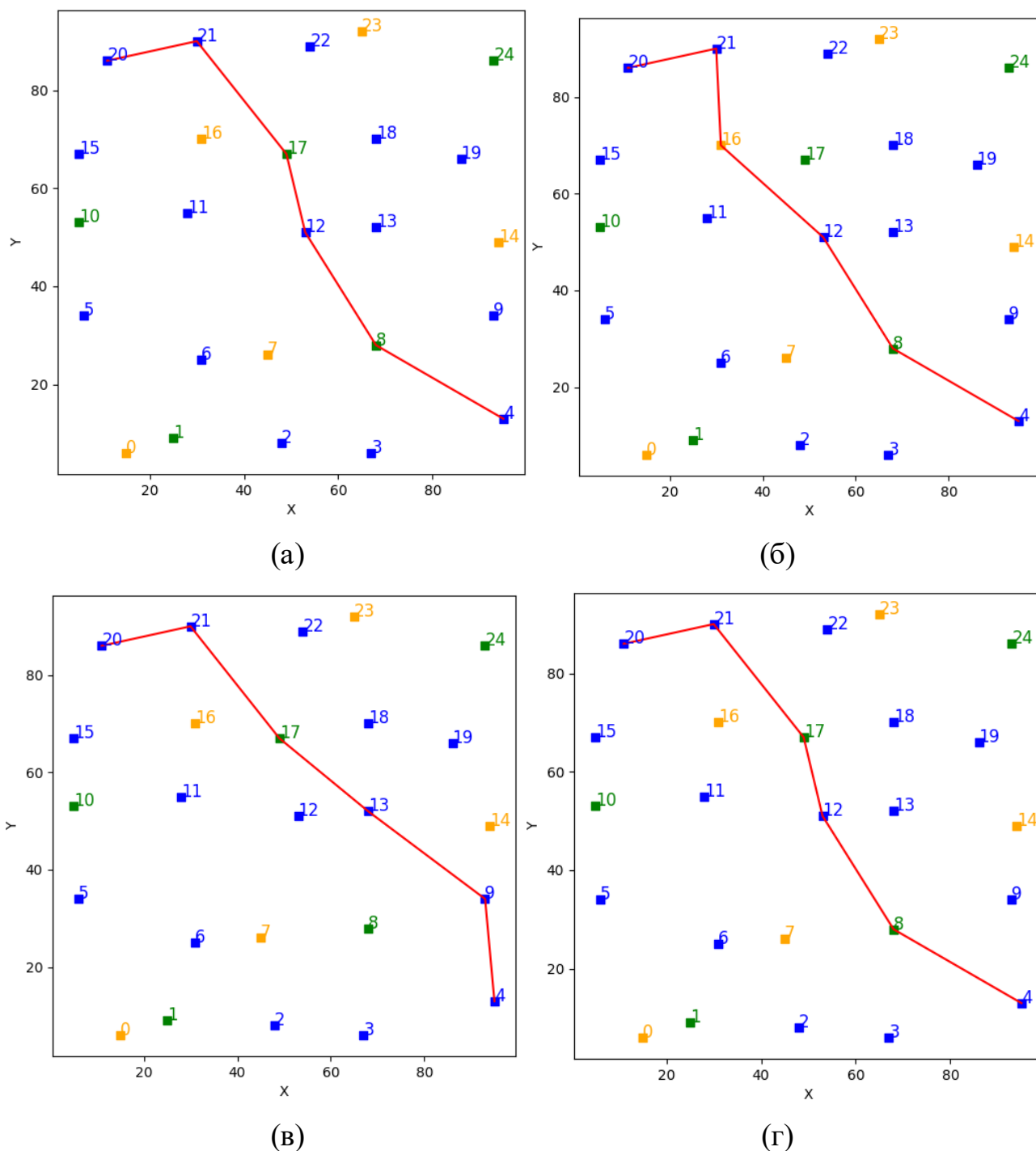
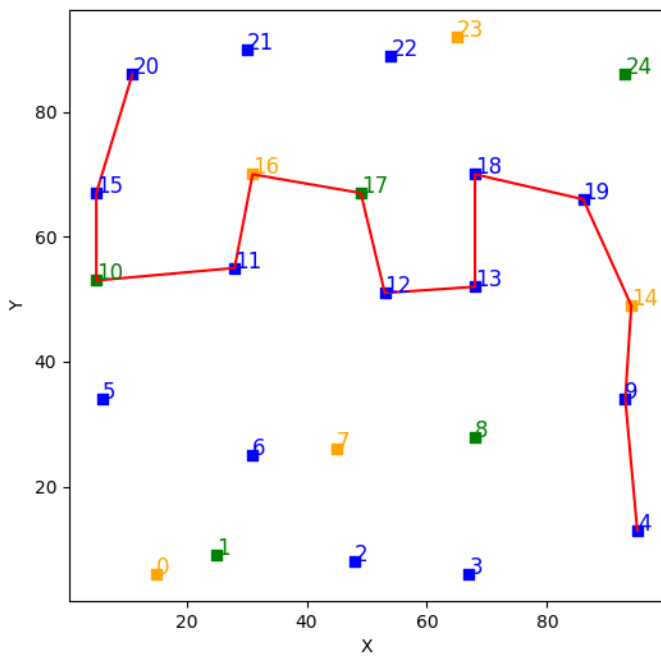


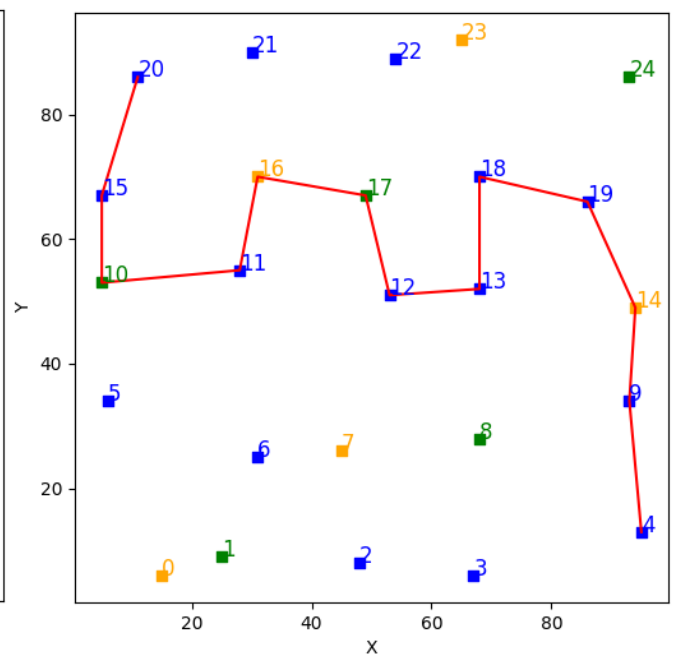
Рис. 2.12. Утворений маршрут при використанні авторського ГА для метрик:

Евклідової (а), Манхеттенської (б), Чебишова (в) та Мінковського (г)

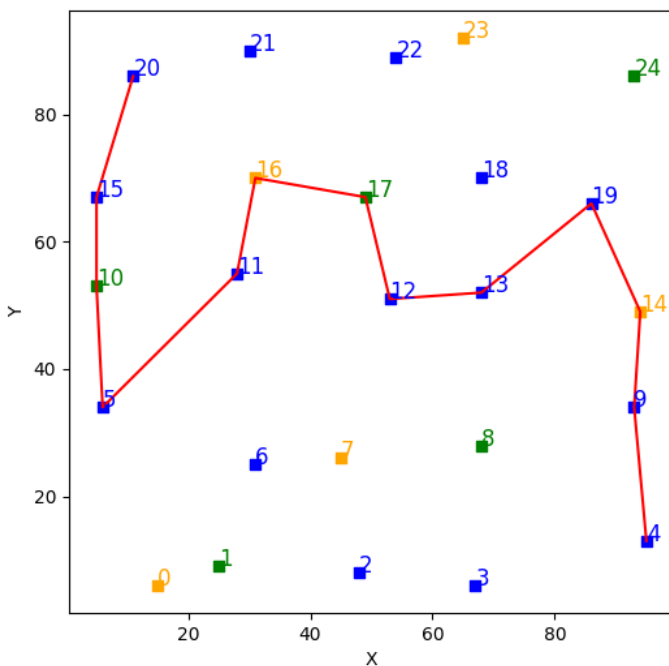
Маршрути, побудовані із використанням ЖА, для розглянутих метрик відстані представлено на рис. 2.13.



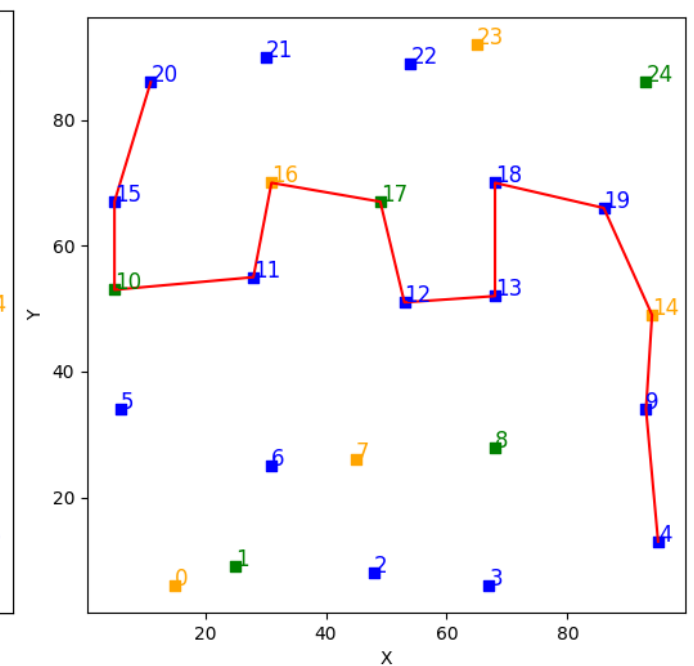
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2.13. Утворений маршрут при використанні ЖА для метрик: Евклідової (а), Манхеттенської (б), Чебишова (в) та Мінковського (г)

Маршрути, побудовані із використанням МА, для розглянутих метрик відстані представлено на рис. 2.14.

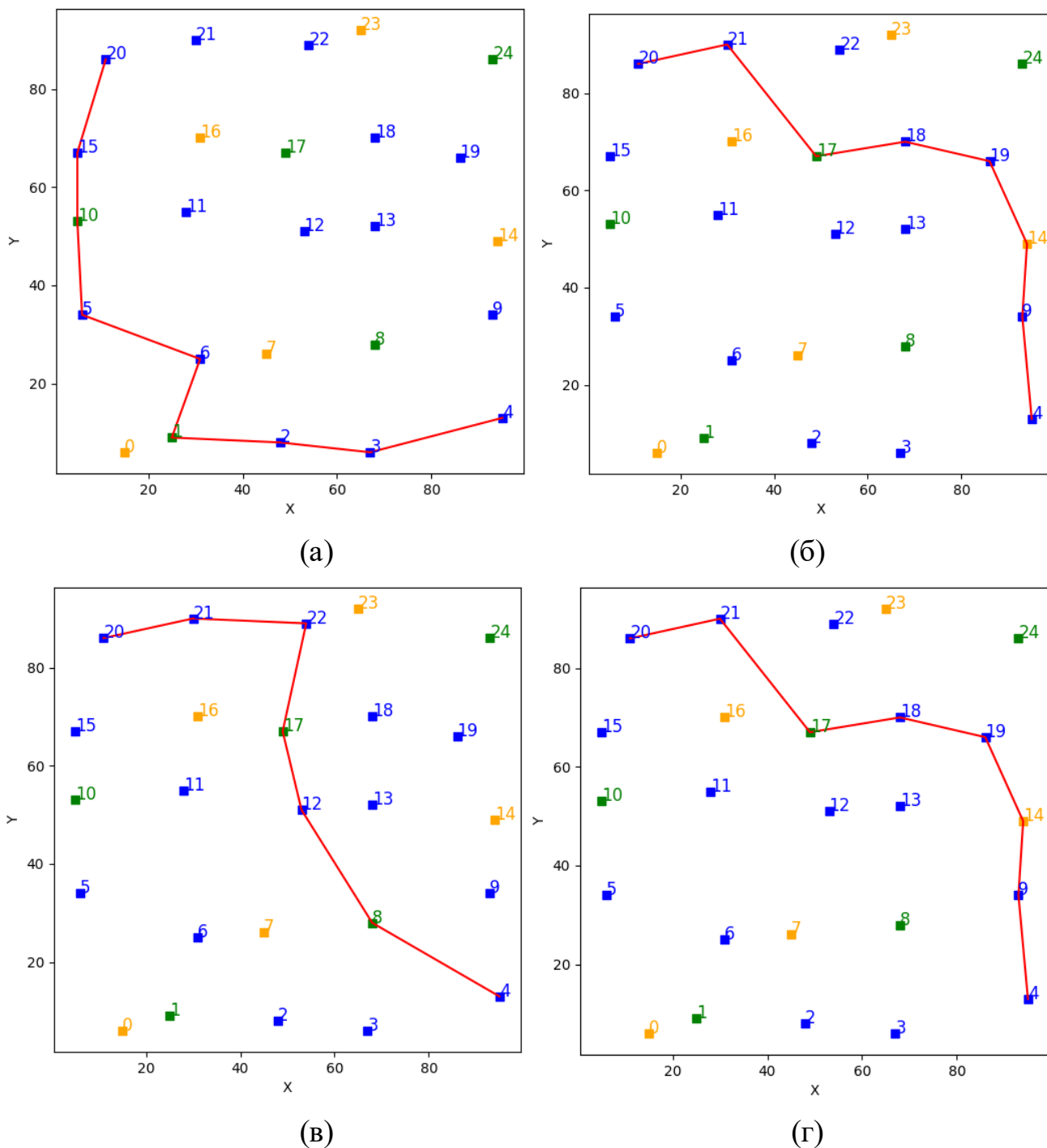


Рис. 2.14. Утворений маршрут при використанні МА для метрик: Евклідової (а), Манхеттенської (б), Чебишова (в) та Мінковського (г)

Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів представлені результати моделювання (рис. 2.12 – 2.14) наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Порівняння утворених маршрутів при використанні авторського ГА, ЖА і МА [130]

Алгоритм	Метрика	Утворений маршрут	Довжина маршруту
Розроблений генетичний	Евклідова	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	121
Жадібний		{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	210
Мурашиний		{4, 3, 2, 1, 6, 5, 10, 15, 20}	165
Розроблений генетичний	Манхеттенська	{4, 8, 12, 16, 21, 20}	165
Жадібний		{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	243
Мурашиний		{4, 9, 14, 19, 18, 17, 21, 20}	173
Розроблений генетичний	Чебишова	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	107
Жадібний		{4, 9, 14, 19, 13, 12, 17, 16, 11, 5, 10, 15, 20}	209
Мурашиний		{4, 8, 12, 17, 22, 21, 20}	131
Розроблений генетичний	Мінковського	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	113
Жадібний		{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	207
Мурашиний		{4, 9, 14, 19, 18, 17, 21, 20}	135

Ефективність авторського ГА оцінювалася шляхом порівняння мінімізованої довжини маршруту з результатами МА як представника популяційних метаевристик, та ЖА як базового евристичного методу. Порівняння проводилося для чотирьох різних метрик відстані.

На основі результатів, представлених у таблиці 2.7, бачимо, що використання авторського ГА дозволяє знайти маршрут меншої довжини із використанням меншої кількості вузлів для усіх розглянутих метрик у порівнянні із ЖА та МА.

Для здійснення об'єктивного порівняння з існуючими підходами та оцінки ступеня досягнутого прогресу визначено відсоткове покращення використання запропонованого алгоритму як:

$$\Delta(\%) = \left(\frac{L_{base} - L_{GA}}{L_{base}} \right) \times 100, \quad (2.16)$$

де L_{base} – довжина маршруту, отримана за допомогою алгоритму, з яким здійснюється порівняння (ЖА / МА),

L_{GA} – довжина маршруту, сформованого розробленим ГА.

(2.16) дозволяє чітко порівняти ефективність різних алгоритмів, що є важливим для формування висновків щодо переваг та доцільності впровадження запропонованого підходу.

Таким чином, розроблений ГА дозволив сформувати маршрут, який є меншим:

- порівняно із ЖА: на 42.38% – для Евклідової метрики, на 32.10% – для Манхеттенської метрики, на 48.80% – для метрики Чебишова, на 45.41% – для метрики Мінковського;

- порівняно із МА: на 26.67% – для Евклідової метрики, на 4.62% – для Манхеттенської метрики, на 18.32% – для метрики Чебишова, на 16.30% – для метрики Мінковського.

Варто зауважити, що довжина маршруту при Евклідовій метриці є меншою, ніж при метриці Чебишова, оскільки метрика Чебишова фокусується на найбільшій різниці між координатами, тоді як Евклідова враховує всі координати разом. Отримані результати будуть особливо відрізнятися у випадках, коли різниця по одній із координат значно більша, ніж по іншій.

Отже, аналіз отриманих результатів демонструє, що розроблений ГА забезпечує кращі результати порівняно ЖА та МА. Зменшення довжини побудованого маршруту спостерігається стабільно для всіх розглянутих метрик відстані, що свідчить про універсальність і стійкість розробленого методу до різних геометричних особливостей простору.

Таким чином, пропонований ГА доцільно використовувати для підвищення ефективності маршрутизації даних у БСМ при різних метриках відстані.

– при додаванні / виходу із ладу вузлів

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботі [131].

а) при виході із ладу вузлів

У БСМ надійність та ефективність передачі даних є критично важливими для забезпечення їх нормального функціонування. Вихід з ладу одного або декількох вузлів може суттєво вплинути на продуктивність мережі, зокрема спричинити втрату даних, зменшення покриття мережі тощо.

СВ можуть виходити із ладу через ряд причин, до яких можна віднести:

- фізичні фактори (пошкодження, погодні умови, бойові дії),
- апаратні відмови (обмежений заряд батареї, виробничі дефекти, зношування компонентів),
- програмні відмови (помилки в програмному забезпеченні),
- людський фактор (крадіжка).

Врахування цих факторів є важливим для створення БСМ, які здатні функціонувати у будь-яких умовах.

У зв'язку з цим здійснено дослідження ефективності роботи розробленого ГА при виході із ладу вузлів БСМ.

Для моделювання використано 25 вузлів із різними радіусами дії (20,30 та 40 метрів), розміщених випадковим чином на ділянці, розміром 100×100 м.

На рис. 2.15 представлено матрицю відстаней та на рис. 2.16 – сформований маршрут між 4 та 20 вузлом на основі використання авторського ГА при умові, що усі наведені вузли функціонують.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	10	0	23	1000	1000	31	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	18	1000	1000	1000	14	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	28	22	30	1000	37	23	0	25	1000	1000	27	24	33	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	38	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	31	1000	1000	1000	33	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	18	1000	1000	1000	20	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	37	1000	29	22	29	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29	
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	21	
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	37	1000	1000	1000	29	21	1000	1000	39	28	0

Рис. 2.15. Матриця відстаней для 25 вузлів початкової мережевої топології

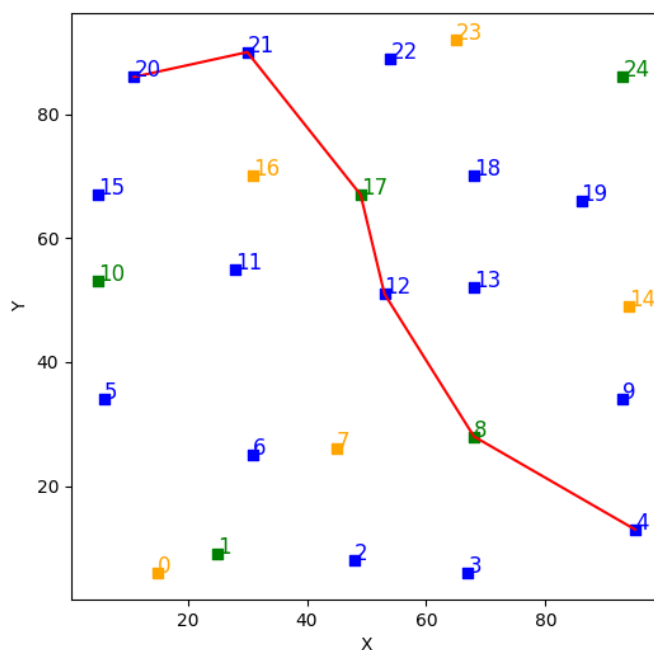


Рис. 2.16. Побудований розробленим ГА маршрут передавання даних між вузлом 4 і 20 початкової мережевої топології

Далі переходимо до поступового видалення вузлів та перевірки ефективності роботи розглянутого алгоритму. Видалені вузли надалі буде позначено сірим кольором.

На рис. 2.17 представлено маршрут, побудований при видаленні вузла 12 та 9, при використанні авторського ГА.

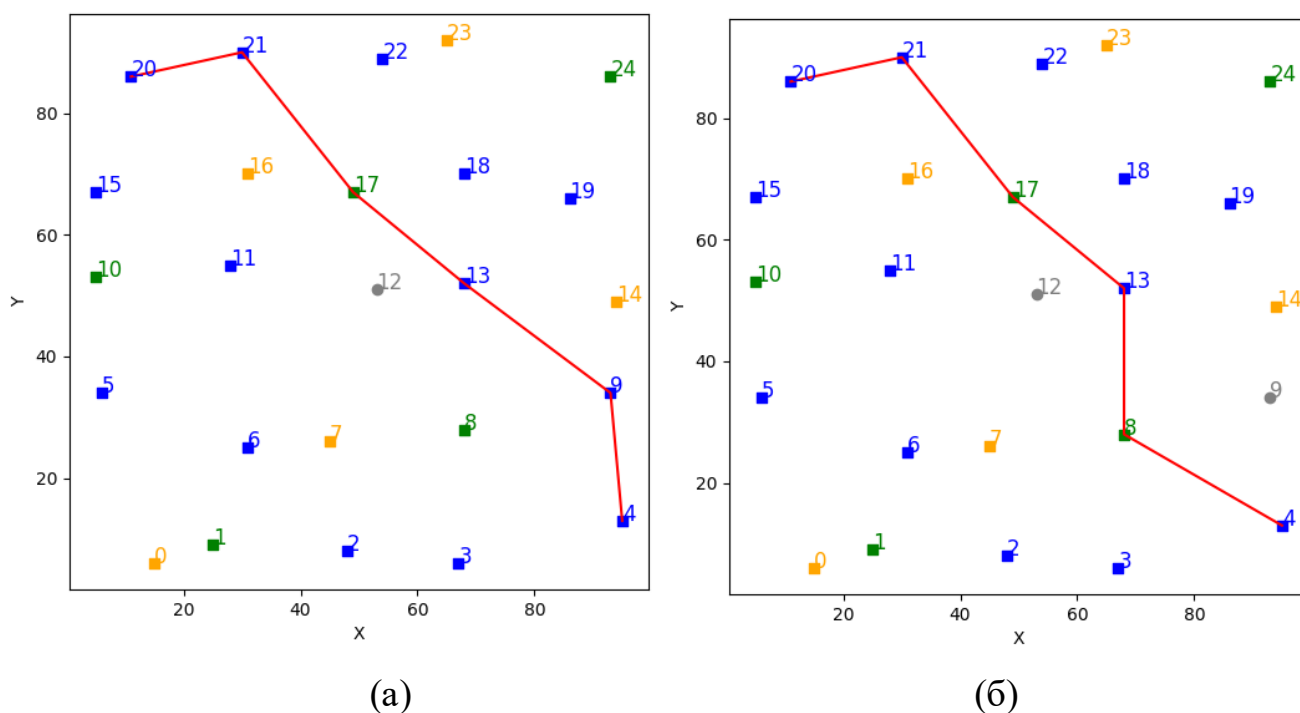
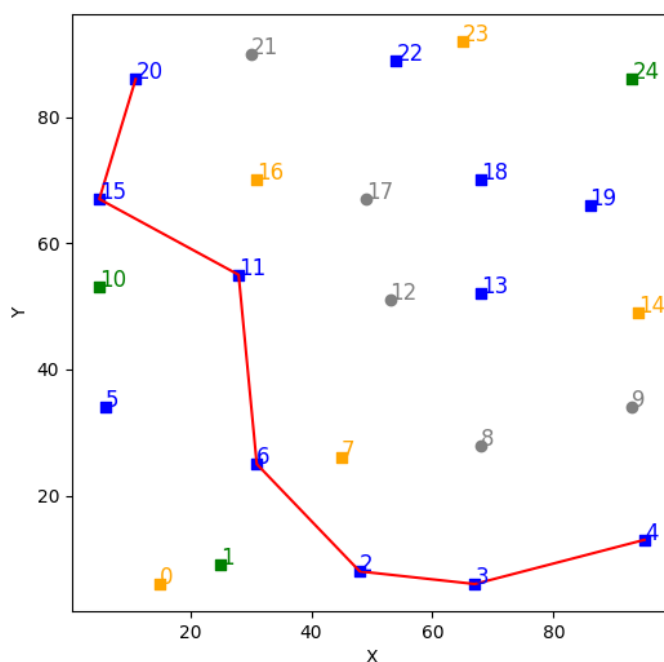


Рис. 2.17. Сформований ГА маршрут при виході із ладу вузла 12 (а) та 9 (б)

Figure 1 consists of two side-by-side scatter plots, each showing a set of 24 data points in a 2D space. The x-axis is labeled 'X' and ranges from 0 to 100, with major ticks at 20, 40, 60, and 80. The y-axis is labeled 'Y' and ranges from 0 to 100, with major ticks at 20, 40, 60, and 80. The data points are numbered 1 through 24 and are colored: blue (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24). The points are distributed across the plot area. In the left plot, a red path connects the points in a specific sequence: 4, 13, 18, 22, 21, 20, 15, 10, 5, 1, 6, 11, 16, 23, 19, 14, 9, 12, 17, 24, 3, 2, 7, and 8. In the right plot, a red path connects the points in a different sequence: 4, 6, 11, 15, 20, 21, 22, 23, 24, 19, 18, 13, 10, 5, 1, 6, 11, 16, 23, 19, 14, 9, 12, 17, 24, 3, 2, 7, and 8. The paths are different, indicating different solutions for the Traveling Salesman Problem.

(6)



(B)

Для порівняння ефективності роботи авторського ГА здійснено дослідження ефективності ЖА при пошуку маршруту між 4 та 20 вузлом розглянутої мережевої топології при послідовному видаленні аналогічних вузлів: 12, 9, 17, 21, 8.

На рис. 2.19 та 2.20 представлено матрицю відстаней та сформований маршрут при використанні ЖА для мережевої топології із 25 вузлів, які повноцінно функціонують.

Greedy Distance Matrix																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	10	0	23	1000	1000	31	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	18	1000	1000	1000	14	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	28	22	30	1000	37	23	0	25	1000	1000	27	24	33	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	38	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	31	1000	1000	1000	33	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	18	1000	1000	1000	20	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	18	0	19	37	1000	29	22	29	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	1000	19	0	18	1000	23	22	29
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	21
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	19	0	24	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	24	0	11	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	37	1000	1000	1000	29	21	1000	39	28	0	

Рис. 2.19. Матриця відстаней для 25 вузлів початкової мережевої топології для ЖА

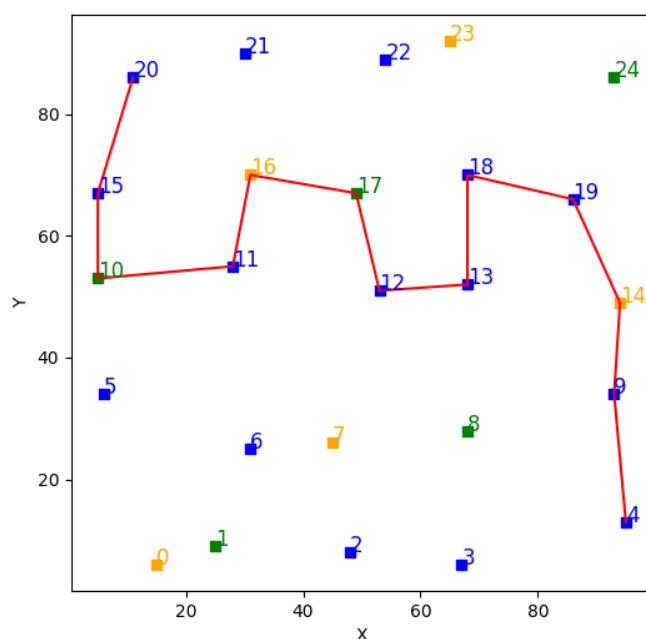


Рис. 2.20. Побудований ЖА маршрут передавання даних між вузлом 4 і 20 при початковій мережевій топології

Далі поступово було видалено ті ж вузли, що і при дослідженні роботи ГА, а саме: 12,9,17,21,8. На рис. 2.21 показано маршрут, побудований ЖА при видаленні вузла 12 та 9.

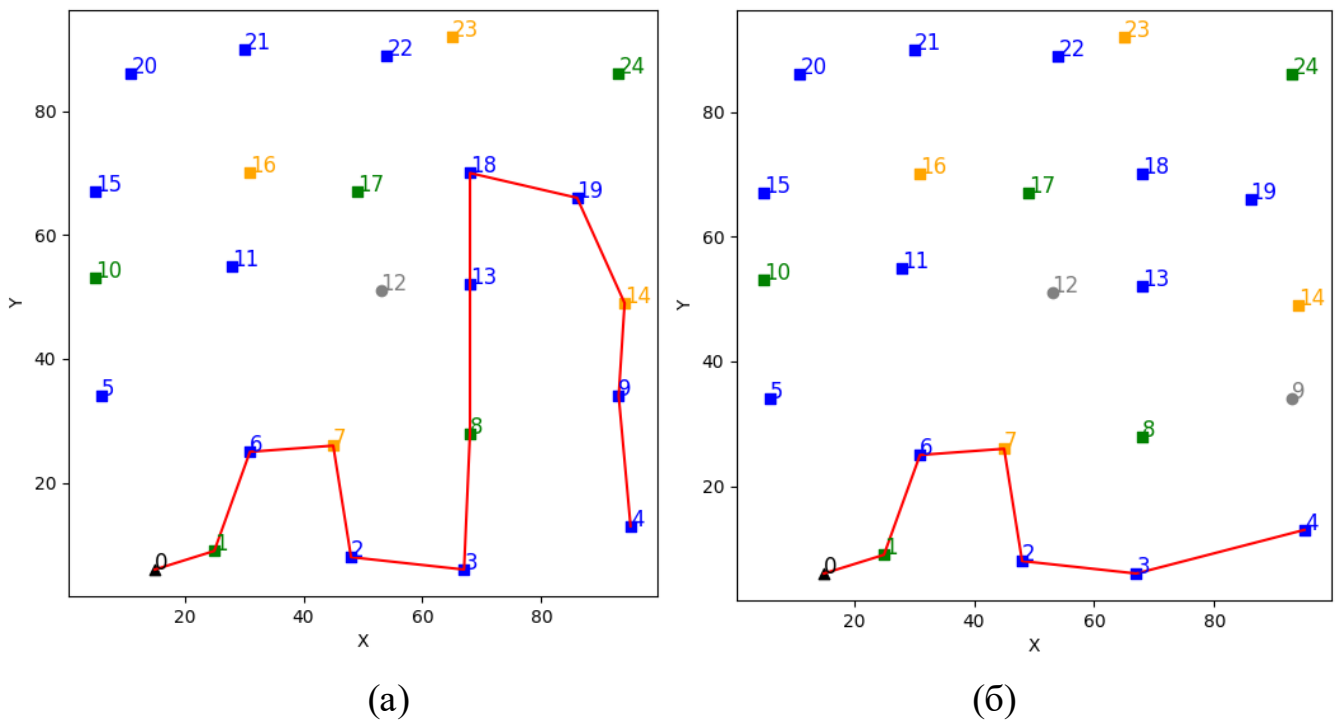


Рис. 2.21. Результат побудови ЖА маршруту передавання даних між 4 і 20 вузлом при видаленні вузла 12 (а) та 9 (б)

Як бачимо з рис. 2.21 а, маршрут не встановлено, оскільки робота ЖА зупиняється на вузлі 0 через відсутність подальших доступних шляхів. Це означає, що всі можливі шляхи з поточного вузла вичерпані (з урахуванням обмеження дії сенсорних вузлів), і немає доступних сусідніх вузлів, які можна використати для продовження маршруту.

Рис. 2.21 б демонструє, що застосування ЖА не дозволило сформувати маршрут між вузлом-джерелом та вузлом-отримувачем.

На рис. 2.22 представлено маршрут, побудований ЖА при наступному видаленні вузла 17, 21 та 8.

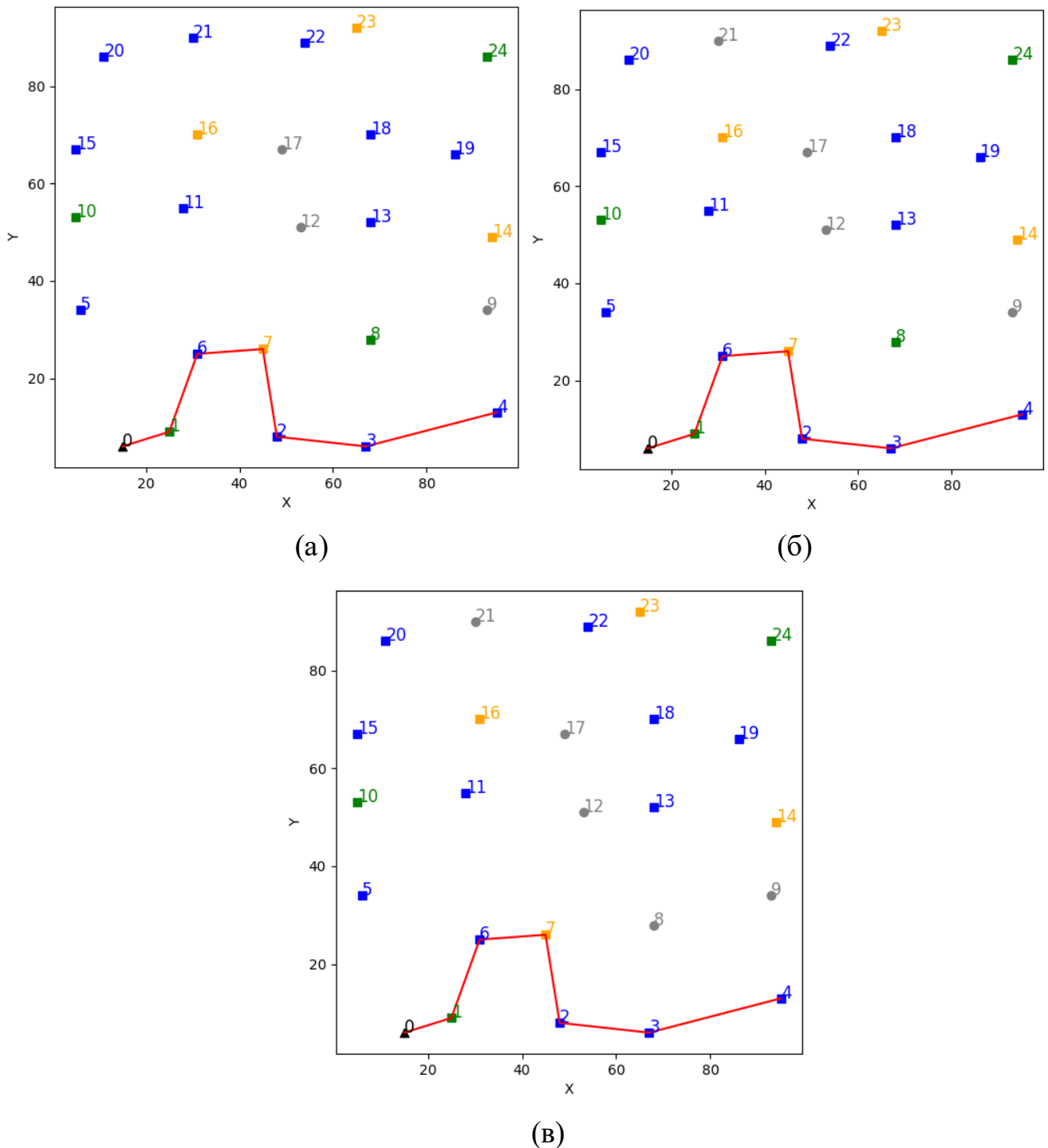


Рис. 2.22. Результат побудови ЖА маршруту передавання даних між 4 і 20 вузлом при додатковому видаленні вузла 17 (а), 21 (б), 8 (в)

Як бачимо з рис. 2.22, результат побудови маршруту є неуспішним, оскільки не було досягнуто вузла-отримувача.

Для порівняння ефективності роботи авторського ГА здійснено дослідження ефективності застосування МА при пошуку маршруту між 4 та 20 вузлом

розглянутої мережевої топології при послідовному видаленні аналогічних вузлів: 12, 9, 17, 21, 8.

На рис. 2.23 та 2.24 відповідно представлено матрицю відстаней та сформований маршрут при використанні МА для мережевої топології із 25 вузлів, які повноцінно функціонують.

ACO Distance Matrix																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	0	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
2	10	0	23	1000	1000	31	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
8	1000	1000	18	1000	1000	1000	14	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
9	1000	1000	28	22	30	1000	37	23	0	25	1000	1000	27	24	33	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	38	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	31	1000	1000	1000	33	1000	1000	1000	1000		
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000		
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000		
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000		
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	18	1000	1000	1000	20	1000	1000	1000		
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	37	1000	29	22	29	1000		
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29	1000		
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	1000	21		
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000		
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000		
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000		
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	0	1000		
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	37	1000	1000	1000	29	21	1000	1000	39	28	0		

Рис. 2.23. Матриця відстаней для 25 вузлів початкової мережевої топології для МА

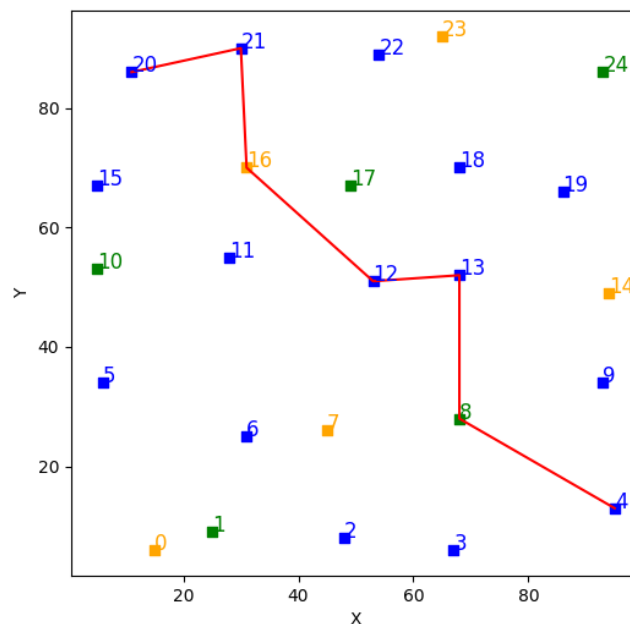
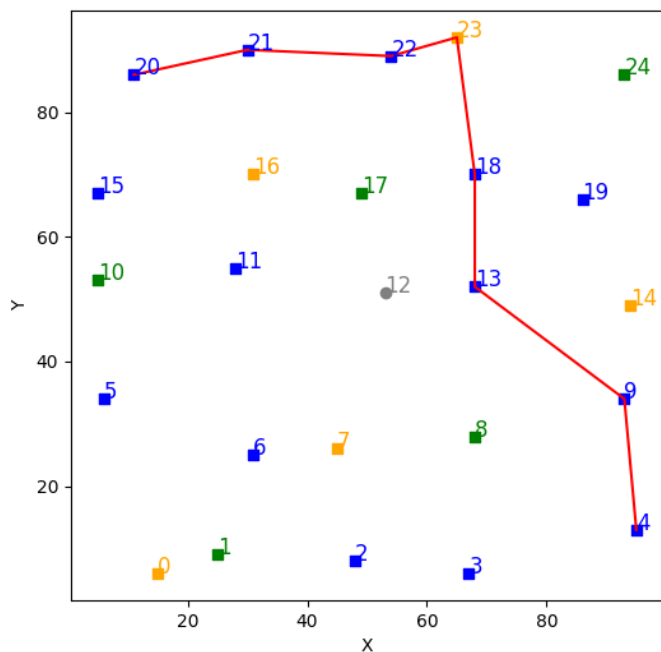
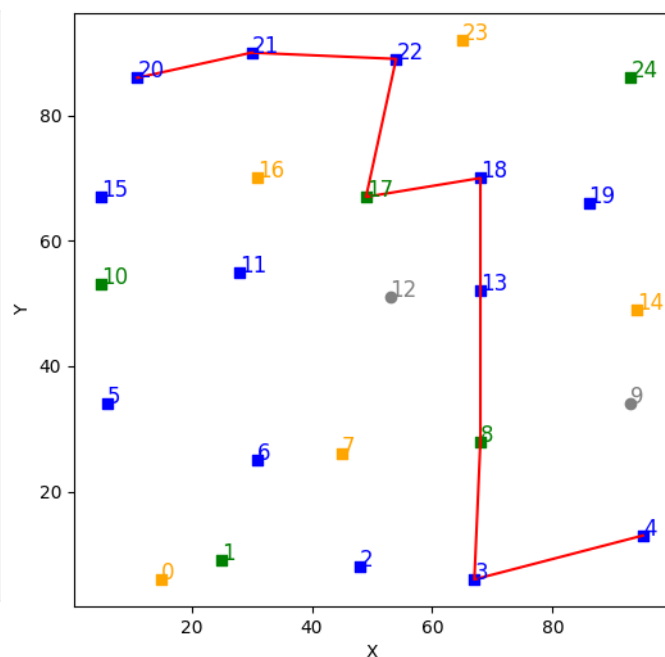


Рис. 2.24. Побудований МА маршрут передавання даних між вузлом 4 і 20 при початковій мережевій топології

На рис. 2.25 та 2.26 представлено побудований МА маршрут при наступному видаленні вузла 12, 9; 17, 21, 8, відповідно.

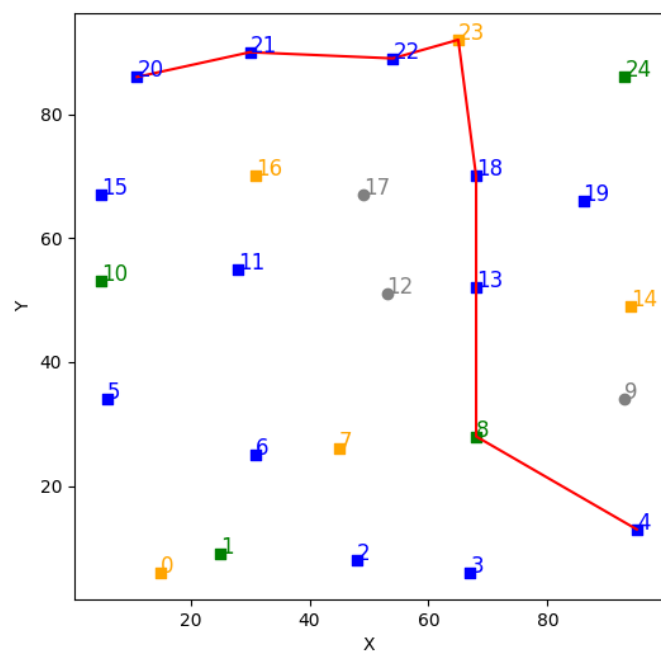


(a)

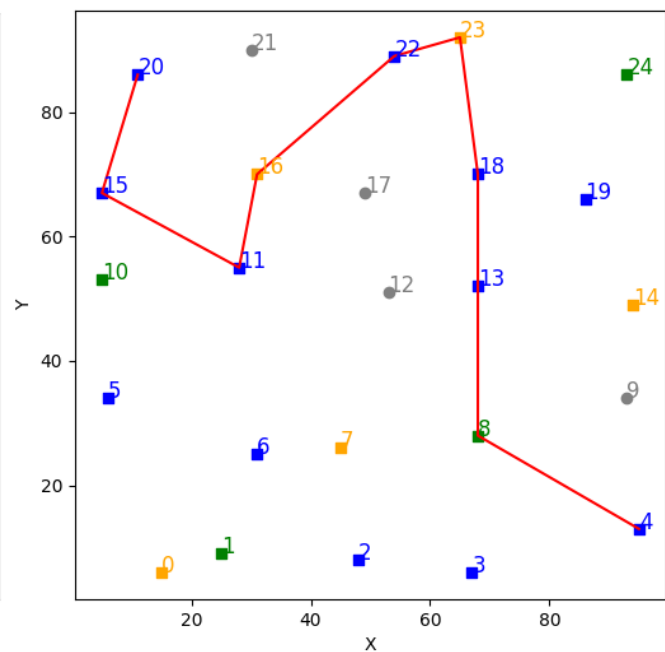


(б)

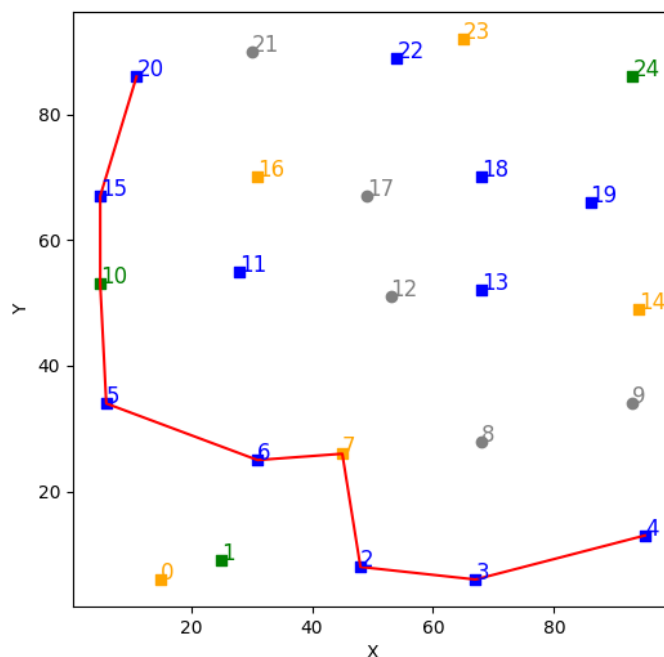
Рис. 2.25. Результат побудови МА маршруту передавання даних між 4 і 20 вузлом при видаленні вузла 12 (а) та 9 (б)



(a)



(б)



(в)

Рис. 2.26. Результат побудови МА маршруту передавання даних між 4 і 20 вузлом при додатковому видаленні вузла 17 (а), 21 (б), 8 (в)

Таким чином, результати, наведені на рис. 2.25 та 2.26 продемонстрували успішне створення маршрутів у всіх розглянутих випадках при застосуванні МА.

Для кращої наочності отриманих результатів їх представлено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Отримані результати використання розглянутих алгоритмів щодо пошуку маршруту при послідовному видаленні вузлів у розглянутій мережевій топології [131]

Розроблений генетичний алгоритм						
Номер видаленого вузла	-	12	9	17	21	8
Утворений маршрут, вузли	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	{4, 8, 13, 18, 22, 21, 20}	{4, 8, 6, 11, 15, 20}	{4, 3, 2, 6, 11, 15, 20}
Довжина утвореного маршруту, м	121	123	126	138	141	145
Жадібний алгоритм						
Номер видаленого вузла	-	12	9	17	21	8

Продовження таблиці 2.8

Утворений маршрут, вузли	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	–	–	–	–	–
Довжина утвореного маршруту, м	210	–	–	–	–	–
Мурашиний алгоритм						
Номер видаленого вузла	-	12	9	17	21	8
Утворений маршрут, вузли	{4, 8, 13, 12, 16, 21, 20}	{4, 9, 13, 18, 23, 22, 21, 20}	{4, 3, 8, 13, 18, 17, 22, 21, 20}	{4, 8, 13, 18, 23, 22, 21, 20}	{4, 8, 13, 18, 23, 22, 16, 11, 15, 20}	{4, 3, 2, 7, 6, 5, 10, 15, 20}
Довжина утвореного маршруту, м	137	145	176	148	193	157

Як бачимо із наведених даних у таблиці 2.8, поступове видалення п'яти вузлів із розглянутої топології не стало перешкодою для ефективної роботи розробленого ГА, оскільки для кожного розглянутого випадку було сформовано відповідний маршрут. При цьому спостерігається прямопропорційний зв'язок між кількістю видалених вузлів та довжиною маршруту – більша кількість видалених вузлів зумовлює створення маршрутів більшої довжини. Після видалення вузлів потрібно здійснити їх обхід, що призводить до збільшення довжини маршрутів.

Теорія графів підтверджує, що зменшення кількості вершин (вузлів) у графі призводить до збільшення середньої довжини найкоротших шляхів між іншими вершинами.

ГА демонструє стабільне та значне скорочення довжини маршруту порівняно з МА, забезпечуючи в середньому 16.14% покращення.

Щодо ефективності роботи ЖА, то у 5 розглянутих випадках його використання не дозволило сформувати маршрут для передачі даних між двома розглянутими вузлами.

МА продемонстрував успішне знаходження маршруту до кінцевого вузла навіть після відмови критичних проміжних вузлів. У всіх сценаріях алгоритм забезпечив 100% надійність доставки, що є критично важливим для БСМ, проте довжини утворених маршрутів для всіх випадків є більшими у порівнянні із розробленим ГА, що підтверджує доцільність застосування розробленого рішення у топологіях, де надійність має поєднуватися з мінімізацією вартості маршруту в умовах можливих відмов вузлів мережі.

б) при додаванні нових вузлів

Для СМ, враховуючи динамічну топологію, характерне також додавання нових вузлів, яке доцільне при потребі:

- збільшення територіального покриття мережі, що особливо актуально для випадків, коли потрібно охопити великі території для збору / передачі інформації, наприклад моніторингу навколишнього середовища певної області;
- збільшення щільності вузлів для отримання більше детальних та достовірних даних, зокрема для медичних систем;
- відновлення роботи мережі після виходу із ладу вузлів через різноманітні причини;
- підвищення якості обслуговування користувачів шляхом збільшення пропускної здатності, зменшення затримки під час передачі даних, що важливо для додатків, які працюють в режимі реального часу;
- інтеграції нових технологій / функцій для модернізації мережі відповідно до сучасних тенденцій.

Таким чином, додавання нових вузлів у СМ є важливим, що в свою чергу обумовлює відповідне дослідження щодо ефективності роботи розробленого ГА.

Продовжуємо розглядати мережеву топологію, яка була отримана після видалення вузлів 12,9,17,21,8, при цьому будемо поступово добавляти у неї нові вузли із радіусом дії 30 метрів.

Рис. 2.27 демонструє маршрут, сформований розробленим ГА при додаванні вузла із номером 25, 26, 27 та 28 відповідно.

Варто зауважити, що відповідно до розглянутої топології нумерація вузлів починається із нуля, проте при побудові матриці відстаней – із 1. Таким чином, додавання 25 вузла у розглянутій мережевій топології позначено як 26.

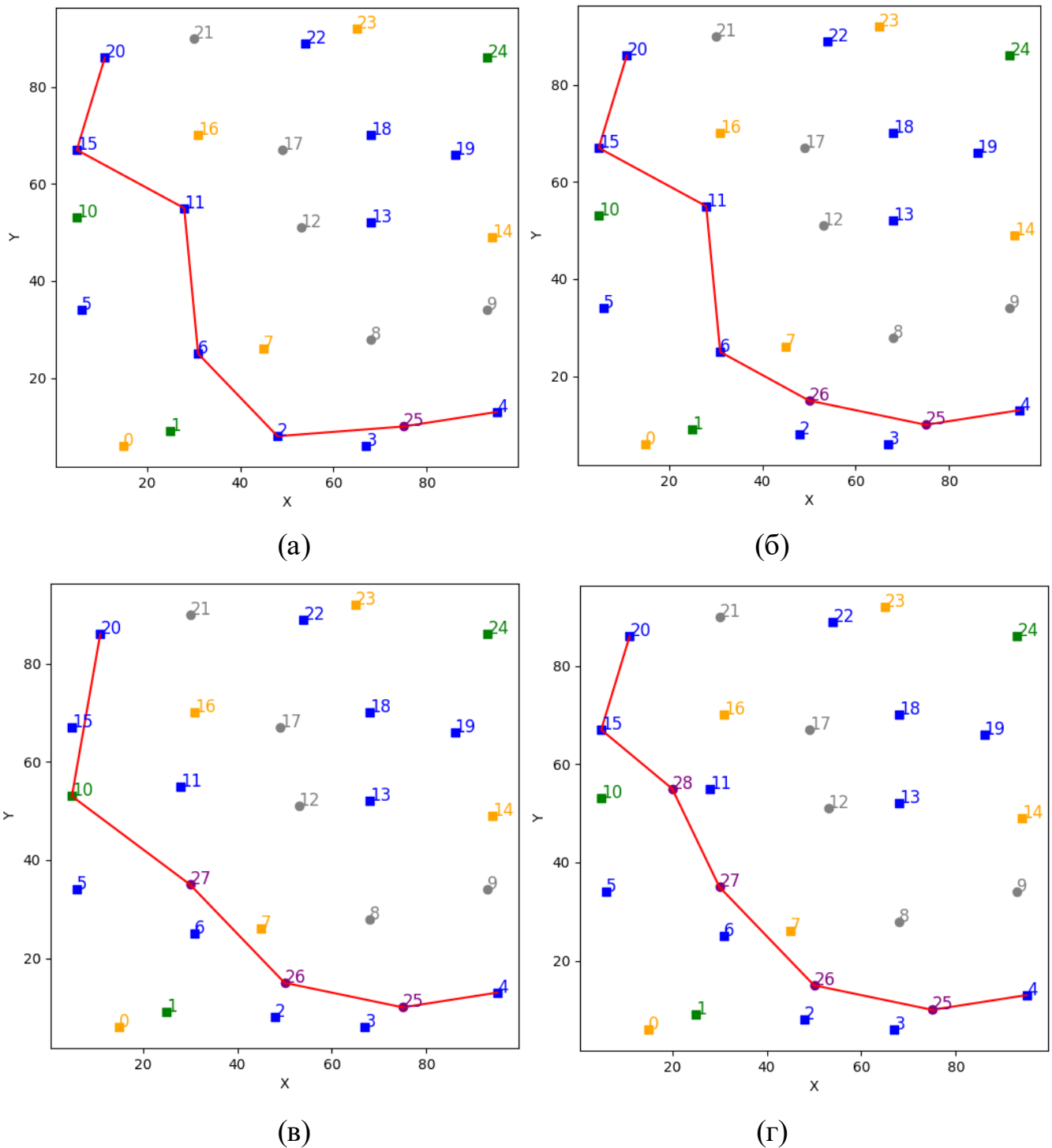


Рис. 2.27. Сформований ГА маршрут при додаванні вузла із номером 25 (а), 26 (б), 27 (в), 28 (г)

Рис. 2.28 демонструє формування маршруту розробленим ГА при додаванні вузла із номером 29.

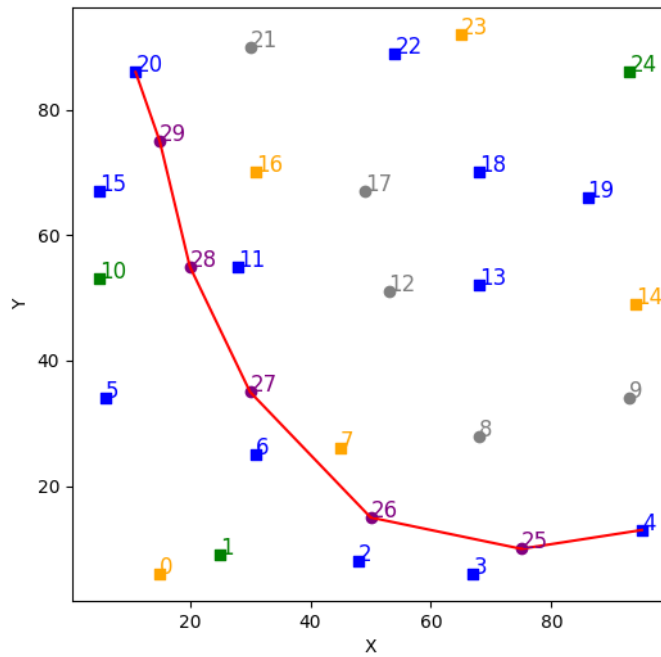
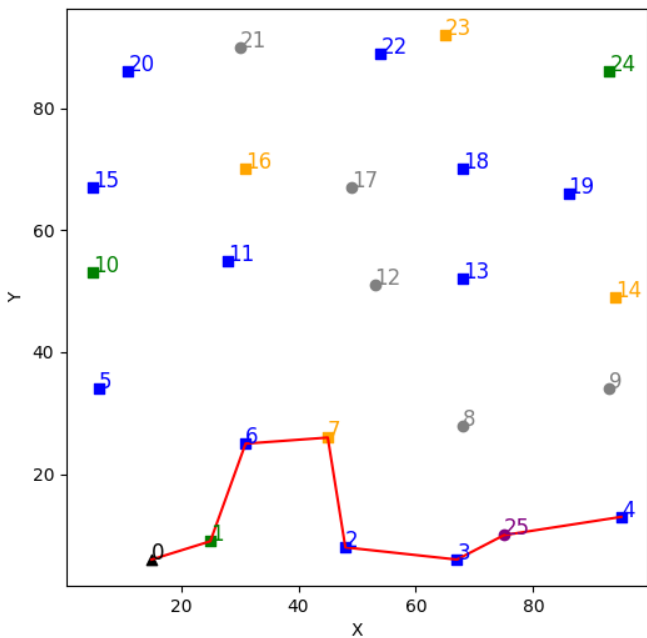


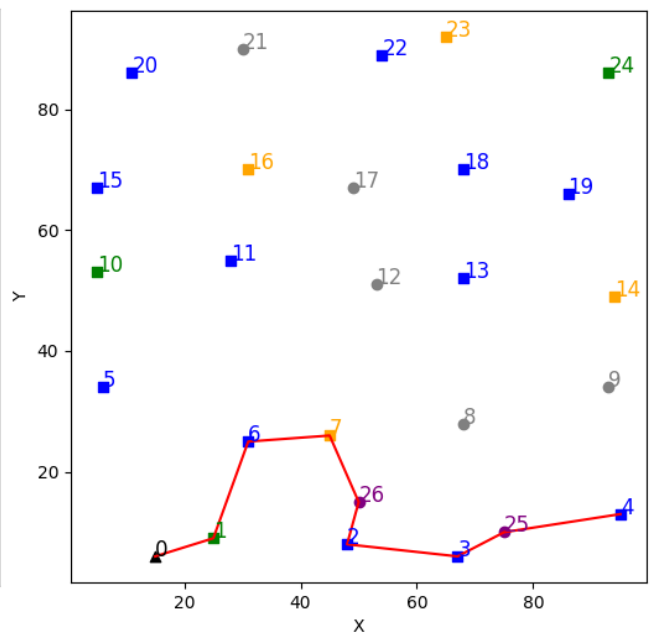
Рис. 2.28. Сформований ГА маршрут при додаванні вузла 29

Аналогічно для порівняння здійснимо оцінку ефективності роботи ЖА при поступовому додаванні вузлів 25, 26, 27, 28 та 29.

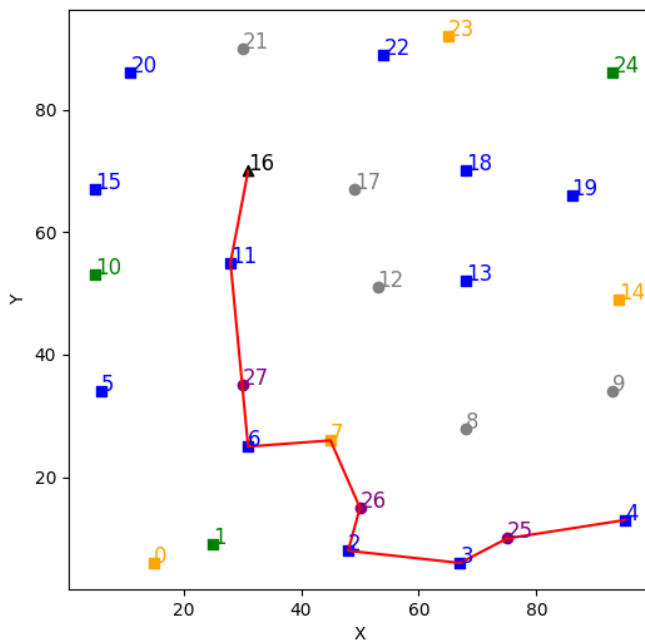
На рис. 2.29 представлено маршрут, сформований ЖА при додаванні вузла із номером 25, 26, 27 та 28 відповідно.



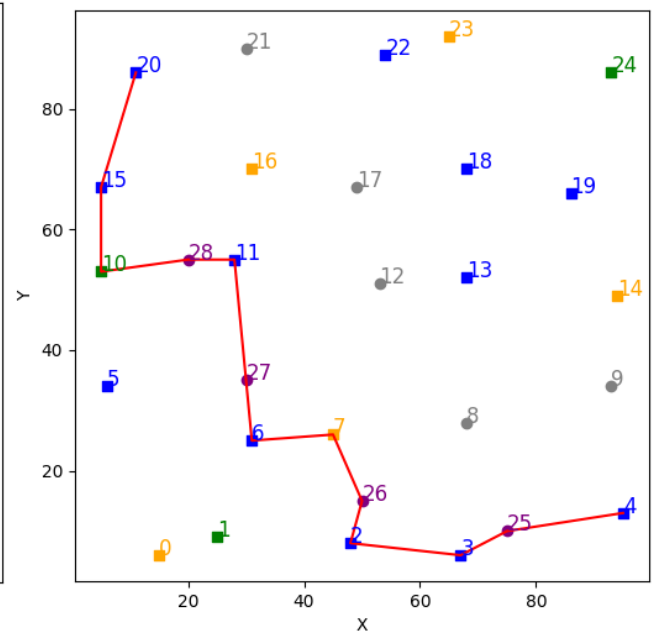
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2.29. Результат побудови ЖА маршруту між 4 і 20 вузлом при додаванні вузла 25 (а), 26 (б), 27(в), 28 (г)

Як бачимо з рис. 2.29 (а - в), незважаючи на включення додаткових вузлів у процес формування маршруту між 4 та 20 вузлом, ЖА не здійснив утворення необхідного маршруту. Тільки для випадку (г) побудова маршруту є успішною.

Рис. 2.30 демонструє формування маршруту ЖА при додаванні вузла із номером 29.

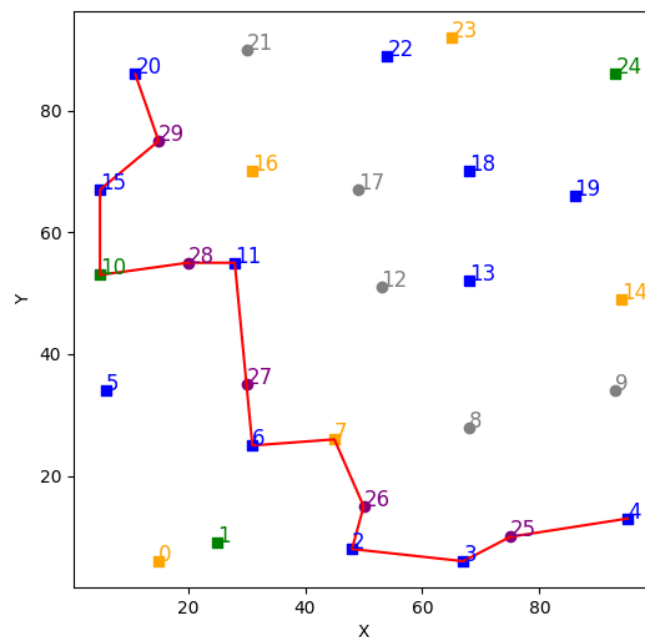


Рис. 2.30. Сформований ЖА маршрут при додаванні вузла 29

Далі здійснено оцінку ефективності роботи МА при поступовому додаванні вузлів 25, 26, 27, 28 та 29. На рис. 2.31 представлено маршрут, сформований МА при додаванні вузла із номером 25, 26, 27 та 28 відповідно.

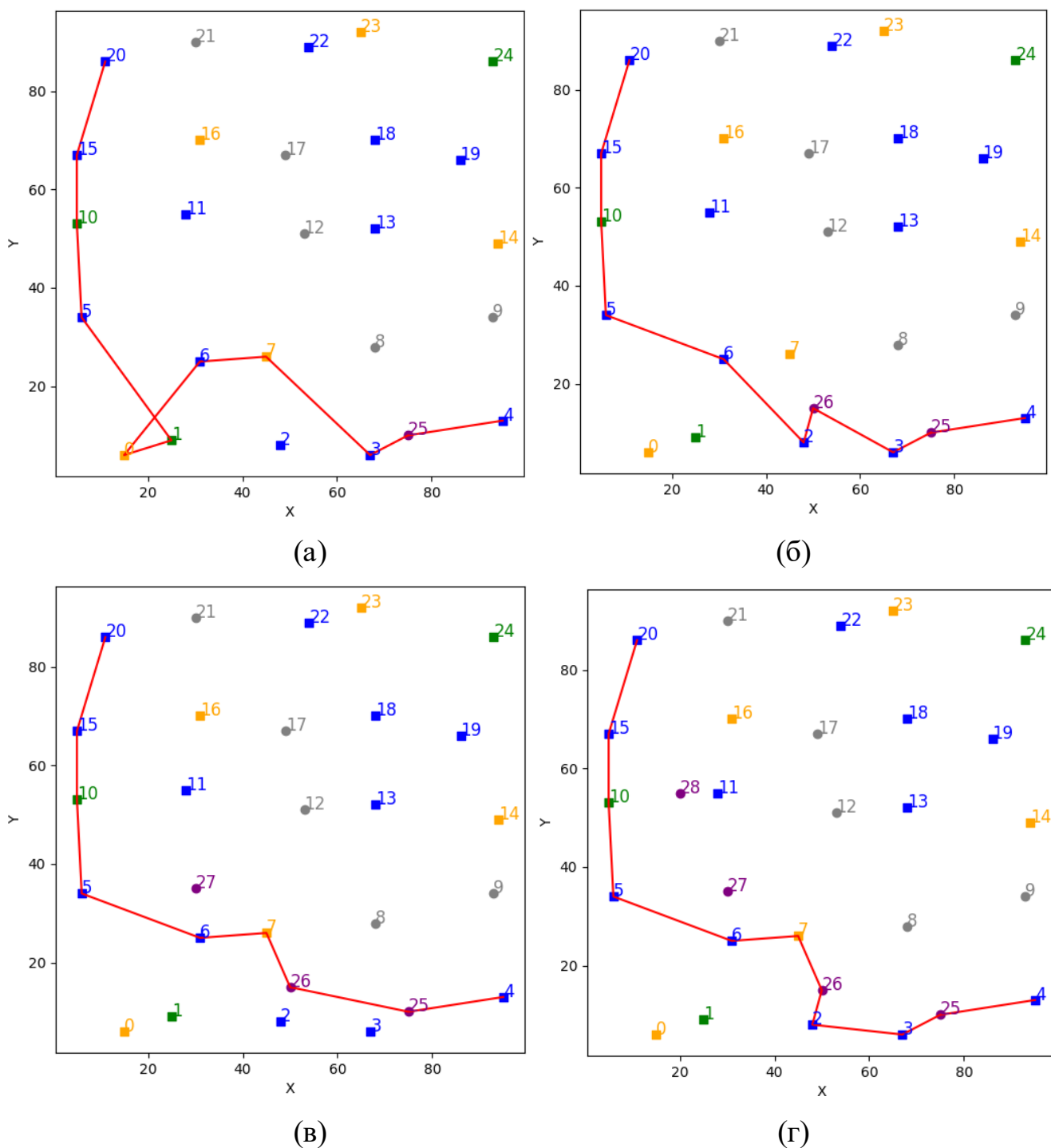


Рис. 2.31. Результат побудови МА маршруту між 4 і 20 вузлом при додаванні вузла 25 (а), 26 (б), 27(в), 28 (г)

Рис. 2.32 демонструє формування маршруту МА при додаванні вузла із номером 29.

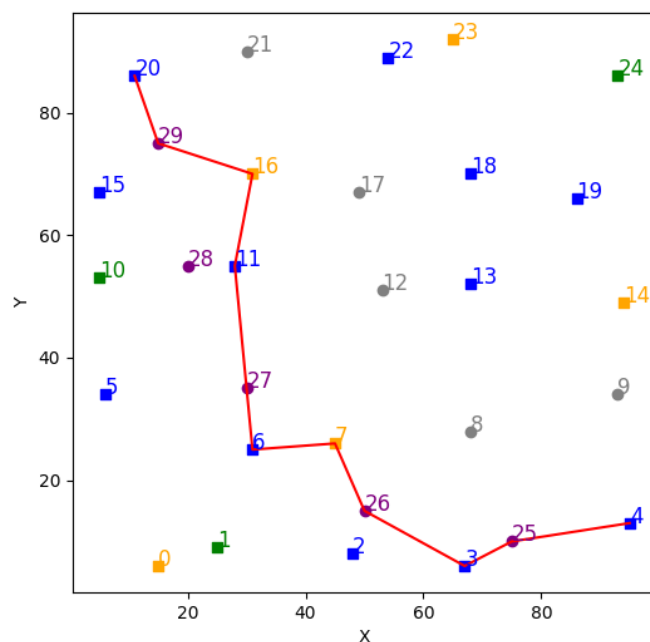


Рис. 2.32. Сформований МА маршрут при додаванні вузла 29

Для кращої наочності отриманих результатів їх представлено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Отримані результати використання розглянутих алгоритмів щодо пошуку маршруту при послідовному додаванні вузлів у розглянутій мережевій топології [131]

Розроблений генетичний алгоритм					
Номер доданого вузла	25	26	27	28	29
Утворений маршрут, вузли	{4, 25, 2, 6, 11, 15, 20}	{4, 25, 26, 6, 11, 15, 20}	{4, 25, 26, 27, 10, 20}	{4, 25, 26, 27, 28, 15, 20}	{4, 25, 26, 27, 28, 29, 20}
Довжина утвореного маршруту, м	145	140	136	133	126
Жадібний алгоритм					
Номер доданого вузла	25	26	27	28	29
Утворений маршрут, вузли	—	—	—	{4, 25, 3, 2, 26, 7, 6, 27, 11, 28, 10, 15, 20}	{4, 25, 3, 2, 26, 7, 6, 27, 11, 28, 10, 15, 29, 20}
Довжина утвореного маршруту, м	—	—	—	166	170
Мурашиний алгоритм					
Номер доданого вузла	25	26	27	28	29

Продовження таблиці 2.9

Утворений маршрут, вузли	{4, 25, 3, 7, 6, 0, 1, 5, 10, 15, 20}	{4, 25, 3, 26, 2, 6, 5, 10, 15, 20}	{4, 25, 26, 7, 6, 5, 10, 15, 20}	{4, 25, 3, 2, 26, 7, 6, 5, 10, 15, 20}	{4, 25, 3, 26, 7, 6, 27, 11, 16, 29, 20}
Довжина утвореного маршруту, м	188	156	149	158	145

Як бачимо, додавання нових вузлів при використанні ГА дозволило зменшити довжину маршруту. Це свідчить про його здатність ефективно адаптувати маршрути з урахуванням нових вузлів, оптимізуючи загальну відстань. ЖА здійснив успішне формування маршруту при додаванні вузлів 28 та 29, проте для цих випадків довжина маршруту є більшою у порівнянні із результатами ГА.

У порівнянні із МА, розроблене рішення стабільно формує коротші маршрути у всіх сценаріях додавання вузлів, забезпечуючи скорочення довжини маршруту в діапазоні від 8.72% до 22.87%. Найбільша перевага ГА над зафіксована після додавання 25 вузла. Це свідчить про те, що генетичні оператори швидше та ефективніше інтегрують новий вузол у глобально оптимальний маршрут, тоді як МА потребує більше ітерацій для перерозподілу феромонів та адаптації.

ЖА не зміг знайти дійсний маршрут після додавання вузлів 25, 26 та 27. Це демонструє його нездатність адаптуватися до швидких змін топології та високу залежність від локальних умов зв'язку.

На основі представлених результатів імітаційного моделювання здійснимо оцінку ефективності роботи розробленого ГА при виході із ладу вузлів СМ на основі імовірності успішного встановлення маршруту P_{succes_route} .

P_{succes_route} – це імовірність формування робочого маршруту для передачі даних від вузла-джерела до вузла-отримувача. Основні фактори, які впливають на даний критерій, це:

- динамічна топологія мережі, яка визначає зв'язки між вузлами;
- алгоритм маршрутизації, який здійснює пошук та вибір маршруту;
- стан мережевих вузлів, що визначає чи можна їх використовувати у процесі формування маршруту.

Варто зауважити, що імовірність успішної передачі даних та імовірність успішного встановлення маршруту не є тотожними поняттями.

При виході із ладу 20% вузлів від загальної кількості ГА демонструє 100% імовірність успішного встановлення маршруту для передачі даних між заданими вузлами, у той час як ЖА не забезпечує формування маршруту у всіх розглянутих випадках поступового видалення вузлів.

При поступовому додаванні п'яти вузлів до попередньої мережевої топології ГА демонструє 100% P_{succes_route} , тоді як ЖА є успішним тільки для двох випадків.

Відповідно тоді для ЖА $P_{succes_route} = \frac{2}{5} \cdot 100\% = 40\%$.

Визначимо загальне значення P_{succes_route} для усіх розглянутих випадків (при видаленні 5 вузлів, при додаванні 5 вузлів) на основі представлених даних у п. 2.4:

для ГА $P_{succes_route} = 100\%$, тоді як для ЖА $P_{succes_route} = \frac{2}{10} \cdot 100\% = 20\%$.

Таким чином, використання розробленого ГА дозволяє отримати у 5 разів більшу імовірність встановлення маршруту у порівнянні із ЖА для усіх випадків, представлених у цьому пункті.

Отже, на основі наведених результатів, розроблений ГА є оптимальним вибором для маршрутизації в БСМ із динамічною топологією завдяки здатності стабільно формувати маршрути, які є в середньому на 16.5% коротшими, ніж у МА, та повній відмовостійкості на відміну від ЖА.

Висновки до розділу 2

Цей розділ присвячено маршрутизації даних на основі генетичної еволюції для безпроводних сенсорних мереж. Представлено розроблений генетичний алгоритм для формування маршруту мінімальної довжини у БСМ при використанні адаптивної імовірності схрещування, мутації та генетичних операторів: турнірного оператора відбору, впорядкованого оператора схрещування та оператора перемішування для мутації. Наведено математичний апарат таких метрик відстаней як Евклідова, Чебишова, Манхеттенська та Мінковського.

Здійснено дослідження ефективності використання розробленого ГА при формуванні маршруту із використанням різних метрик відстані у мережі для двох випадків: при наявності вузлів одного радіусу дії та трьох радіусів дії. Моделювання проводилося на основі програмного продукту, створеного на мові Python з інтеграцією спеціалізованої бібліотеки DEAP.

Показано, що для ГА при знаходженні маршруту найменшої довжини із мінімальними часовими затратами для 25 сенсорних вузлів оптимальними параметрами є: кількість поколінь – 150, розмір популяції – 300.

На основі результатів імітаційного моделювання продемонстровану перевагу використання пропонованого рішення для таких випадків:

- при розгляді вузлів із однаковим радіусом дії: ГА дозволив сформувати маршрут, довжина якого на 47,14% менша у порівнянні із ЖА, та на 28,39% – із МА. Кількість переходів у маршруті, сформованому за допомогою ГА, також є суттєво меншою: у три рази порівняно з ЖА та у два рази порівняно з МА.

- при розгляді вузлів із трьома радіусами дії для різних метрик відстані розроблений ГА дозволив сформувати маршрут, який є меншим порівняно із ЖА: на 42.38% – для Евклідової метрики, на 32.10% – для Манхеттенської метрики, на 48.80% – для метрики Чебишова, на 45.41% – для метрики Мінковського; порівняно із МА: на 26.67% – для Евклідової метрики, на 4.62% – для Манхеттенської метрики, на 18.32% – для метрики Чебишова, на 16.30% – для метрики Мінковського.

- при поступовому видаленні мережевих вузлів пропонований ГА продемонстрував кращі результати в оптимізації маршруту порівняно з ЖА та МА. Це підтверджується стабільним зменшенням довжини маршруту порівняно з МА, забезпечуючи в середньому 16.14% покращення. Щодо ефективності роботи ЖА, то у 5 розглянутих випадках його використання не дозволило сформувати маршрут для передачі даних між двома розглянутими вузлами.

- при додаванні нових вузлів у існуючу топологію: у порівнянні із МА, розроблений ГА стабільно формує коротші маршрути у всіх сценаріях додавання вузлів, забезпечуючи скорочення довжини маршруту в діапазоні від 8.72% до 22.87%. При цьому ЖА не зміг знайти дійсний маршрут після додавання вузлів 25,

26 та 27, що демонструє його нездатність адаптуватися до швидких змін топології та високу залежність від локальних умов зв'язку.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування розробленого методу у мережеских топологіях, де надійність має поєднуватися з мінімізацією вартості маршруту в умовах додавання/ видалення сенсорних вузлів.

РОЗДІЛ 3. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ ДАНИХ У МЕРЕЖАХ ІЗ ДИНАМІЧНО ЗМІННОЮ ТОПОЛОГІЄЮ

3.1. Імітаційна модель безпроводної сенсорної мережі

Розглянемо БСМ мережу із m сенсорних вузлів, кожен із яких має певний радіус дії. Вважаємо, що така мережа є одноранговою (децентралізованою), відповідно кожен її вузол може бути як приймачем, так і передавачем. У таких динамічних топологіях кожен вузол відповідає за встановлення з'єднань із сусідніми вузлами і за ретрансляцію пакетів від імені інших вузлів, тому такі мережі можуть бути створені без підтримки стаціонарної інфраструктури. Завдяки цим властивостям децентралізована БСМ має великий потенціал застосування в різних сценаріях, зокрема для зв'язку на полі бою, при стихійних лихах, аваріях.

Представимо модель такої мережі як орієнтований зважений граф $G(V, E)$, де V – вершини (сенсорні вузли), E – їх ребра (з'єднання між ними). Обґрунтуємо вибрані властивості графа.

Використано орієнтований граф, оскільки для БСМ вузли здійснюють передачу даних у двох напрямках, тобто їх взаємодія є двосторонньою. Для врахування значень різних параметрів вибрано зважений граф, кожному ребру якого відповідає певне значення – вага W . Вага ребра використовується для різних задач, зокрема для пошуку оптимального маршруту.

Оскільки для багатокритеріальної маршрутизації вага ребра має включати більше одного параметру, то W можна представити як множину $\{w_1, w_2, \dots, w_{z-1}\}$ значень ваг ребер, де $w_1 = \{w^{1k}, w^{2k}, \dots, w^{qk}\}$, w^{qk} – значення певного q -ого параметру (критерію), який використовується для оптимізації маршруту.

Кожен сенсорний вузол на площині має певне місце і характеризується координатами (x_m, y_m) та радіусом дії R_{com} , що в свою чергу дозволяє:

- здійснювати вибір оптимальних маршрутів, зокрема із мінімальною відстанню;
- створювати моделі мережі для симуляції різних сценаріїв, наприклад додавання / видалення вузлів.

Для аналізу структури мережі використовується її візуалізація у двовимірному просторі, що:

- здійснює зрозуміле представлення топології мережі для швидкої ідентифікації вузлів та з'єднань між ними;
- допомагає визначити оптимальні місця для розміщення нових вузлів або переміщення існуючих для покращення продуктивності мережі тощо.

Приклад моделі мережі у двовимірному просторі із вузлами різного радіусу дії представлено на рис. 3.1, при цьому для СВ ■ – $R_{com} = 20$ м, ■ – $R_{com} = 30$ м, ■ – $R_{com} = 40$ м.

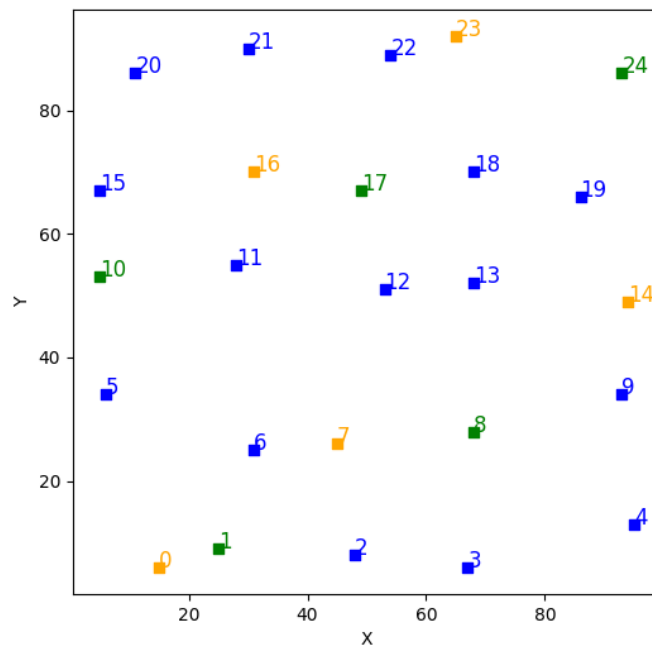


Рис. 3.1. Модель мережі БСМ із вузлами різного радіусу дії

Приймаємо, що між двома вузлами існує з'єднання (ребро), якщо вони знаходяться у зоні R_{com} . Ця зона являє собою коло радіусом R_{com} , і позначає те, що кожен вузол може взаємодіяти тільки з тими вузлами, які знаходяться в межах певної відстані (R_{com}).

Це важливе припущення для моделювання БСМ, оскільки воно визначає, які саме вузли можуть обмінюватись даними. Вузли за межами розглянутого кола знаходяться поза зоною досяжності зв'язку даного вузла, внаслідок чого вони не можуть використовуватись для передачі даних. Відповідно умову наявності зв'язку між вузлами БСМ можна записати як:

$$d_{i,j} = \begin{cases} d_{i,j} \leq R_{com}, \text{ то з'єднання існує} \\ d_{i,j} > R_{com}, \text{ то з'єднання не існує} \end{cases}. \quad (3.1)$$

Відповідно до (3.1) з'єднання (ребра) між двома вузлами немає, якщо відстань між ними перевищує R_{com} першого вузла. Придатність певного маршруту визначається на основі функції ваги ребер, які входять у нього:

$$Q_r(i, j) = f(W_{i,j}), \quad W_{i,j} = \{w_1, w_2, \dots, w_{z-1}\}. \quad (3.2)$$

(3.2) використовується для визначення ваги між вузлами i, j у мережевому графі на основі характеристик вузлів і можливих параметрів, які впливають на вагу з'єднання між ними. Для об'єднання значень різних критеріїв оцінки придатності маршруту використовується їх нормування, що більш детально описано у п. 3.3. Це дозволяє враховувати вагу різних метрик, зокрема відстань, затримку, заряд батареї вузла тощо, для визначення оптимального маршруту.

3.2. Багатокритеріальний метод маршрутизації даних на основі генетичного алгоритму

Для пошуку оптимального маршруту передачі даних у БСМ сформульовано багатокритеріальну задачу оптимізації, що дозволяє врахувати як параметри фізичного рівня (радіус дії, рівень сигналу, Евклідову відстань між вузлами, залишковий заряд батареї), так і характеристики мережевого рівня (затримка, втрати даних, ступінь завантаженості вузлів). Такий підхід забезпечує комплексне урахування факторів, що безпосередньо впливають на ефективність та надійність функціонування мережі.

Кожний маршрут визначається як послідовність вершин: $P = (v_0 = src, v_1, \dots, v_L = dest)$, де $src, dest$ позначають відповідно початковий та кінцевий вузол, L – кількість переходів (ребер у маршруті).

Ребро (i, j) включається до множини E за умови, що відстань між вузлами не перевищує радіус дії вузла:

$$(i, j) \in E \leftrightarrow d_{ij} \leq R_i, \quad (3.3)$$

де d_{ij} – Евклідова відстань між вузлами i та j , R_i – радіус дії вузла i .

Для кожного ребра між сусідніми вузлами (v_r, v_{r+1}) визначається вартість $\tilde{c}_{v_r, v_{r+1}}$, яка обчислюється на основі нормалізованої багатокритеріальної оцінки із використанням таких критеріїв: Евклідова відстань, заряд батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримка передачі даних, вхідний/вихідний ступінь вузла [135].

Нормування кожного із розглянутих критеріїв w здійснюється на основі (3.4):

$$w_{norm} = \begin{cases} a + (b - a) \left(\frac{w - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right), \text{при } \uparrow w \rightarrow Q \uparrow \\ a + (b - a) \left(\frac{w_{max} - w}{w_{max} - w_{min}} \right), \text{при } \downarrow w \rightarrow Q \uparrow \end{cases}, \quad (3.4)$$

де w_{norm} – нормоване значення критерію, w – поточне значення критерію між розглянутими вузлами, w_{min} , w_{max} – мінімальне і максимальне можливе значення критерію, відповідно, a, b – мінімальне і максимальне значення діапазону нормалізації, відповідно; Q – значення якості маршруту. Діапазон нормалізації є $[1, 100]$. Відповідно до нього було здійснено нормування усіх значень розглянутих критеріїв.

Для забезпечення справедливості внеску кожного критерію в процес оцінки придатності маршруту використано ваговий коефіцієнт. Його значення є однаковим для всіх розглянутих критеріїв, щоб запобігти домінуванню одного критерію над іншими та сприяти їх коректному порівнянню і комбінуванню (3.5) [133].

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 = 1, \quad \alpha_i = 1/n, \quad (3.5)$$

де n – кількість критеріїв.

Після приведення критеріїв до нормалізованого вигляду та врахування вагових коефіцієнтів формується узагальнена функція вартості маршруту, яка визначається як сума вагових коефіцієнтів усіх ребер, що входять до нього:

$$C(P) = \sum_{r=0}^{L-1} \tilde{c}_{v_r, v_{r+1}}. \quad (3.6)$$

Задача пошуку оптимального маршруту формулюється як задача мінімізації:

$$P^* = \arg \min_{P \in \rho(src, dect)} C(P), \quad (3.7)$$

де $\rho(src, dect)$ – множина всіх допустимих маршрутів між вузлами src і $dect$.

Наведена постановка задачі дозволяє враховувати як характеристики каналів зв'язку, так і параметри роботи вузлів. Зокрема, включення заряду батареї як критерію максимізації сприяє рівномірному використанню ресурсів мережі, тоді як врахування рівня сигналу та ймовірності втрат забезпечує підвищену надійність передачі даних. Такий багатокритеріальний підхід, із використанням вагових коефіцієнтів та нормалізації, створює передумови для адаптивного пошуку оптимального маршруту в умовах динамічно змінної сенсорної мережі.

Розглянемо більш детально процес нормування вибраних критеріїв, які мають різні одиниці вимірювання. Для того, щоб привести їх до одного масштабу, потрібно виконати нормування, що дозволяє пропорційно впливати на результат оптимізації [134]. Для об'єднання декількох критеріїв в одну цільову функцію використовуються вагові коефіцієнти, які дозволяють врахувати важливість кожного критерію.

Таким чином, вагові коефіцієнти забезпечують гнучкість у налаштуванні алгоритму відповідно до поточних вимог. Зміна їх значень дозволяє здійснювати адаптацію алгоритму пошуку оптимального рішення до різних умов.

Нормування критерію w здійснюється на основі (3.4). Після вибору оптимального маршруту по певному критерію чи їх сукупності, пропонується сформувати множину альтернативних (резервних) маршрутів по критерію кількості транзитів (переходів).

Дана множина називається альтернативною, оскільки у ній будуть знаходитись маршрути, які можна використати на випадок непрацездатності оптимального маршруту. Відповідно така множина маршрутів дозволить надсилати дані через інші доступні маршрути. Її використання є доцільним для підвищення надійності роботи БСМ при змінних умовах.

Пропонується формувати таку множину маршрутів, задаючи діапазон кількості транзитів, базуючись на оптимальному маршруті. Тобто після визначення найкращого маршруту здійснюється визначення кількості переходів h для нього. Далі для формування множини альтернативних маршрутів задаємо діапазон $[h-1; h+3]$ із кроком 1.

Після нормування здійснюється запуск розробленого ГА. Варто зауважити, що формування альтернативних маршрутів можна розглядати як додаткову дію.

Розглянемо критерії для пошуку оптимального маршруту в БСМ.

Евклідова відстань

Евклідова відстань W_1 використовується для визначення фізичної відстані між вузлами. Чим більша відстань між двома вузлами, тим більше енергії необхідно для передачі сигналу. Це пов'язано з тим, що сигнал слабшає з відстанню, тому для більшої відстані відповідно потрібно більше потужності. Також збільшення відстані безпосередньо впливає на час передачі даних. Формалізоване правило визначення W_1 двома вузлами, які з'єднані між собою ребром, можна представити як $\sum_{i=1}^n d_i$, де n – кількість ребер у маршруті. Для цього критерію використовується діапазон значень $[1;40]$ м, що обумовлено радіусом дії вузлів, діапазон нормалізації – $[1;100]$.

Нормування W_1 здійснюється відповідно до формули:

$$w_{1norm} = a + (b - a) \left(\frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}} \right), \quad (3.8)$$

де w_{1norm} – нормоване значення Евклідової відстані, d – поточне значення Евклідової відстані між розглянутими вузлами, $d_{\min}$, $d_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення Евклідової відстані, відповідно.

Заряд батареї вузла

Заряд батареї вузла W_2 є важливим для забезпечення довготривалої роботи БСМ. Ефективна маршрутизація повинна враховувати величину заряду батареї вузлів, щоб забезпечити баланс енергоспоживання.

Формалізоване правило визначення W_2 між двома вузлами, які з'єднані між собою ребром, можна представити як $\min(c_1, \dots, c_n)$, де c – значення заряду батареї вузла. Для цього критерію використовується діапазон значень $[1;100]$ %, діапазон нормалізації – $[1;100]$.

Нормування критерію W_2 здійснюється як:

$$w_{2norm} = a + (b - a) \left(\frac{c_{max} - c}{c_{max} - c_{min}} \right), \quad (3.9)$$

де w_{2norm} – нормоване значення критерію заряду батареї вузла, c – поточне значення критерію заряду батареї вузла, c_{min} , c_{max} – мінімальне і максимальне значення критерію заряду батареї вузла, відповідно.

Рівень сигналу вузла

Рівень сигналу вузла W_3 впливає на якість та надійність зв'язку між вузлами. Високий рівень сигналу між вузлами мінімізує ризик втрат даних під час передачі, що є особливо важливим для БСМ, оскільки повторна передача негативно впливає на рівень заряду вузла.

Формалізоване правило визначення W_3 між двома вузлами, які з'єднані між собою ребром, можна представити як $\min(s_1, \dots, s_n)$, де s – значення рівня сигналу вузла. Для цього критерію використовується діапазон значень $[-90; -31]$ дБм, діапазон нормалізації – $[1; 100]$.

Нормування критерію W_3 здійснюється як:

$$w_{3norm} = a + (b - a) \left(\frac{s_{max} - s}{s_{max} - s_{min}} \right), \quad (3.10)$$

де w_{3norm} – нормоване значення критерію рівня сигналу вузла, s – поточне значення критерію рівня сигналу вузла, s_{min} , s_{max} – мінімальне і максимальне значення критерію рівня сигналу вузла, відповідно.

Рівень втрат даних

Рівень втрат даних W_4 дозволяє оцінити надійність маршруту. Вибір маршрутів з низьким рівнем втрат даних сприяє підвищенню загальної ефективності мережі, зменшуючи необхідність повторних передач.

Формалізоване правило визначення W_4 між двома вузлами, які з'єднані між собою ребром, можна представити як $\max(l_1, \dots, l_n)$, де l – значення рівня втрат даних. Для цього критерію використовується діапазон значень $[1; 15]\%$, діапазон нормалізації – $[1; 100]$.

Нормування критерію W_4 здійснюється як:

$$w_{4norm} = a + (b - a) \left(\frac{l - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \right), \quad (3.11)$$

де w_{4norm} – нормоване значення критерію рівня втрат даних, l – поточне значення критерію рівня втрат даних, $l_{\min}$, $l_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення критерію рівня втрат даних, відповідно.

Затримка передачі даних

Затримка передачі даних W_5 безпосередньо пов'язана з іншими розглянутими критеріями. Також велике значення даного критерію негативно впливає на розмір черги у буферах вузлів, що може спричинити перевантаження і втрату даних.

Формалізоване правило визначення W_5 між двома вузлами, які з'єднані між собою ребром, можна представити як $\max(t_1, \dots, t_n)$, де t – значення затримки передачі даних. Для цього критерію використовується діапазон значень $[1; 20]$ мс, діапазон нормалізації – $[1; 100]$.

Нормування критерію W_5 здійснюється як:

$$w_{5norm} = a + (b - a) \left(\frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \right), \quad (3.12)$$

де w_{5norm} – нормоване значення критерію затримки передачі даних, t – поточне значення критерію затримки передачі даних, $t_{\min}$, $t_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення критерію рівня затримки передачі даних, відповідно.

Вхідний / вихідний ступінь вузла

Вхідний / вихідний ступінь вузла w_6 дозволяє визначити наскільки часто певний вузол використовується для мережевих з'єднань, що відображає кількість ребер, які входять / виходять із певного вузла. Цей критерій є важливим, оскільки він безпосередньо впливає на можливості вибору вузлів для подальшої передачі даних.

Високий вихідний ступінь вузла свідчить про наявність великої кількості можливих маршрутів для передачі даних з цього вузла. Це забезпечує гнучкість у виборі подальшого маршруту та дозволяє адаптувати маршрутизацію залежно від поточних умов. Наявність багатьох вхідних ребер сприяє кращому балансуванню навантаження між вузлами, оскільки дані можуть розподілятися по декількох шляхах, що знижує ризик перевантаження одного маршруту і, відповідно, можливість виникнення "вузьких місць" у мережі.

Отже, при великому значенні w_6 мережа стає більш стійкою до збоїв, оскільки існують альтернативні маршрути при виникненні проблем на основному.

w_6 є комплексним критерієм, оскільки його значення формується на основі двох величин: вхідної та вихідної кількості ребер для вузла мережі. Формалізоване правило визначення цього критерію для кожного вузла $\min(g_1, \dots, g_n)$, де g – кількість вхідних/вихідних ребер у вузол. Для w_6 використовується діапазон значень $[1; 10]$, діапазон нормалізації – $[1; 100]$. Нормування критерію w_6 здійснюється як:

$$w_{6norm} = a + (b - a) \left(\frac{g_{max} - g}{g_{max} - g_{min}} \right), \quad (3.13)$$

де w_{6norm} – нормоване значення критерію вхідного/вихідного ступеня вузла; g , g_{min} , g_{max} – поточне, мінімальне і максимальне значення вхідного/вихідного ступеня вузла, відповідно.

Підсумовуючи (3.8 – 3.13), придатність кожної ділянки (ребра) для найбільш ефективного маршруту оцінюється на основі значення певного критерію: для Евклідової відстані, заряду батареї, рівня сигналу вузла, вхідного/вихідного ступеня

вузла– найменше значення, для рівня втрат даних і затримки передачі сигналу – найбільше значення.

3.3. Генетичний алгоритм багатокритеріального пошуку оптимального маршруту для безпроводної сенсорної мережі

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботі [135].

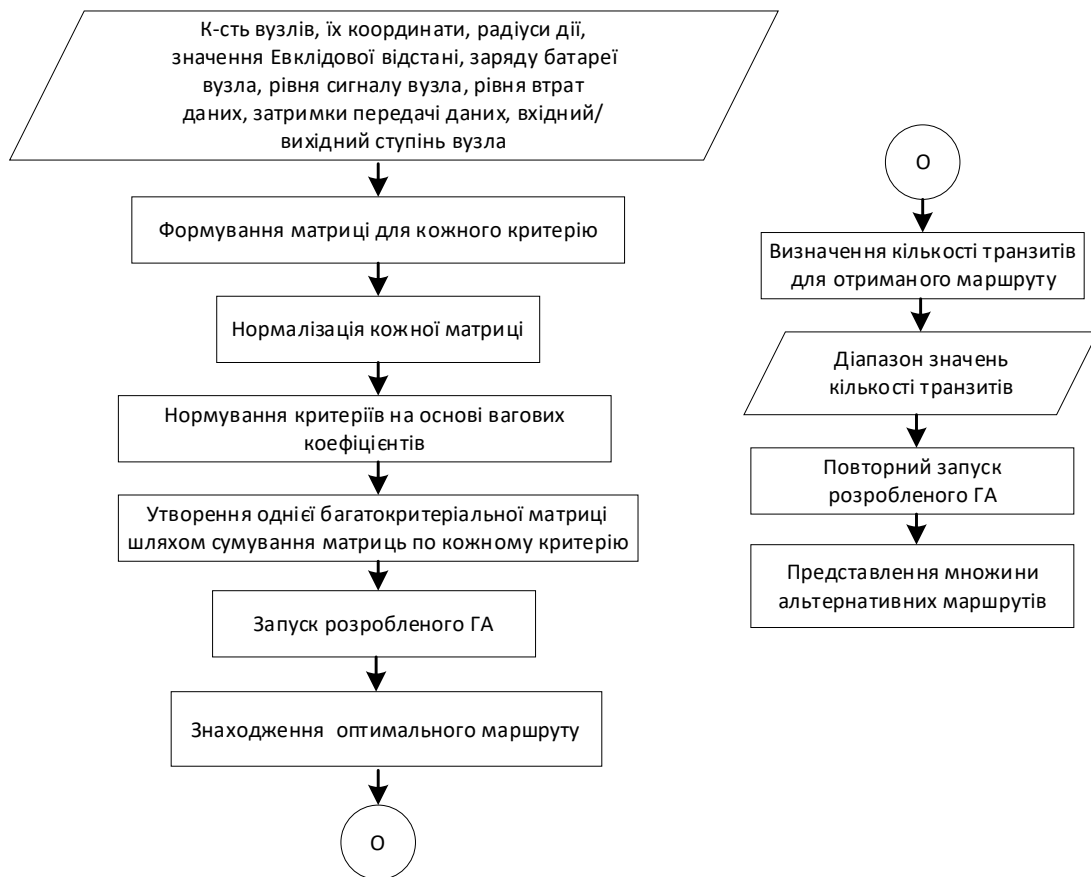
Для пошуку оптимального маршруту передачі даних у БСМ використано багатокритеріальність, що дозволяє враховувати усі важливі параметри, які впливають на ефективну і надійну роботу мережі.

Для визначення критеріїв, які забезпечують комплексний та збалансований пошук маршруту, було детально проаналізовано особливості функціонування БСМ та роботи, присвячені маршрутизації [136-141]. На основі цього було вибрано такі критерії як Евклідова відстань, заряд батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримка передачі даних та вхідний/вихідний ступінь вузла, що у сукупності дозволяє формувати оптимальні рішення в різних умовах [135].

На рис. 3.2 представлено розроблений алгоритм для багатокритеріального пошуку оптимального маршруту та множини альтернативних маршрутів. Після введення вхідних даних відбувається формування матриці для кожного критерію, який використовується для пошуку маршруту.

Кожен елемент такої матриці представляє з'єднання між двома вузлами і включає в себе значення певного параметру (Евклідової відстані, рівня втрат даних тощо). Далі здійснюється нормалізація утворених матриць для їх приведення до діапазону [1;100].

Для забезпечення справедливого внеску кожного критерію в процес оцінки придатності маршруту використано ваговий коефіцієнт. Його значення є однаковим для всіх розглянутих критеріїв, щоб запобігти домінуванню одного критерію над іншими та сприяти їх коректному порівнянню і комбінуванню.



(а) оптимального маршруту

(б) множини резервних маршрутів по критерію кількості транзитів

Рис. 3.2. Узагальнена блок-схема розробленого алгоритму багатокритеріального пошуку [135]

Наступний етап – це утворення однієї багатокритеріальної матриці шляхом сумування нормалізованих матриць по 6-ти критеріям. Після цього переходимо до запуску розробленого ГА, що дозволяє знайти оптимальний маршрут у заданих умовах. Якщо мережева топологія часто змінюється через мобільність вузлів або зміну умов середовища, то доцільно далі здійснити пошук множини альтернативних маршрутів, що міститиме ті маршрути, значення фітнес-функції яких є близькими до оптимального рішення. Для цього пропонується застосувати критерій кількість транзитів (переходів) h . Відповідно визначається його значення для оптимального маршруту, після чого задається діапазон значень як $[h-1; h+3]$ із кроком 1. Здійснюється повторний запуск ГА, внаслідок чого формується множина

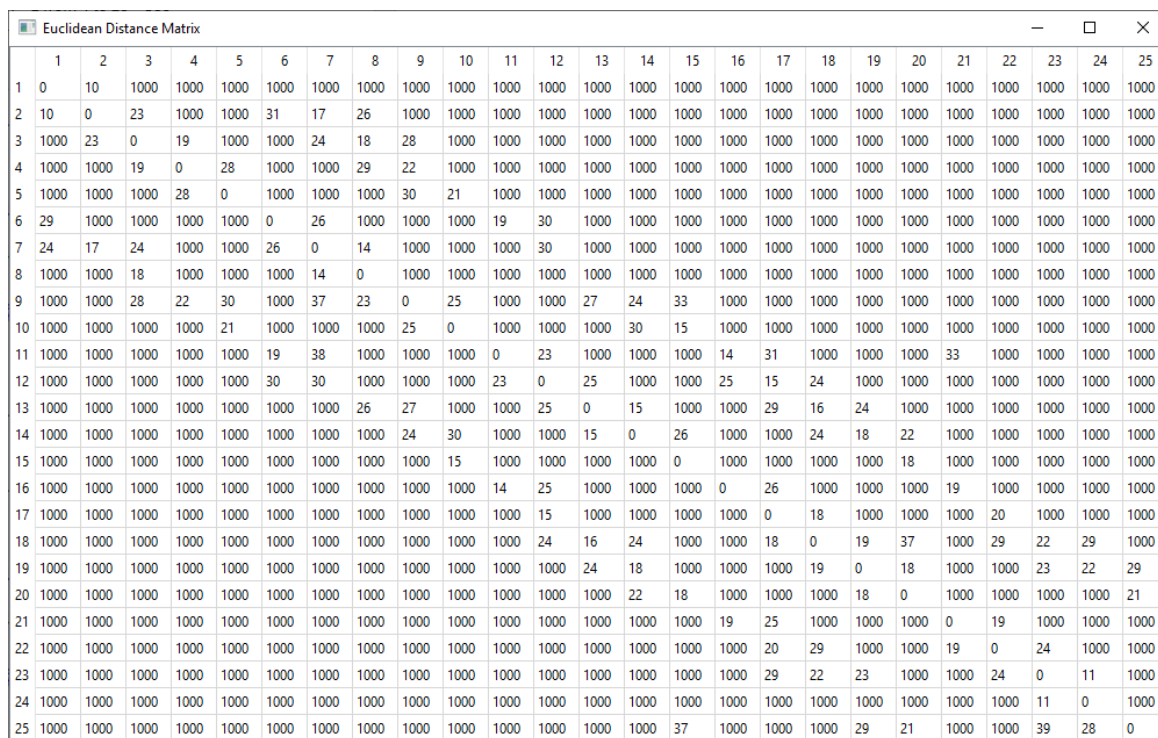
альтернативних маршрутів, що дозволить мережі здійснювати швидку адаптацію при зміні умов.

3.4. Дослідження ефективності застосування багатокритеріального генетичного алгоритму для визначення оптимального маршруту між сенсорними вузлами

Для перевірки ефективності розробленого ГА багатокритеріального пошуку оптимального маршруту для БСМ створено програму на мові програмування Python, основою якої є бібліотека DEAP. У цьому пункті наведено результати моделювання при використанні розроблених рішень на основі генетичної еволюції, представлених у 3 розділі, ЖА та МА, особливості роботи яких описано у 2 розділі.

а) для Евклідової відстані

Для роботи алгоритму здійснено формування початкової матриці Евклідових відстаней, яка представлена на рис. 3.3.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	10	0	23	1000	1000	31	17	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	23	0	19	1000	1000	24	18	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	19	0	28	1000	1000	29	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	28	0	1000	1000	1000	30	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	29	1000	1000	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	24	17	24	1000	1000	26	0	14	1000	1000	1000	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	18	1000	1000	1000	14	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	28	22	30	1000	37	23	0	25	1000	1000	27	24	33	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	25	0	1000	1000	1000	30	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	19	38	1000	1000	1000	0	23	1000	1000	1000	14	31	1000	1000	1000	33	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	30	30	1000	1000	1000	23	0	25	1000	1000	25	15	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	27	1000	1000	25	0	15	1000	1000	29	16	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	30	1000	1000	15	0	26	1000	1000	24	18	22	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	18	1000	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	25	1000	1000	0	26	1000	1000	1000	19	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	0	18	1000	1000	1000	20	1000	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	16	24	1000	1000	18	0	19	37	1000	29	22	29	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	18	1000	1000	1000	19	0	18	1000	1000	23	22	29
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	18	1000	1000	18	0	1000	1000	1000	1000	21	
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	25	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	29	1000	1000	19	0	24	1000	1000	
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	29	22	23	1000	1000	24	0	11	1000	
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	0	1000	
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	37	1000	1000	1000	29	21	1000	39	28	0	

Рис. 3.3. Матриця відстаней

Рис. 3.4 демонструє графову модель мережі БСМ для Евклідової відстані, рис. 3.5 – нормалізовану матрицю. На рис. 3.4 круг позначає вузол мережі, у якому вказано його порядковий номер відповідно до моделі розглянутої мережі БСМ у п. 3.2, ребра – з'єднання між вузлами, на яких вказано їх вагу – нормалізоване

значення Евклідової відстані. Для графової моделі, представленої у цьому розділі, використовуються вузли різних кольорів, які позначають різні радіуси їх дії: ● – 20 метрів, ● – 30 метрів, ● – 40 метрів.

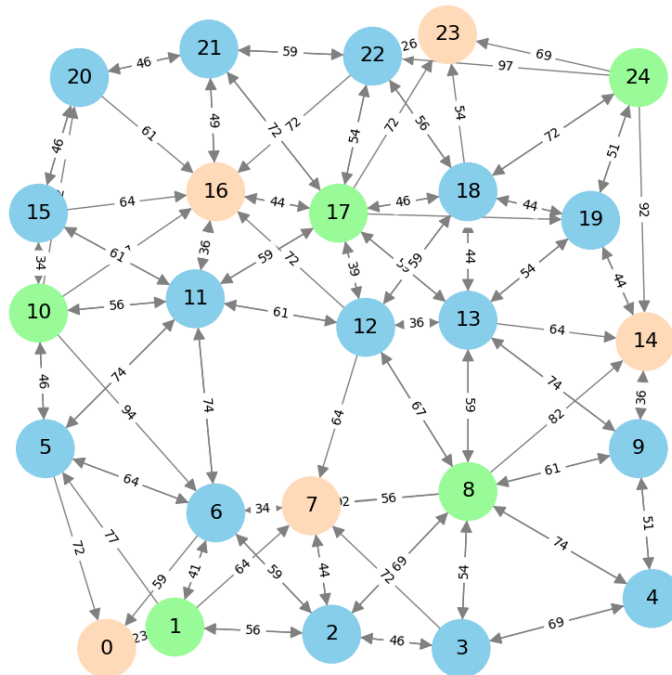


Рис. 3.4. Графова модель мережі для Евклідової відстані

Normalized Euclidean Distance Matrix																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	23	0	56	1000	1000	77	41	64	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	56	0	46	1000	1000	59	44	69	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	46	0	69	1000	1000	72	54	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	69	0	1000	1000	1000	74	51	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	72	1000	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	1000	46	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	59	41	59	1000	1000	64	0	34	1000	1000	1000	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	44	1000	1000	1000	34	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	69	54	74	1000	92	56	0	61	1000	1000	67	59	82	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	51	1000	1000	1000	61	0	1000	1000	1000	74	36	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	46	94	1000	1000	1000	0	56	1000	1000	1000	34	77	1000	1000	1000	82	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	74	74	1000	1000	1000	56	0	61	1000	1000	61	36	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	64	67	1000	1000	61	0	36	1000	1000	72	39	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	74	1000	1000	36	0	64	1000	1000	59	44	54	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	36	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	44	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	34	61	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	1000	46	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	36	1000	1000	1000	0	44	1000	1000	1000	49	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	39	59	1000	1000	44	0	46	92	1000	72	54	72	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	44	1000	1000	46	0	44	1000	1000	56	54	72	1000
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	54	44	1000	1000	44	0	1000	1000	1000	1000	51
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	46	61	1000	1000	1000	0	46	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	49	72	1000	1000	46	0	59	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	72	54	56	1000	1000	59	0	26	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	92	1000	1000	1000	72	51	1000	1000	97	69	0

Рис. 3.5. Нормалізована матриця відстаней

Рис. 3.6 демонструє отриманий маршрут за критерієм W_1 при використанні розробленого ГА.

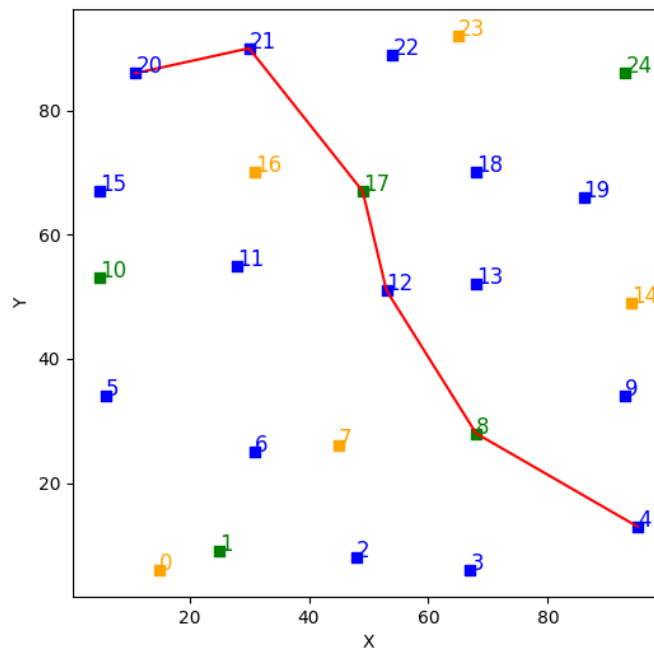


Рис. 3.6. Побудований маршрут за критерієм W_1 при використанні ГА

На рис. 3.7 та 3.8 представлено нормалізовану матрицю відстаней та маршрут за критерієм W_1 при використанні ЖА.

Greedy Normalized Euclidean Distance Matrix																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	23	0	56	1000	1000	77	41	64	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	56	0	46	1000	1000	59	44	69	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	46	0	69	1000	1000	72	54	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	69	0	1000	1000	1000	74	51	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	72	1000	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	1000	46	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	59	41	59	1000	1000	64	0	34	1000	1000	1000	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	44	1000	1000	1000	34	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	69	54	74	1000	92	56	0	61	1000	1000	67	59	82	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	51	1000	1000	1000	61	0	1000	1000	1000	74	36	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	46	94	1000	1000	1000	0	56	1000	1000	1000	34	77	1000	1000	1000	82	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	74	74	1000	1000	1000	56	0	61	1000	1000	61	36	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	64	67	1000	1000	61	0	36	1000	1000	72	39	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	74	1000	1000	36	0	64	1000	1000	59	44	54	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	36	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	44	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	34	61	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	46	1000	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	39	59	1000	1000	0	44	1000	1000	49	1000	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	39	59	1000	1000	44	0	46	92	1000	72	54	72	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	44	1000	1000	1000	46	0	44	1000	1000	56	54	72
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	54	44	1000	1000	1000	44	0	1000	1000	1000	1000	51
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	46	61	1000	1000	1000	0	46	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	49	72	1000	1000	46	0	59	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	72	54	56	1000	1000	59	0	26	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	92	1000	1000	1000	72	51	1000	1000	97	69	0

Рис. 3.7. Нормалізована матриця відстаней для ЖА

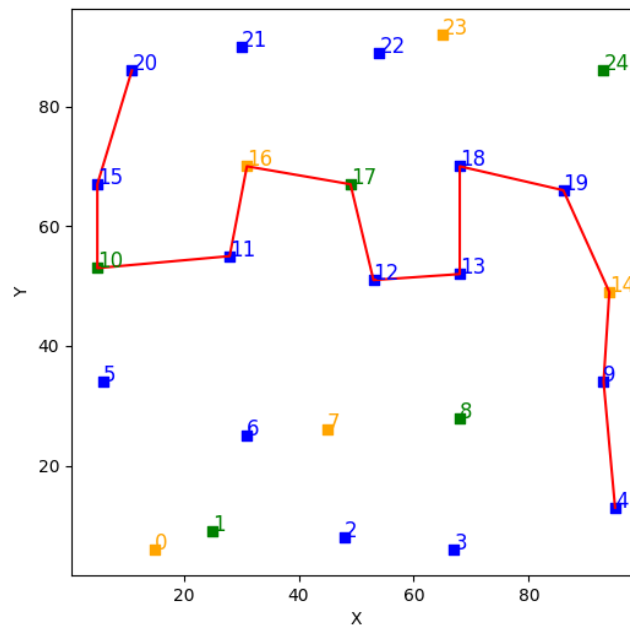


Рис. 3.8. Побудований маршрут за критерієм W_1 при використанні ЖА

На рис. 3.9 та 3.10 представлено нормалізовану матрицю відстаней та маршрут за критерієм W_1 при використанні МА.

ACO Normalized Euclidean Distance Matrix																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	0	23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
2	23	0	56	1000	1000	77	41	64	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
3	1000	56	0	46	1000	1000	59	44	69	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
4	1000	1000	46	0	69	1000	1000	72	54	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
5	1000	1000	1000	69	0	1000	1000	1000	74	51	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
6	72	1000	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	1000	46	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
7	59	41	59	1000	1000	64	0	34	1000	1000	1000	74	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
8	1000	1000	44	1000	1000	1000	34	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
9	1000	1000	69	54	74	1000	92	56	0	61	1000	1000	67	59	82	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
10	1000	1000	1000	1000	51	1000	1000	1000	61	0	1000	1000	1000	74	36	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
11	1000	1000	1000	1000	1000	46	94	1000	1000	1000	0	56	1000	1000	1000	34	77	1000	1000	1000	82	1000	1000	1000	1000		
12	1000	1000	1000	1000	1000	74	74	1000	1000	1000	56	0	61	1000	1000	61	36	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	64	67	1000	1000	61	0	36	1000	1000	72	39	59	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	74	1000	1000	36	0	64	1000	1000	59	44	54	1000	1000	1000	1000	1000		
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	36	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	44	1000	1000	1000	1000	1000		
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	34	61	1000	1000	1000	0	64	1000	1000	1000	46	1000	1000	1000	1000		
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	36	1000	1000	1000	1000	0	44	1000	1000	1000	49	1000	1000	1000		
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	39	59	1000	1000	44	0	46	92	1000	72	54	72	1000		
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	59	44	1000	1000	1000	46	0	44	1000	1000	56	54	72		
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	54	44	1000	1000	1000	44	0	1000	1000	1000	1000	51		
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	46	61	1000	1000	1000	0	46	1000	1000	1000		
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	49	72	1000	1000	46	0	59	1000	1000		
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	72	54	56	1000	1000	59	0	26	1000		
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	26	0	1000		
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	92	1000	1000	1000	72	51	1000	1000	97	69	0		

Рис. 3.9. Нормалізована матриця відстаней для МА

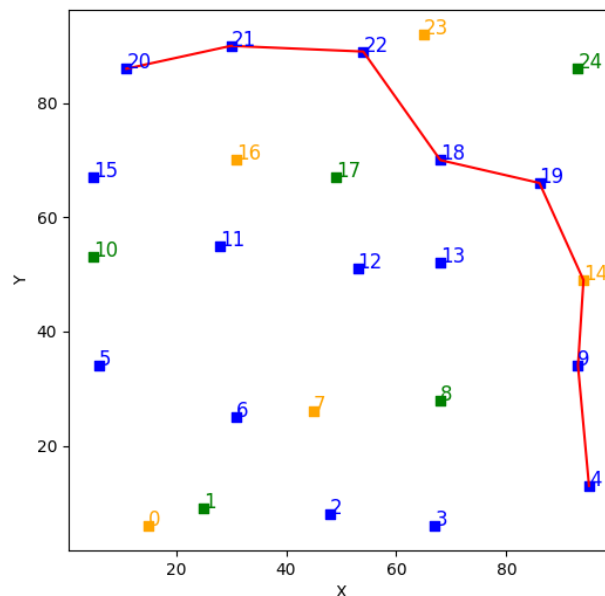


Рис. 3.10. Побудований маршрут за критерієм W_1 при використанні МА

Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів отримані результати моделювання наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння утворених маршрутів по критерію Евклідової відстані при використанні розробленого ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	298
Жадібний	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 11, 10, 15, 20}	510
Мурашиний	{4, 9, 14, 19, 18, 22, 21, 20}	336

На основі даних, представлених у таблиці 3.1, авторський ГА формує маршрут, який є коротшим: на 11.31% порівняно з МА, та на 41.57% – з ЖА, що підтверджує ефективність розробленого рішення.

Далі здійснено моделювання для визначення множини резервних маршрутів по критерію кількості транзитів (рис. 3.2. (б)). Оскільки найкращий маршрут (рис. 3.6) містить 5 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів. Відповідно для цього випадку $h = \{4:8\}$, внаслідок чого у цьому діапазоні сформовано отриману множину із 4 найкращих резервних маршрутів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Дані про множину маршрутів для $h = 5$

№ маршруту	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	298
2	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	302
3	{4, 8, 12, 16, 21, 20}	308
4	{4, 8, 12, 11, 15, 20}	309

Таким чином, отримана множина маршрутів, яку доцільно використовувати при виході із ладу основного маршруту для швидкого переключання на альтернативний, що мінімізує час простою та запобігає втраті даних.

У таблиці 3.3 представлено дані по найкращому маршруту на основі критерію W_1 для кожного значення $h = \{5:8\}$ у порядку зростання значення d .

Таблиця 3.3

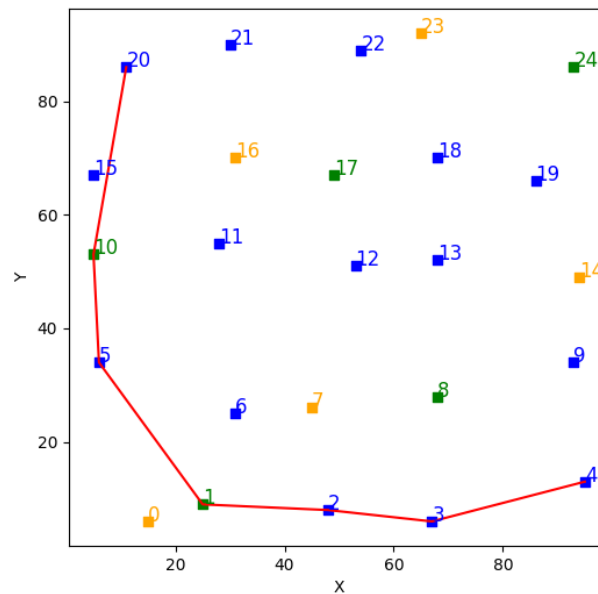
Дані про найкращі маршрути по критерію W_1 для окремо взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	298
2	6	{4, 9, 13, 12, 17, 21, 20}	318
3	7	{4, 9, 14, 19, 18, 22, 21, 20}	336
4	8	{4, 9, 14, 19, 18, 23, 22, 21, 20}	360

В умовах, коли топологія мережі змінюється, розгляд оптимальних маршрутів для кожного значення критерію окремо дозволяє швидко адаптувати маршрутизацію до нових умов.

б) для заряду батареї вузла

Для дослідження пошуку маршруту по критерію заряду батареї вузла W_2 використано значення, які наведено на рис. 3.11.



(в)

Рис. 3.12. Побудований маршрут за критерієм W_2 при використанні ГА (а), ЖА (б) та МА (в)

Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів результати моделювання, представлені на рис. 3.12, наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Порівняння утворених маршрутів по критерію заряду батареї вузла при використанні розробленого ГА і класичного ЖА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	228
Жадібний	{4, 3, 2, 1, 7, 6, 5, 10, 15, 16, 17, 19, 24, 22, 21, 20}	648
Мурашиний	{4, 3, 2, 1, 5, 10, 20}	286

У цьому сценарії пропонується ГА формує маршрут, який є на 20.28% коротшим порівняно з МА та на 64.81% порівняно з ЖА.

Оскільки найкращий маршрут по критерію заряду батареї вузлів (рис. 3.12) містить 5 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів, який є {4: 8}.

У таблиці 3.5 представлено інформацію про множину резервних маршрутів у порядку зростання їх довжин.

Таблиця 3.5

Дані про множину маршрутів для $h = 5$

№ маршруту	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	228
2	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	228
3	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	238
4	{4, 8, 6, 5, 10, 20}	254

У таблиці 3.6 представлено інформацію про отримані маршрути на основі критерію W_2 для кожного значення $h \in \{5:8\}$.

Таблиця 3.6

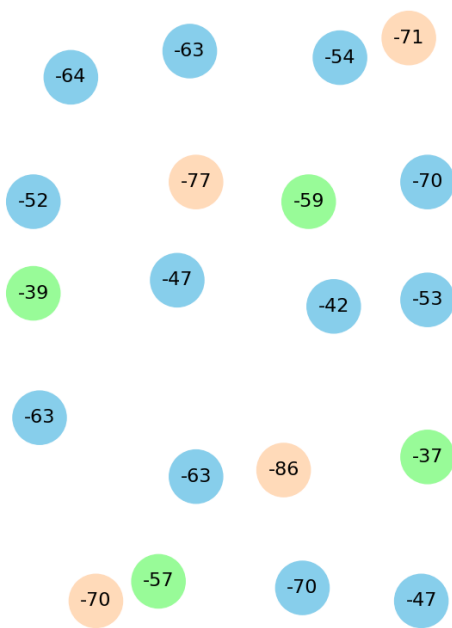
Дані про найкращі маршрути по критерію заряду батареї вузлів для окремо взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	228
2	6	{4, 9, 8, 13, 17, 21, 20}	263
3	7	{4, 8, 13, 19, 24, 22, 21, 20}	295
4	8	{4, 8, 13, 17, 19, 24, 22, 21, 20}	320

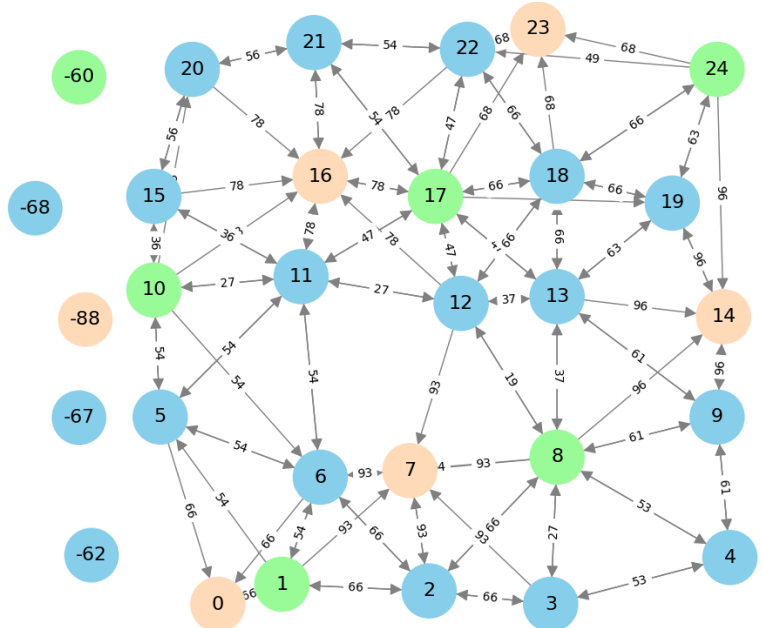
Як бачимо із даних таблиці 3.6, збільшення кількості транзитів впливає на довжину маршруту.

в) для рівня сигналу вузла

Для дослідження пошуку маршруту по критерію рівня сигналу вузла W_3 використано значення, які наведено на рис. 3.13.



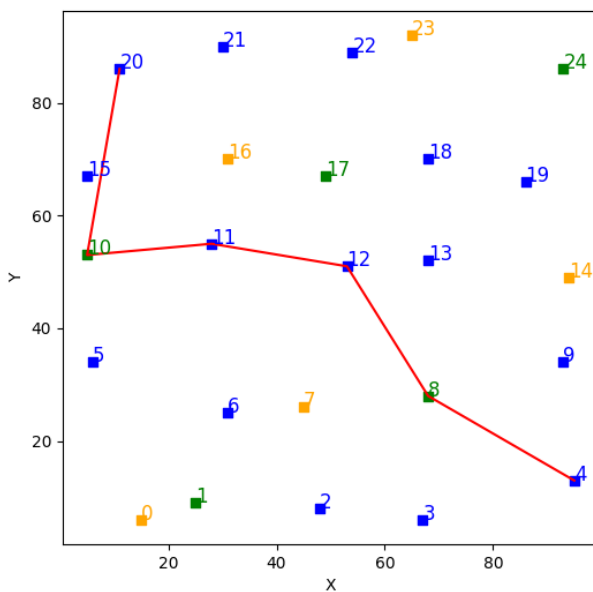
(a)



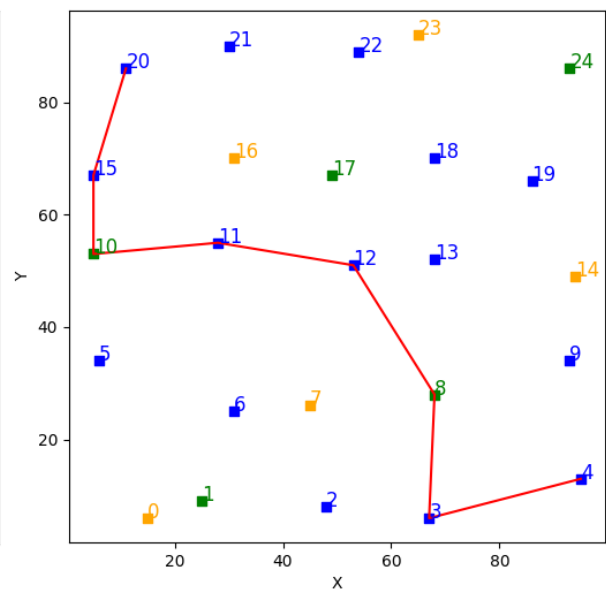
(б)

Рис. 3.13. Значення рівнів сигналу для вузлів (а) та графова модель мережі

На рис. 3.14 показано отриманий маршрут за критерієм W_3 при використанні розробленого ГА (а), ЖА (б) та МА (в).



(a)



(б)

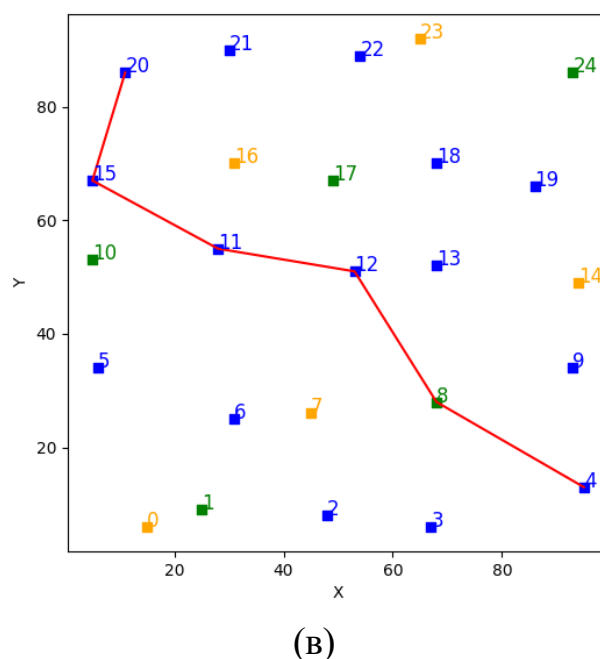


Рис. 3.14. Побудований маршрут за критерієм W_3 при використанні ГА (а), ЖА (б) та МА (в)

Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів результати моделювання, представлені на рис. 3.14, наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Порівняння утворених маршрутів по критерію W_3 при використанні розробленого ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 12, 11, 10, 20}	182
Жадібний	{4, 3, 8, 12, 11, 10, 15, 20}	245
Мурашиний	{4, 8, 12, 11, 15, 20}	191

На основі даних таблиці 3.7, ГА формує маршрут, який є коротшим на 4.71% порівняно з МА та на 25.71% – порівняно з ЖА.

У таблиці 3.8 представлено інформацію про множину найкращих резервних маршрутів для $h \in \{4:8\}$.

Таблиця 3.8

Дані про множину маршрутів для $h \in \{5: 6\}$

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 11, 10, 20}	182
2	5	{4, 8, 12, 11, 15, 20}	191
3	6	{4, 3, 8, 12, 11, 10, 20}	209
4	6	{4, 8, 12, 11, 10, 15, 20}	218

У таблиці 3.9 представлено інформацію по найкращому маршруту на основі критерію W_3 для кожного значення $h \in \{5: 8\}$.

Таблиця 3.9

Дані про найкращі маршрути по критерію рівня сигналу вузла для окремо взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 11, 10, 20}	182
2	6	{4, 3, 8, 12, 11, 10, 20}	209
3	7	{4, 3, 8, 12, 11, 10, 15, 20}	245
4	8	{4, 3, 8, 13, 12, 11, 10, 15, 20}	300

г) для рівня втрат даних

Для дослідження пошуку маршруту по критерію рівня втрат даних W_4 сформовано початкову матрицю, представлену на рис. 3.15.

Для більш повного представлення структури досліджуваної мережі БСМ на рис. 3.16 представлено її графову модель.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	5	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	3	0	6	1000	1000	13	3	7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	7	0	5	1000	1000	6	5	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	3	0	10	1000	1000	9	6	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	6	0	1000	1000	6	7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	7	1000	1000	1000	0	10	1000	1000	1000	5	6	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	10	3	10	1000	1000	9	0	3	1000	1000	1000	9	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	5	1000	1000	1000	4	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	6	7	9	1000	13	8	0	7	1000	1000	7	8	11	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	6	1000	1000	1000	9	0	1000	1000	6	4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	4	15	1000	1000	1000	0	8	1000	1000	1000	3	14	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	6	9	1000	1000	1000	6	0	10	1000	1000	8	5	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	8	10	1000	1000	7	0	5	1000	1000	6	3	7	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	8	6	1000	1000	3	0	6	1000	1000	9	4	9	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	5	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	1000	4	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	3	8	1000	1000	1000	0	8	1000	1000	1000	3	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	5	1000	1000	1000	1000	0	4	1000	1000	1000	5	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	6	5	7	1000	1000	5	0	5	12	1000	7	9	9	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	8	5	1000	1000	1000	5	0	5	1000	1000	7	8	6
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	7	3	1000	1000	1000	4	0	1000	1000	1000	1000	9
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	4	6	1000	1000	1000	0	3	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	5	8	1000	1000	3	0	9	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9	9	7	1000	1000	8	0	3	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	3	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	10	8	1000	1000	15	9	0

Рис. 3.15. Матриця рівнів втрат даних

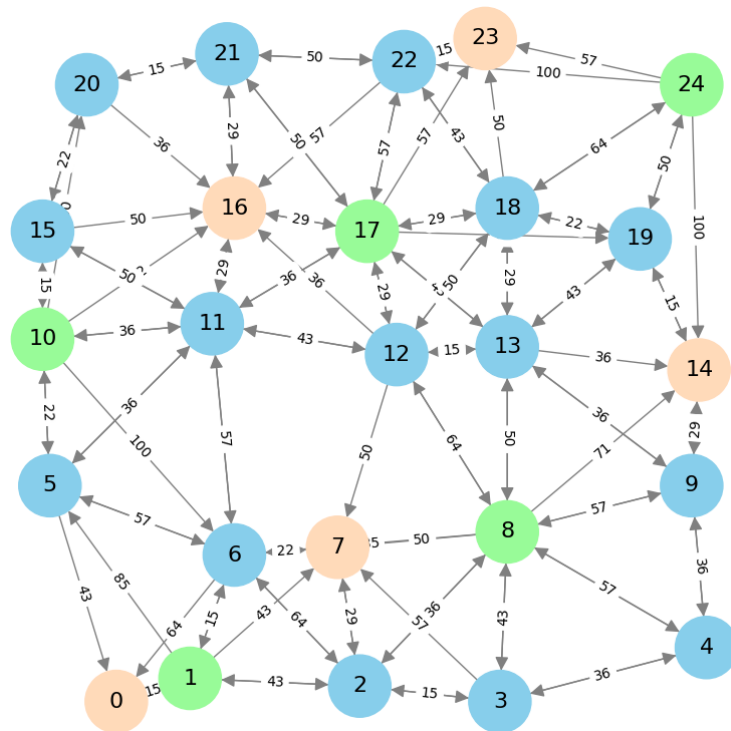
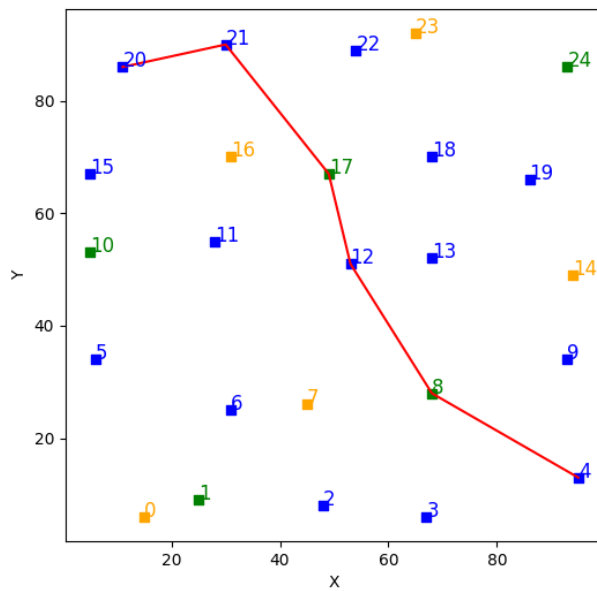
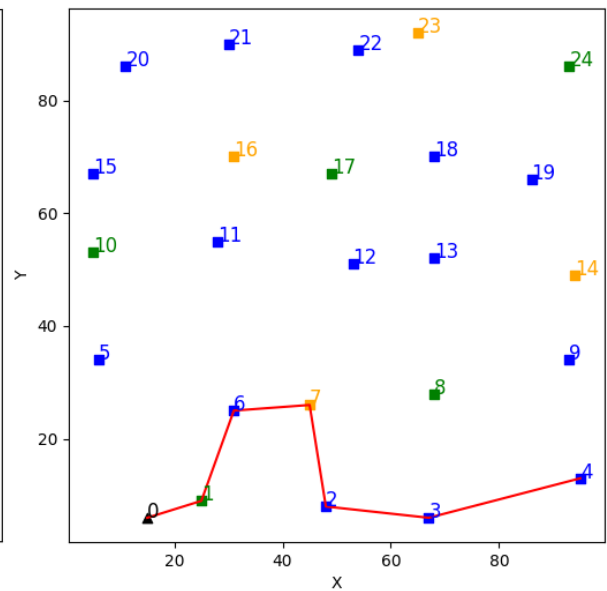


Рис. 3.16. Графова модель мережі для рівнів втрат даних

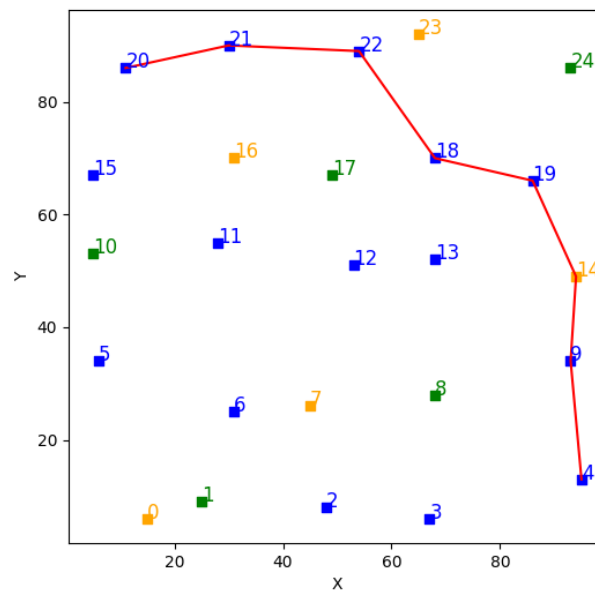
На рис. 3.17 показано отриманий маршрут за критерієм W_4 при використанні розробленого ГА (а), ЖА (б) та МА (в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 3.17. Побудований маршрут за критерієм w_4 при використанні ГА (а), ЖА (б), МА (в)

Як бачимо з рис. 3.17 (б), використання ЖА не дозволило сформувати успішний маршрут між вузлами 4 і 20. У цьому випадку алгоритм зупинився на вузлі 0, із якого не знайшов виходу.

Отримані результати моделювання, представлені на рис. 3.17, наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Порівняння утворених маршрутів по критерію W_4 при використанні розробленого
ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	152
Жадібний	-	-
Мурашиний	{4, 9, 14, 19, 18, 22, 21, 20}	217

У таблиці 3.11 представлено інформацію про множину найкращих резервних маршрутів для $h \in \{4:8\}$ у порядку зростання їх довжин, у таблиці 3.12 – про найкращий маршрут по критерію W_4 для кожного значення $h \in \{5:8\}$.

Таблиця 3.11

Дані про множину маршрутів для $h \in \{5:6\}$

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	152
2	5	{4, 8, 12, 16, 21, 20}	159
3	6	{4, 9, 13, 12, 17, 21, 20}	167
4	6	{4, 8, 12, 17, 16, 21, 20}	167

Таблиця 3.12

Дані про найкращі маршрути по критерію рівня втрат даних для окремо взятих
значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	152
2	6	{4, 9, 13, 12, 17, 21, 20}	167
3	7	{4, 9, 13, 12, 17, 16, 21, 20}	182
4	8	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 16, 21, 20}	211

д) для затримки передачі даних

Для роботи алгоритму здійснено формування початкової матриці для критерію затримки передачі даних W_5 , яка представлена на рис. 3.18.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	3	0	15	1000	1000	24	6	13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	12	0	4	1000	1000	20	9	11	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	3	0	12	1000	1000	14	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	19	0	1000	1000	1000	20	11	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	19	1000	1000	1000	1000	0	14	1000	1000	1000	9	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	18	7	11	1000	1000	13	0	9	1000	1000	1000	16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	7	1000	1000	1000	5	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	14	16	12	1000	22	17	0	12	1000	1000	16	16	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	1000	15	1000	1000	1000	11	0	1000	1000	1000	18	4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	9	22	1000	1000	1000	0	19	1000	1000	1000	7	30	1000	1000	1000	26	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	20	14	1000	1000	1000	12	0	11	1000	1000	14	7	12	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	14	12	1000	1000	17	0	7	1000	1000	18	8	13	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	16	16	1000	1000	6	0	15	1000	1000	12	5	19	1000	1000	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	6	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	5	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	10	17	1000	1000	1000	0	15	1000	1000	1000	6	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	8	1000	1000	1000	1000	0	3	1000	1000	1000	6	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	8	17	1000	1000	7	0	4	24	1000	20	16	14	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	18	9	1000	1000	10	0	5	1000	1000	15	13	14	1000
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	19	7	1000	1000	9	0	1000	1000	1000	20	1000	1000
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	9	16	1000	1000	1000	0	6	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	5	19	1000	1000	10	0	12	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11	12	13	1000	1000	13	0	9	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	4	0	1000	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	27	1000	1000	1000	17	20	1000	1000	28	19	0

Рис. 3.18. Матриця значень затримок передачі даних

Рис. 3.19 демонструє графову модель мережі БСМ для розглянутого критерію.

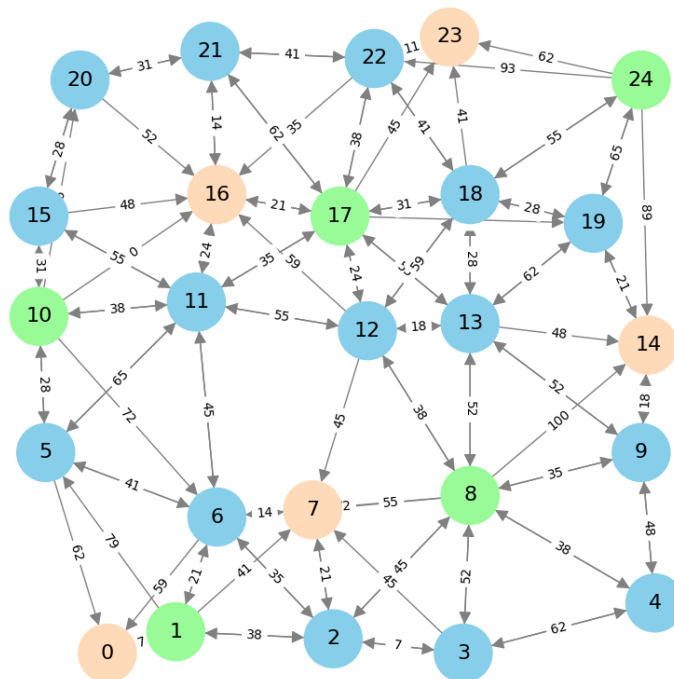
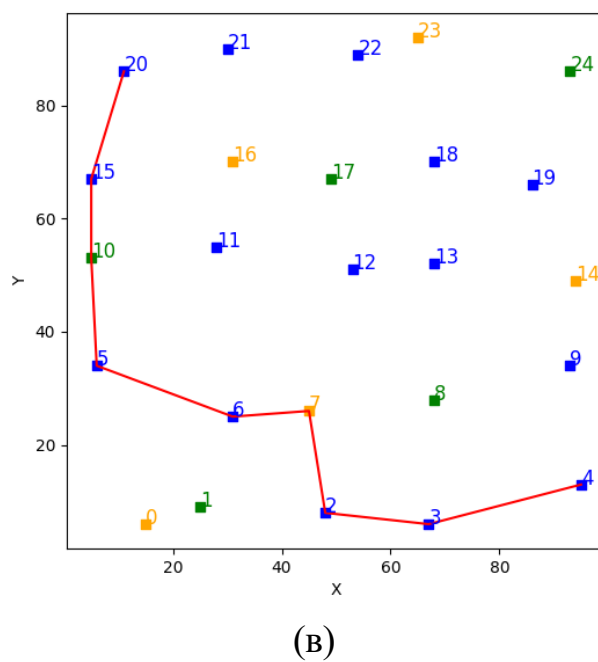


Рис. 3.19. Графова модель мережі для затримки передачі даних

На рис. 3.20 показано отриманий маршрут за критерієм w_5 при використанні розробленого ГА (а), ЖА (б), МА (в).



Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів результати моделювання, представлені на рис. 3.20, наведено у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

Порівняння утворених маршрутів по критерію W_5 при використанні розробленого
ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 16, 21, 20}	189
Жадібний	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 21, 20}	228
Мурашиний	{4, 3, 2, 7, 6, 5, 10, 15, 20}	219

Отже, ГА формує маршрут, який є коротший на 13.70% порівняно з МА та на 17.11% порівняно з ЖА.

У таблиці 3.14 представлено інформацію про найкращі маршрути для $h \in \{6: 8\}$. Оскільки найкращий отриманий маршрут містить 8 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів, який є $\{7: 11\}$. Дані про такі отримані маршрути наведено в таблиці 3.15.

Таблиця 3.14

Дані про множину маршрутів для $h \in \{6: 8\}$

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	8	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 16, 21, 20}	189
2	6	{4, 9, 13, 17, 16, 21, 20}	202
3	7	{4, 9, 13, 12, 17, 16, 21, 20}	206
4	7	{4, 9, 14, 19, 18, 22, 21, 20}	208

Таблиця 3.15

Дані про найкращі маршрути по критерію затримки передачі даних для окремо
взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	8	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 16, 21, 20}	189
2	9	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 17, 16, 21, 20}	224
3	10	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 16, 21, 20}	228
4	11	{4, 9, 14, 19, 18, 13, 12, 17, 11, 16, 21, 20}	263

е) для вхідного/вихідного ступеня вузла

Для формування критерію вхідного/вихідного ступеня вузла w_6 на рис. 3.21 представлено значення кількості вхідних та вихідних ребер, на рис. 3.22 – визначений ступінь вузла.

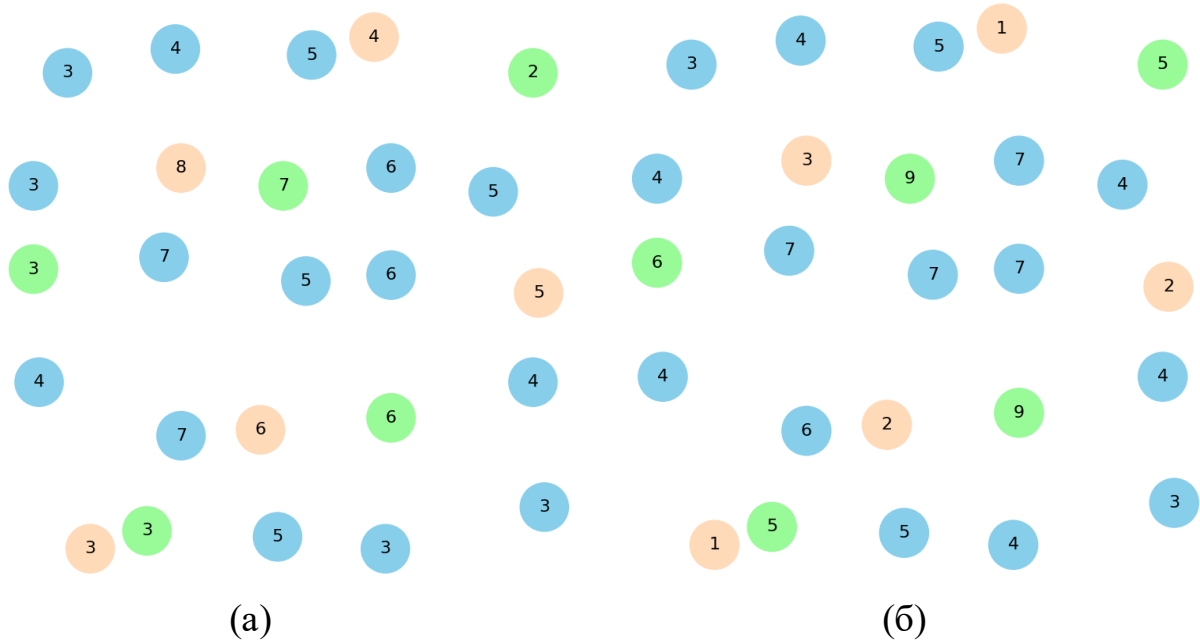


Рис. 3.21. Дані про вхідні (а) та вихідні (б) ребра вузлів досліджуваної мережі

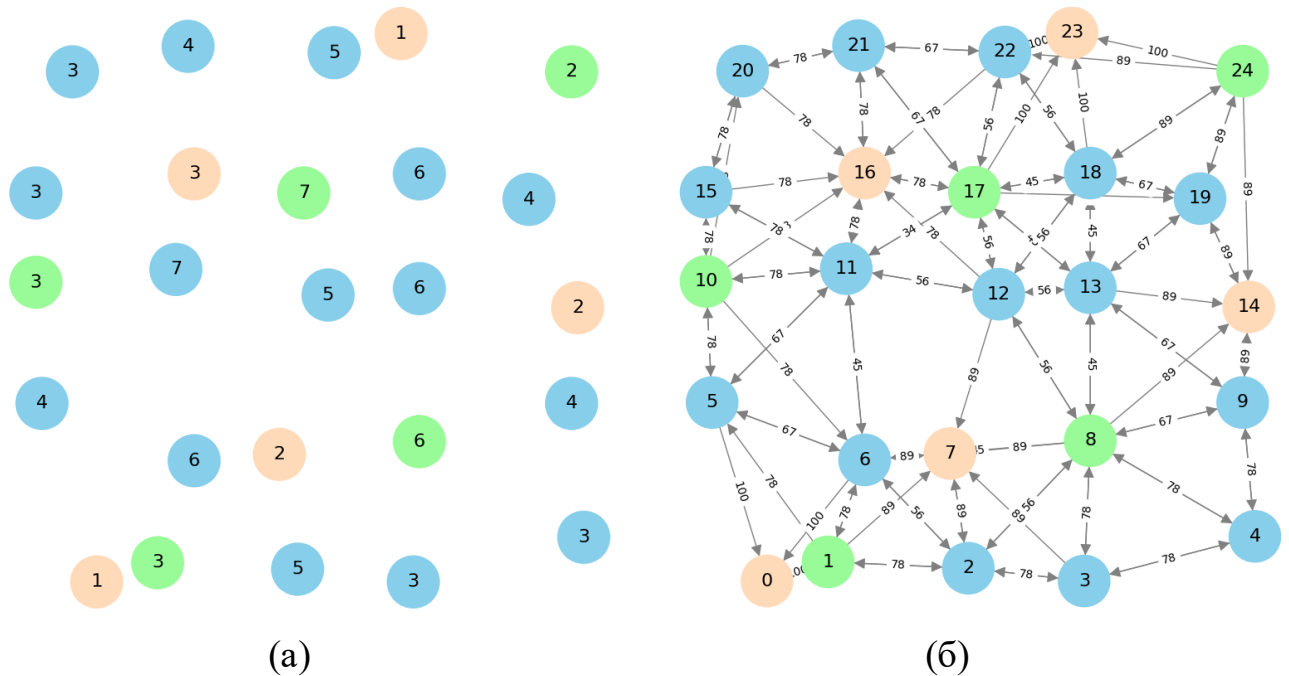
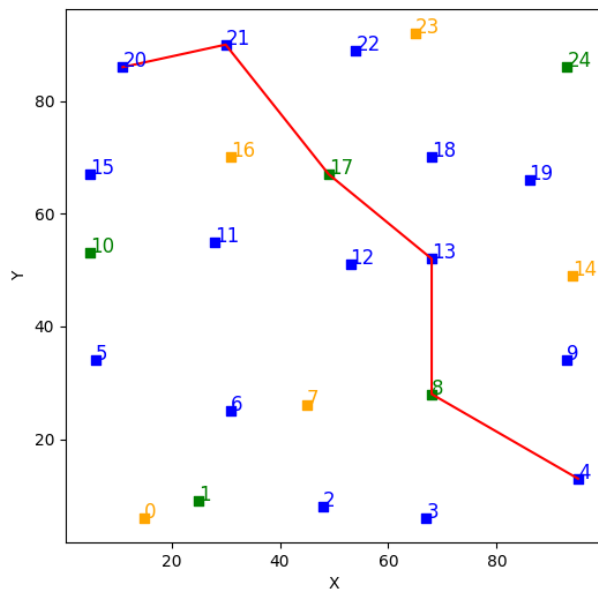
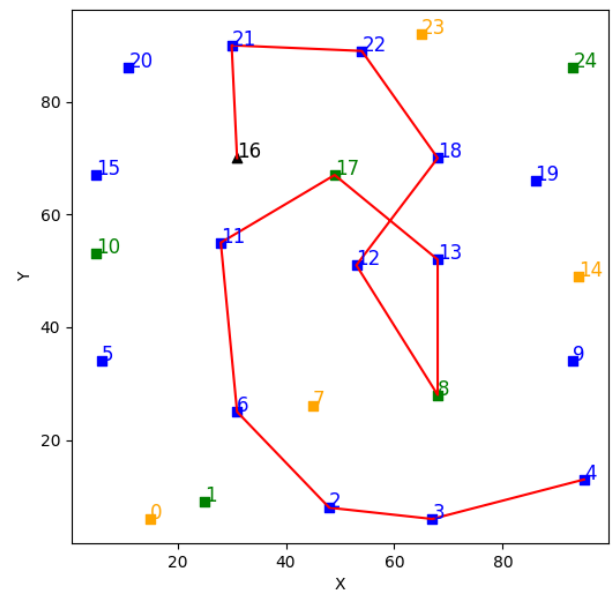


Рис. 3.22. Визначене значення вхідного/вихідного ступеня вузла (а) та графова модель мережі (б)

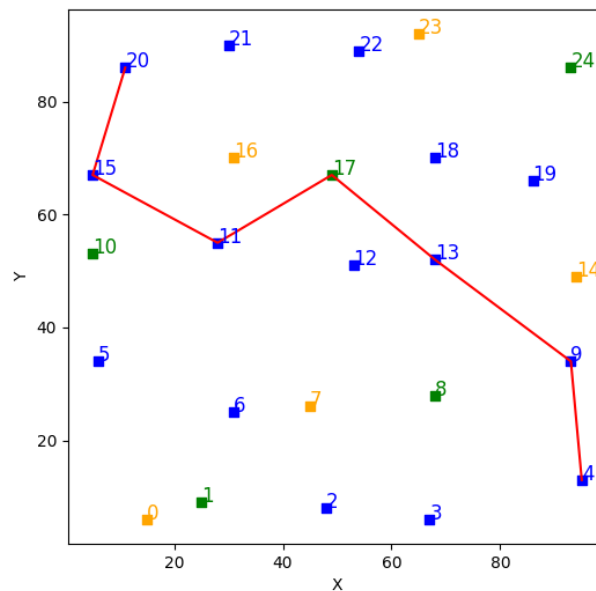
На рис. 3.23 показано отриманий маршрут за критерієм w_6 при використанні розробленого ГА (а), ЖА (б), МА (в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 3.23. Побудований маршрут за критерієм W_6 при використанні ГА (а), ЖА (б), МА (в)

Як видно, ЖА зупиняється на 16 вузлі, із якого не знаходить подальшого виходу.

Для більш наочного порівняння роботи розглянутих алгоритмів результати моделювання, представлені на рис. 3.23, наведено у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16

Порівняння утворених маршрутів по критерію w_6 при використанні розробленого
ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	313
Жадібний	-	-
Мурашиний	{4, 9, 13, 17, 11, 15, 20}	380

Як видно з табл. 3.16, ГА формує маршрут, який є на 17.63% коротшим порівняно з МА, при цьому ЖА не здійснює успішне формування маршруту.

Оскільки найкращий отриманий маршрут (рис. 3.23) містить 5 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів {4:8}. У таблиці 3.17 представлено інформацію про множину найкращих резервних маршрутів для $h \in \{4:8\}$.

Таблиця 3.17

Дані про множину маршрутів для $h = 5$

№ маршруту	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	313
2	{4, 8, 6, 11, 10, 20}	324
3	{4, 8, 6, 11, 15, 20}	324
4	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	335

У таблиці 3.18 представлено дані про найкращий маршрут по критерію w_6 для кожного значення $h \in \{4:8\}$.

Таблиця 3.18

Отримані дані про найкращі маршрути по критерію w_6 вузла для окремо взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	313
2	6	{4, 8, 6, 11, 17, 21, 20}	347

Продовження таблиці 3.18

3	7	{4, 8, 6, 11, 17, 22, 21, 20}	403
4	8	{4, 8, 6, 11, 17, 18, 22, 21, 20}	448

є) для комплексного критерію

Матеріали цього пункту частково опубліковано автором у роботі [135].

У цьому пункті розглянемо результати пошуку маршруту для комплексного критерію, який включає 6 складових: Евклідову відстань, заряд батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримку передачі даних, вхідний/вихідний ступінь вузла [135]

Для наочності у таблиці 3.19 наведено дані про пошук найкращого маршруту за кожним із 6 критеріїв окремо при використанні розробленого алгоритму.

Таблиця 3.19

Дані про найкращий маршрут за кожним із 6 критеріїв окремо

Критерій	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Евклідова відстань	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	298
заряд батареї вузла	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	228
рівень сигналу вузла	{4, 8, 12, 11, 10, 20}	182
рівень втрат даних	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	152
затримка передачі даних	{4, 9, 14, 19, 18, 17, 16, 21, 20}	189
вхідний/вихідний ступінь вузла	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	313

Рис. 3.24 демонструє графову модель мережі БСМ для комплексного критерію.

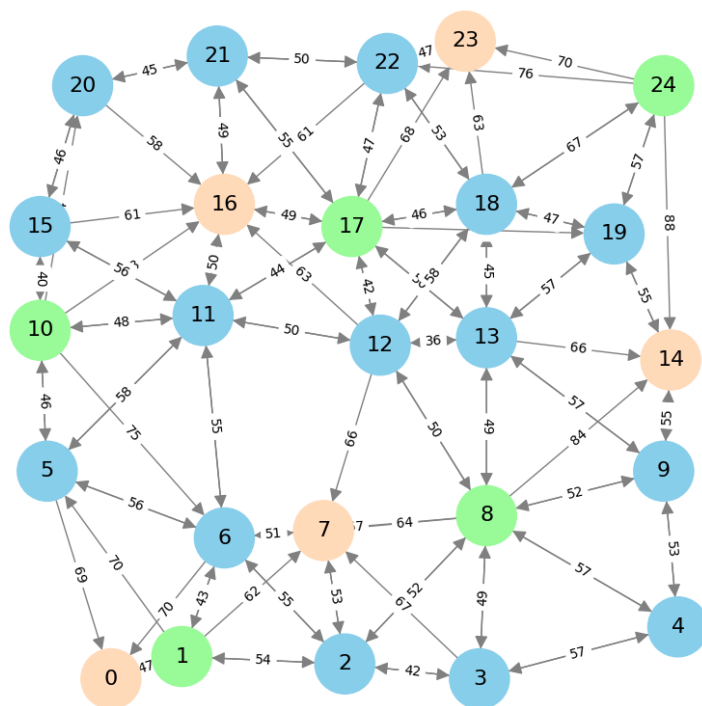
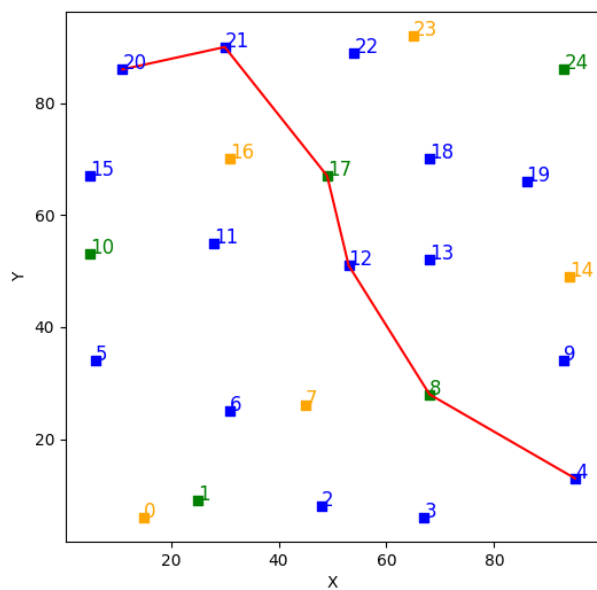
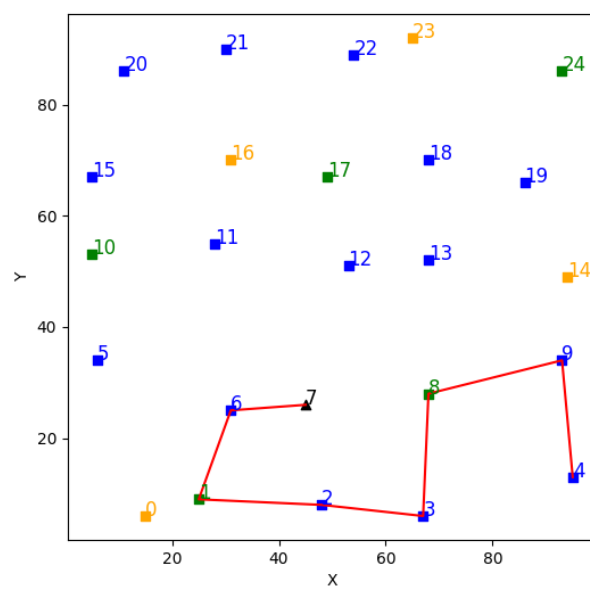


Рис. 3.24. Графова модель мережі БСМ для комплексного критерію [135]

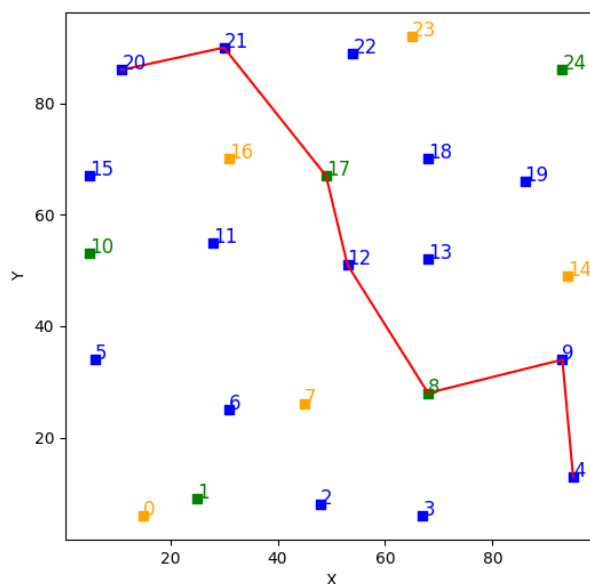
На рис. 3.25 показано отриманий маршрут при використанні розробленого ГА (а), ЖА (б), МА (в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 3.25. Побудований маршрут за комплексним критерієм при використанні
ГА (а), ЖА (б), МА (в)

Варто зауважити, що для цього дослідження ЖА та МА було модифіковано для роботи із сукупністю розглянутих критеріїв. Проте використання ЖА не дозволило сформувати успішний маршрут між вузлами 4 і 20. У цьому випадку робота алгоритму завершена на вузлі 7.

У таблиці 3.20 наведено порівняння роботи розглянутих алгоритмів із рис. 3.25.

Таблиця 3.20

Порівняння утворених маршрутів по комплексному критерію при використанні
розробленого ГА, ЖА та МА

Алгоритм	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
Розроблений генетичний	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	246
Жадібний	-	-
Мурашиний	{4, 9, 8, 12, 17, 21, 20}	292

Отже, у цьому сценарії ГА формує маршрут, який є на 15.75% коротшим порівняно з МА, при цьому ЖА не здійснює успішне формування маршруту.

На рис. 3.26 представлено результати моделювання при визначенні множини резервних маршрутів. Оскільки отриманий маршрут містить 5 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів $\{4:8\}$.

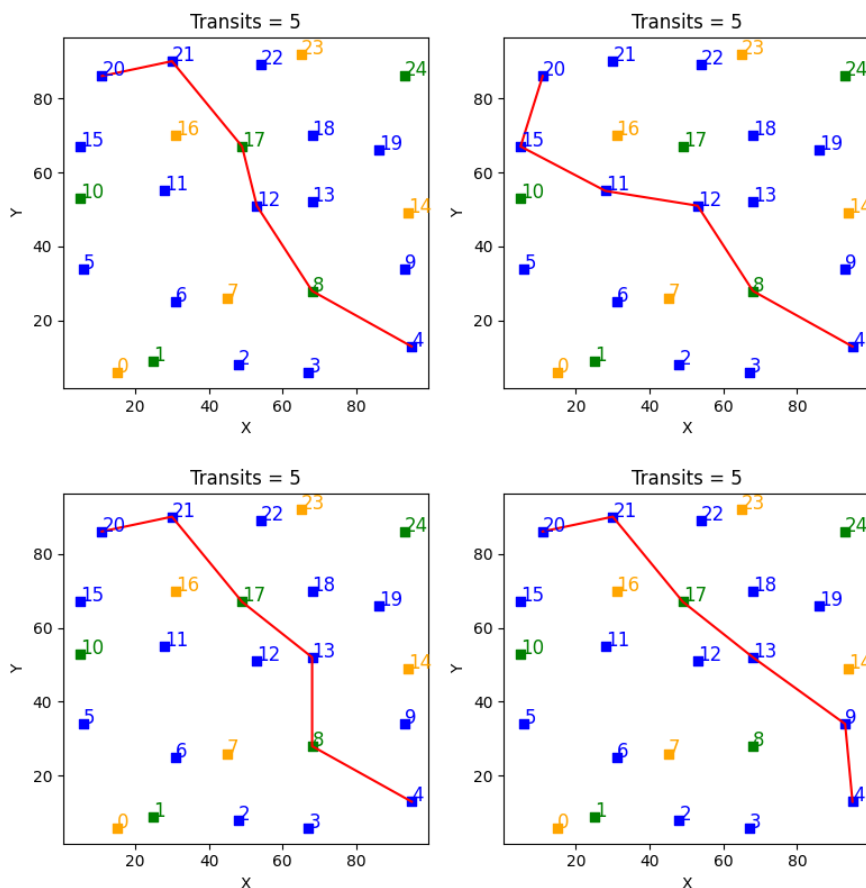


Рис. 3.26. Множина найкращих резервних маршрутів для $h \in \{4:8\}$

Як бачимо, з рис. 3.26, найкращі маршрути отримано для $h = 5$.

У таблиці 3.21 представлено інформацію про отримані маршрути із рис. 3.26 у порядку зростання їх довжин.

Таблиця 3.21

Дані про множину маршрутів для $h = 5$

№ маршруту	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	246
2	{4, 8, 12, 11, 15, 20}	254
3	{4, 8, 13, 17, 21, 20}	256
4	{4, 9, 13, 17, 21, 20}	259

На рис. 3.27 представлено по найкращому маршруту на основі комплексного критерію для кожного значення $h \in \{5: 8\}$.

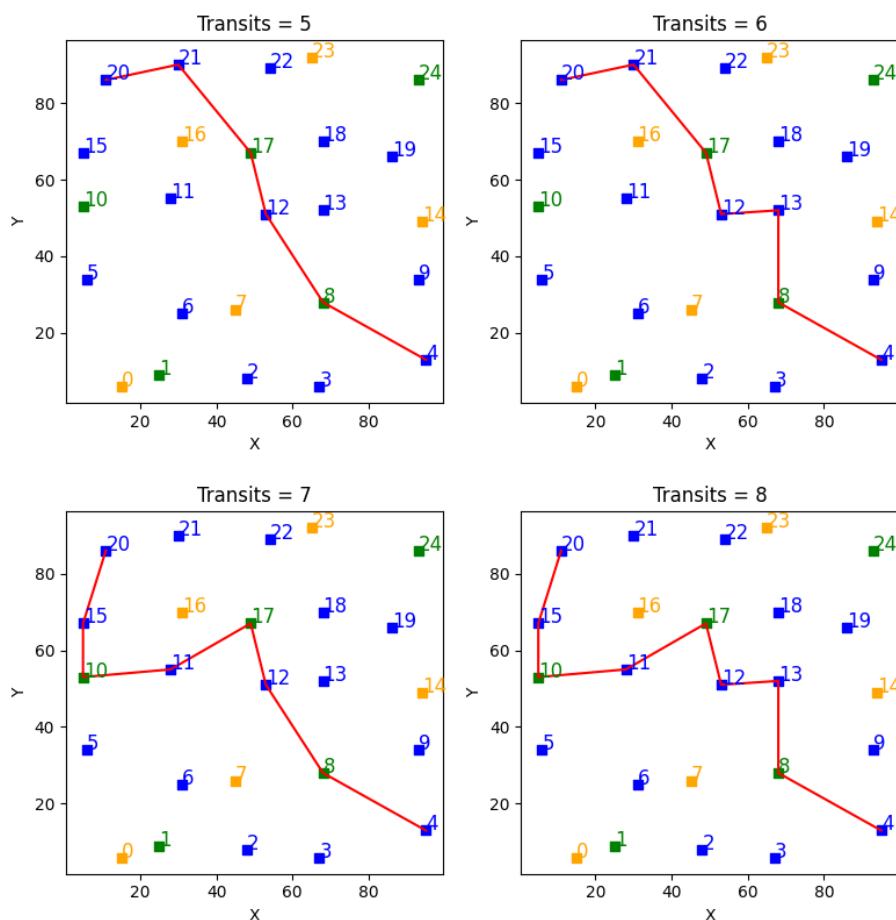


Рис. 3.27. Представлення найкращого маршруту по критерію W_6 для кожного значення $h \in \{5: 8\}$

У таблиці 3.22 представлено інформацію про отримані маршрути із рис. 3.27.

Таблиця 3.22

Дані про найкращі маршрути по комплексному критерію для окремо взятих значень h

№ маршруту	Кількість транзитів	Утворений маршрут, вузли	Довжина маршруту, м
1	5	{4, 8, 12, 17, 21, 20}	246
2	6	{4, 8, 13, 12, 17, 21, 20}	282
3	7	{4, 8, 12, 17, 11, 10, 15, 20}	320
4	8	{4, 8, 13, 12, 17, 11, 10, 15, 20}	356

Таким чином, наведені результати демонструють доцільність застосування пропонованого рішення як при використанні окремих, так і при сукупності розглянутих критеріїв для пошуку найкращого маршруту у БСМ.

3.5. Дослідження ефективності застосування розробленого генетичного алгоритму для транспортної задачі у «розумному місті»

Одним із ключових викликів сучасного мегаполісу є забезпечення ефективної транспортної логістики, що включає зменшення заторів, скорочення часу в дорозі, зниження рівня забруднення повітря та оптимальне використання дорожньої мережі [142]. Для вирішення цього розглядається застосування розробленого багатокритеріального підходу на основі ГА із урахуванням критеріїв, які здійснюють оцінку дорожньої інфраструктури.

В контексті «розумного» міста для транспортних засобів (ТЗ) можна виділити такі основні види комунікації: Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I) та при використанні Roadside Unit (RSU) [143, 144].

На рис. 3.28 наведено перехрестя дороги для планування маршруту у «розумному» місті, де комунікація може відбуватися із використанням V2V, V2I, RSU та Vehicle-to-Everything (V2X). Прямий зв'язок між пристроями та транспортними засобами базується на стандартах безпроводного доступу (5G тощо). Дорожні знаки та світлофори обладнані інтелектуальними сенсорами, які відстежують потік транспортних засобів і забезпечують адаптивне керування сигналами залежно від інтенсивності руху.

ТЗ передають інформацію про своє місцезнаходження, швидкість і напрямок руху до інших автомобілів і до інфраструктури. Дані від сенсорів, транспортних засобів і RSU інтегруються в хмарні сервіси для аналізу ситуації на дорогах, прогнозування заторів і оптимізації маршрутів.

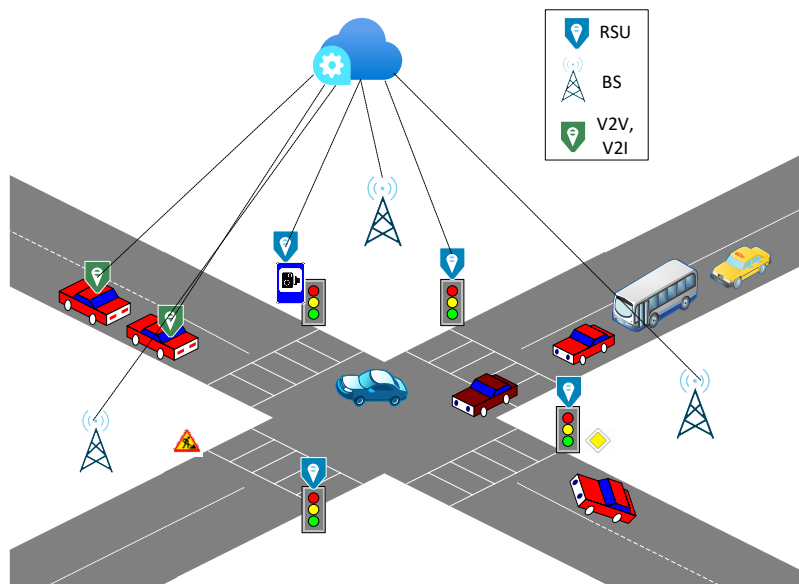


Рис. 3.28. Сегмент схеми організації транспортної інфраструктури для «розумного» міста

У задачах оптимальної маршрутизації транспортних засобів традиційно основним критерієм вибору шляху є його довжина або час у дорозі. Проте реальні умови руху у транспортних мережах значно складніші та динамічніші, тому для забезпечення ефективної маршрутизації необхідно враховувати низку додаткових факторів, таких як затори, ремонтні роботи тощо, які можуть суттєво змінювати реальний час подорожі, роблячи коротші маршрути менш ефективними, ніж довші, але менш завантажені альтернативи.

Для вирішення поставленого завдання у розробленому рішенні виділено 2 основні етапи (рис. 3.29): визначення оптимального маршруту в заданих умовах та формування множини резервних (альтернативних) маршрутів шляхом застосування генетичного алгоритму.

Залежно від специфіки транспортної мережі може застосовуватися як повний підхід, що включає обидва етапи, так і лише перший етап, орієнтований на пошук одного маршруту.

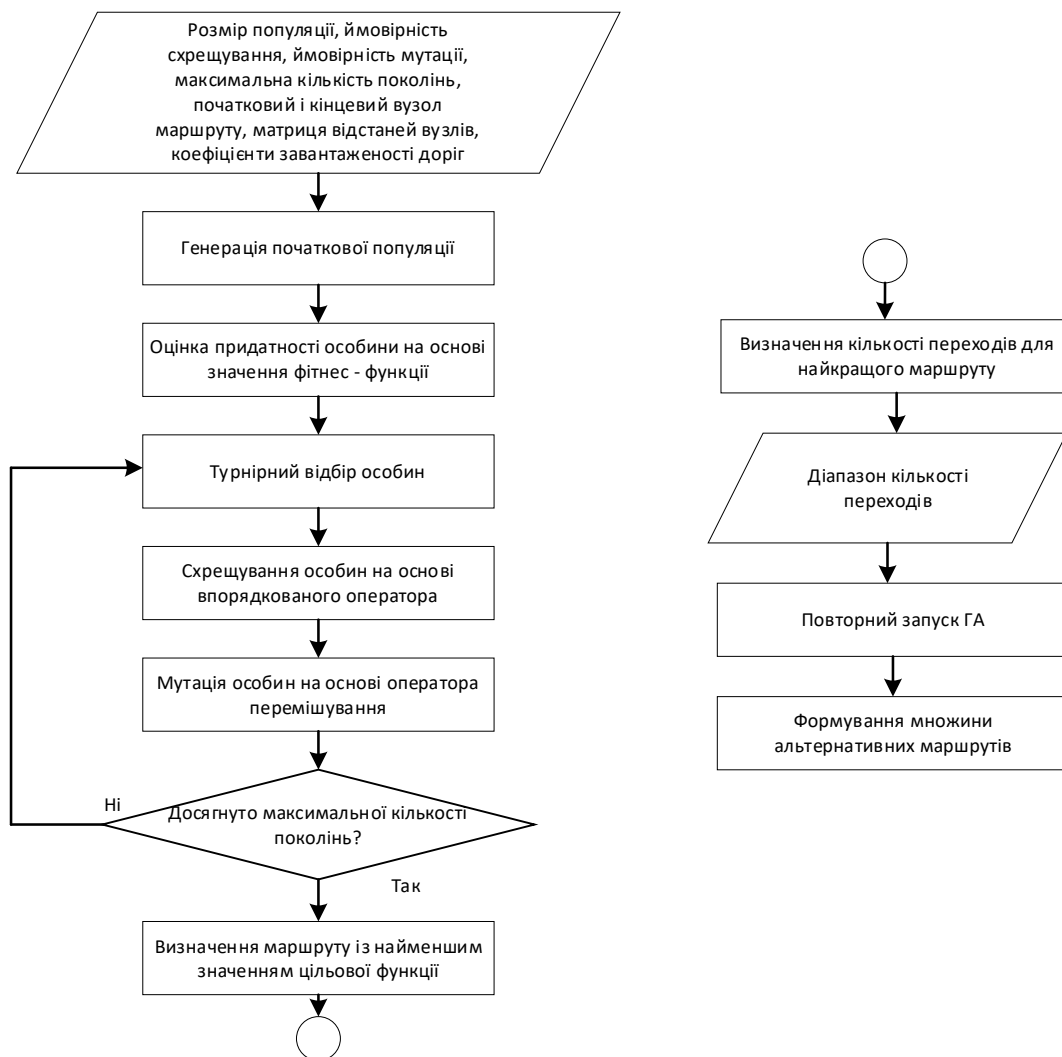


Рис. 3.29. Узагальнена блок-схема роботи розробленого алгоритму
 (а) пошуку оптимального маршруту ТЗ (б) множини резервних маршрутів ТЗ по критерію кількості транзитів

Мережа розглядається як граф $G(V, E)$, де V – множина вершин (місць розташування), E – множина ребер (відстаней між вузлами (вершинами)).

На етапі генерації початкової популяції здійснюється формування особин (маршрутів) $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, для кожної з яких початкова v_1 та кінцева точка v_n є однаковими.

Фітнес-функція $F(X_i)$ визначає якість (оптимальність) кожного потенційного маршруту:

$$F(X_i) = \min \sum_{j=1}^{n-1} w(v_j, v_{j+1}) d(v_j, v_{j+1}), \quad (3.14)$$

де $d(v_j, v_{j+1})$ – Евклідова відстань між вузлами, $w(v_j, v_{j+1})$ – коефіцієнт для оцінки рівня завантаженості ребра (чим більше значення коефіцієнта, тим більша завантаженість): $w_1 = 1$, $w_2 = 1.5$, $w_3 = 2$, $w_4 = 3$.

Для здійснення оцінки придатності кожного маршруту використовується багатокритеріальна матриця, у якій розміщуються дані про вузли, відстань між ними із урахуванням коефіцієнтів із (3.14), та штрафи у розмірі 10 000, які використовуються у випадку відсутності прямого шляху між двома вершинами і при недоступності такого шляху через ремонтні роботи та інші форс-мажорні обставини.

Формування множини альтернативних маршрутів здійснюється на основі визначення діапазону кількості переходів, який базується на значенні цього параметра для найкращого маршруту.

Альтернативні маршрути дозволяють адаптуватися до змін дорожньої інфраструктури (аварії, затори, тощо) без необхідності повторного обчислення оптимального шляху. Крім цього, їх використання дозволяє рівномірніше розподіляти транспортні потоки, оскільки при виборі одного маршруту усіма транспортними засобами збільшується імовірність заторів.

Для проведення імітаційного моделювання прийнято, що вузли «розумного» міста (сенсори, RSU тощо) рандомно розміщені на розглянутій території з урахуванням обмеження на максимальну дальність зв'язку. Радіус дії кожного вузла не перевищує 200 метрів. Окрім випадкового розподілу, вузли встановлюються на кожному перехресті та поворотах транспортної мережі, що дозволяє покращити зв'язність та забезпечити зв'язок у місцях зміни напрямку руху.

Для проведення дослідження обрано територію Сихівського району міста Львова, який є одним із найбільших та найдинамічніших районів міста з розвиненою транспортною інфраструктурою. Район характеризується високою щільністю забудови, значним потоком транспортних засобів, що робить його актуальним об'єктом для аналізу ефективності утвореного маршруту для транспортних засобів.

У дослідженні розглядається визначення маршруту між двома контрольними точками: точка А (відправлення): вул. Коломийська, 10; точка В (прибуття): вул. Зелена, 283.

На рис. 3.30 представлено розміщення вузлів «розумного» міста на досліджуваній території.

Для кожного вузла мережі визначено його географічні координати. Встановлено відстані між усіма вузлами на основі Евклідової метрики та внесено їх до матриці відстаней. Загалом у межах досліджуваної території розміщено 73 вузли.

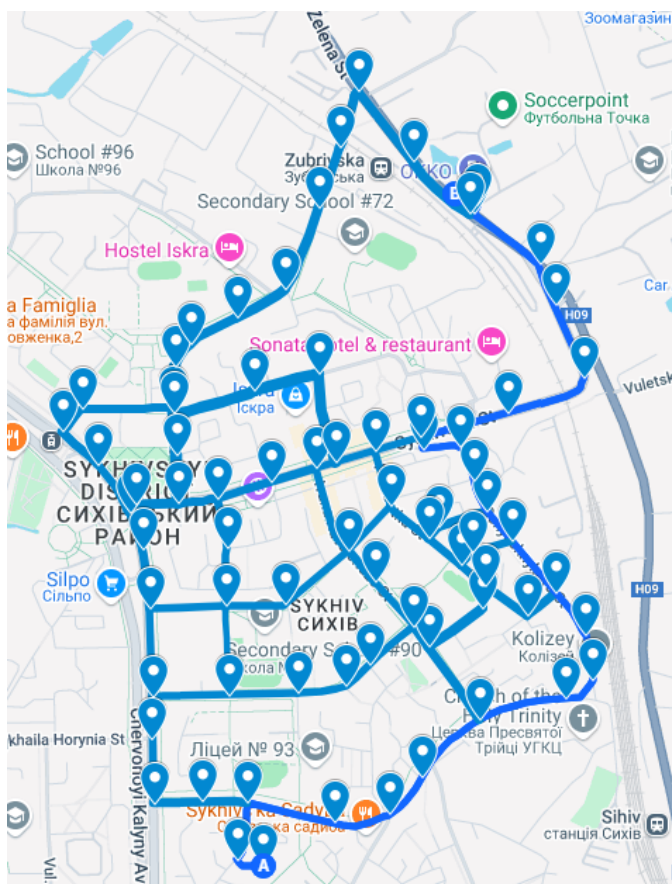


Рис. 3.30. Розміщення вузлів на досліджуваній території для визначення маршруту між точками А і В

На основі Евклідових відстаней між вузлами побудовано граф досліджуваної мережі (рис. 3.31), де 0 вузол – точка відправлення, 22 вузол – точка прибуття.

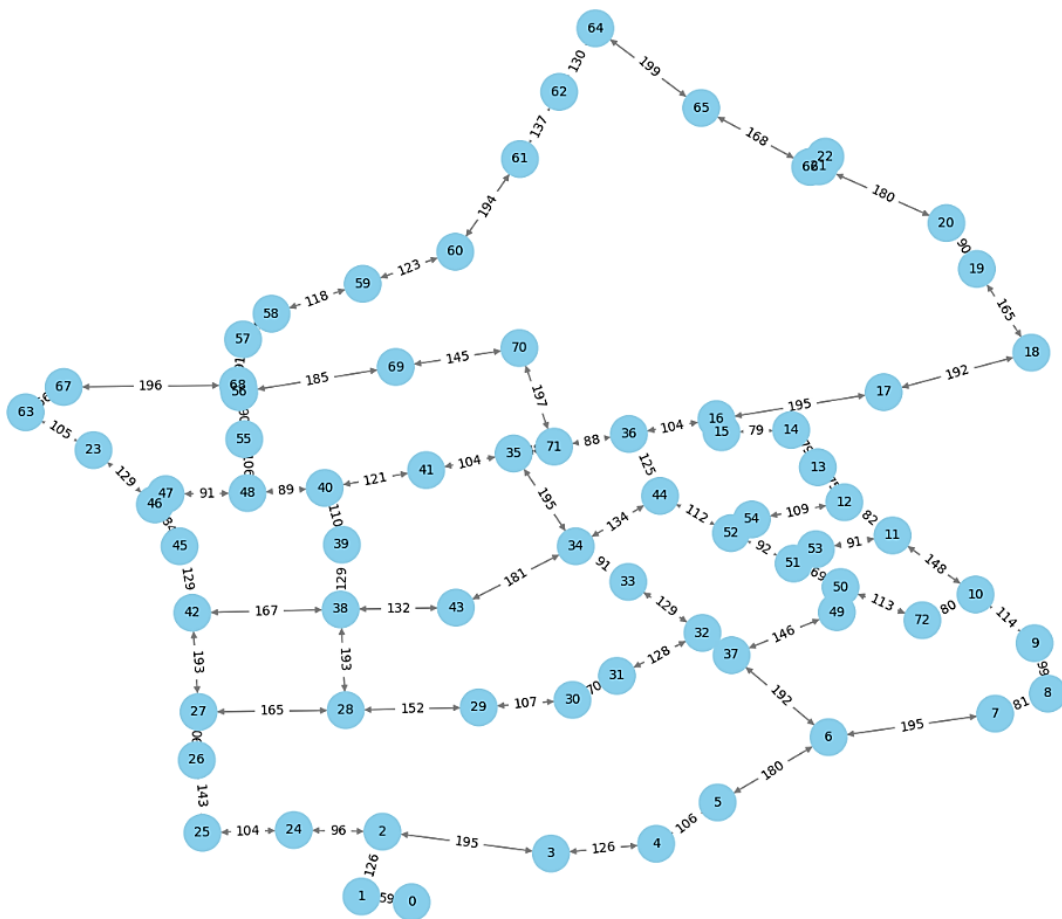


Рис. 3.31. Граф досліджуваної мережі

Далі розглянуто три сценарії пошуку оптимального маршруту з використанням різної кількості критеріїв. У першому випадку здійснюється маршрутизація на основі одного критерію – мінімальної довжини шляху, у другому – додається другий критерій: рівень завантаженості дорожніх ділянок, що дозволяє оцінити не лише відстань, а й пропускну здатність маршруту. У третьому сценарії пошук маршруту здійснюється за трьома критеріями: мінімальна довжина шляху, рівень завантаженості доріг та врахування недоступності окремих маршрутів (наприклад, через аварії, ремонти тощо).

Такий поетапний підхід дозволяє провести порівняльну оцінку ефективності побудови маршрутів залежно від складності врахованих факторів і ступеня наближення до реальних умов експлуатації транспортної мережі.

– по критерію відстані

Було здійснено пошук найкоротшого маршруту для транспортних засобів між вузлами 0 та 22. Отриманий результат представлено на рис. 3.32.

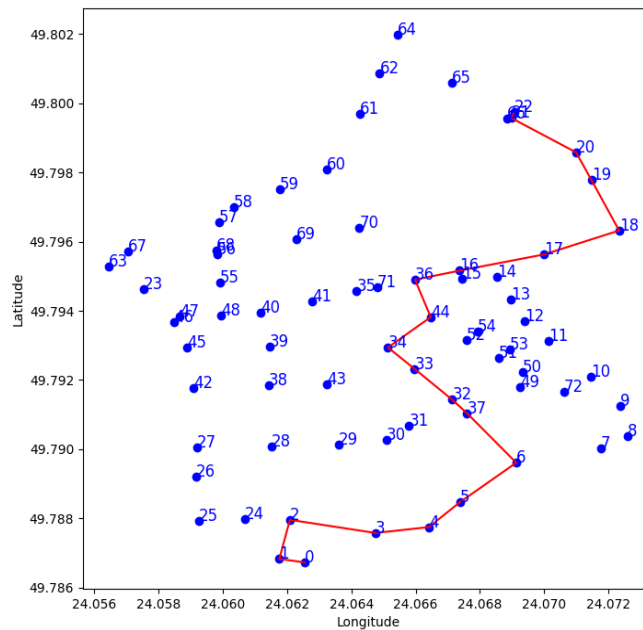


Рис. 3.32. Утворений маршрут найменшої довжини між вузлами 0 та 22

Відповідно до другого етапу роботи розробленого методу було сформовану множину альтернативних маршрутів, для яких заданий діапазон переходів визначався на основі найкращого отриманого рішення. Таким чином, для альтернативних маршрутів вибрано діапазон у межах $k_{trans_best_r} \pm 4$, де $k_{trans_best_r}$ - кількість переходів для найкращого маршруту.

Оскільки для найкращого маршруту цей параметр становив 19, відповідно вибраний діапазон {19 : 23}. Для порівняння наведених результатів моделювання їх представлено у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23

Отримані маршрути при використанні розробленого ГА із урахуванням одного критерію

Номер маршруту	Вузли утвореного маршруту	Кількість переходів	Значення оцінки маршруту
1	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	19	2464
2	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 38, 43, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	19	2494
3	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 42, 38, 43, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	19	2496
4	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	20	2521

Продовження таблиці 3.23

5	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 38, 39, 40, 41, 35, 71, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	21	2522
6	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 42, 38, 39, 40, 41, 35, 71, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	21	2524
7	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 42, 45, 46, 47, 48, 40, 41, 35, 71, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	23	2533
8	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 35, 71, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	20	2536

Для оцінки ефективності розробленого алгоритму здійснено порівняння результатів його роботи із маршрутами, отриманими шляхом використання ЖА [174] та МА. Отримані результати наведено на рис. 3.33.

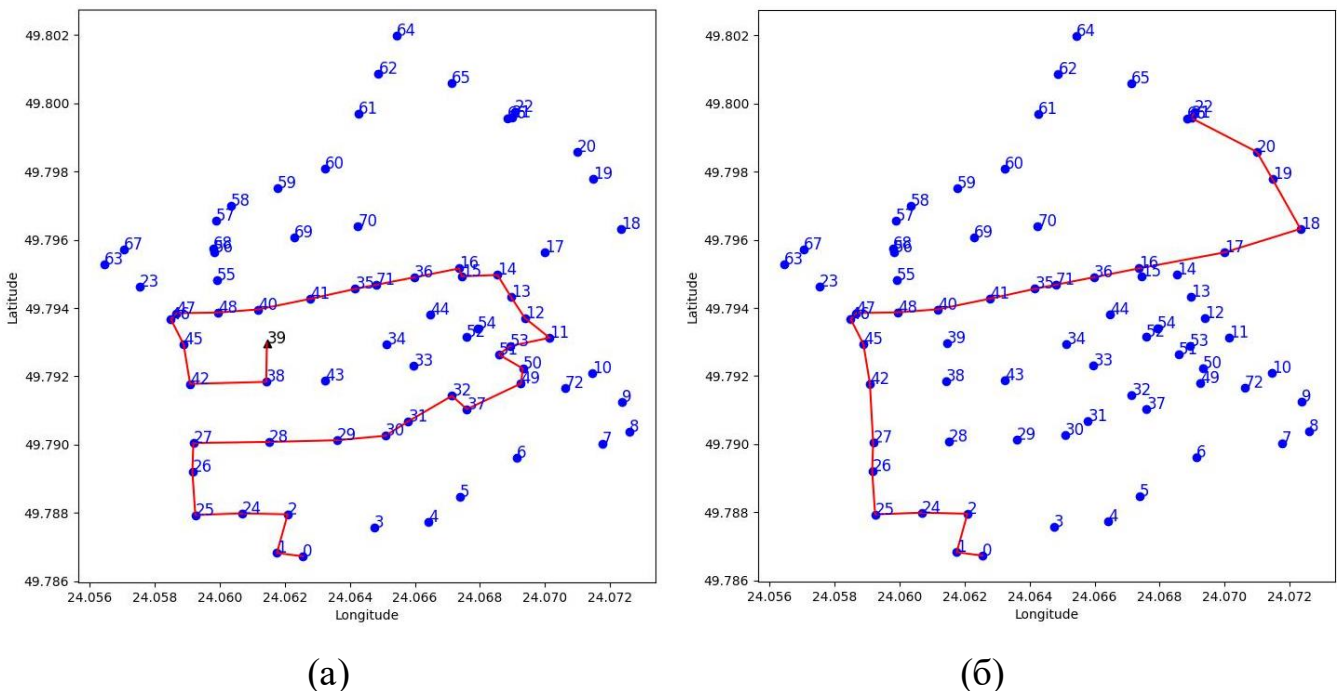


Рис. 3.33. Результат роботи (а) ЖА та (б) МА при пошуку маршруту між вузлами 0 та 22

Як видно із рис. 3.33, ЖА не досягнув кінцевої точки маршруту, зупинившись на 39 вузлі, тоді як МА успішно визначив маршрут між заданими точками.

У таблиці 3.24 представлено отримані результати моделювання із рис. 3.33.

Таблиця 3.24

Порівняння отриманих маршрутів при використанні авторського ГА, ЖА та МА

Вид алгоритму	Вузли утвореного маршруту	Значення маршруту
Розроблений генетичний	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	2464
Жадібний	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 36, 71, 35, 41, 40, 48, 47, 46, 45, 42, 38, 39}	-

Мурашковий	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 42, 45, 46, 47, 48, 40, 41, 35, 71, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	2533
------------	---	------

Таким чином, авторське рішення на основі ГА є більш ефективним для пошуку найкоротшого маршруту транспортної мережі, ніж ЖА та МА.

– по сукупності критеріїв відстані та завантаженості доріг

З урахуванням коефіцієнтів відповідно до (3.14) транспортну мережу досліджуваної території представлено на рис. 3.34, де зелений колір відповідає W_1 , жовтий – W_2 , оранжевий – W_3 , червоний – W_4 .

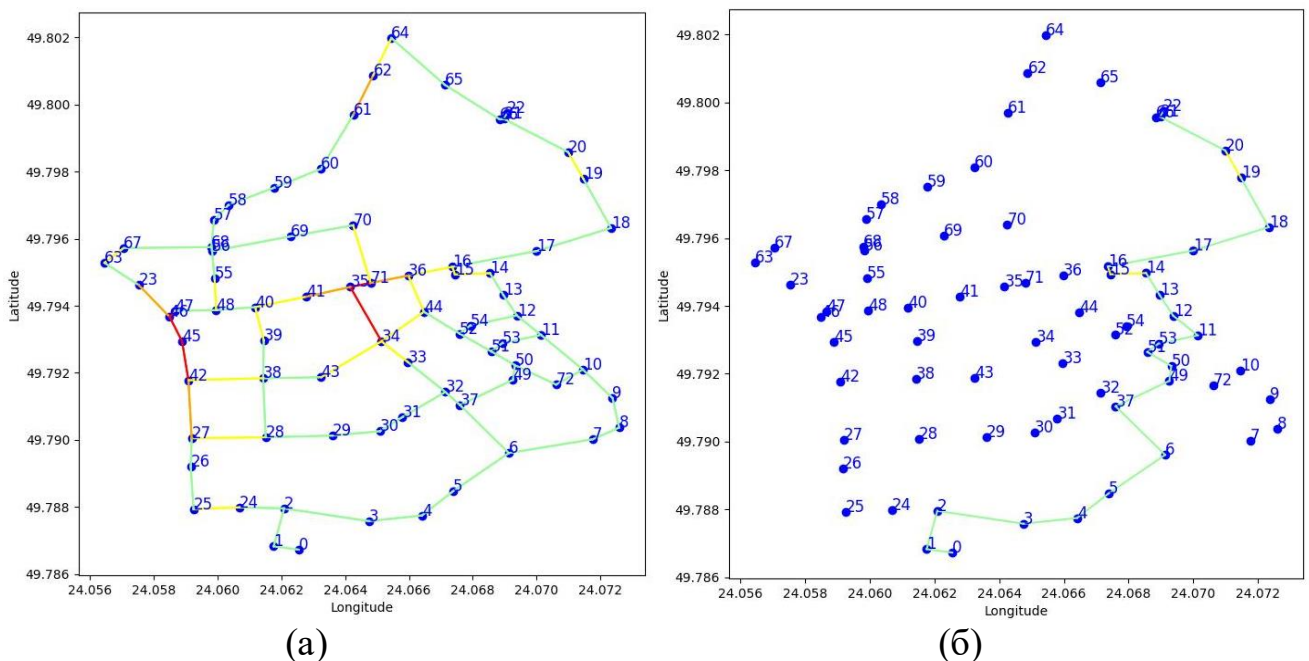


Рис. 3.34. Транспортна мережа досліджуваної території із завантаженістю доріг
(а) та (б) оптимальний маршрут при використанні розробленого ГА

Відповідно до другого етапу роботи розробленого методу для альтернативних маршрутів вибрано діапазон у межах $k_{trans_best_r} \pm 4$, де $k_{trans_best_r}$ - кількість переходів для найкращого маршруту. Оскільки для найкращого маршруту цей параметр становив 23, відповідно вибраний діапазон {19 : 27}.

Для зручності порівняння наведених результатів моделювання їх представлено у таблиці 3.25. Для визначення часу руху транспортного засобу у роботі для цього випадку та інших, розглянутих у межах цього пункту дисертації, прийнято, що швидкість руху становить 30 км/год.

Отримані маршрути при використанні розробленого ГА із урахуванням двох
критеріїв

Номер маршруту	Вузли утвореного маршруту	Кількість переходів	Значення оцінки маршруту	Час руху транспортного засобу, с
1	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	23	2655	318.6
2	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	20	2680	321.6
3	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 54, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	23	2682	321.84
4	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	22	2710	325.2
5	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	19	2735	328.2
6	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 72, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	23	2799	335.88
7	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 54, 52, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	24	2943	353.16
8	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 38, 43, 34, 44, 36, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	19	2944	353.28

Представлені дані у таблиці 3.25 демонструють роботу запропонованого рішення, що знаходить декілька маршрутів із схожими характеристиками.

Таким чином, представлений метод здатний адаптуватися до різних сценаріїв, використання альтернативних маршрутів забезпечує більшу гнучкість щодо вибору шляху в умовах завантаженості транспортної мережі.

Рис. 3.35 демонструє сформований маршрут при використанні ЖА та МА.

Як видно із рис. 3.35а, ЖА не досягнув кінцевої точки маршруту, зупинившись на 39 вузлі, тоді як МА (рис. 3.35б) успішно сформував маршрут до вузла призначення.

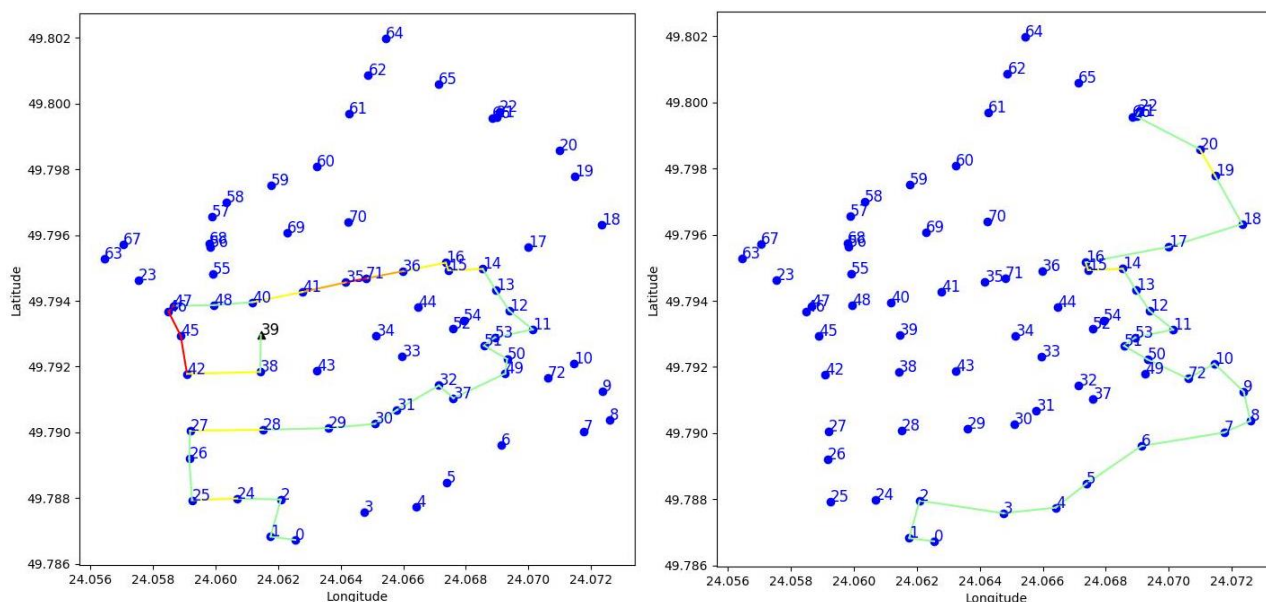


Рис. 3.35. Сформований маршрут при використанні

(а) ЖА

(б) МА

У таблиці 3.26 представлено отримані результати моделювання із рис. 3.35.

Таблиця 3.26

Порівняння отриманих маршрутів при використанні ГА, ЖА та МА із врахуванням двох критеріїв

Вид алгоритму	Вузли утвореного маршруту	Значення маршруту	Час руху транспортного засобу, с
Розроблений генетичний	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	2655	318.6
Жадібний	{0, 1, 2, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 49, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 36, 71, 35, 41, 40, 48, 47, 46, 45, 42, 38, 39}	-	-
Мурашковий	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 72, 50, 51, 53, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}	2952	354.24

На основі аналізу даних, представлених у таблиці 3.26, видно, що розроблений ГА дозволив сформувати найкращий маршрут у розглянутих умовах.

– по сукупності критеріїв відстані, завантаженості та недоступності доріг

Також здійснено дослідження формування дорожнього маршруту із врахуванням ділянок, недоступних для проїзду. На рис. 3.36 (а) представлено транспортну мережу досліджуваної території із урахуванням двох таких ділянок, які позначені фіолетовим кольором, (б) – результати роботи розробленого алгоритму.

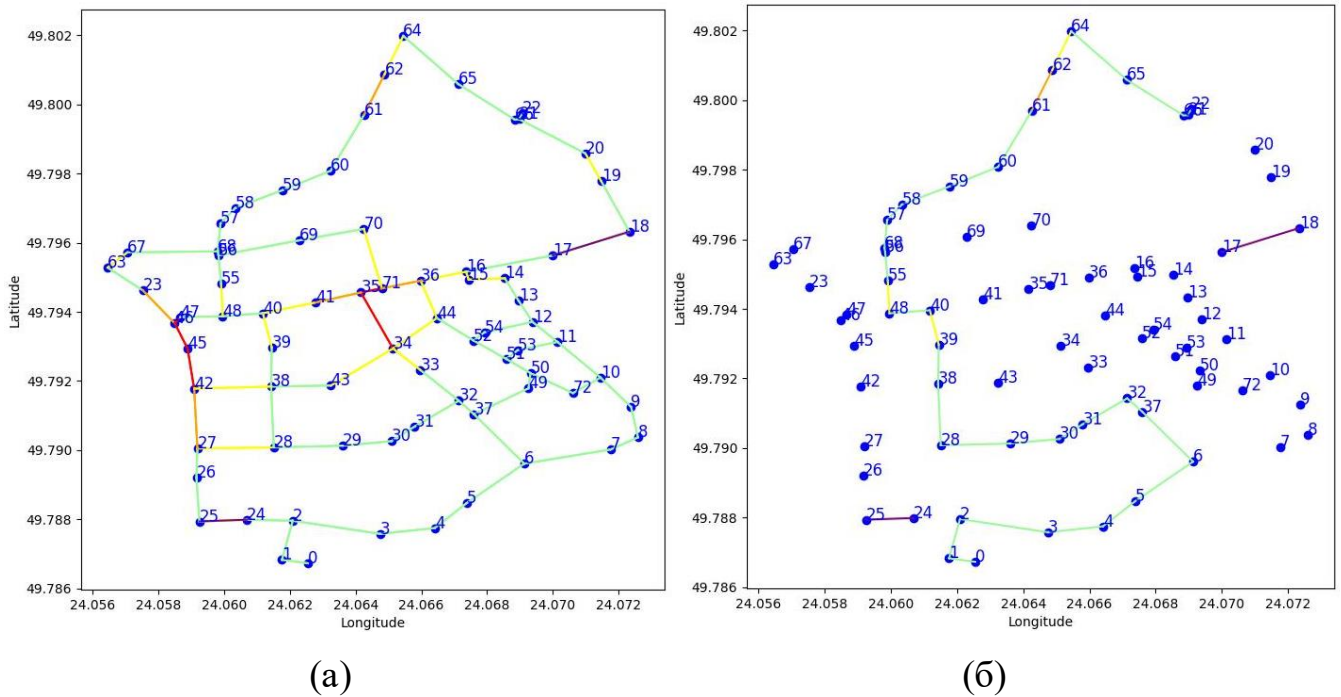


Рис. 3.36. Транспортна мережа досліджуваної території із завантаженістю доріг та ділянок, недоступних для проїзду (а) та (б) оптимальний маршрут при використанні розробленого ГА

Для зручності порівняння отриманих результатів моделювання щодо множини резервних маршрутів їх представлено у таблиці 3.27.

Таблиця 3.27

Отримані маршрути при використанні розробленого ГА в умовах різного завантаження та недоступності доріг

Номер маршруту	Вузли утвореного маршруту	Кількість переходів	Значення маршруту	Час руху ТЗ, с
1	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 31, 30, 29, 28, 38, 39, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	30	3787	454.44
2	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 43, 38, 39, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	29	3805	456.6
3	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 36, 71, 70, 69, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	29	3904	468.48
4	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 44, 36, 71, 70, 69, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	28	3959	475.08
5	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 35, 41, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	28	4082	489.84

Продовження таблиці 3.27

6	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 33, 34, 35, 71, 70, 69, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	27	4124	494.88
7	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 36, 71, 35, 41, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	32	4150	498.0
8	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 49, 50, 51, 52, 44, 34, 43, 38, 39, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	32	4152	498.24

Пошук маршруту у даних умовах для порівняння було здійснено також ЖА та МА (рис. 3.37).

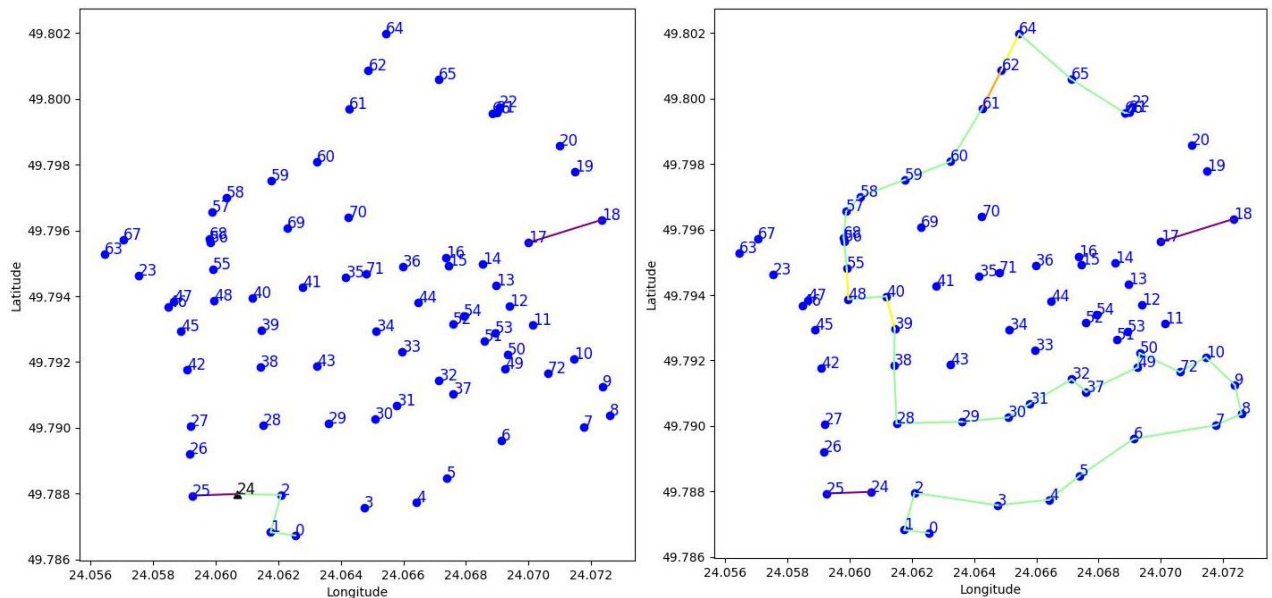


Рис. 3.37. Сформований маршрут при використанні

(а) ЖА

(б) МА

Як видно із рис. 3.37а, ЖА не досягнув кінцевої точки маршруту, зупинившись на 24 вузлі. У таблиці 3.28 представлено дані, отримані на основі результатів моделювання (рис. 3.37).

Таблиця 3.28

Порівняння отриманих маршрутів при використанні ГА, ЖА та МА в умовах різного завантаження та недоступності доріг

Вид алгоритму	Вузли утвореного маршруту	Значення маршруту	Час руху транспортного засобу, с
Розроблений генетичний	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 37, 32, 31, 30, 29, 28, 38, 39, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	3787	454.44
Жадібний	{0, 1, 2, 24}	-	-
Мурашковий	{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 72, 50, 49, 37, 32, 31, 30, 29, 28, 38, 39, 40, 48, 55, 56, 68, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 21, 22}	4470	536.4

На основі аналізу даних, представлених у таблиці 3.28, видно перевагу використання розробленого ГА у порівнянні із ЖА та МА. Зокрема ГА забезпечує суттєве покращення у порівнянні із МА – на 15.28% менший час руху ТЗ по утвореному маршруту.

Таким чином, пропонуване рішення доцільно використовувати для підвищення ефективності маршрутизації транспортних засобів у «розумному місті» при динамічно змінних умовах (рівня завантаженості, недоступності доріг).

Висновки до розділу 3

У цьому розділі наведено основні критерії для пошуку найкращого маршруту передачі даних та описано особливості їх роботи.

Запропоновано багатокритеріальний метод маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі еволюційного механізму пошуку маршруту із фітнес-функцією, побудованою на основі нормалізованих значень мережевих параметрів та характеристик сенсорного вузла.

Описано модель децентралізованої безпроводної сенсорної мережі у двовимірному просторі із вузлами різного радіусу дії.

Наведено генетичний алгоритм, який використовується для пошуку оптимального маршруту в БСМ. Оптимізація здійснюється на основі багатокритеріальної фітнес-функції, яка інтегрує шість ключових параметрів, що відображають специфіку функціонування БСМ: Евклідова відстань, рівень заряду батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримка передачі даних та вхідний/вихідний ступінь вузла.

З метою підтвердження переваг розробленого багатокритеріального ГА, було проведено імітаційне порівняння його показників з результатами ЖА та МА.

На основі отриманих результатів показано, що для комплексного критерію розроблений ГА формує маршрут, який є на 15.75% коротшим порівняно з МА, при цьому ЖА не здійснює успішне формування маршруту.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність застосування пропонуваного рішення для задач маршрутизації в БСМ, зокрема у випадках зі динамічно змінною топологією та необхідністю мінімізації витрат енергії.

Здійснено реалізацію розробленого методу на основі авторського ГА для планування маршрутів транспортних засобів у «розумному» місті, який враховує найменшу відстань, рівень завантаженості доріг та їх непрохідність, використовуючи відповідні коефіцієнти та штрафи. Для оптимізації пошуку маршруту застосовано еволюційні оператори генетичного алгоритму, зокрема турнірний відбір, впорядковане схрещування та мутацію на основі перемішування.

Для оцінки ефективності авторського рішення проведено порівняльний аналіз результатів його роботи із ЖА та МА. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що розроблений алгоритм забезпечує зменшення часу руху транспортного засобу на 15.28% порівняно із МА завдяки оптимальному вибору маршруту, при цьому ЖА не досягає вузла - призначення.

Отже, запропоноване рішення може бути інтегроване в інтелектуальні транспортні системи «розумного» міста для аналізу дорожньої ситуації та адаптивного планування маршрутів транспортних засобів.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТІВ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

4.1. Розроблення методу просторового розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботах [148, 149].

Mesh топологія є однією з популярних і ефективних топологій для БСМ, завдяки своїй гнучкості, надійності та можливості забезпечувати високу ступінь зв'язності мережі.

Відповідно розміщення вузлів мережі здійснюється у вигляді сітки, де кожен вузол розташовується на перетині вертикальних і горизонтальних ліній. Завдяки регулярному розміщенню вузлів у сітці досягається рівномірне покриття території, що мінімізує «сліпі» зони.

Однакова відстань між вузлами та рівномірний розподіл з'єднань дозволяє зменшувати імовірність перевантаження певних вузлів.

Варто зауважити, що mesh топологію доцільно застосовувати для розгортання вузлів у відносно однорідних середовищах, де немає значних перешкод, і де необхідно забезпечити рівномірне покриття великої площі, зокрема для моніторингу великих сільськогосподарських територій, спостереження за станом навколишнього середовища у рівнинних місцевостях, інфраструктурного моніторингу тощо.

У роботі [150] згадується, що у випадку додавання нових вузлів або зміни топології, mesh структура може бути менш гнучкою, оскільки нові вузли потрібно буде інтегрувати в існуючу сітку, що може призвести до порушення її регулярності. Для уникнення цього недоліку у дисертаційній роботі пропонується використати принцип еволюції, який базується на використанні трьох генетичних операторів: відбору, схрещування та мутації.

ГА, як метод глобальної оптимізації, дозволяє знайти оптимальні місця для розміщення вузлів з урахуванням топології всієї мережі. Це забезпечує мінімальне порушення існуючої структури mesh і зменшує негативний вплив на її регулярність.

Таким чином, використання ГА для розміщення вузлів у mesh топології дозволяє усунути недоліки, пов'язані зі зміною топології або додаванням нових вузлів. Він забезпечує оптимальну інтеграцію нових елементів у мережу завдяки можливостям адаптації до динамічних змін, мінімізуючи порушення її регулярності та підвищуючи загальну ефективність роботи мережі. ГА досліджує простір рішень шляхом створення нових особин (можливих рішень) у популяції, кожна з яких представляє певне рішення. Спочатку популяція може містити різноманітні і, можливо, неефективні рішення. Протягом декількох поколінь, через відбір, схрещування та мутації, алгоритм генерує нові особини, що мають потенційно кращі характеристики [149].

Варто зауважити, що для задачі оптимального розміщення сенсорних вузлів, простір рішень складається з усіх можливих конфігурацій розміщення таких вузлів на досліджуваній площині [149].

Запропонований метод використовує еволюційний пошук на основі генетичних операторів, для визначення оптимального розподілу сенсорних вузлів на площині, поділеній на квадрати рівного розміру. Для кожної потенційної конфігурації обчислюється фітнес-функція, що кількісно відображає рівень «переповнення» квадратів, тобто ступінь порушення рівномірності розподілу сенсорних вузлів.

Таким чином, запропонований метод спрямований на пошук конфігурацій, які мінімізують кількість перевантажених квадратів, сприяючи більш рівномірному розташуванню сенсорів на площині та зменшенню ймовірності утворення зон із надмірною щільністю.

Розглянемо досліджувану область $[L_{size} \times L_{size}] \subset \mathbb{R}^2$ (L_{size} – розмір сторони території, $\mathbb{R}^2$ – двовимірний евклідів простір), на якій розміщуються сенсорні вузли $V = \{v_1, \dots, v_N\}$. Кожен вузол характеризується координатами (x_i, y_i) , радіусом дії r_i та мінімальною міжвузловою відстанню i_n_{dist} .

$$v_i = (x_i, y_i) \in D, \quad i = 1, \dots, N, \quad (4.1)$$

де N – загальна кількість вузлів, D – множина всіх дискретних точок (центри клітинок сітки досліджуваної площини).

Для кожного вузла задано радіус дії r_i , що визначає область, яку він покриває:

$$C_i = \{(x, y) \in D | (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq r_i^2\}, \quad (4.2)$$

де C_i – множина точок, які знаходяться в межах кола з центром у (x_i, y_i) і радіусом r_i .

Сумарне покриття можна представити як $C(X) = \bigcup_{i=1}^N C_i$, де $C(X)$ – усі точки досліджуваної області, які покриваються при даному розташуванні сенсорів X .

Для запобігання надмірного скупчення вузлів між будь-якими двома із них повинна виконуватись умова: $\|x_i - x_j\| \geq i_{n_{dist}}, \forall i \neq j$.

Щільність покриття в точці (x, y) : $n(x, y) = \sum_{i=1}^N 1_{C_i}(x, y)$, де $1_{C_i}(x, y)$ – індикаторна функція:

$$1_{C_i}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (x, y) \in C_i, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Значення $n(x, y)$ показує, скільки сенсорів одночасно покривають точку (x, y) . Якщо $n(x, y) = 0$, то точка непокрита, $n(x, y) = 1$ – оптимальне покриття (одним сенсором), $n(x, y) > 1$ – надлишкове покриття.

Визначення кількості точок, які покрито більш ніж одним сенсором, здійснюється на основі:

$$O(X) = \sum_{x, y \in D} \max(0, n(x, y) - 1). \quad (4.4)$$

Таким чином, загальну функцію оптимізації можна представити як:

$$\min_{X \in D^N} f(X) = O(X), \quad (4.5)$$

де $O(X)$ – перекриття зон вузлів, X – конфігурація вузлів.

Таким чином, задача оптимального розміщення сенсорних вузлів формулюється як задача мінімізації $\min_{X \in D^N} f(X)$, розв'язок якої забезпечує баланс між мінімізацією надлишкового перекриття та дотриманням обмеження на мінімальну міжвузлову відстань для вузлів з різними радіусами дії.

4.2. Модифікований генетичний алгоритм для розміщення сенсорних вузлів на площині

На рис. 4.1 представлено узагальнену блок-схему пропонованого ГА розміщення мережевих вузлів для mesh топології. На етапі вхідних даних задаються

параметри відповідно до рис. 4.1. На наступному етапі рандомно здійснюється присвоєння координат (x, y) вузлам мережі. Після чого відбувається формування хромосом (особин), кожна з яких являє собою список координат $[x_1, y_1; x_2, y_2; \dots x_n, y_n]$, де кожна пара x_n, y_n – координати одного вузла на площині. Таким чином, кожна хромосома в популяції представляє можливу конфігурацію розміщення вузлів.

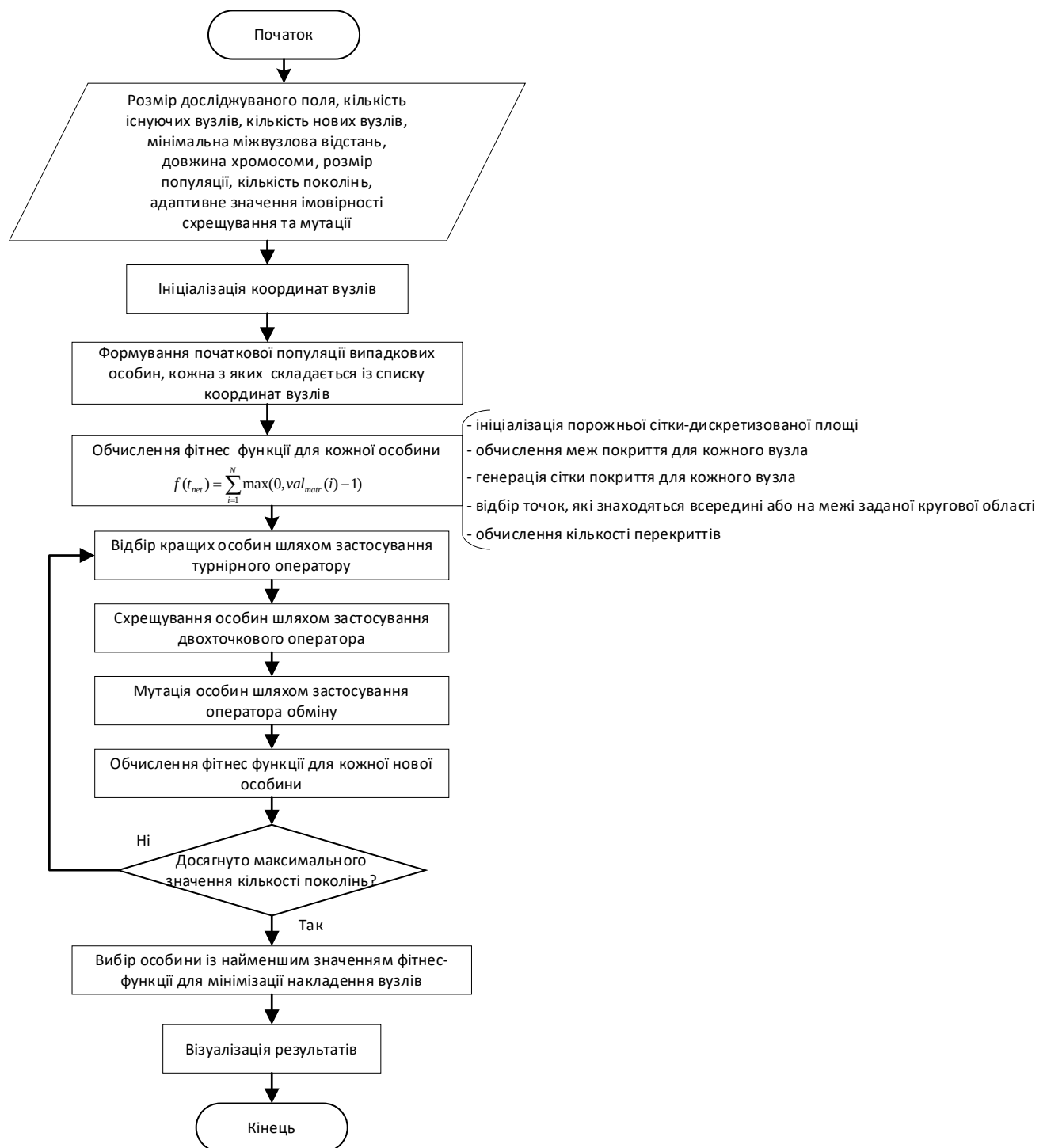


Рис. 4.1. Блок-схема пропонованого ГА розміщення мережевих вузлів [148]

Для визначення придатності кожної особини здійснюється обчислення фітнес функції, яка оцінює «переповнення» квадратів на розглянутій площині. Відповідно визначається кількість вузлів у кожному квадраті шляхом додавання матриць для нових і існуючих вузлів. Для існуючих вузлів матриця складається із 0 та 1: 1 – якщо вузол є, 0 – якщо вузла немає у розглянутому квадраті; для нових вузлів – від 0 до k , де k – кількість вузлів, які одночасно знаходяться у одному квадраті [149].

Якщо є більше одного вузла в одному квадраті, то відбувається віднімання 1. Внаслідок цього ГА шукає рішення, що мінімізують кількість перевантажених квадратів, тобто зменшують кількість вузлів, розміщених у межах одного квадрату. Це забезпечує більш рівномірний розподіл вузлів по всьому полю, що важливо для оптимальної роботи мережі [149].

Фітнес функцію $f(t_{net})$ можна представити як [149]:

$$f(t_{net}) = \sum_{i=1}^N \max(0, val_{matr}(i) - 1), \quad (4.6)$$

де $val_{matr}(i)$ – значення у матриці для кожного квадрату i , N – загальна кількість квадратів на досліджуваному полі.

Функція (4.6) мінімізує кількість зайвих об'єктів у кожній клітинці. Чим менше значення $f(t_{net})$ тим краще, оскільки це означає, що розподіл об'єктів по квадратах є більш рівномірним.

Отже, у контексті оптимізації фітнес функцію (4.6) доцільно використовувати для задачі розподілу об'єктів, де потрібно уникати їх скупчення в одному місці, тобто максимізувати рівномірність розподілу.

Після визначення значення фітнес функції для кожної особини із початкової популяції здійснюється їх зміна шляхом використання наступних генетичних операторів:

- для етапу відбору – турнірного,
- для етапу схрещування – двоточкового,
- для етапу мутації – обміну.

Далі новоутворені особини оцінюються з точки зору придатності для вирішення поставленої задачі шляхом використання (4.6). Критерієм зупинки роботи алгоритму є досягнення заданої кількості поколінь, після чого вибирається особина із найменшим значенням розглянутої фітнес функції [149].

Випадкове розміщення вузлів у БСМ застосовується, коли необхідно розгорнути мережу швидко, з мінімальними витратами на планування та налаштування. У такому випадку СВ розміщуються без певного порядку, шляхом випадкового розташування в межах заданої області. Проте це може призвести до нерівномірного покриття мережі і низької зв'язності певних вузлів, що ускладнює передачу даних та знижує надійність мережі [151]. Для усунення такого негативного впливу пропонується застосувати метод оптимального розміщення сенсорних вузлів (рис. 4.1).

Розглянемо його етапи роботи із точки зору програмної реалізації.

1. Задання основних параметрів відповідно до вхідних даних з рис. 4.1.

Використання мінімально допустимої відстані між вузлами призначено для забезпечення кращого покриття території та підвищення ефективності мережі. Також цей параметр запобігає надмірному перекриттю зон дії вузлів, що може призвести до зайвих витрат енергії та зменшення продуктивності мережі через надмірне дублювання даних і конфлікти під час передачі.

Таким чином, врахування мінімальної міжвузлової відстані є важливим при плануванні та розміщенні сенсорних вузлів для досягнення оптимального покриття та функціонування мережі.

2. Створення функції `get_locations()` для формування набору координат, на яких можуть бути розташовані сенсорні вузли. Метою цього етапу є визначення розподілених точок на площині, які можна використовувати для подальшої оптимізації за допомогою ГА.

3. Створення функції `get_lim_counts()` для генерування випадкових координат вузлів із урахуванням обмежень для кожного вузла.

Нехай множина координат можливого розташування вузлів $Loc_{nodes} \in$

$$Loc_{nodes} = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}, \quad (4.7)$$

де n – кількість нових вузлів.

Випадковим чином вибирається підмножина координат, яка визначає початкові місця розташування вузлів. Далі розраховуються обмеження для вузлів мережі.

Для кожного вузла з координатами (x_i, y_i) обчислюються межі:

$$x_{\min} = \max(1, x_i - \text{inter_dist}(i)), x_{\max} = \min(f_size + 1, x_i + \text{inter_dist}(i) + 1), \quad (4.8)$$

$$y_{\min} = \max(1, y_i - \text{inter_dist}(i)), y_{\max} = \min(f_size + 1, y_i + \text{inter_dist}(i) + 1), \quad (4.9)$$

де i – індекс вузла, inter_dist – обмеження на мінімальну міжвузлову відстань, f_size – розмір досліджуваного поля,

Ці межі визначають квадрат, всередині якого знаходиться область покриття кожного вузла. Здійснюється обчислення сітки точок, які потрапляють в область покриття вузла:

$$x_{range} = \{x \in Z | x_{\min} \leq x \leq x_{\max}\}, y_{range} = \{y \in Z | y_{\min} \leq y \leq y_{\max}\}. \quad (4.10)$$

Після цього визначається, які точки всередині квадрату також належать колу вузла із урахуванням inter_dist :

$$mask = \{(x, y) | (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \leq \text{inter_dist}(i)^2\}. \quad (4.11)$$

Здійснюється оновлення матриці lim_counts , яка визначає скільки разів певна точка на розглянутій площині належить до області покриття вузлів.

4. Створення початкової популяції особин на основі бібліотеки DEAP, кожна із яких представляє потенційне розташування вузлів на площині.

5. Задання фітнес функції $f(t_{net})$ для оцінки якості кожної особини, відповідно до якої чим менше накладень вузлів, тим краще їх розміщення.

6. Задання генетичних операторів відповідно до рис. 4.1.

Оператор відбору:

$$S = select(P, T), \quad (4.12)$$

де P - поточна популяція, T - розмір турніру, S - підмножина особин для схрещування.

Оператор схрещування:

$$C_i = \text{crossover}(P_i, P_j), \quad (4.13)$$

де P_i, P_j - батьківські особини, C_i - нова особина, отримана внаслідок схрещування батьківських особин.

Оператор мутації змінює значення генів у особинах із адаптивною ймовірністю на основі вибору двох випадкових позицій у особині та їх подальшого обміну між собою.

Після застосування всіх операторів ГА популяція оновлюється новими індивідами:

$$P_{t+1} = S + M(C_i), \quad (4.14)$$

де P_{t+1} - оновлена популяція на наступній ітерації роботи алгоритму, S - кращі особини після відбору, $M(C_i)$ - особини після схрещування і мутації.

7. Запуск генетичного алгоритму. Процес повторюється до досягнення заданої кількості поколінь.

8. Візуалізація отриманих результатів: розташування вузлів на площині, їх радіус дії, мінімальна міжвузлова відстань та «перекриття» вузлів (якщо наявне).

Отже, описані етапи алгоритму дозволяють оптимізувати розташування вузлів у сенсорній мережі з метою мінімізації перекриття їх зон дії.

4.3. Дослідження особливостей функціонування відомих алгоритмів розміщення сенсорних вузлів

Для перевірки працездатності запропонованого методу розміщення сенсорних вузлів на основі ГА створено програмний модуль на мові програмування Python. Щоб порівняти результати щодо ефективності розташування вузлів БСМ вибрано такі підходи як рівномірний пошук, жадібний пошук та випадковий пошук [152 - 154]. Для їх реалізації розроблені програмні алгоритми із урахуванням особливостей БСМ, блок-схеми яких представлено на рис. 4.2-4.4.

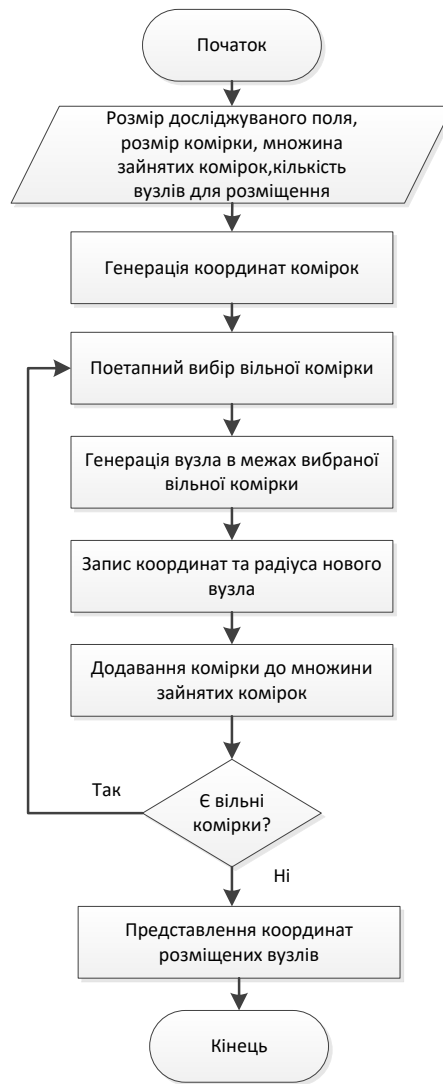


Рис. 4.2. Узагальнена блок-схема роботи алгоритму рівномірного пошуку розташування вузлів БСМ

При рівномірному пошуку досліджуване поле поділяється на комірки, в межах кожної з яких випадково розміщується один вузол. Метою алгоритму є заповнення всіх незайнятих комірок вузлом із відповідними координатами. Варто зауважити, що відсутня перевірка на мінімальну міжвузлову відстань, що дозволяє більш швидше виконати розміщення вузлів, проте це може призвести до їх надмірної щільності.

Алгоритм жадібного пошуку приймає рішення поетапно, здійснюючи вибір вільної комірки та генерацію вузла в її межах з метою мінімізації перекриття із іншими вузлами шляхом визначення Евклідової відстані між центром нового та кожного із існуючих вузлів.

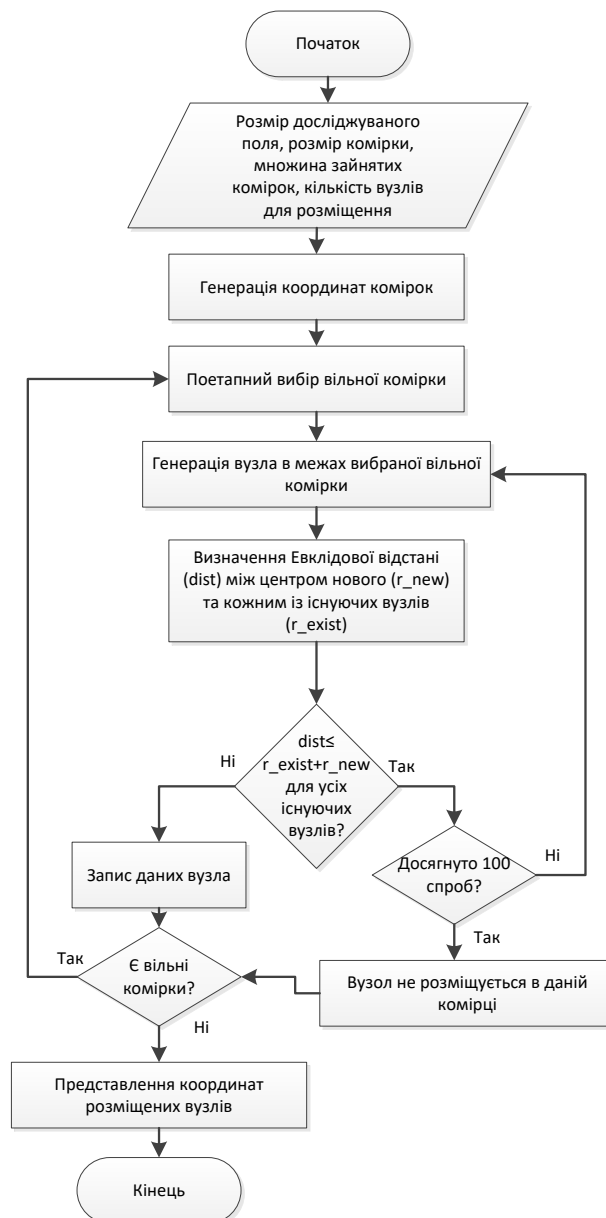


Рис. 4.3. Узагальнена блок-схема роботи алгоритму жадібного пошуку розташування вузлів БСМ

Випадковий пошук є одним із найпростіших у реалізації та базується на генерації координат розміщення вузлів випадковим чином. Кожен згенерований вузол проходить перевірку на допустимість за критерієм відсутності перекриття із існуючими вузлами на основі визначення Евклідової відстані між центром нового та кожного із існуючих вузлів.

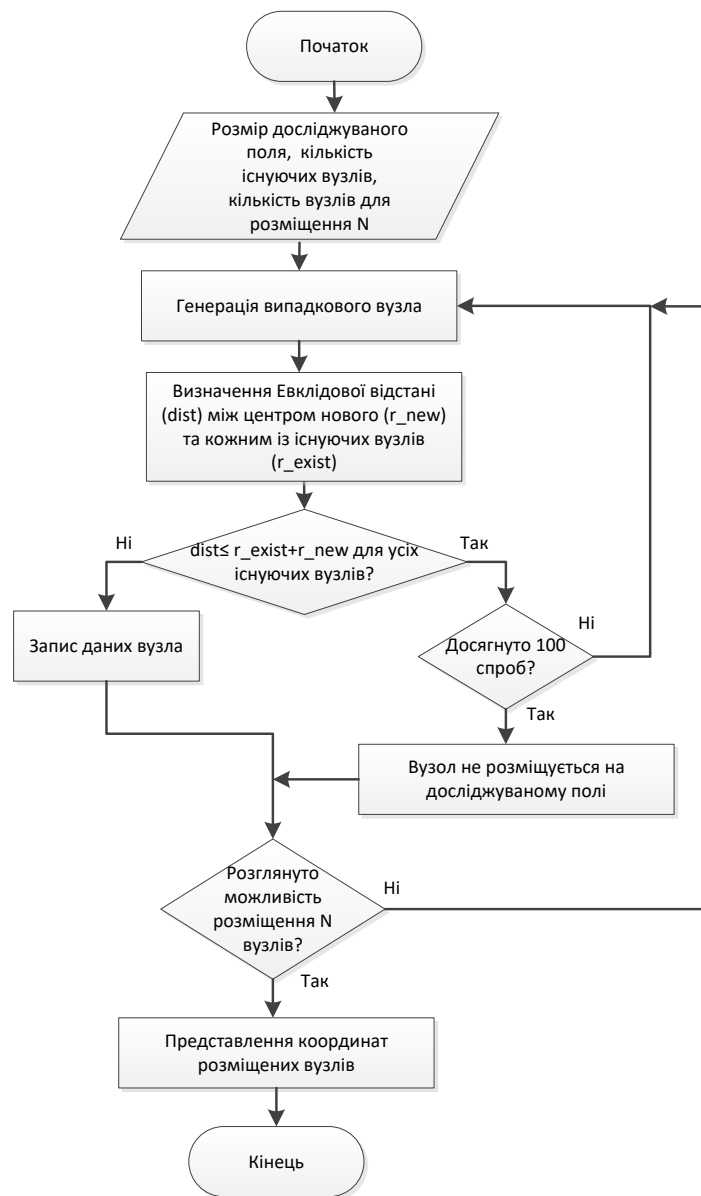


Рис. 4.4. Узагальнена блок-схема роботи алгоритму випадкового пошуку розташування вузлів БСМ

4.4. Розробка програмного модуля для моделювання та дослідження розроблених методів

Розроблений програмний модуль являє собою спеціалізоване програмне забезпечення, що призначене для моделювання та симуляційних досліджень розроблених методів у БСМ з урахуванням динамічно змінної топології та обмеженості енергетичних і мережевих ресурсів. Основним завданням модуля є реалізація ГА для визначення оптимальних маршрутів передачі даних між сенсорними вузлами та для пошуку оптимальних схем їх просторового розміщення, що забезпечують ефективне покриття заданої території.

Архітектура програмного модуля побудована на основі модульного принципу, що забезпечує гнучкість та масштабованість системи. Такий підхід дозволяє реалізовувати розширюваний функціонал та адаптувати програмне забезпечення до різних сценаріїв функціонування БСМ. Ключовою особливістю є гнучка модульність, яка передбачає можливість заміни окремих компонентів альтернативними реалізаціями. Зокрема, користувач може змінювати оператори генетичного алгоритму (відбору, кросинговеру, мутації) або інтегрувати інші методи оптимізації для проведення порівняльного аналізу з ГА. Це забезпечує універсальність архітектури та її придатність для симуляційних досліджень з різними умовами, метриками продуктивності та сценаріями розміщення та маршрутизації сенсорних вузлів.

Методологічною основою функціонування модуля є принцип імітаційного моделювання з дискретними подіями. Даний підхід передбачає відтворення роботи системи як послідовності подій (передача пакета, активація або вихід з ладу вузла, зміна маршруту тощо), які відбуваються у певні моменти часу та впливають на подальший перебіг процесів. Кожен процес у мережі моделюється як окрема подія, що дозволяє адекватно враховувати вплив різноманітних факторів. Принцип імітаційного моделювання з дискретними подіями надає можливість змінювати вхідні параметри (кількість вузлів, політику маршрутизації тощо) та досліджувати поведінку системи у різних сценаріях, обчислювати комплексні метрики.

Таким чином, вибір імітаційного моделювання з дискретними подіями як базової парадигми функціонування програмного модуля забезпечує відтворення реалістичної поведінки БСМ, що в свою чергу позитивно впливає на достовірність отриманих результатів. Розроблений модуль складається з таких ключових підсистем (рис. 4.5):

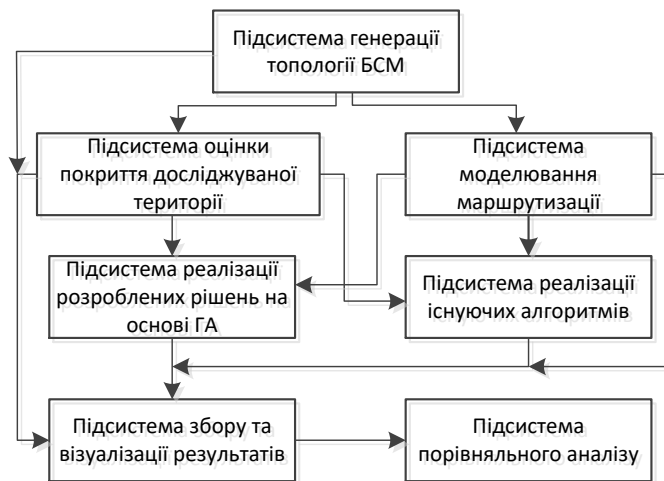


Рис. 4.5. Взаємозв'язок підсистем розробленого програмного модуля для симуляційних досліджень

- Підсистема генерації топології БСМ, яка забезпечує формування початкових сценаріїв для дослідження, зокрема розміщення вузлів у площині з можливістю задання кількості вузлів, їх координат (фіксованих або випадкових), радіусів дії (однакових або різних), обмежень на мінімальну міжвузлову відстань. При цьому підтримуються різні сценарії: додавання нових вузлів та вихід із ладу існуючих.

- Підсистема оцінки покриття території, яка призначена для формалізованого аналізу результатів роботи алгоритму при розміщенні вузлів у межах заданої площини із врахуванням неоднорідності їх радіусів дії. Покриття оновлюється дискретно у відповідь на події (додавання вузла, вихід із ладу, зміна параметрів тощо).

Функціонал даної підсистеми включає моделювання покриття території (побудова карти покриття на основі радіусів дії та мінімальної міжвузлової відстані вузлів), розрахунок зон перекриття між вузлами, оцінку повноти їх розміщення (визначення кількості вузлів, які вдалося успішно розмістити, та які не було розміщено), розрахунок відсотка надлишкового перекриття площі. Також забезпечується порівняння варіантів покриття при різних стратегіях розміщення вузлів (випадкова, жадібна, рівномірна).

- Підсистема реалізації розроблених рішень на основі ГА, яка забезпечує його коректне функціонування шляхом вибору операторів відбору, схрещування та

мутації; задання розміру популяції, кількості поколінь, імовірності мутації та схрещування (статична / динамічна), фітнес-функції. Дана підсистема дозволяє реалізувати різні сценарії оптимізації – як для маршрутизації, так і для розміщення вузлів.

- Підсистема реалізації існуючих алгоритмів для вибору маршруту та розміщення вузлів БСМ, яка забезпечує можливості об'єктивного порівняння запропонованих рішень із відомими. У складі цієї підсистеми реалізовано дві групи алгоритмів: алгоритми маршрутизації (жадібний, мурашковий) та алгоритми просторового розміщення вузлів (рівномірний, випадковий, жадібний). Завдяки своїй модульності підсистема легко розширюється шляхом додавання нових алгоритмів і забезпечує уніфікований інтерфейс взаємодії з іншими підсистемами.

- Підсистема моделювання маршрутизації, яка здійснює оцінку побудованих маршрутів у динамічно змінному середовищі на основі довжини маршруту, кількості транзитів. Дана підсистема також підтримує багатокритеріальний підхід, що дозволяє здійснювати оцінку на основі сукупності критеріїв (Евклідова відстань, затримка тощо). Для обчислення відстаней доступний вибір метрик, зокрема реалізовано Евклідову, Манхеттенську, Чебишова та Мінковського.

- Підсистема збору та візуалізації результатів, що здійснює відображення просторового розташування вузлів у межах модельованої території, включно з розмежуванням нових та вже існуючих; побудову графіків, що ілюструють динаміку основних метрик продуктивності. У структурі цієї підсистеми передбачено базу даних, яка є сховищем результатів симуляцій. Такий підхід дає змогу забезпечити можливість повторного використання отриманих даних.

- Підсистема порівняльного аналізу забезпечує інтеграцію та системне узагальнення результатів, отриманих у процесі симуляційних експериментів. Також до її функцій належить статистичний аналіз результатів, що дозволяє оцінювати масштабованість алгоритмів при зростанні кількості вузлів, збільшенні / зменшенні площі покриття; порівняння ефективності розробленого ГА з існуючими на основі

уніфікованого набору метрик. Дана підсистема також дає можливість виводити проміжні результати роботи ГА із заданим кроком для кількості поколінь.

Приклад вікна розробленого програмного продукту наведено на рис. 4.6.

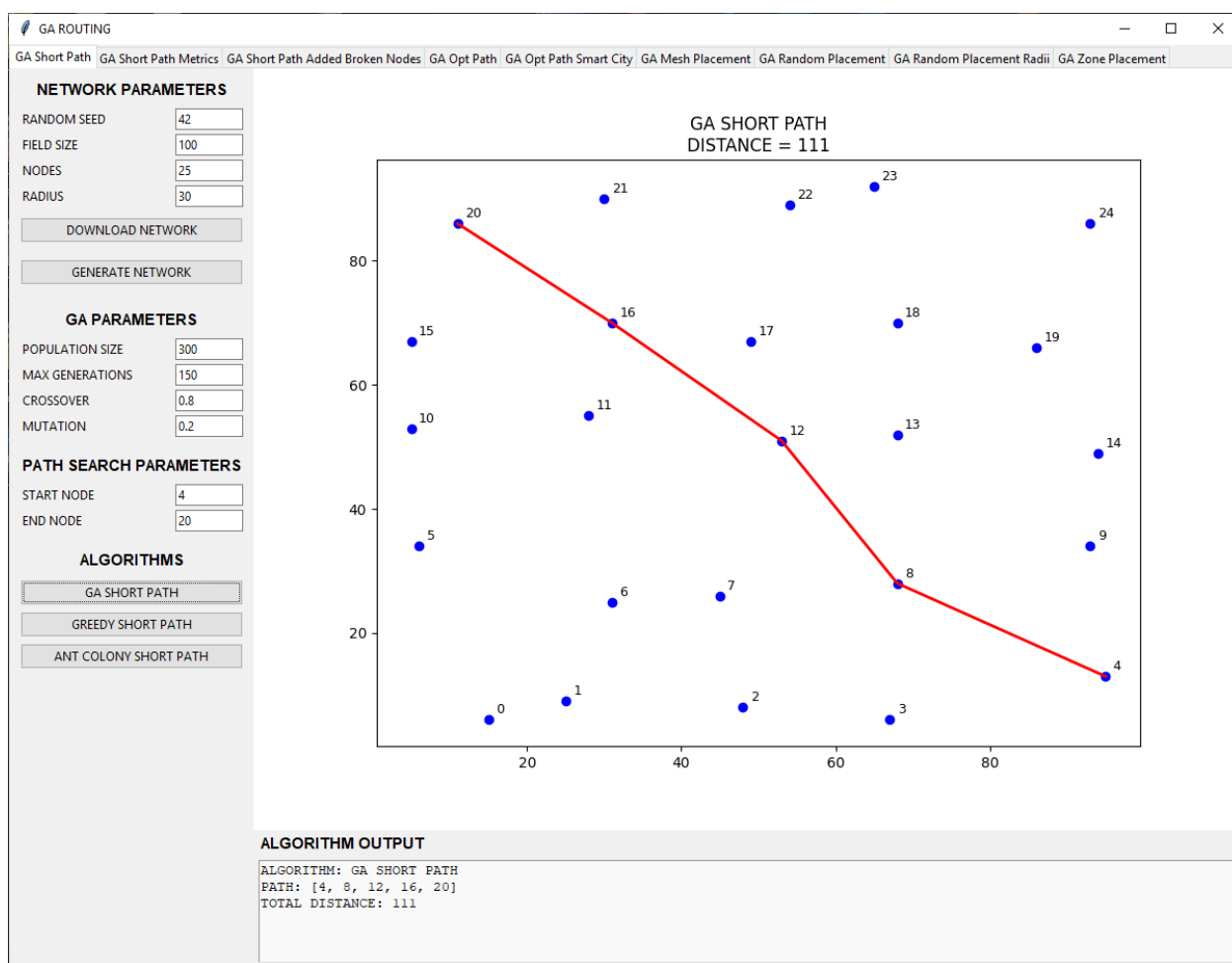


Рис. 4.6. Приклад вікна розробленого програмного продукту

Для реалізації програмного модуля використано мову програмування Python та наступні бібліотеки: random – для моделювання випадкових процесів, matplotlib – для побудови графіків і візуалізації даних, numpy – для роботи із багатовимірними масивами, матрицями та математичними операціями, networkx – для роботи з графами та мережами, PyQt5 – для створення графічних інтерфейсів користувача, math – для математичних функцій, time – для роботи з часом, DEAP – для реалізації ГА, sys – для взаємодії з інтерпретатором Python і системою.

4.5. Дослідження ефективності застосування методу просторового розміщення сенсорних вузлів

Цей підрозділ присвячено результатам імітаційного моделювання для наступних випадків:

– mesh топології

Матеріали цього підрозділу частково опубліковано автором у роботі [149].

Для mesh топології розмір досліджуваного поля задається у кількості квадратів – 10×10 . Розмір популяції – 1000, кількість поколінь – 400, для динамічного корегування відповідно до (2.1) вибрано такі діапазони імовірності схрещування та мутації як $[0.5; 0.8]$ та $[0.05; 0.2]$ [149].

а) розміщення 100 нових вузлів

На рис. 4.7 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування сенсорних вузлів для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25.

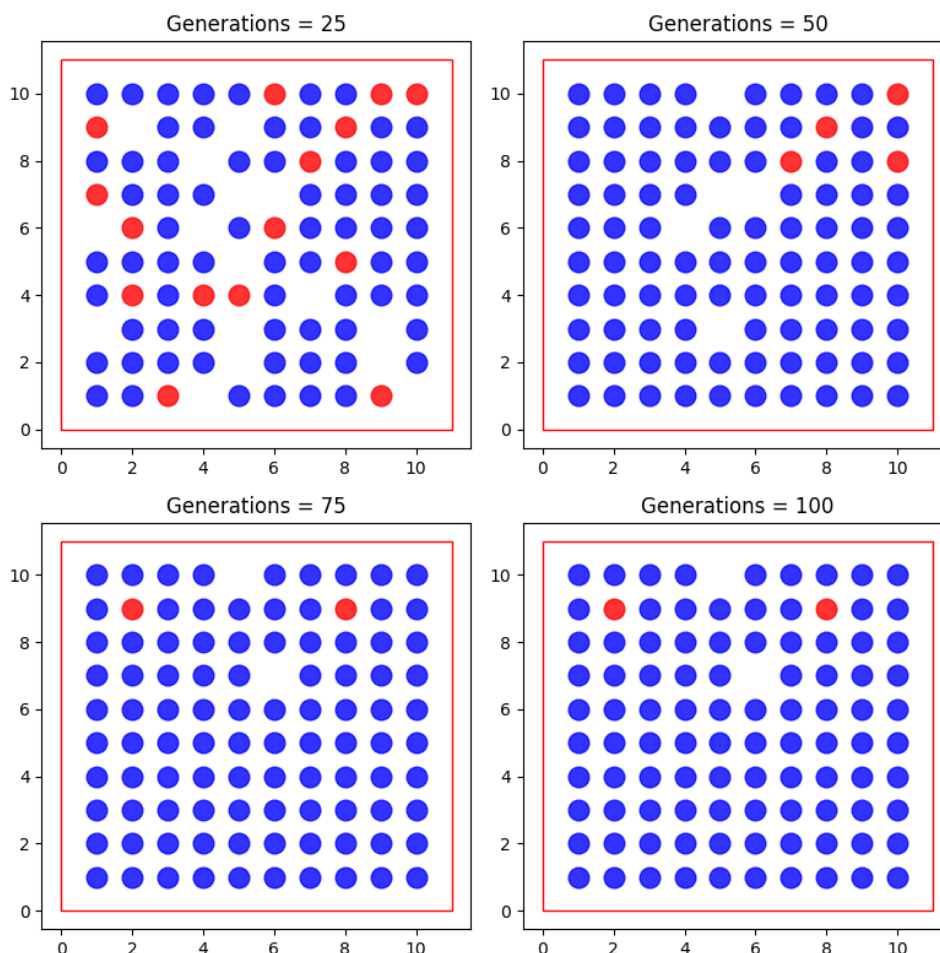


Рис. 4.7. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 100 сенсорних вузлів [149]

У цьому розділі ● позначає мережевий вузол, який розміщується один у певному квадраті площини, ● – два і більше вузлів, які одночасно розміщуються у квадраті.

Як бачимо з рис. 4.7, при $G = 25$ спостерігається найбільша кількість «переповнених» квадратів, при подальшому збільшенні значення G вузли більш рівномірно розміщуються по представленій площині [149].

Повністю рівномірне розміщення 100 вузлів досягнуто при $G = 300$, що представлено на рис. 4.8. Для аналізу і оцінки ефективності роботи розробленого алгоритму на рис. 4.9 представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес функції $f(t_{net})$.

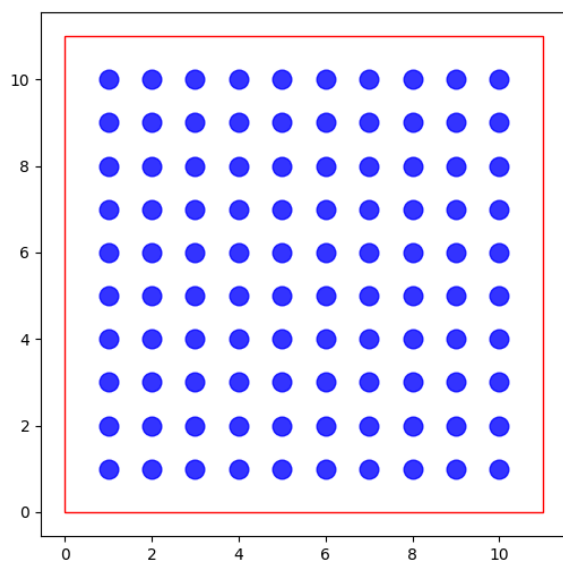


Рис. 4.8. Рівномірне розміщення 100 сенсорних вузлів

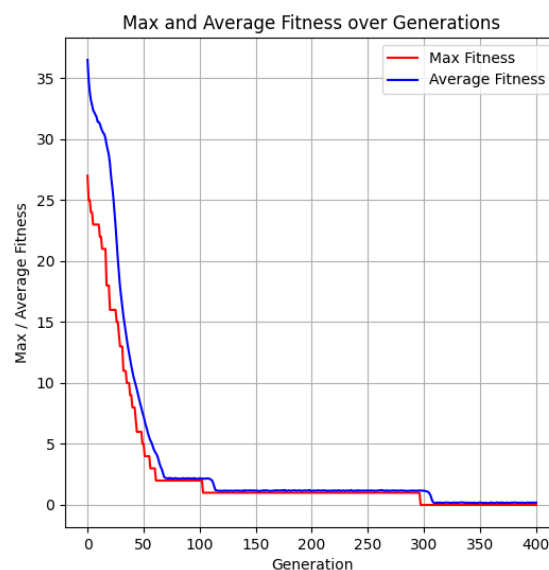


Рис. 4.9. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Рис. 4.9 демонструє, що при $G = 300$ фітнес-функція досягає стаціонарного значення, тобто моменту, коли її значення перестає змінюватися значним чином. Це вказує на те, що алгоритм досяг збіжності, і подальші покоління не приводять до покращення результатів.

б) розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих

На рис. 4.10 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування сенсорних вузлів на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25. На даному рисунку використано ● для позначення існуючого вузла мережі.

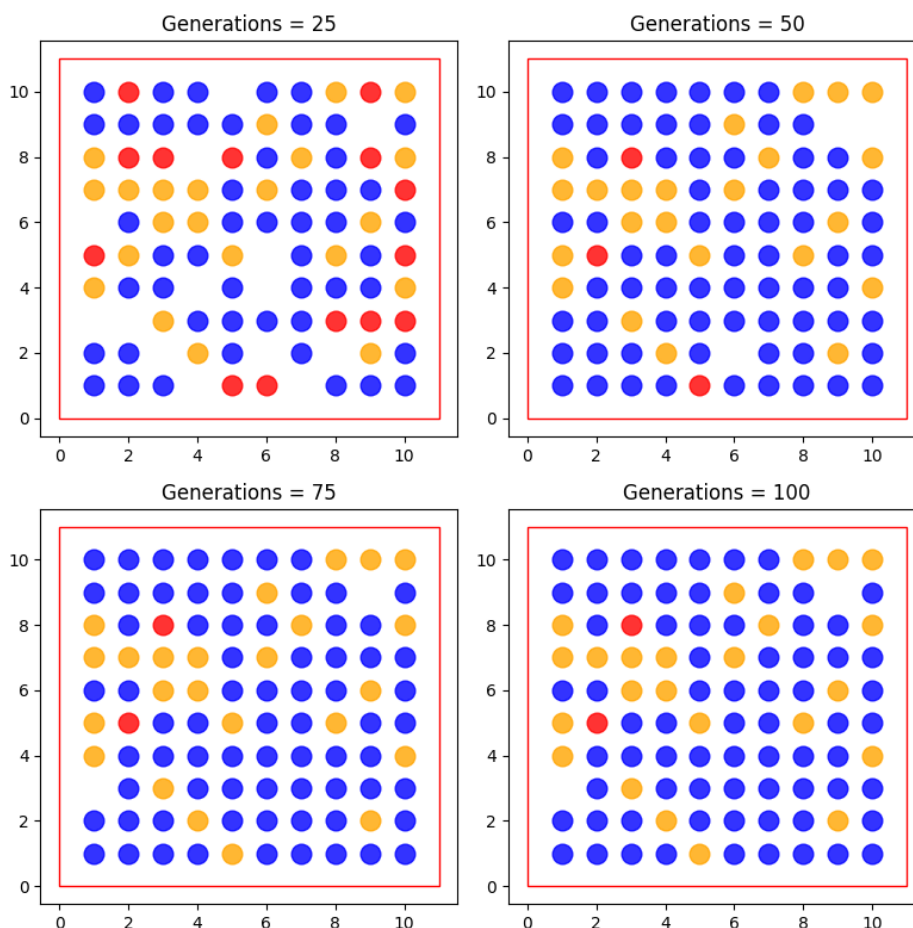


Рис. 4.10. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих

Як бачимо з рис. 4.10, при $G = 25$ спостерігається найбільша кількість «переповнених» квадратів, при подальшому збільшенні значення G вузли більш рівномірно розміщуються по представленій площині. Відповідно процес генетичної еволюції приводить до стабілізації розміщення вузлів, при цьому збільшення кількості поколінь наближає алгоритм до глобального оптимуму. Найкращий результат розміщення 75 нових вузлів при наявності 25 існуючих отримано при $G = 260$ [149].

На рис. 4.11 представлено вплив кількості поколінь на величину фітнес-функції для розглянутого випадку.

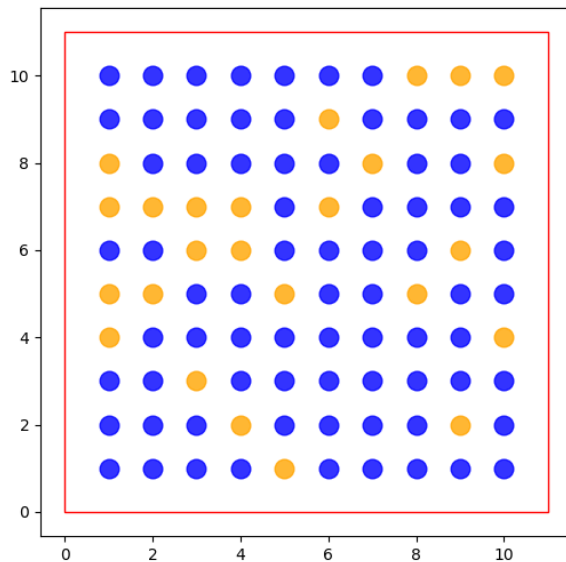


Рис. 4.11. Рівномірне розміщення 75 нових вузлів при 25 існуючих

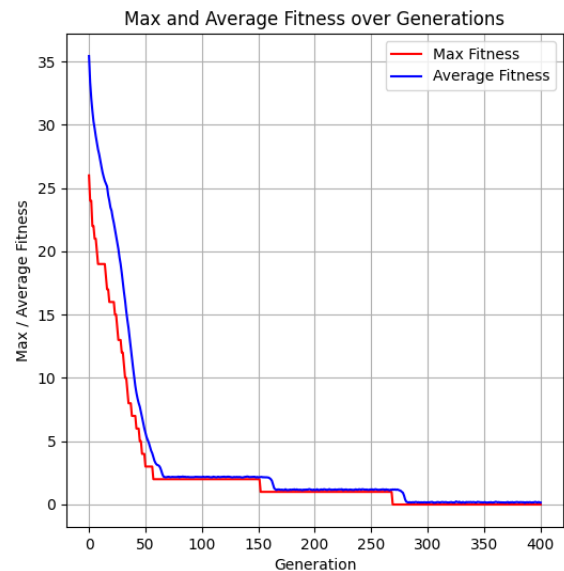


Рис. 4.12. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Відповідно до рис. 4.12, із збільшенням кількості поколінь ГА знаходить усе більш оптимальні рішення для розміщення вузлів, наближаючи систему до глобального оптимуму, який спостерігається при $G = 260$.

в) розміщення 50 нових вузлів при наявності 50 існуючих

На рис. 4.13 представлено поетапні результати функціонування запропонованого алгоритму розташування сенсорних вузлів на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25. Відповідно до наведених даних, видно, що при збільшенні кількості поколінь розроблений алгоритм дозволяє оптимально розмістити мережеві вузли при наявності існуючих. Отже, найкращий результат розміщення 50 нових вузлів при наявності 50 існуючих отримано при $G = 75$.

На початкових етапах (до 50 поколінь) спостерігається швидке зменшення як максимального, так і середнього значень фітнес-функції (рис. 4.14). Це вказує на те, що алгоритм швидко знаходить кращі рішення на ранніх стадіях еволюції, коли популяція активно досліджує простір рішень.

На рис. 4.15 представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції для розглянутого випадку.

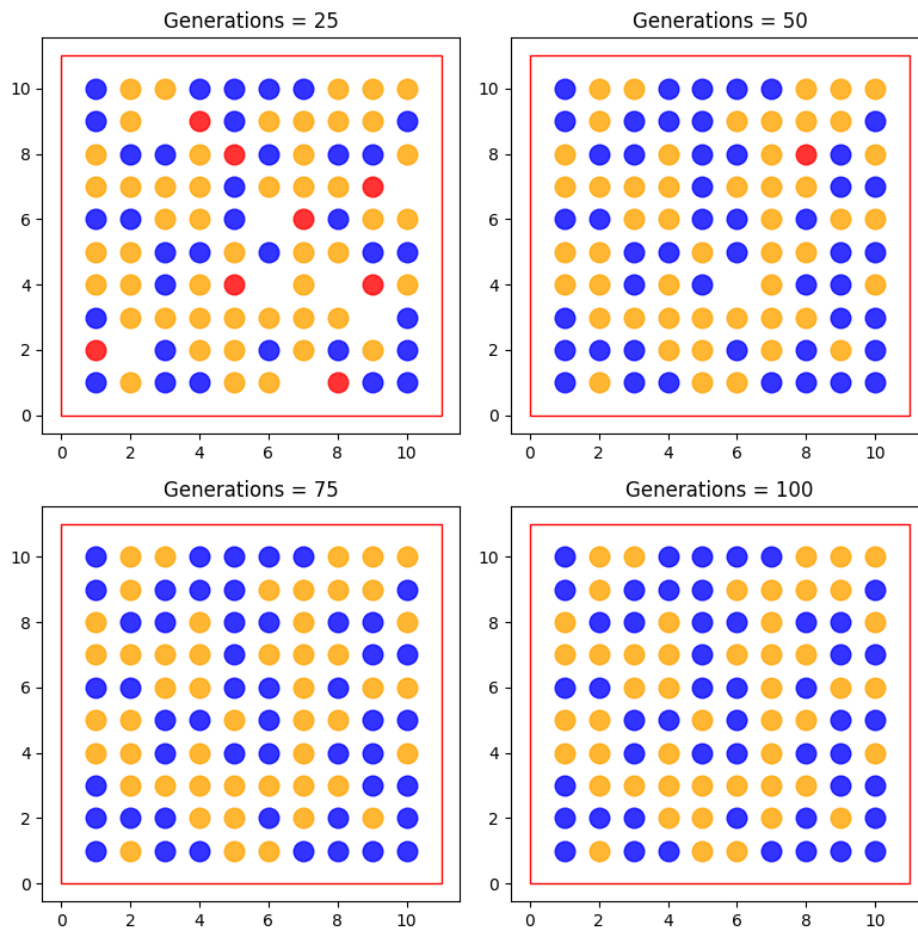


Рис. 4.13. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 50 нових вузлів при наявності 50 існуючих

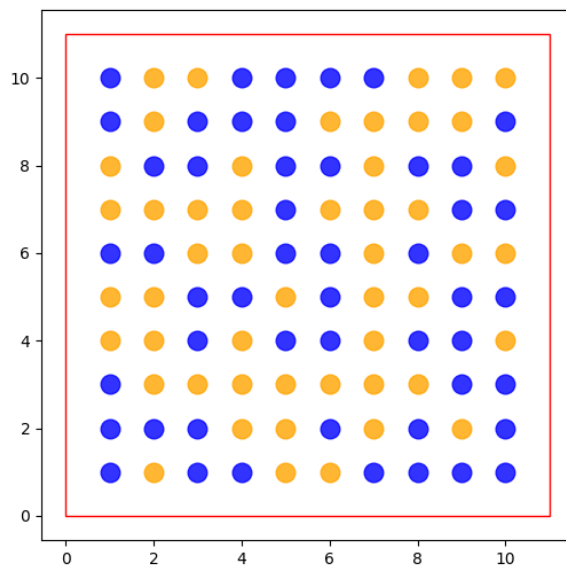


Рис. 4.14. Рівномірне розміщення 50 нових вузлів при 50 існуючих

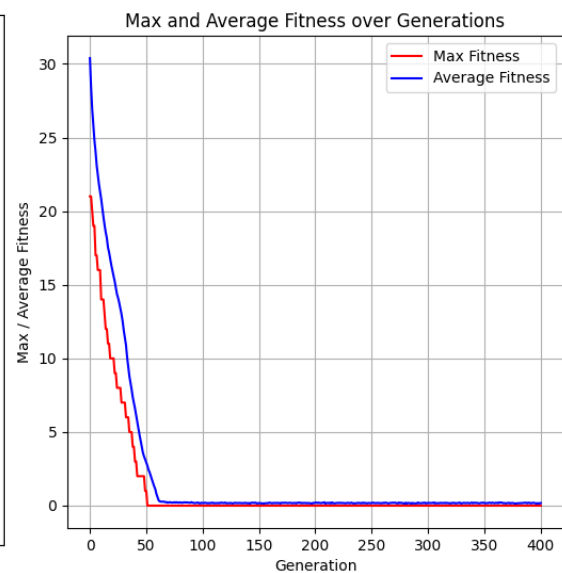


Рис. 4.15. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

г) розміщення 25 нових вузлів при наявності 75 існуючих

На рис. 4.16 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування сенсорних вузлів на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25.

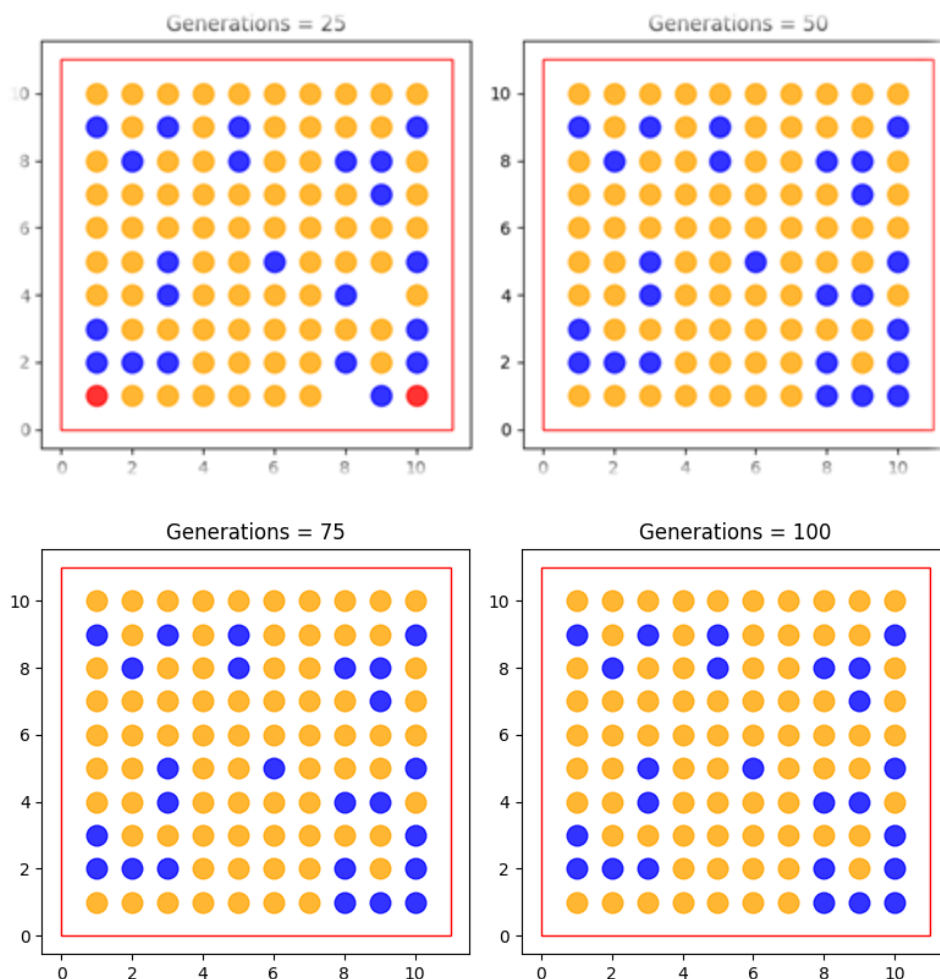


Рис. 4.16. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 25 нових вузлів при наявності 75 існуючих

Повністю рівномірне розміщення нових мережевих вузлів здійснюється при $G = 50$, що для кращої наочності представлено на рис. 4.17.

На рис. 4.18 наведено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції для розглянутого випадку.

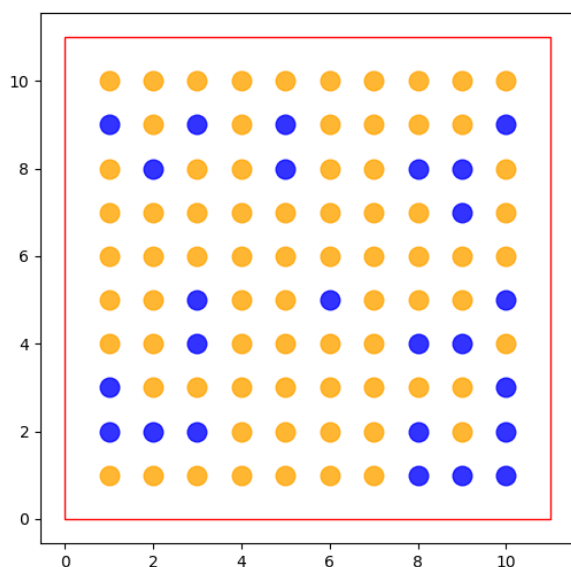


Рис. 4.17. Рівномірне розміщення 25 нових вузлів при 75 існуючих

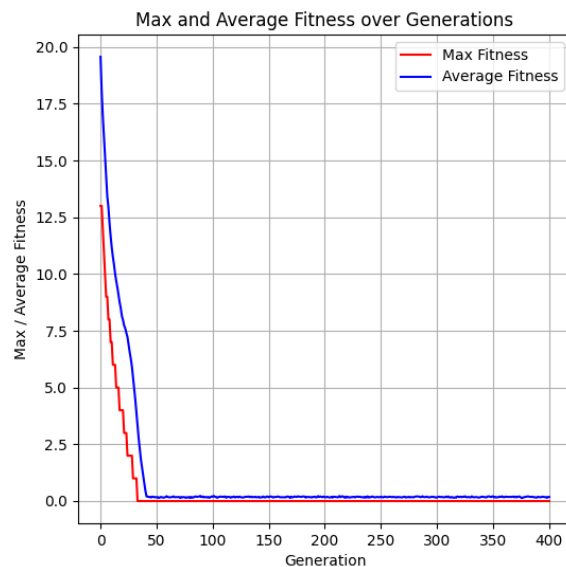


Рис. 4.18. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Вищепредставлені рисунки підтверджують ефективність розробленого ГА у задачі оптимального розміщення сенсорних вузлів. Швидка конвергенція на початкових стадіях демонструє, що алгоритм здатен швидко знаходити якісні рішення. Стабілізація фітнес-функції після 50 поколінь свідчить про досягнення певного рівня оптимальності. Це може бути використано для встановлення критерію зупинки алгоритму, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати, припиняючи еволюцію після досягнення стабільного стану [149].

– випадкового розміщення вузлів при однаковому радіусі їх дії

На основі ряду проведених досліджень визначено, що ефективність роботи пропонованого методу є найбільшою при таких параметрах: розмір популяції – 800, кількість поколінь – 200, діапазони імовірності схрещування та мутації $[0.5; 0.8]$ та $[0.05; 0.2]$ відповідно, радіус дії вузлів – 30 м, обмеження на мінімально допустиму відстань між двома вузлами – 20 м (10 м для кожного вузла) [151].

У цьому пункті представлено результати моделювання, отримані при вказаних значеннях вхідних параметрів. Щодо кількості вузлів, то розглянуто такі випадки: 25 – нових, 0 – існуючих; 20 – нових, 5 – існуючих; 15 – нових, 10 – існуючих; 10 – нових, 15 – існуючих; 5 – нових, 20 – існуючих.

Також розглянуто роботу алгоритму при збільшенні щільності вузлів шляхом зменшення розміру квадрату по периметру на 5 м.

а) розміщення 25 нових вузлів

На рис. 4.19 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 25 нових вузлів мережі на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25.

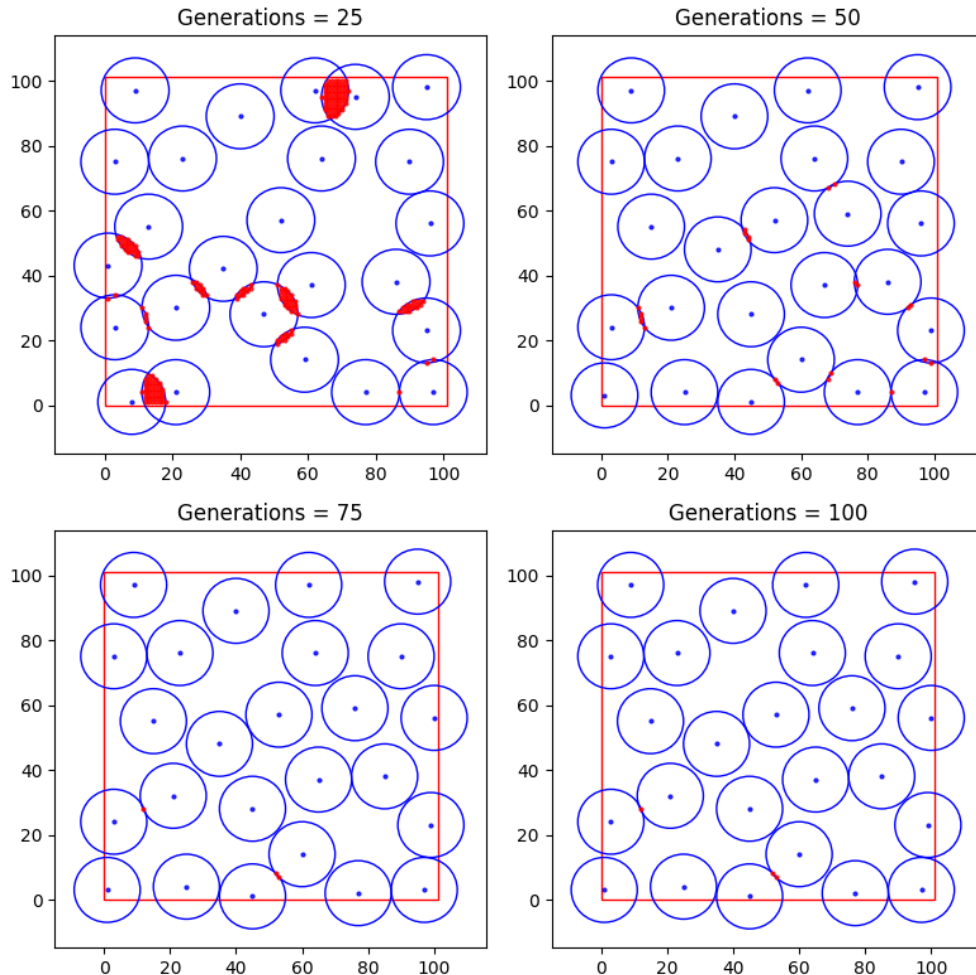


Рис. 4.19. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 25 нових вузлів

Як бачимо з рис. 4.19, коли кількість поколінь становить 25, то наявна велика кількість зон «перекриття» вузлів, що позначено червоним кольором. При збільшенні значення G спостерігається більш оптимальне розміщення вузлів [151].

Рис. 4.20 демонструє найкраще розміщення 25 вузлів на розглянутій площині, яке отримано при $G = 152$. При цьому отримана хромосома із 25 вузлів [23, 76; 2, 24; 25, 4; 40, 97; 95, 98; 15, 55; 45, 28; 99, 23; 45, 1; 1, 3; 9, 97; 76, 59; 3, 75; 90, 75; 77, 1; 97, 3; 35, 48; 61, 14; 21, 32; 85, 38; 65, 37; 64, 76; 62, 97; 53, 57; 96, 56], де кожному вузлу відповідають дві координати (x та y).

Для аналізу роботи розробленого алгоритму представлено вплив кількості поколінь на величину фітнес-функції на рис. 4.21.

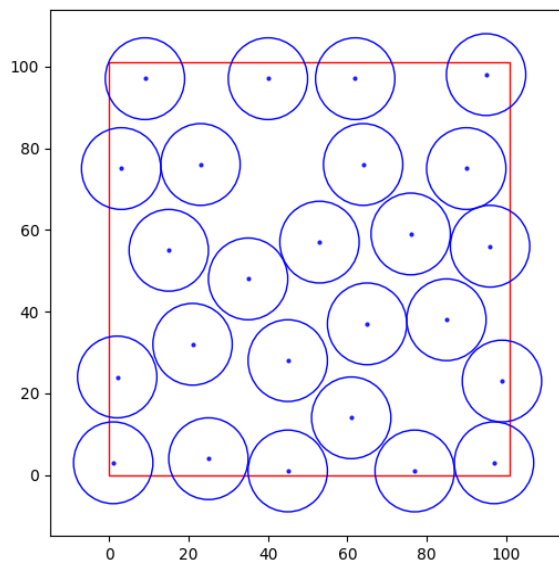


Рис. 4.20. Оптимальне розміщення 25 нових вузлів

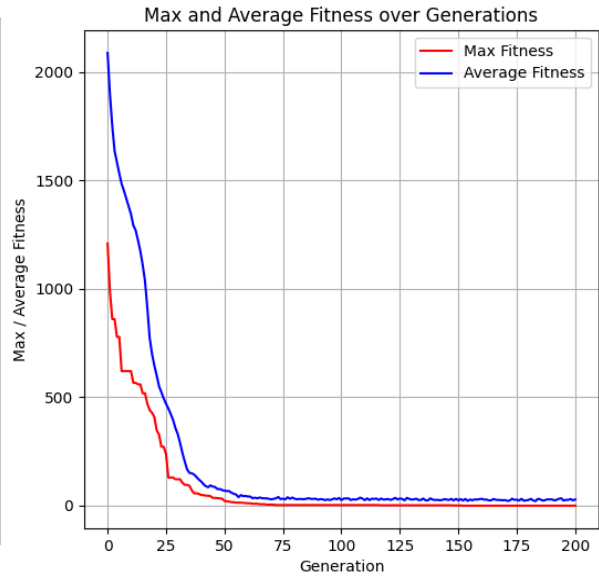


Рис. 4.21. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

При початкових значеннях G спостерігається найбільше зростання максимального значення фітнес функції, що характерно для початкової фази еволюційного процесу. Далі відбувається суттєве покращення якості рішень (максимального/середнього значення фітнес функції) при збільшенні кількості поколінь. При цьому оптимальне рішення досягається при $G=152$.

Як бачимо з рис. 4.21, орієнтовно після 50-ого покоління максимальне значення фітнес функції досягає досить стабільного стану і залишається на ньому із незначними відхиленнями до кінця моделювання. Це свідчить про те, що алгоритм досяг оптимального або близького до оптимального рішення, і подальші покоління не спричиняють значного покращення результату. Середнє значення фітнес функції також стабілізується, що підтверджує вирівнювання якості рішень у популяції. Наведений рисунок демонструє ефективну роботу розробленого ГА. Стабілізація як максимальних, так і середніх значень фітнес функції вказує на успішне вирішення задачі оптимізації [151].

Далі було здійснено порівняння роботи розробленого алгоритму розміщення вузлів із алгоритмами, представленими у пункті 4.4.

На рис. 4.22 представлено результати розміщення 25 сенсорних вузлів при використанні розробленого ГА (Genetic), рівномірного (Mesh), жадібного (Greedy) та випадкового (Random) алгоритмів пошуку.

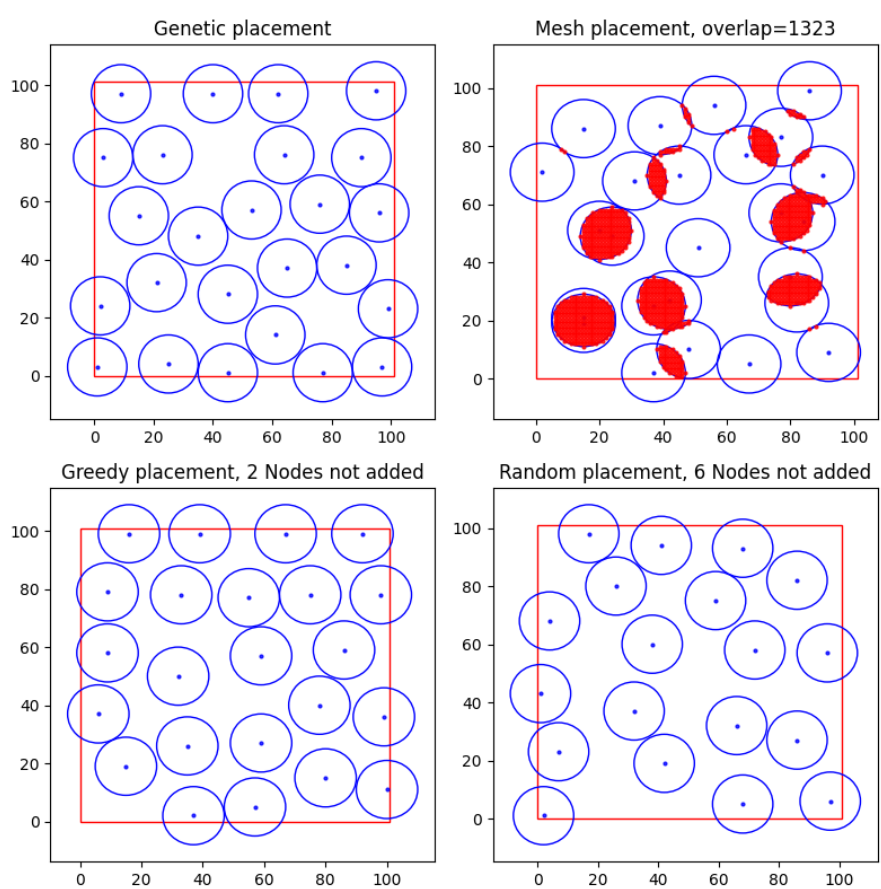


Рис. 4.22. Результати роботи алгоритмів розміщення 25 сенсорних вузлів

Як бачимо з рис. 4.22, розроблене рішення показує найбільш ефективну роботу в заданих умовах. При цьому для рівномірного пошуку $I_{overlap} = 1323$, що вказує на наявність зон перекриття сенсорних вузлів (13,23% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність при розміщенні заданих 25 вузлів: жадібний алгоритм не розмістив 2 вузли, випадковий – 6 вузлів.

У контексті проведених досліджень під поняттям «overlap» розуміється перекриття зон, які визначаються радіусом мінімальної міжвузлової відстані сенсорних вузлів. Такі зони для кожного вузла формуються у вигляді кіл, центри яких відповідають координатам вузлів, а радіуси – заданому значенню мінімальної відстані між ними. Перетин двох або більше таких зон інтерпретується як

перекриття (overlap), що візуалізується червоним кольором на графічному представленні розташування вузлів.

Процес визначення overlap реалізується шляхом дискретизації досліджуваної площини, де кожен метр умовно позначається окремою точкою. Для кожної такої точки визначається кількість зон покриття, у межах яких вона знаходиться. Якщо точка належить більше, ніж одній зоні, то це фіксується як факт перекриття. Для відображення сумарної кількості таких перекриттів у межах усієї досліджуваної області використовується показник $I_{overlap}$, який визначається як:

$$I_{overlap} = \sum_{p \in P} \max(0, c(p) - 1), \quad (4.15)$$

де $c(p) = \sum_{k=1}^N 1_{p \in C_k}$ – функція покриття у точці p : 1 – індикаторна функція, C_k – множина точок, покритих k -им вузлом.

Якщо $I_{overlap} = 0$, то перекриття немає, в протилежному випадку існують точки досліджуваної площини, які покриті більш, ніж одним вузлом, і значення $I_{overlap}$ показує кількість таких точок.

Таким чином, запропонований метод на основі ГА забезпечує оптимальний баланс між покриттям та мінімізацією зон перекриття заданої кількості сенсорних вузлів.

б) розміщення 20 нових вузлів при наявності 5 існуючих

На рис. 4.23 представлено ітераційні результати процесу формування оптимального розміщення вузлів мережі на досліджуваній площині для кількості поколінь 25 – 100 із кроком 25, де жовтим кольором позначено існуючі вузли, синім – нові. Розташування 5 існуючих вузлів задано рандомно, на основі чого отримано такі їх координати: [(96, 50), (73, 73), (27, 73), (27, 4), (50, 27)].

Рис. 4.24 демонструє найкраще розміщення 20 нових вузлів при 5 існуючих, яке отримано при $G=131$. Для розуміння ефективності і особливостей роботи алгоритму в процесі його виконання представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції на рис. 4.25.

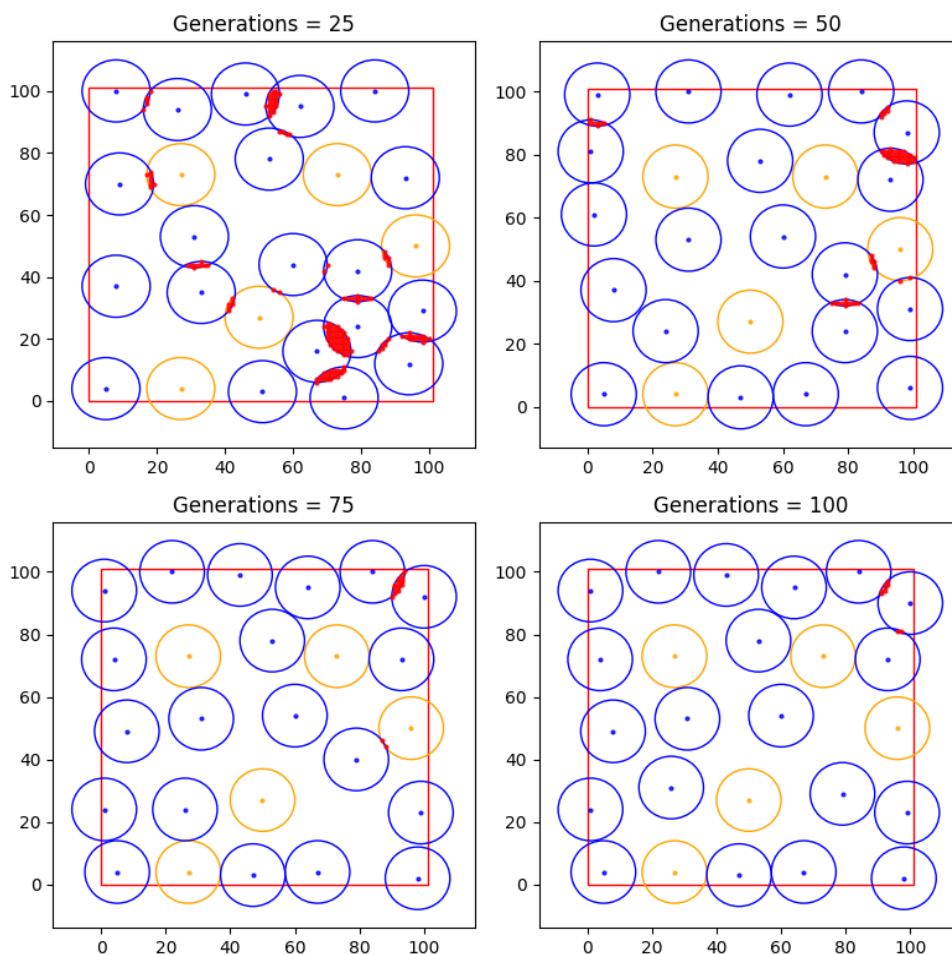


Рис. 4.23. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розміщення 20 нових вузлів при наявності 5 існуючих

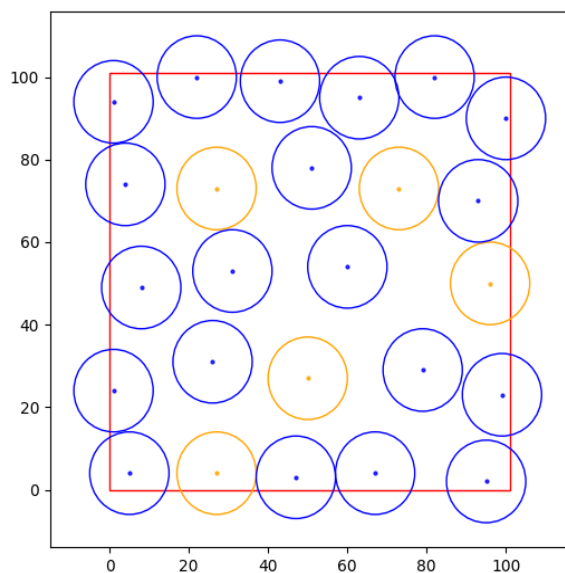


Рис. 4.24. Оптимальне розміщення 20 нових вузлів при 5 існуючих

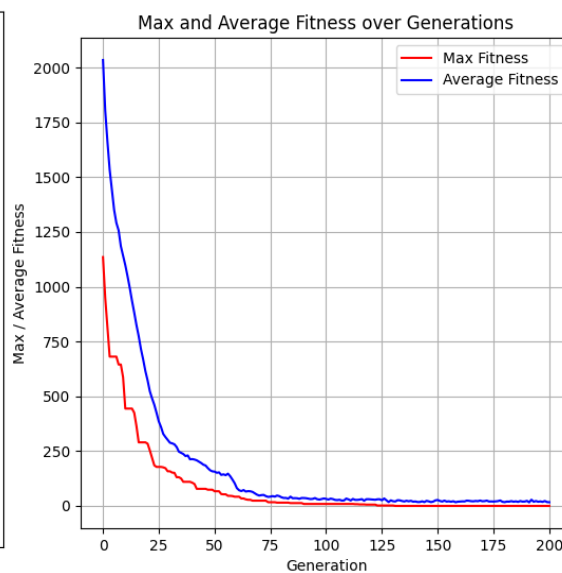


Рис. 4.25. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Отже, використання розробленого ГА дозволило здійснити оптимальне розташування вузлів, уникнувши зон «перекриттів».

Після досягнення $G = 130$ значення $f(t_{net})$ є практично незмінним, що вказує на стабільність роботи алгоритму. Таким чином, розроблений ГА знаходить оптимальне співвідношення між пошуком нових рішень та покращенням вже знайдених, що дозволяє як уникати локальних оптимумів, так і фокусуватися на ділянках, де є можливість знайти глобальний оптимум.

На рис. 4.26 представлено результати розміщення 20 нових сенсорних вузлів при 5 існуючих шляхом використання розробленого ГА (Genetic), рівномірного (Mesh), жадібного (Greedy) та випадкового (Random) алгоритмів пошуку.

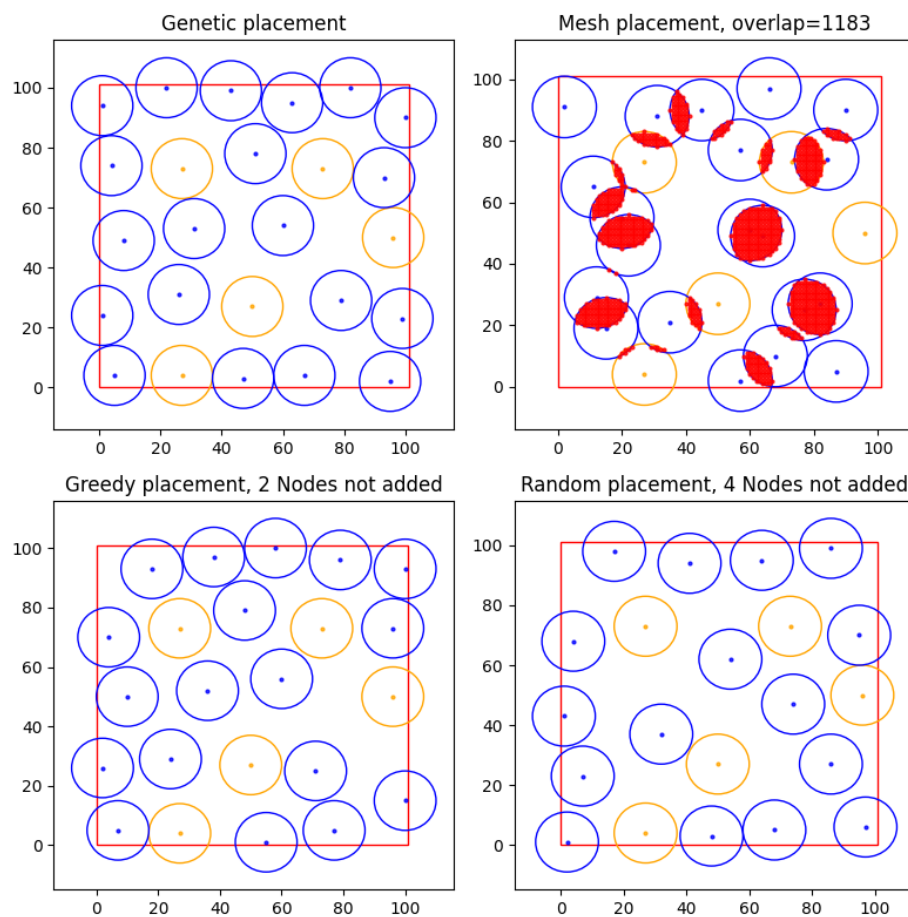


Рис. 4.26. Результати роботи алгоритмів розміщення 20 нових сенсорних вузлів при 5 існуючих

Як бачимо з рис. 4.26, розроблене рішення показує найбільш ефективну роботу в заданих умовах. При цьому для рівномірного пошуку $I_{overlap} = 1183$, що вказує на наявність зон перекриття сенсорних вузлів (11,83% площі). Для жадібного

та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 20 нових вузлів при наявності 5 існуючих: жадібний алгоритм не розмістив 2 вузли, випадковий – 4 вузли.

в) розміщення 15 нових вузлів при наявності 10 існуючих

Рис. 4.27 демонструє поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 15 нових вузлів при наявності 10 існуючих на площині. Розташування 10 існуючих вузлів задано рандомно, на основі чого отримано такі їх координати: [(96, 50), (73, 73), (27, 73), (27, 4), (50, 27), (96, 27), (27, 27), (96, 4), (27, 50), (73, 27)].

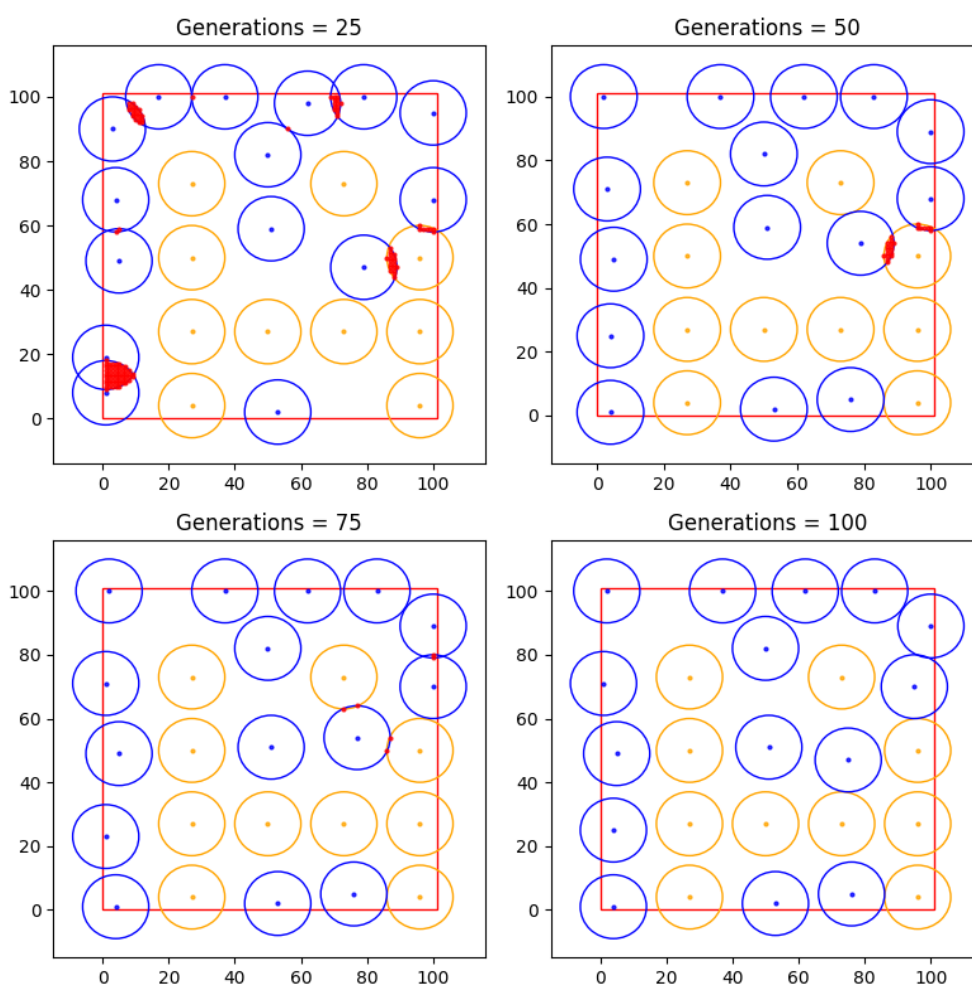


Рис. 4.27. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 15 нових вузлів при наявності 10 існуючих

Аналогічно попереднім випадкам, збільшення значення G позитивно впливає на процес розміщення вузлів.

На рис. 4.28 показано найкраще розміщення 15 нових вузлів при 10 існуючих, яке отримано при $G = 95$. Сформована найкраща хромосома для 15 нових вузлів має такий вигляд: $[4, 25; 37, 100; 83, 100; 53, 2; 62, 100; 76, 5; 4, 1; 5, 49; 75, 47; 100, 89; 50, 82; 95, 70; 2, 100; 51, 51; 1, 71]$. На рис. 4.29 представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$.

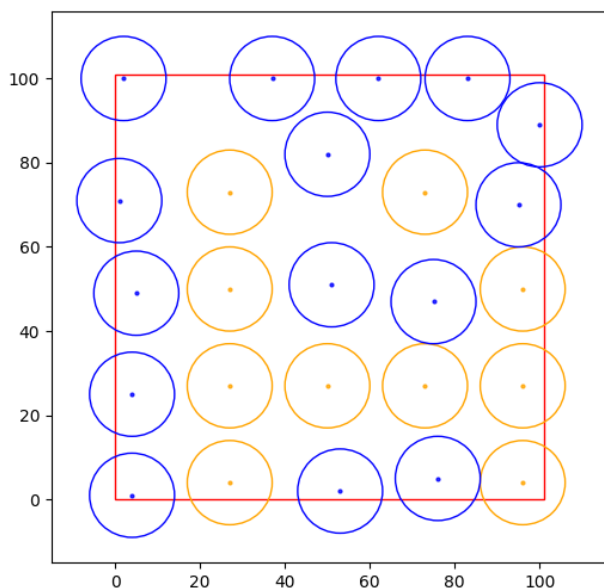


Рис. 4.28. Оптимальне розміщення 15 нових вузлів при 10 існуючих

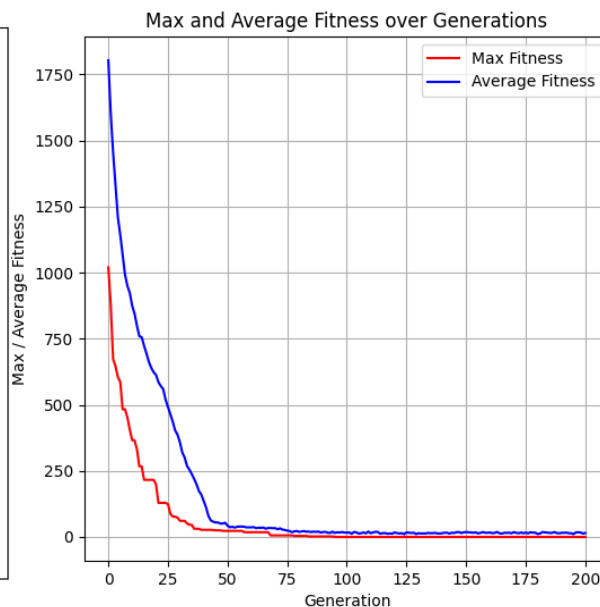


Рис. 4.29. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Як бачимо з рис. 4.29, оптимальне співвідношення між пошуком нових рішень та покращенням вже знайдених отримано при досягненні $G = 95$.

На рис. 4.30 представлено результати розміщення 15 нових сенсорних вузлів при 10 існуючих шляхом використання розробленого ГА (Genetic), рівномірного (Mesh), жадібного (Greedy) та випадкового (Random) алгоритмів пошуку.

Як бачимо з рис. 4.30, розроблене рішення показує найбільш ефективну роботу в заданих умовах. При цьому для рівномірного пошуку $I_{overlap} = 1007$, що вказує на наявність зон перекриття сенсорних вузлів (10,07% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 15 нових вузлів при наявності 10 існуючих: жадібний алгоритм не розмістив 1 вузол, випадковий – 2 вузли.

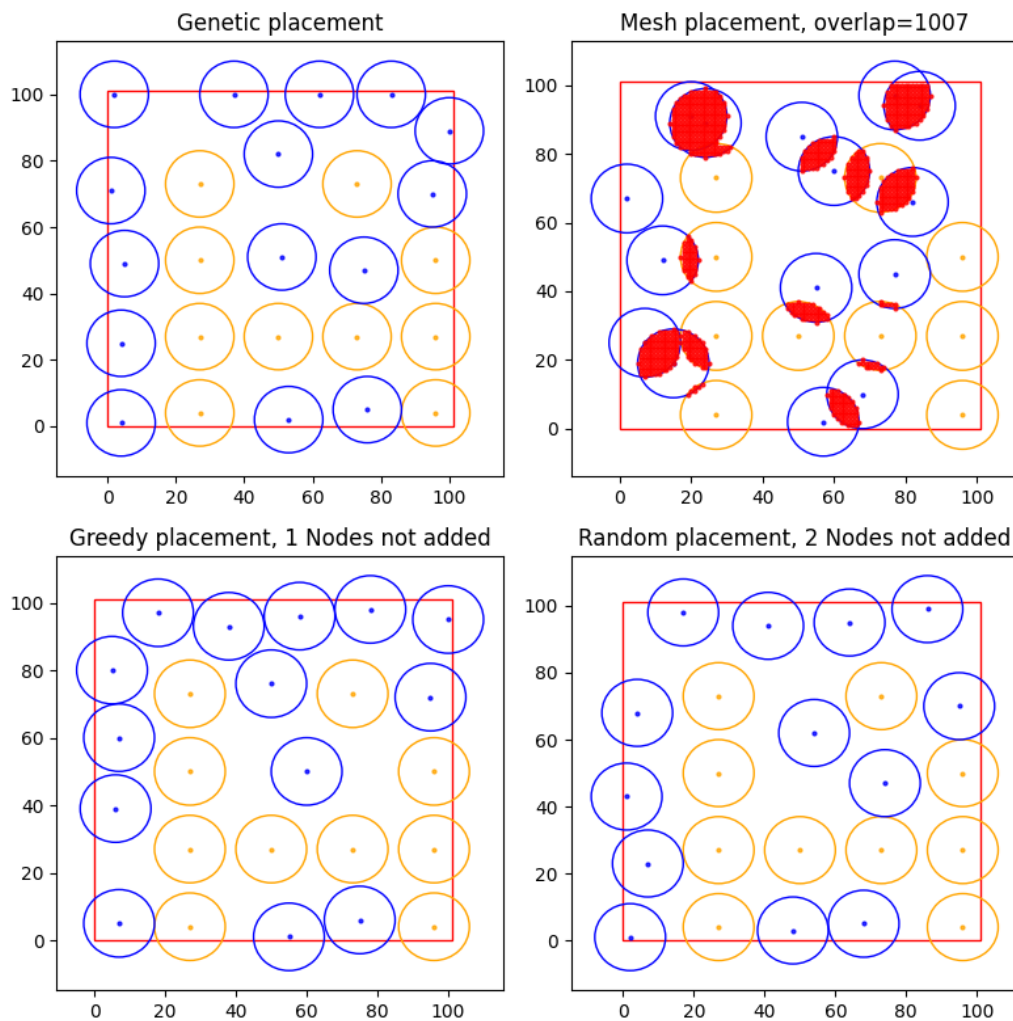


Рис. 4.30. Результати роботи алгоритмів розміщення 15 нових сенсорних вузлів при 10 існуючих

г) розміщення 10 нових вузлів при наявності 15 існуючих

На рис. 4.31 наведено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 10 нових вузлів при наявності 15 існуючих на досліджуваній площині. При цьому існуючі вузли характеризуються такими координатами [(96, 50), (73, 73), (27, 73), (27, 4), (50, 27), (96, 27), (27, 27), (96, 4), (27, 50), (73, 27), (96, 96), (50, 96), (4, 96), (4, 4), (4, 73)].

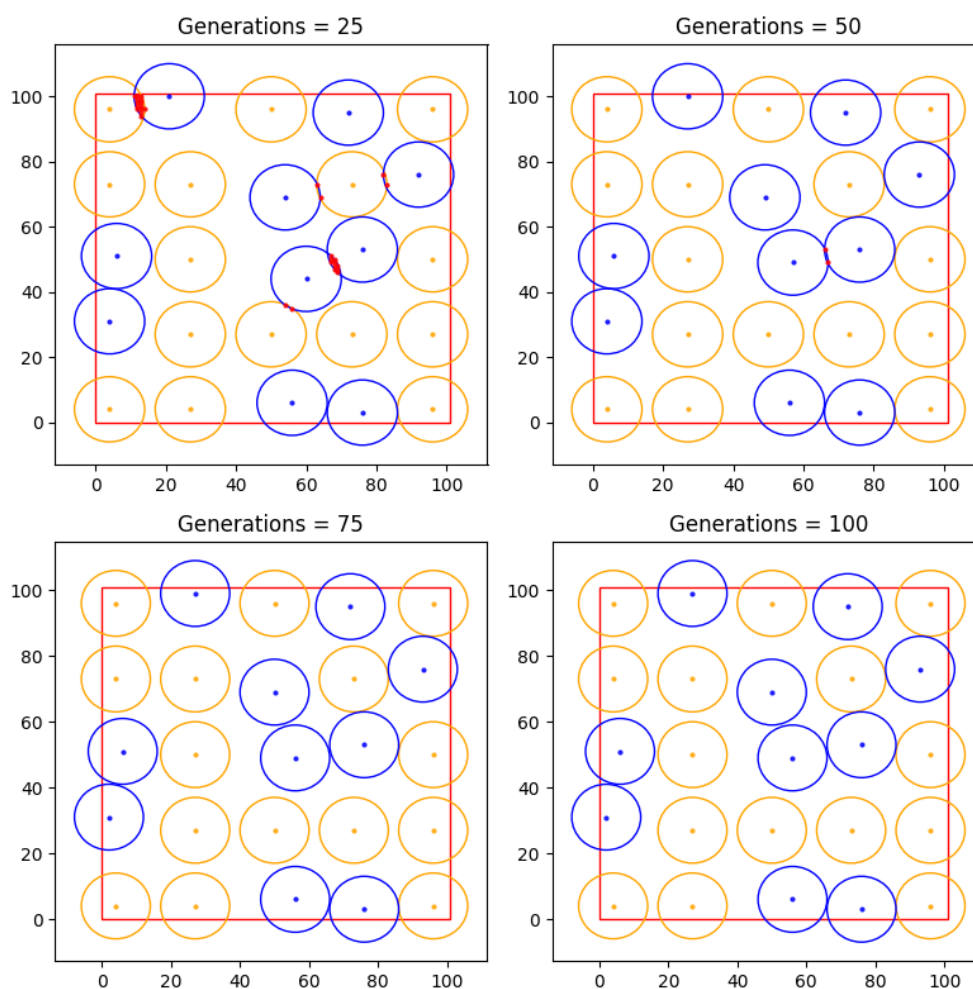


Рис. 4.31. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 10 нових вузлів при наявності 15 існуючих

Як бачимо з рис. 4.31, при $G = 25$ наявна найбільша кількість «перекриттів» для наведених вузлів.

На рис. 4.32 показано найкраще розміщення 10 нових вузлів при 15 існуючих, яке отримано при $G = 52$. Рис. 4.32 демонструє знаходження оптимального результату роботи алгоритму при $G = 52$. Для цього випадку отримана хромосома [76, 3; 50, 69; 72, 95; 93, 76; 6, 51; 56, 6; 2, 31; 76, 53; 56, 49; 27, 99].

На рис. 4.33 представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$.

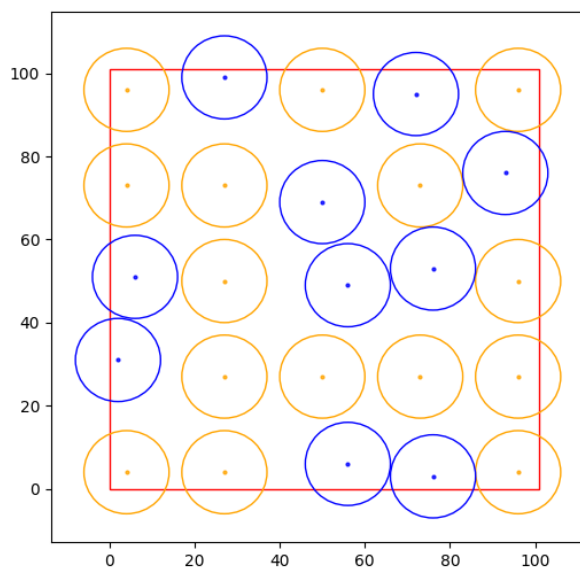


Рис. 4.32. Оптимальне розміщення 10 нових вузлів при 15 існуючих

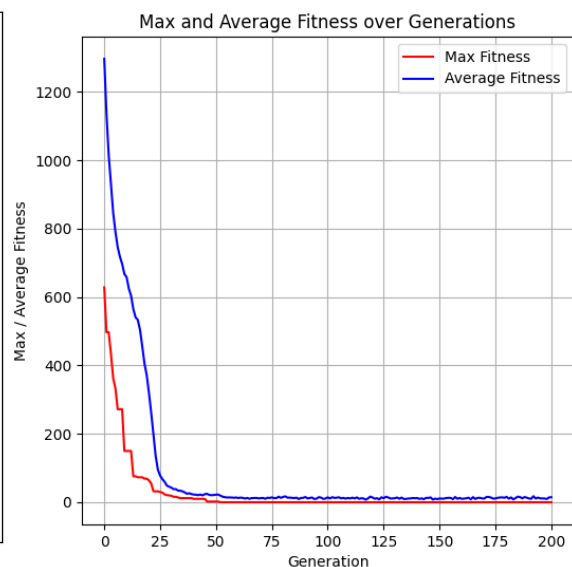
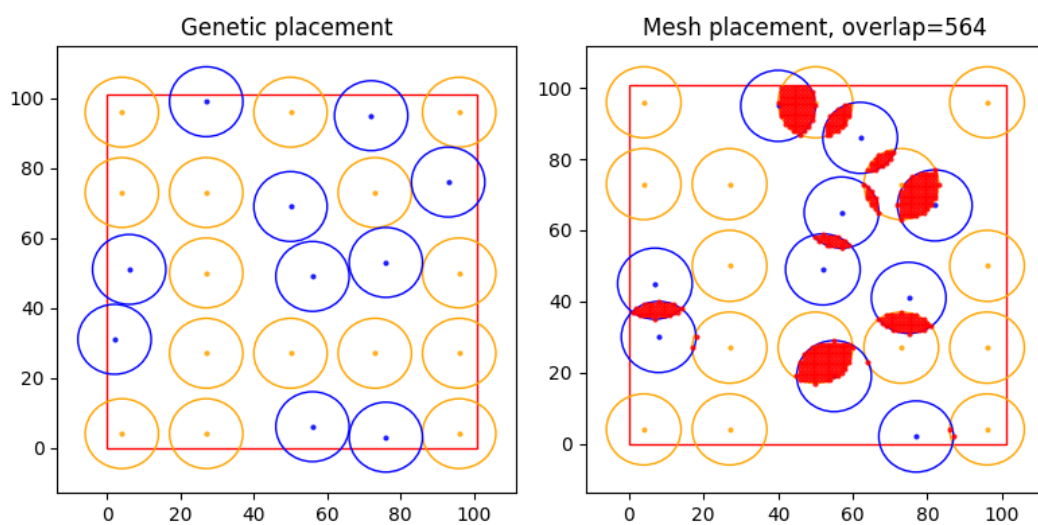


Рис. 4.33. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

На рис. 4.34 представлено результати розміщення 10 нових сенсорних вузлів при 15 існуючих шляхом використання розробленого Genetic, Mesh, Greedy та Random алгоритмів.



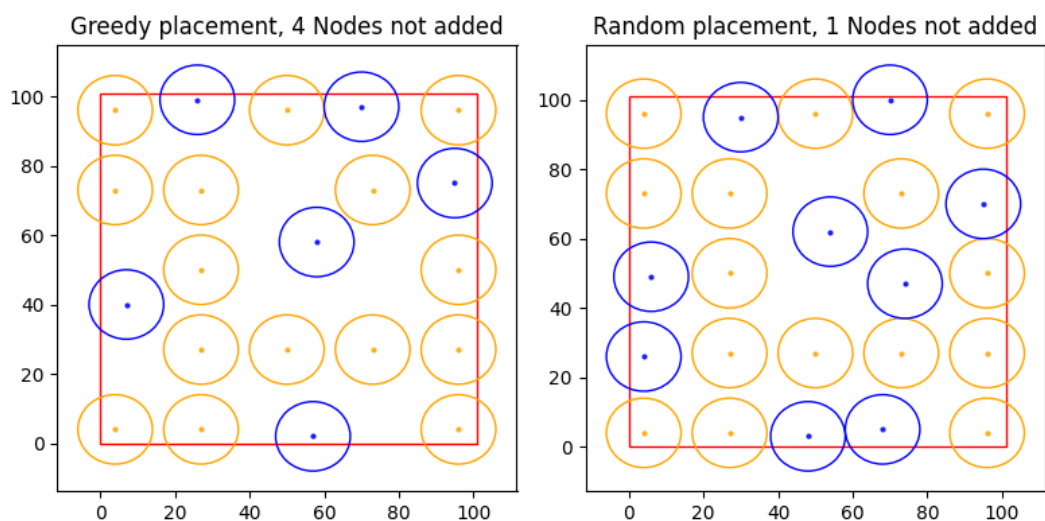


Рис. 4.34. Результати роботи алгоритмів розміщення 10 нових сенсорних вузлів при 15 існуючих

Як бачимо з рис. 4.34, розроблене рішення показує найбільш ефективну роботу в заданих умовах. При цьому для рівномірного пошуку $I_{overlap} = 564$, що вказує на наявність зон перекриття сенсорних вузлів (5,64% площі).

Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 10 нових вузлів при наявності 15 існуючих: жадібний алгоритм не розмістив 4 вузли, випадковий – 1 вузол.

д) розміщення 5 нових вузлів при наявності 20 існуючих

На рис. 4.35 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 5 нових вузлів при наявності 20 існуючих. Рандомні координати 20 існуючих мережевих вузлів: [(96, 50), (73, 73), (27, 73), (27, 4), (50, 27), (96, 27), (27, 27), (96, 4), (27, 50), (73, 27), (96, 96), (50, 96), (4, 96), (4, 4), (4, 73), (50, 4), (73, 50), (73, 4), (50, 73), (4, 27)].

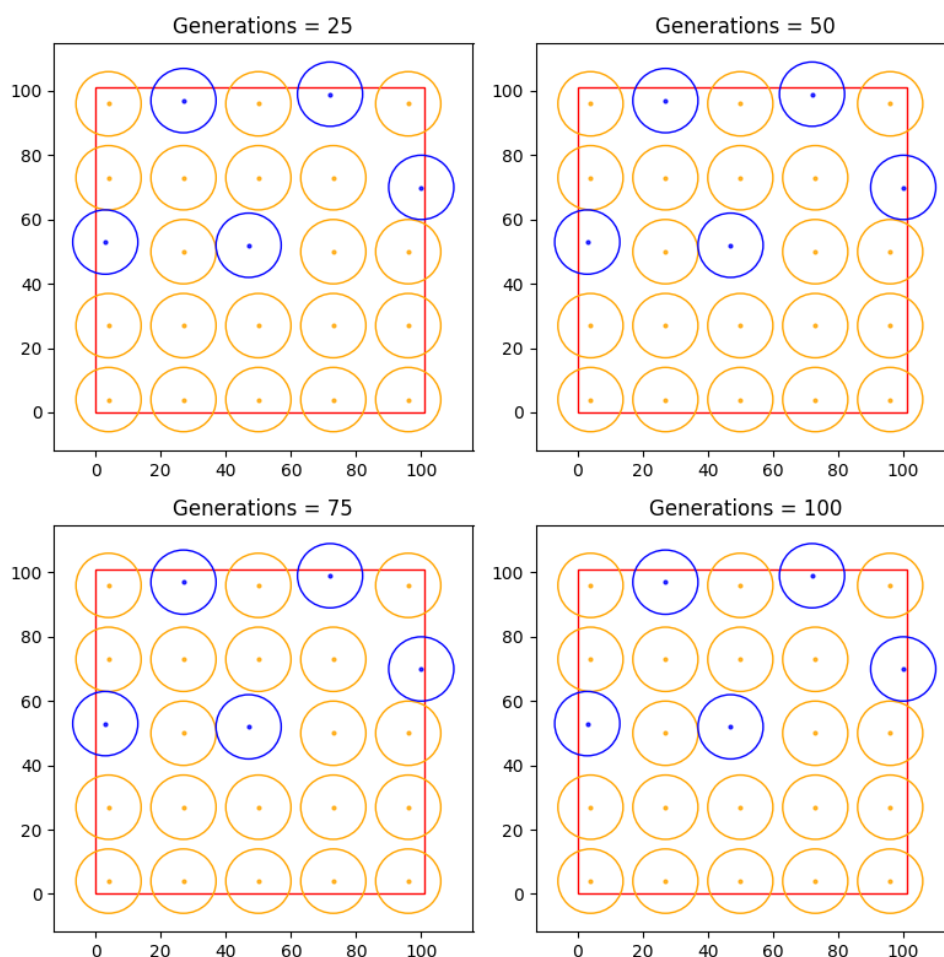


Рис. 4.35. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму розташування 5 нових вузлів при наявності 20 існуючих

Отже, на основі даних із рис. 4.35, бачимо, що використання розробленого алгоритму дозволило знайти оптимальний результат щодо розміщення нових вузлів швидше у порівнянні із іншими розглянутими випадками, представленими у цьому підрозділі. Це пояснюється різними факторами, зокрема тим, що при зменшенні кількості нових вузлів скорочується простір пошуку для алгоритму, що зумовлює створення меншої кількості можливих комбінацій і варіантів розміщення вузлів. В загальному швидше досягнення оптимального розміщення для меншої кількості вузлів пояснюється зменшенням простору пошуку, меншою кількістю варіантів взаємодії між вузлами (необхідністю врахування перекриття) та обчислювальною складністю ГА, а також більш ефективним використанням ресурсів.

Рис. 4.36 демонструє найбільш оптимальне розміщення 5 нових вузлів в існуючій БСМ при $G = 25$. Отримана при цьому хромосома [47, 52; 27, 97; 3, 53; 72,

99; 100, 70]. На рис. 4.37 наведено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$.

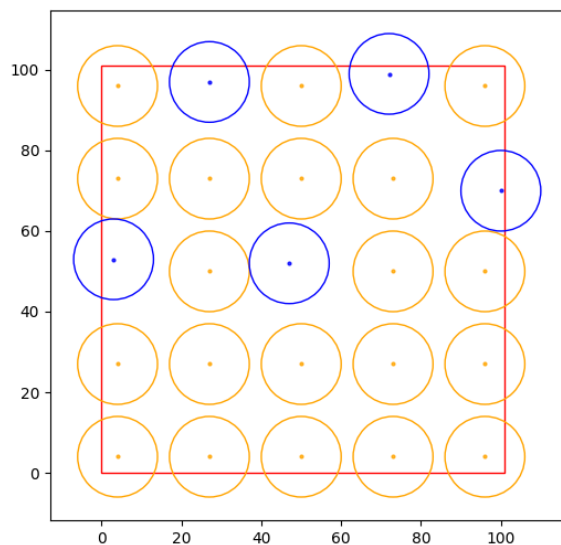


Рис. 4.36. Оптимальне розміщення 5 нових вузлів при 20 існуючих

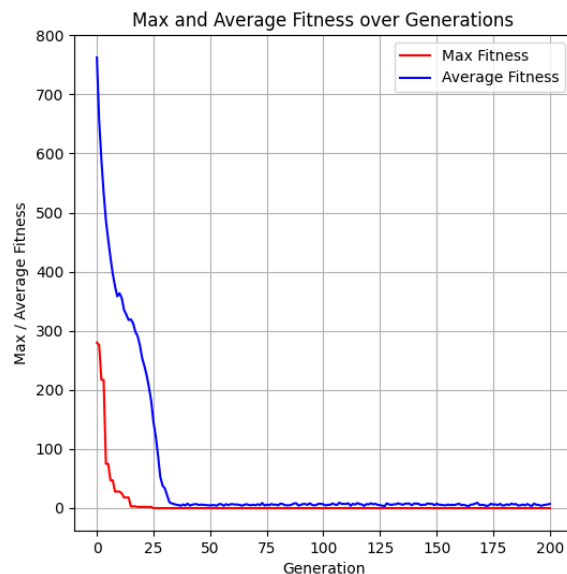
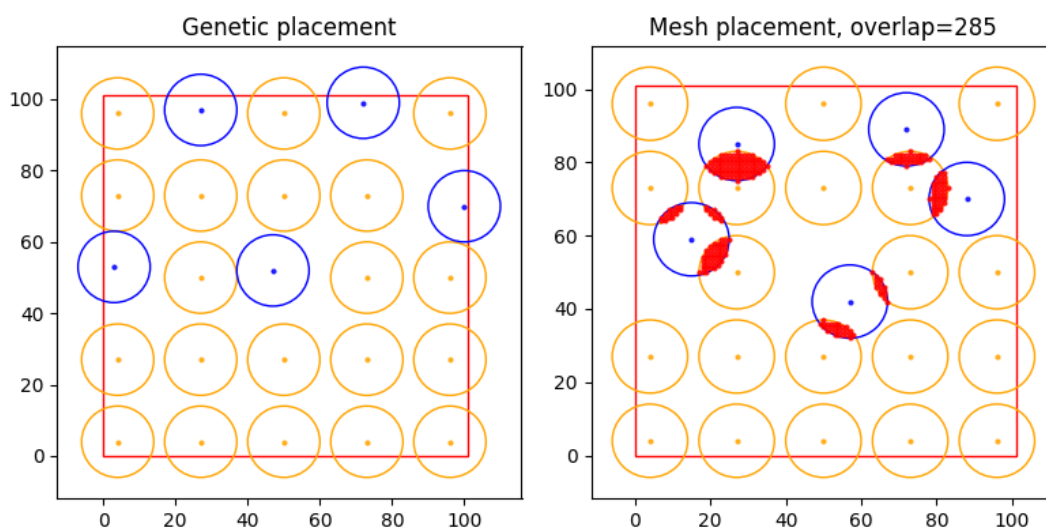


Рис. 4.37. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

З рис. 4.36 видно, що алгоритм досягає глобального оптимуму при $G = 25$.

На рис. 4.38 представлено результати розміщення 5 нових вузлів при 20 існуючих шляхом використання розробленого Genetic, Mesh, Greedy та Random алгоритмів.



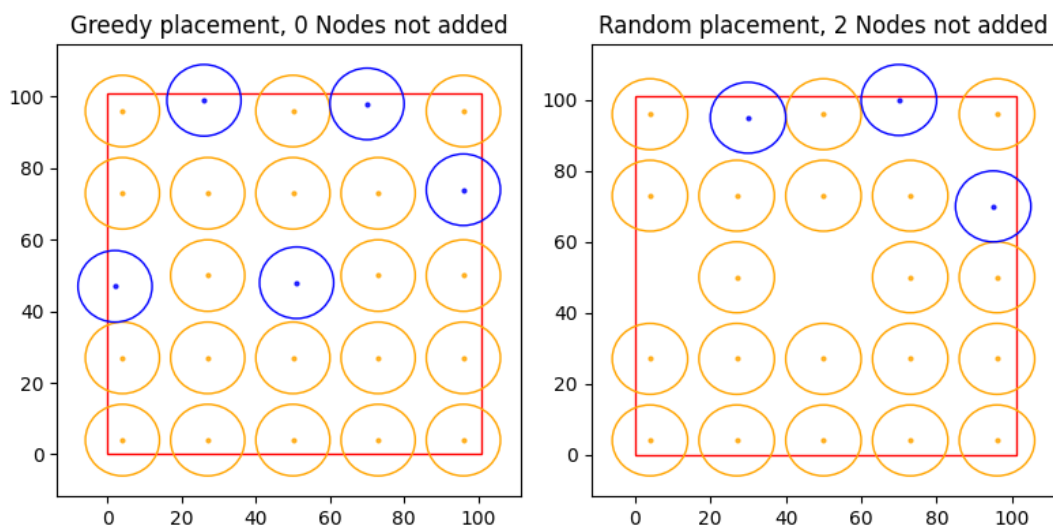


Рис. 4.38. Результати роботи алгоритмів розміщення 5 нових вузлів при 10 існуючих

Як бачимо з рис. 4.38, розроблене рішення та жадібний пошук успішно розмістили 5 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах. Рівномірний пошук характеризується наявністю зон перекриття сенсорних вузлів (2,85% площі). Випадковий пошук дозволив розмістити вузли без перекриття, проте із 5 заданих було розміщено тільки 3.

е) збільшення щільності розміщення 25 нових вузлів

Для цього випадку розглянуто задачу розміщення 25 нових вузлів на площині, яка обмежена квадратом меншого розміру (у порівнянні із попередніми випадками, наведеними у цьому пункті), відповідно поточний його розмір – 5 на 95 м. Отже, вузли мають бути розміщені більш щільно з урахуванням обмеження щодо мінімальної міжвузлової відстані. Зміна розміру квадрату вплинула на роботу ГА, у зв'язку з чим експериментально змінено значення розміру популяції на 1000, решта параметрів – без змін.

На рис. 4.39 представлено поетапні результати функціонування пропонуваного алгоритму при збільшенні щільності розміщення 25 нових вузлів.

Як видно з рис. 4.39, алгоритм не забезпечує оптимальне розміщення вузлів для представленого значення $G = 25 \div 100$ із кроком 25 із урахуванням заданого обмеження на мінімальну міжвузлову відстань, що спричинило накладення зон вузлів. При цьому зростання значення G позитивно впливає на зменшення кількості накладень.

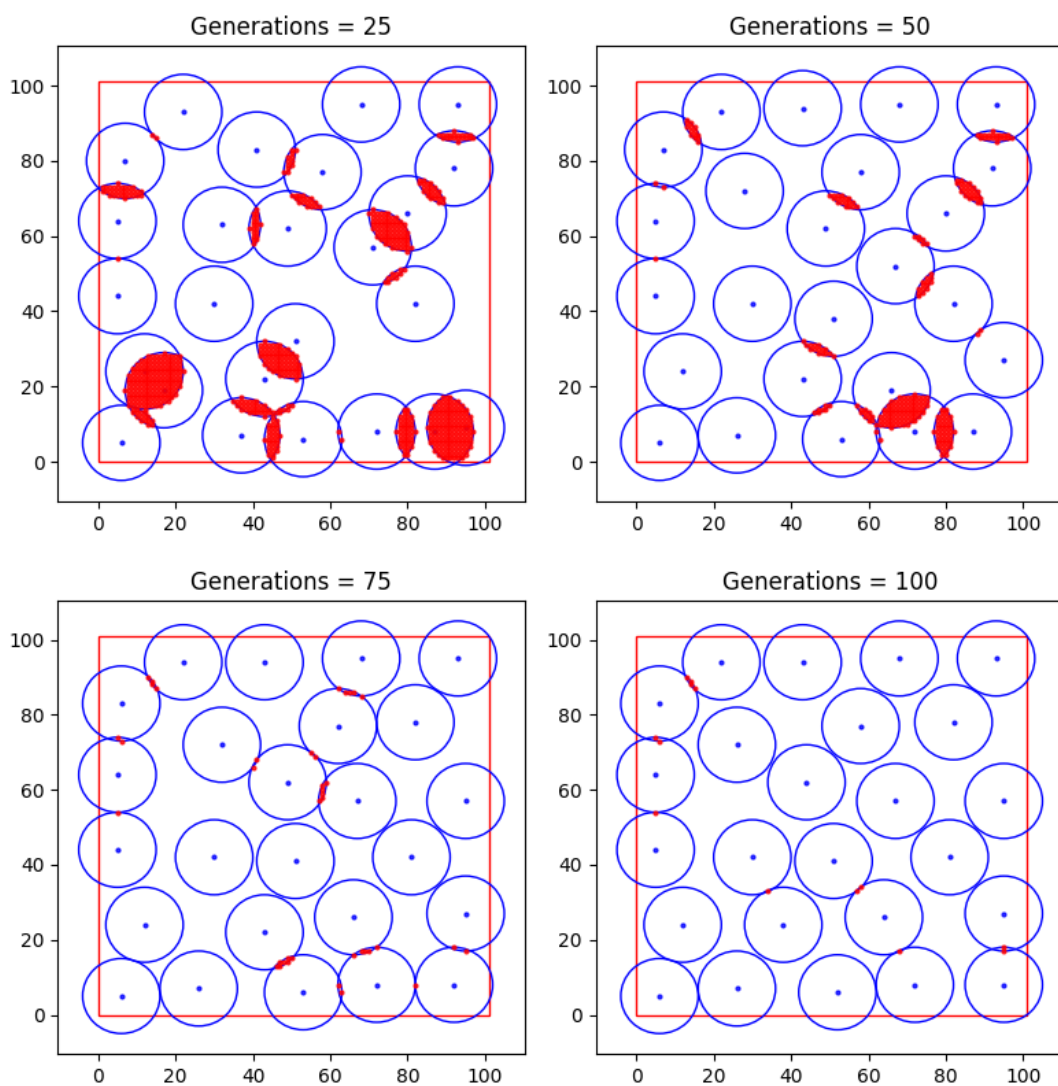


Рис. 4.39. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при збільшенні щільності розміщення 25 нових вузлів

Оптимальне розміщення 25 вузлів при використанні розробленого алгоритму досягнуто для $G = 167$, що показано на рис. 4.40. Сформована при цьому хромосома має такий вигляд: [12, 24; 67, 57; 6, 44; 26, 7; 52, 6; 68, 95; 26, 72; 95, 27; 47, 94; 30, 45; 5, 64; 64, 26; 24, 94; 6, 5; 6, 84; 82, 78; 58, 77; 50, 41; 44, 62; 95, 6; 81, 42; 95, 57; 38, 24; 72, 5; 93, 95].

Рис. 4.41 демонструє вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$ при розміщенні 25 вузлів.

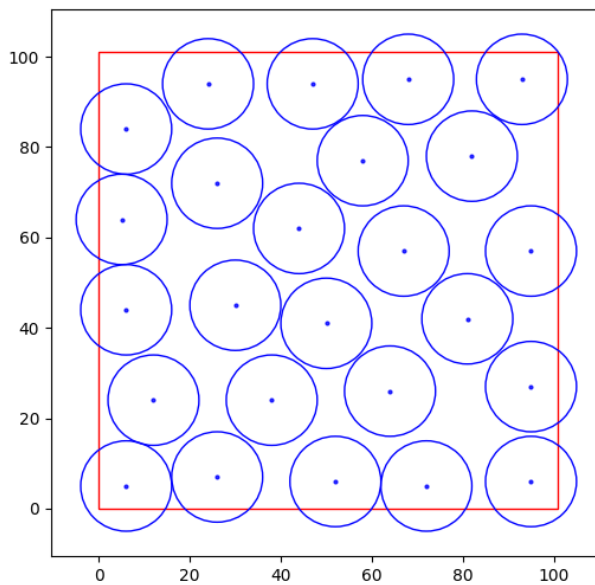


Рис. 4.40. Оптимальне розміщення 25 нових вузлів

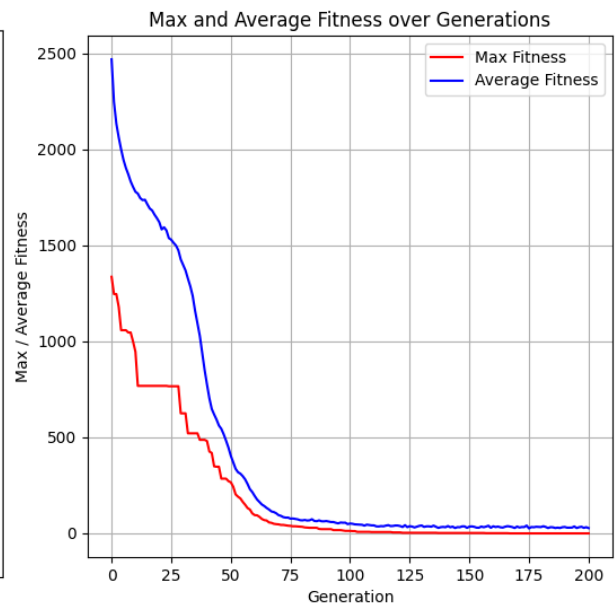


Рис. 4.41. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Як видно з рис. 4.41, на початку роботи алгоритму максимальне і середнє значення фітнес функції є високим, у міру зростання кількості поколінь (орієнтовно до 50) розглянуті значення різко знижуються, що свідчить про початковий етап оптимізації розміщення вузлів, коли неефективні рішення швидко відсіюються. Після 60 покоління швидкість зниження значень придатності значно сповільнюється. Представлені криві на графіку досягають певного рівня стабільності після досягнення $G = 125$, що показує поступову конвергенцію алгоритму. Алгоритм досяг свого оптимального рішення при $G = 167$, подальші розглянуті ітерації не призвели до покращення.

Таким чином, представлені результати продемонстрували доцільність застосування розробленого алгоритму при збільшенні щільності вузлів, що дозволило досягнути їх оптимального розташування на досліджуваній площині.

На рис. 4.42 представлено результати розміщення 25 нових сенсорних вузлів у заданих умовах шляхом використання розробленого Genetic, Mesh, Greedy та Random алгоритмів.

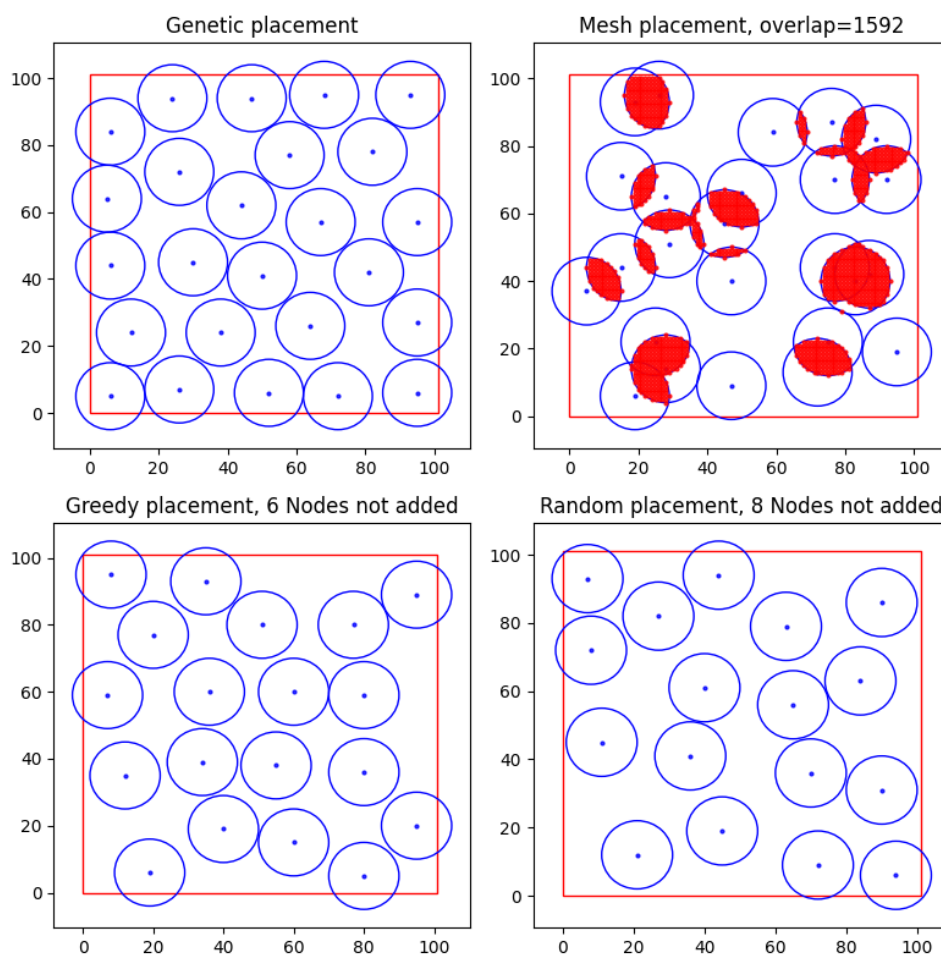


Рис. 4.42. Результати роботи алгоритмів розміщення 25 нових сенсорних вузлів

Як бачимо з рис. 4.42, розроблене рішення успішно розмістило 25 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах.

Рівномірний пошук характеризується наявністю зон перекриття сенсорних вузлів (15,92% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 25 нових вузлів при: жадібний алгоритм не розмістив 6 вузлів, випадковий – 8 вузлів.

є) порівняльний аналіз результатів розміщення сенсорних вузлів однакового радіусу дії

Отримані результати моделювання для кращої наочності щодо порівняння ефективності роботи розглянутих алгоритмів представлено у таблиці 4.1.

Результати розміщення сенсорних вузлів однакового радіусу дії розглянутими
алгоритмами

Розміщення 25 нових сенсорних вузлів при мінімальній міжвузловій відстані 10 м				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	25	25	23	19
Площа перекриття вузлів, %	—	13,23	—	—
Розміщення 20 нових сенсорних вузлів при наявності 5 існуючих, мінімальна міжвузлова відстань 10 м				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	20	20	18	16
Площа перекриття вузлів, %	—	11,83	—	—
Розміщення 15 нових сенсорних вузлів при наявності 10 існуючих, мінімальна міжвузлова відстань 10 м				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	15	15	14	13
Площа перекриття вузлів, %	—	10,07	—	—
Розміщення 10 нових сенсорних вузлів при наявності 15 існуючих, мінімальна міжвузлова відстань 10 м				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	10	10	6	9
Площа перекриття вузлів, %	—	5,64	—	—
Розміщення 5 нових сенсорних вузлів при наявності 20 існуючих, мінімальна міжвузлова відстань 10 м				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	5	5	5	3
Площа перекриття вузлів, %	—	2,85	—	—

Таким чином, отримані результати свідчать про стабільну перевагу розробленого алгоритму над базовими підходами у завданні розміщення сенсорних вузлів з урахуванням мінімальної міжвузлової відстані 10 м.

У всіх п'яти розглянутих сценаріях розроблений алгоритм забезпечив повне розміщення необхідної кількості нових сенсорних вузлів, незалежно від наявності вже існуючих елементів мережі. Для рівномірного пошуку у всіх випадках також було розміщено повний набір вузлів, однак спостерігалось значне надлишкове перекриття площі, яке зменшувалося із зростанням частки вже існуючих вузлів – від 13,23% у сценарії з 25 новими вузлами до 2,85% при розміщенні лише 5 вузлів.

Жадібний пошук продемонстрував неповне розміщення нових сенсорів: відсутність 2 вузлів при розміщенні 25 нових елементів і до 4 нерозміщених вузлів при наявності 15 вже існуючих. Випадковий пошук показав ще нижчі результати, в окремих сценаріях не розмістивши до 6 вузлів.

Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує оптимальне співвідношення повноти покриття досліджуваної площі та відсутності надлишкових зон, що є критично важливим для підвищення ефективності використання ресурсів БСМ.

Порівняльний аналіз результатів показав, що навіть за умови повного розміщення рівномірний підхід поступається розробленому алгоритму через наявність значних зон перекриття, а алгоритми жадібного та випадкового пошуку не гарантують ефективного функціонування мережі через неповне розміщення необхідної кількості сенсорних вузлів.

- випадкового розміщення вузлів із різними радіусами дії

У цьому підпункті представлено результати дослідження розміщення вузлів при різних радіусах їх дії: 20, 30 та 40 м, при цьому відповідно змінювалось обмеження на мінімальну міжвузлову відстань. Оскільки зміна цього обмеження відбувалась на основі його базового значення, то спочатку для нього наведено результати, які демонструють роботу алгоритму для 25 вузлів. Це зроблено для більш наглядного представлення розміщення вузлів при зміні обмеження на мінімальну міжвузлову відстань. Варто зауважити, що у зв'язку із введення нових умов для дослідження, розмір популяції становить 600, решта параметрів – аналогічні попередньому розглянутому випадку.

Рис. 4.43 демонструє поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі при мінімальній міжвузловій відстані 20 м (10 м для одного вузла), радіус дії вузла – 30 м.

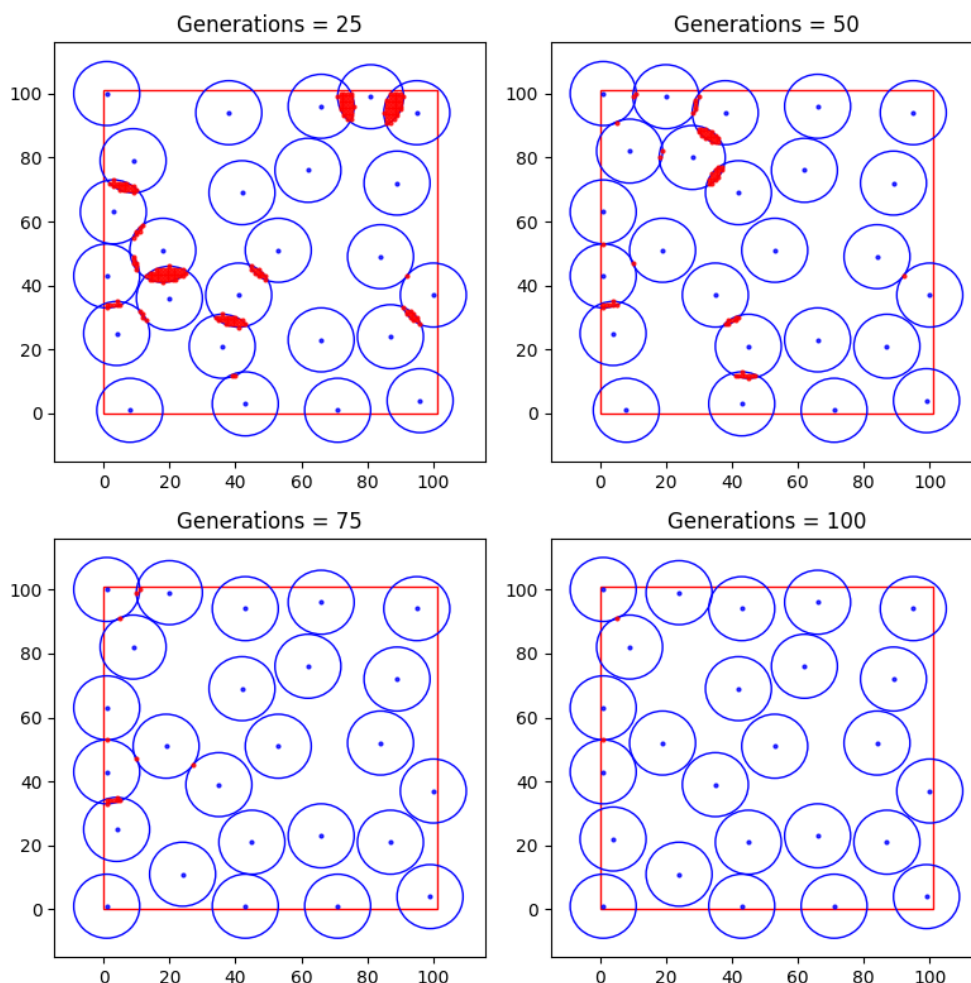


Рис. 4.43. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі

Як видно з рис. 4.43, при наведеній кількості поколінь не отримано розташування 25 вузлів без накладень їх зон.

Рис. 4.44 демонструє досягнення оптимального розташування 25 вузлів при $G = 159$. При цьому отримана хромосома має такий вигляд: [35, 39; 95, 94; 84, 52; 62, 76; 24, 11; 71, 1; 100, 37; 66, 23; 1, 1; 1, 43; 11, 82; 2, 63; 19, 52; 87, 21; 53, 51; 42, 69; 89, 72; 43, 1; 1, 100; 4, 22; 24, 99; 99, 4; 66, 96; 43, 94; 45, 21]. На рис. 4.44 наведено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$.

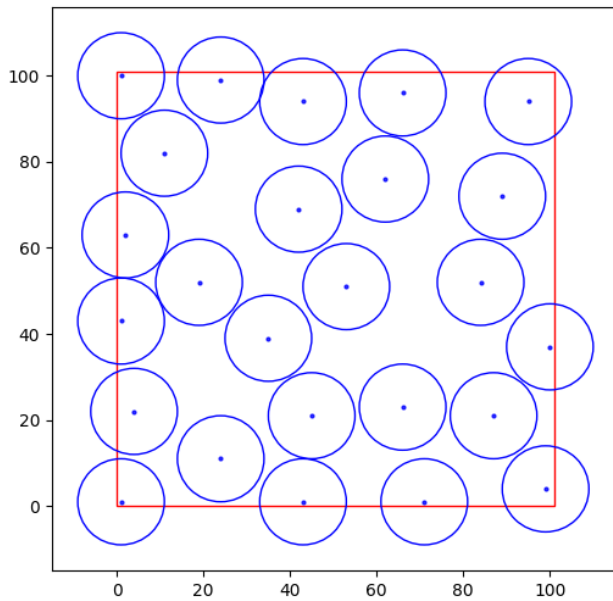


Рис. 4.44. Оптимальне розміщення 25 вузлів

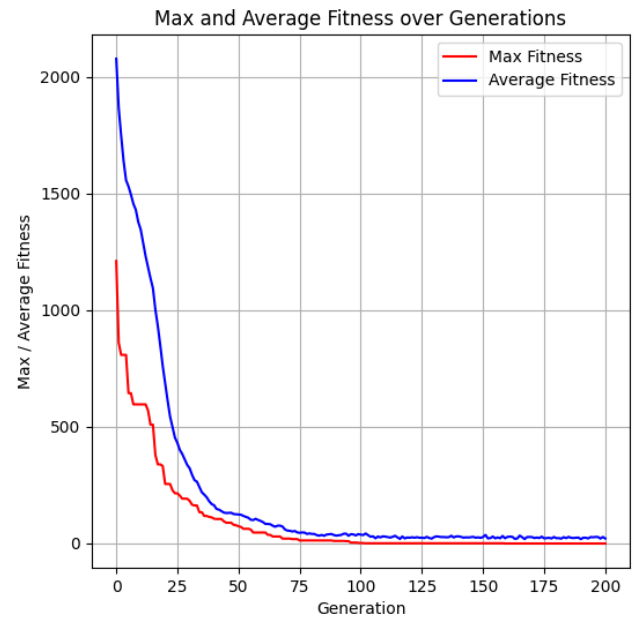
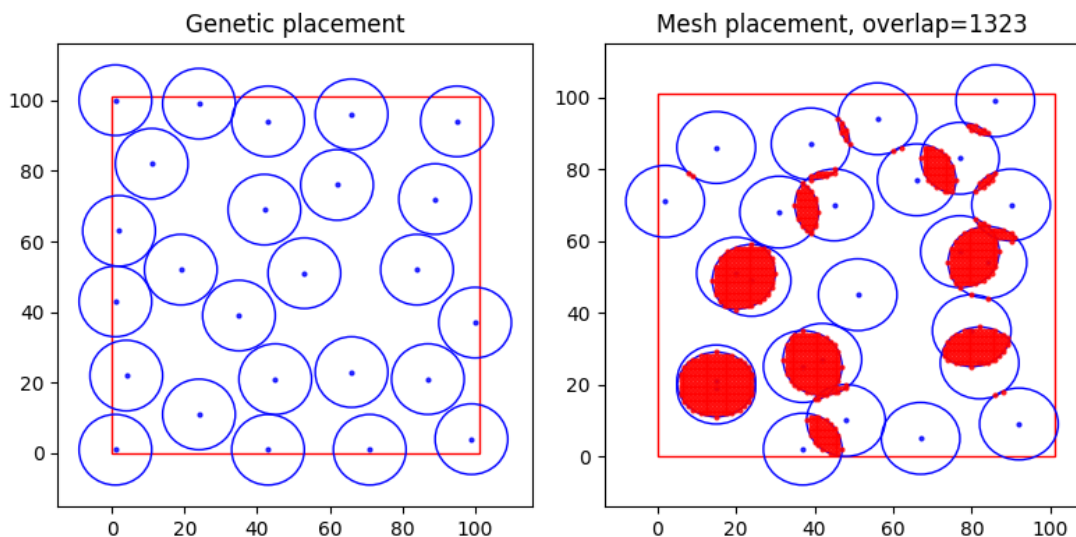


Рис. 4.45 Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Наведений графік (рис. 4.45) демонструє досягнення оптимального значення цільової функції для поставленого завдання.

На рис. 4.46 представлено результати розміщення 25 нових сенсорних вузлів шляхом використання розробленого Genetic, Mesh, Greedy та Random алгоритмів.



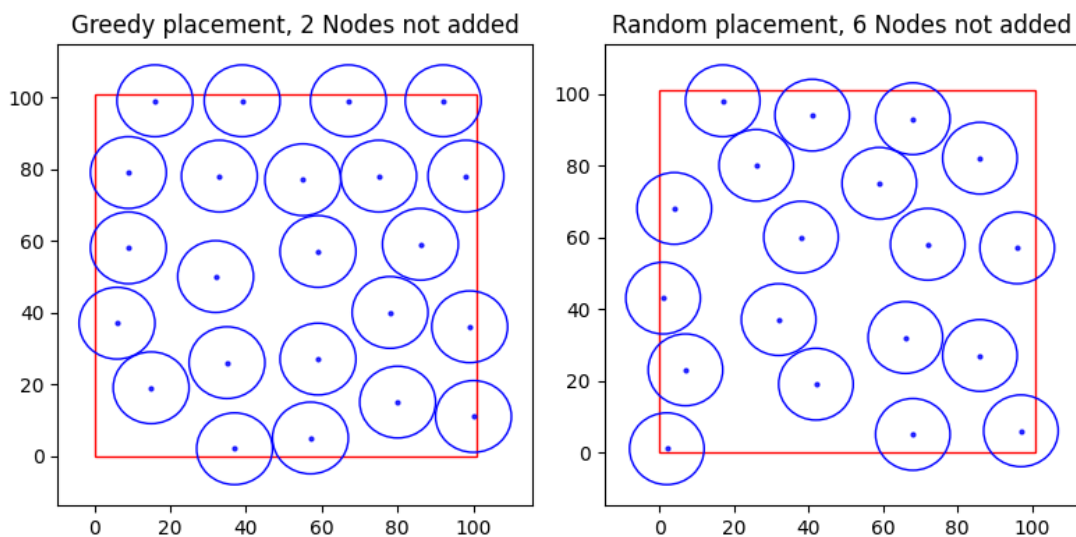
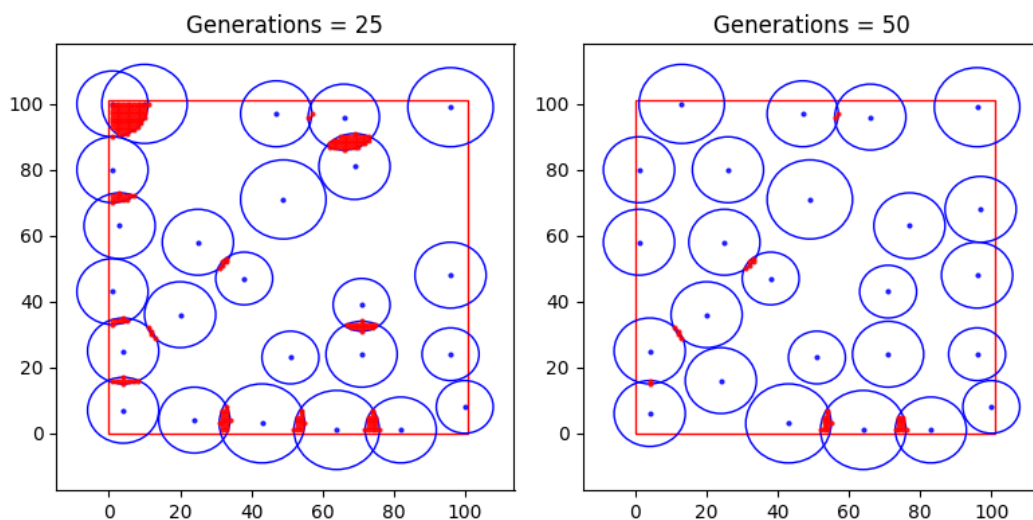


Рис. 4.46. Результати роботи алгоритмів розміщення 25 нових сенсорних вузлів

Як бачимо з рис. 4.46, розроблене рішення успішно розмістило 25 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах. Рівномірний пошук характеризується наявністю зон перекриття сенсорних вузлів (13,23% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 25 нових вузлів при: жадібний алгоритм не розмістив 2 вузли, випадковий – 6 вузлів.

а) при зміні обмеження на мінімальну міжвузлову відстань на ± 2 м

На рис. 4.47 представлено поетапні результати функціонування пропонуваного алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі із обмеженням мінімальної міжвузлової відстані 8, 10 та 12 м для таких радіусів дії вузла як 20, 30 та 40 м відповідно.



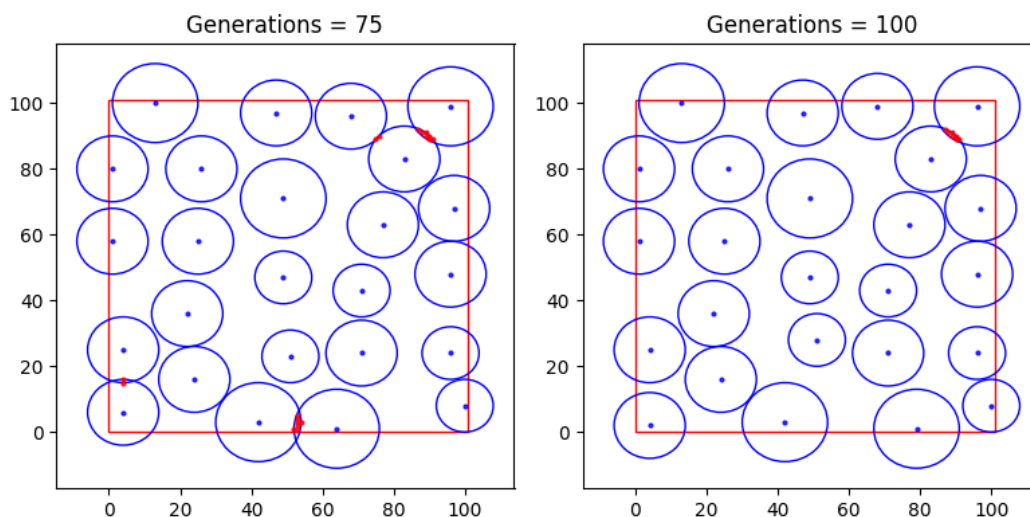


Рис. 4.47. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі із обмеженням мінімальної міжвузлової відстані 8, 10 та 12 м відповідно

Наведені результати (рис. 4.47) показують, що при зростанні кількості поколінь робота алгоритму характеризується підвищенням ефективності роботи, що продемонстровано зменшенням накладання зон вузлів.

Для аналізу ефективності та поведінки алгоритму з часом на рис. 4.49 представлено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$.

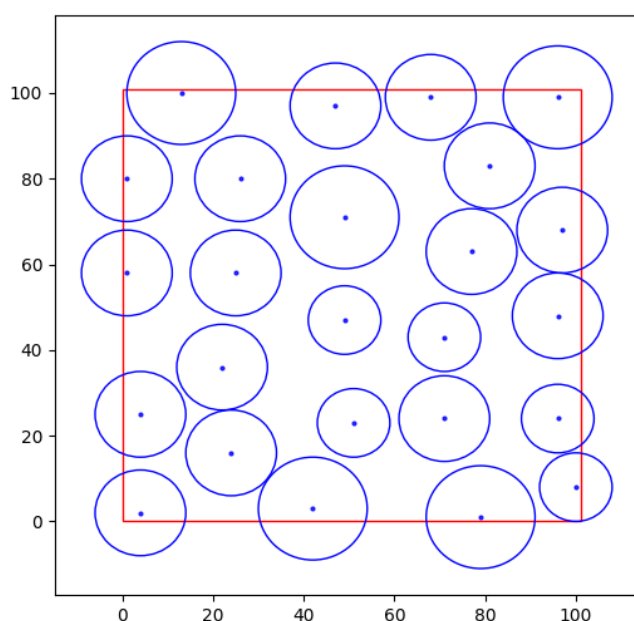


Рис. 4.48. Оптимальне розміщення вузлів із різними обмеженнями на мінімальну міжвузлову відстань

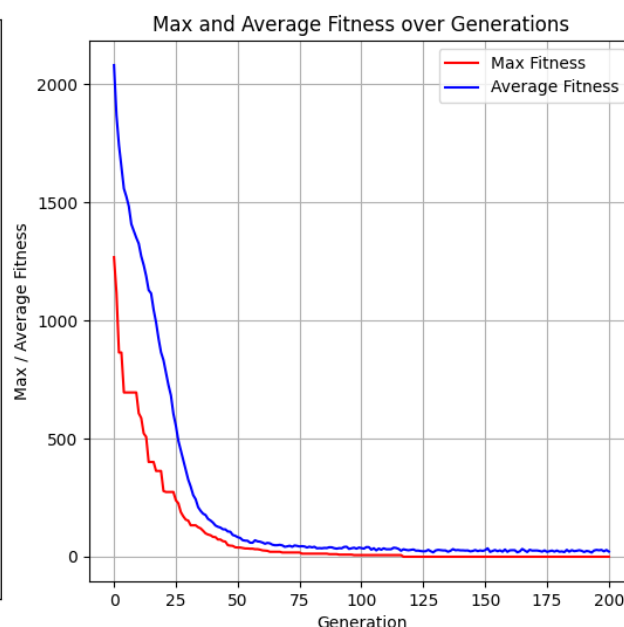


Рис. 4.49. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Знаходження глобального оптимуму здійснено при $G = 117$, отримане при цьому розміщення вузлів наведено на рис. 4.48. Сформована хромосома для цієї кількості поколінь має такий вигляд: [71, 43; 49, 71; 77, 63; 26, 80; 97, 68; 71, 24; 47, 97; 100, 8; 79, 1; 1, 80; 13, 100; 25, 58; 24, 16; 81, 83; 96, 24; 4, 2; 51, 23; 42, 3; 1, 58; 4, 25; 22, 36; 96, 48; 68, 99; 49, 47; 96, 99] відповідно до авторської статті [148]. Наведений графік дозволяє показати як алгоритм покращує рішення на кожному кроці (поколінні) та наскільки швидко він наближається до глобального оптимуму.

На рис. 4.50 представлено результати розміщення 25 нових сенсорних вузлів шляхом використання розробленого Genetic, Mesh, Greedy та Random алгоритмів із значеннями мінімальної міжвузлової відстані 8, 10 та 12 м відповідно.

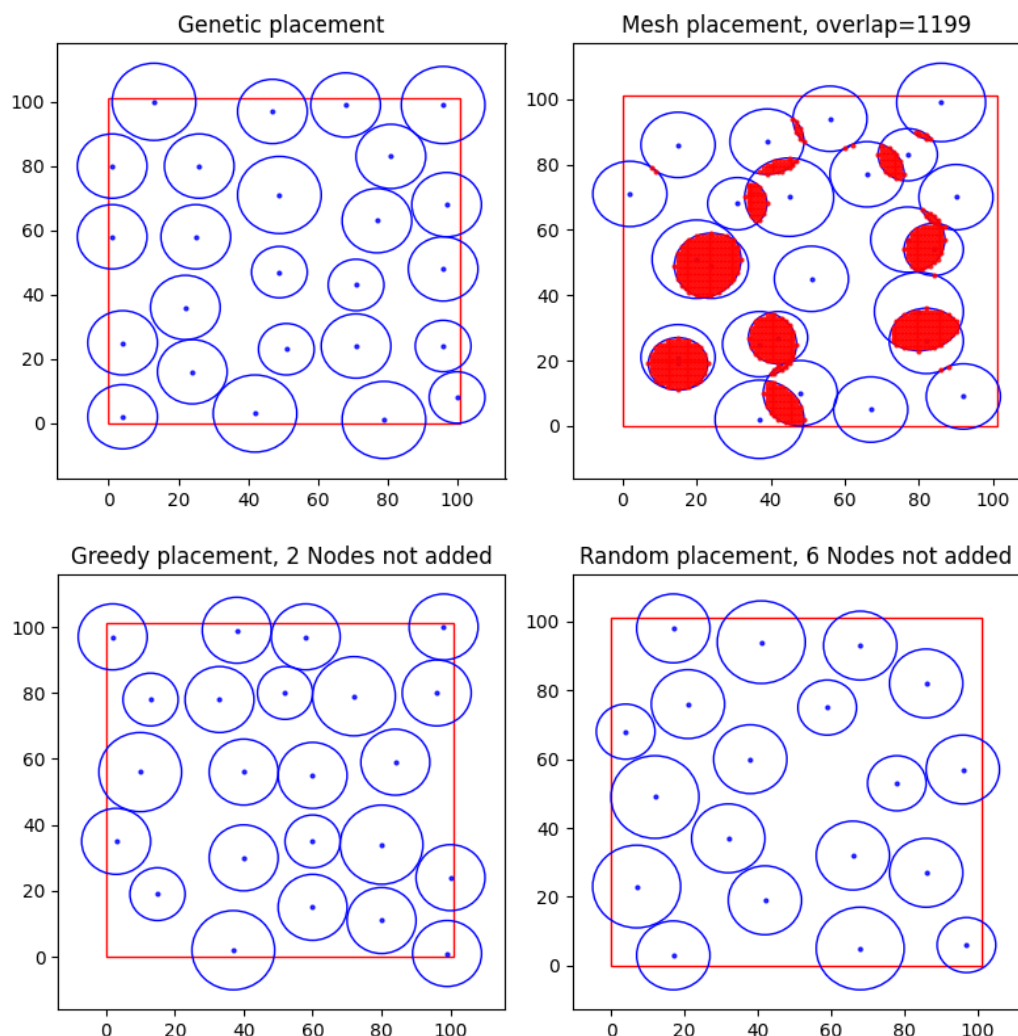


Рис. 4.50. Результати роботи алгоритмів розміщення 25 нових сенсорних вузлів (радіусом дії 20, 30 та 40 м) при мінімальній міжвузловій відстані 8, 10 та 12 м

Як бачимо з рис. 4.50, розроблене рішення успішно розмістило 25 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах. Рівномірний пошук

характеризується наявністю зон перекриття сенсорних вузлів (11,99% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 25 нових вузлів: жадібний алгоритм не розмістив 2 вузли, випадковий – 6 вузлів.

б) при зміні обмеження на мінімальну міжвузлову відстань на ± 5 м

На рис. 4.51 представлено поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі із обмеженням мінімальної міжвузлової відстані 5, 10 та 15 м, які застосовуються для вузлів із радіусом дії 20, 30 та 40 м відповідно.

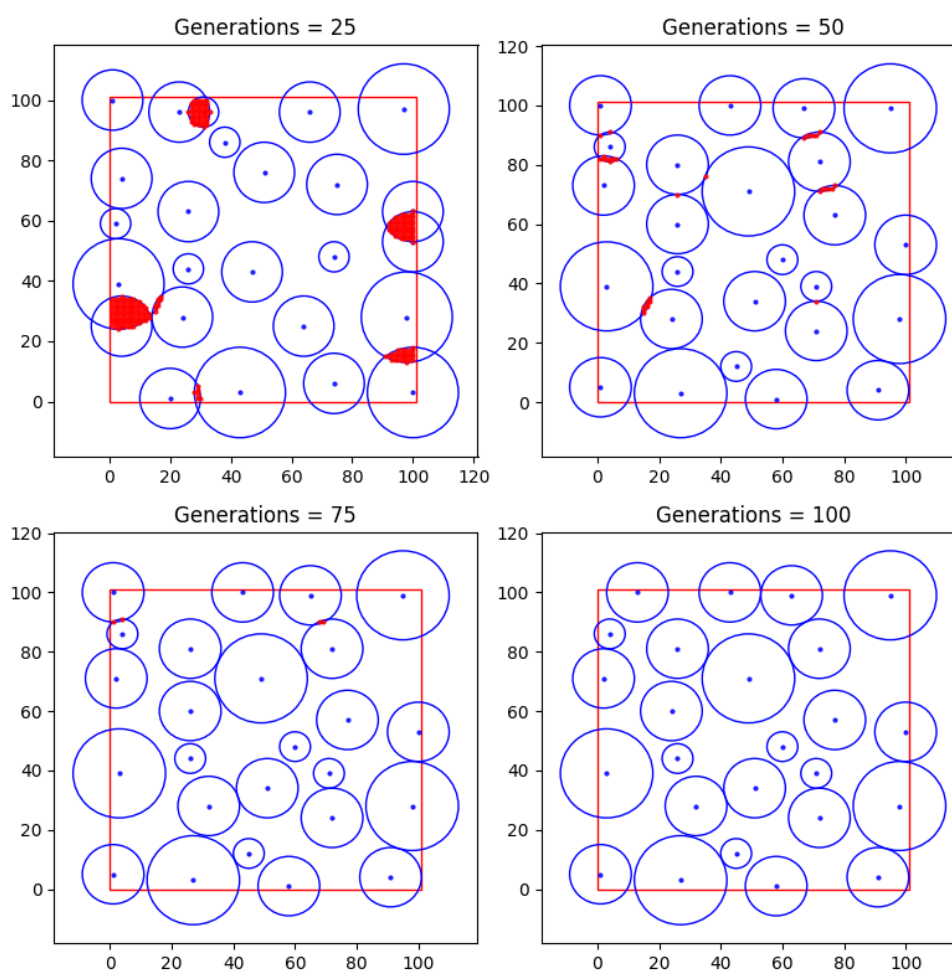


Рис. 4.51. Поетапні результати функціонування пропонованого алгоритму при розміщенні 25 вузлів мережі із обмеженням мінімальної міжвузлової відстані 5, 10 та 15 м відповідно

Як видно з рис. 4.51, при наведеній кількості поколінь алгоритм здійснив оптимальне розміщення 25 вузлів із урахуванням заданих обмежень. Проте у дослідженні важливим є точність для досягнення глобального оптимуму (проміжні

результати представлено із кроком 25 поколінь), у зв'язку з чим на рис. 4.52 представлено його досягнення при $G = 90$. Сформована хромосома має такий вигляд: [71, 39; 49, 71; 77, 57; 26, 81; 72, 81; 72, 24; 91, 4; 26, 44; 3, 39; 100, 53; 98, 28; 43, 100; 1, 5; 2, 71; 60, 48; 51, 34; 45, 12; 27, 3; 13, 100; 63, 99; 58, 1; 32, 28; 24, 60; 4, 86; 95, 99].

Для оцінки ефективності алгоритму розглянуто швидкість конвергенції, що показано на рис. 4.53.

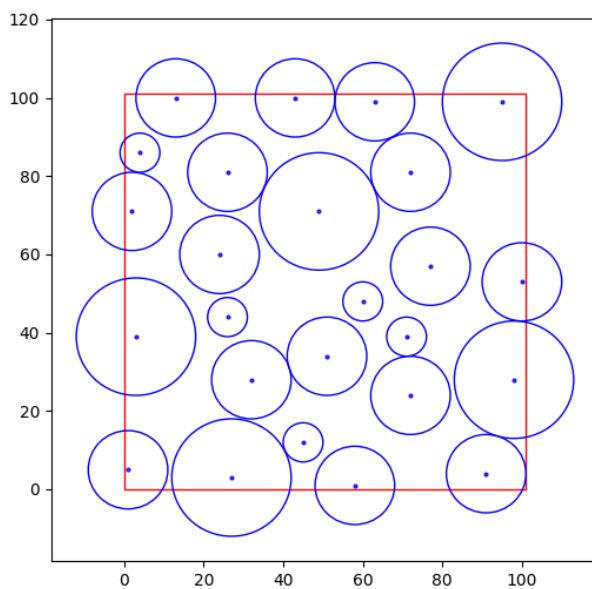


Рис. 4.52. Оптимальне розміщення вузлів із різними обмеженнями на мінімальну міжвузлову відстань

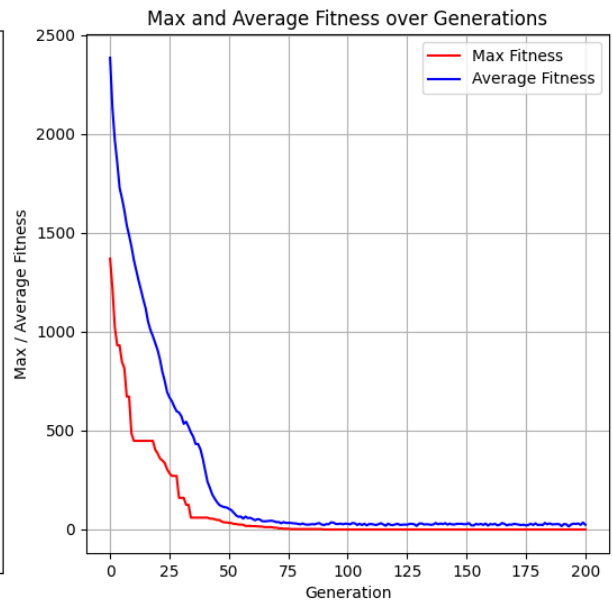


Рис. 4.53. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Очевидно, що чим швидше алгоритм досягає оптимуму, тим менше часу та обчислювальних ресурсів при цьому витрачається. Представлений графік на рис. 4.53 демонструє знаходження оптимального рішення при $G = 90$.

Результати моделювання засвідчують ефективність функціонування розробленого ГА для оптимального розміщення сенсорних вузлів з різними радіусами дії. Представлені візуалізації є важливими для валідації досягнутої конвергенції та об'єктивної оцінки якості знайденого рішення, що слугує основою для прийняття рішення щодо завершення роботи алгоритму або необхідності його подальшої параметричної оптимізації.

На рис. 4.54 представлено результати розміщення 25 нових сенсорних вузлів шляхом використання розробленого ГА (Genetic), рівномірного (Mesh), жадібного (Greedy) та випадкового (Random) алгоритмів пошуку при обмеженнях мінімальної міжвузлової відстані 5, 10 та 15 м.

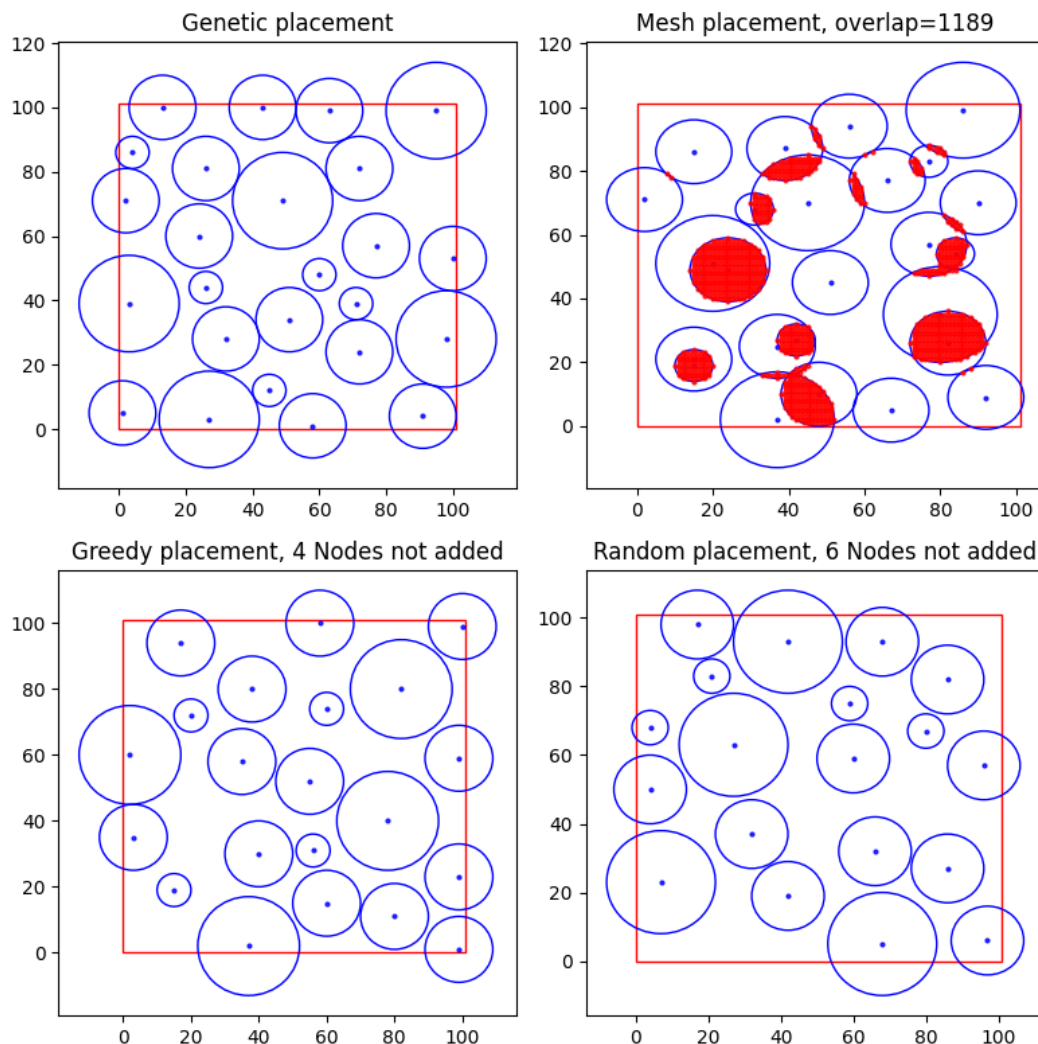


Рис. 4.54. Результати роботи алгоритмів розміщення 25 нових сенсорних вузлів (радіусом дії 20,30 та 40 м) при обмеженнях мінімальної міжвузлової відстані 5, 10 та 15 м відповідно

Як бачимо з рис. 4.54, розроблене рішення успішно розмістило 25 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах. Рівномірний пошук характеризується наявністю зон перекриття сенсорних вузлів (11,89% площі). Для жадібного та випадкового пошуку перекриття відсутнє, однак ці методи продемонстрували нижчу ефективність у процесі розміщення 25 нових вузлів: жадібний алгоритм не розмістив 4 вузли, випадковий – 6 вузлів.

в) порівняльний аналіз результатів випадкового розміщення вузлів із різними радіусами дії при зміні обмеження на мінімальну міжвузлову відстань

Отримані результати моделювання для кращої наочності щодо порівняння ефективності роботи розглянутих алгоритмів представлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати розміщення сенсорних вузлів різного радіусу дії розглянутими алгоритмами

Розміщення 25 нових сенсорних вузлів із радіусами дії 20, 30 та 40 м, мінімальна міжвузлова відстань 8, 10 та 12 м відповідно				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	25	25	23	19
Площа перекриття вузлів, %	—	11,99	—	—
Розміщення 25 нових сенсорних вузлів із радіусами дії 20, 30 та 40 м, мінімальна міжвузлова відстань 5, 10 та 15 м відповідно				
<i>Показники ефективності роботи алгоритму</i>	<i>Розроблений алгоритм</i>	<i>Рівномірний пошук</i>	<i>Жадібний пошук</i>	<i>Випадковий пошук</i>
Кількість вузлів, які було розміщено	25	25	21	19
Площа перекриття вузлів, %	—	11,89	—	—

Таким чином, отримані результати дослідження ефективності розробленого алгоритму у сценаріях розміщення 25 нових сенсорних вузлів із різними значеннями радіусів дії та мінімальної міжвузлової відстані свідчать про його перевагу над розглянутими методами.

У першому сценарії (радіуси дії 20, 30 та 40 м; мінімальна міжвузлова відстань 8, 10 та 12 м відповідно) розроблений алгоритм забезпечив повне розміщення усіх сенсорних вузлів без утворення зон перекриття. Рівномірний пошук також розмістив усі 25 вузлів, проте створив надлишкове перекриття на 11,99% площі, що потенційно призводить до нераціонального використання мережевих ресурсів. Жадібний пошук не розмістив 2 вузли, випадковий – 6, що свідчить про їх недостатню ефективність у забезпеченні повноти покриття досліджуваної площини.

У другому сценарії (радіуси дії 20, 30 та 40 м; мінімальна міжвузлова відстань 5, 10 та 15 м відповідно) запропонований алгоритм продемонстрував результат, розмістивши всі 25 вузлів без надлишкового перекриття. Рівномірний пошук продемонстрував аналогічну повноту розміщення, однак із надлишковим перекриттям 11,89% площі. Жадібний алгоритм у цьому випадку не розмістив 4 вузли, тоді як випадковий – 6.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що розроблений алгоритм забезпечує оптимальне розміщення сенсорних вузлів з урахуванням їх радіусів дії, уникаючи надлишкового перекриття. У порівнянні з рівномірним пошуком він усуває проблему дублювання зон перекриття, а в порівнянні з жадібним та випадковим підходами – гарантує ефективне розташування заданої кількості сенсорів, що є критично важливим для роботи БСМ.

– оцінки зв'язності та ступеня покриття мережі

Зв'язність сенсорних вузлів визначає, наскільки ефективно вони можуть передавати зібрану інформацію через мережу до вузла-джерела. Оцінка зв'язності дозволяє визначити потенційні "мертві зони" або вузли, які не мають зв'язку з іншими частинами мережі. Це особливо важливо в додатках, де потрібна постійна передача даних, таких як системи моніторингу довкілля, безпеки тощо. Для визначення середньої зв'язності мережі використано орієнтований граф, де вузли відповідають сенсорам, а ребра – з'єднанням між ними. Ініціалізацію графу здійснено за допомогою бібліотеки NetworkX. Для кожної пари вузлів i та j перевіряється чи відстань між ними є меншою за порогове значення, $i \neq j$. Якщо ці дві умови виконуються, то додається ребро з вагою, що дорівнює відстані між вузлами. Таким чином, граф будується на основі матриці відстаней, де ребра між вузлами існують лише тоді, коли відстань між ними менша за заданий радіус.

Використано функцію для перевірки, чи граф є сильно зв'язним, тобто чи існує шлях від кожного вузла до всіх інших. Задано обчислення середньої зв'язності мережі як відношення кількості ребер до кількості вузлів. У випадку, коли граф сильно зв'язний, цей показник дає середню кількість вихідних зв'язків для кожного вузла, що свідчить про те, наскільки добре кожен вузол з'єднаний з іншими,

використовуючи різні шляхи для передачі даних. Визначення зони покриття сенсорними вузлами дозволяє оцінити, наскільки ефективно мережа охоплює досліджувану територію або об'єкти. Для цього задано площу досліджуваної території, розбиту на сітку розміром $\text{field_size} \times \text{field_size}$. Прийmemo, що $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множина сенсорних вузлів із координатами (x_i, y_i) та радіусом дії R_{com} . Покриття C визначається як відсоток площі, що знаходиться всередині хоча б одного круга радіусом R_{com} з центром у s_i :

$$C = \frac{\bigcup_{i=1}^n \text{Circle}(s_i, R_{com})}{F} \times 100\%, \quad (4.16)$$

де F – загальна площа досліджуваної території.

Для відстеження покритих точок використовується двовимірний масив. Для кожного вузла визначається квадратна область $[x_i - R_{com}, x_i + R_{com}] \times [y_i - R_{com}, y_i + R_{com}]$. Визначення точок, які знаходяться всередині круга покриття, здійснюється на основі умови: $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq R_{com}^2$. Таким чином, всі точки, які задовольняють дану умову, позначаються як покриті. Було розроблено відповідні програми із використанням мови Python для оцінки зв'язності та покриття сенсорних вузлів на площині. Отримані результати представлено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати оцінки зв'язності та покриття досліджуваної мережі

Розглянутий випадок	Розмір популяції	Радіус дії, м	Міжвузлова відстань, м	Зв'язність	Покриття, %
25 нових вузлів	800	30	10	3.52	100
20 нових вузлів, 5 – існуючих				3.44	100
15 нових вузлів, 10 - існуючих				3.44	100
10 нових вузлів, 15 - існуючих				3.76	100
5 нових вузлів, 20 - існуючих				3.28	100
25 нових вузлів	1000	30	10	4,08	100
25 нових вузлів	600	20,30,40	10	3.2	100
			8,10,12	3.6	100
			5,10,15	3.84	100

Як бачимо з табл. 4.3, найбільше значення зв'язності характерне для розміщення 25 нових вузлів із використанням розміру популяції 1000.

Варто зауважити, що цей випадок єдиний із розглянутих, який використовує зменшений розмір досліджуваного поля у порівнянні із іншими. Відповідно щільність вузлів є більшою, що в свою чергу впливає на їх зв'язність.

У випадку з 25 новими вузлами при розмірі популяції 800 та стандартному досліджуваному полю, зв'язність становить 3.52, що вказує на хорошу інтеграцію вузлів між собою. Це дозволяє мережі ефективно передавати дані між вузлами без суттєвих втрат інформації. Для комбінацій із змішаними вузлами (20 нових і 5 існуючих, 15 нових і 10 існуючих), значення зв'язності залишаються стабільними на рівні приблизно 3.44. У цих випадках додавання існуючих вузлів не суттєво впливає на загальну зв'язність, але забезпечує достатню стабільність мережі.

Отримані результати з 25 новими вузлами та варіаціями їх радіусу дії (20, 30, 40 м) та міжвузлової відстані (5, 10, 15 м) показують, що зв'язність коливається від 3.2 до 3.84, залежно від конфігурації. Варіація радіусів дії в мережі (5, 10, 15 м) дозволяє досягти найвищого рівня зв'язності (3.84) при використанні розміру досліджуваного поля 100×100 .

Це пояснюється тим, що мережа стає більш збалансованою: вузли з більшими радіусами можуть створювати глобальні зв'язки з віддаленими вузлами, тоді як вузли з меншими радіусами з'єднуються з сусідами на короткій відстані. Незалежно від радіуса дії та міжвузлової відстані, мережа завжди покриває 100% досліджуваної території. Це свідчить про те, що розміщення 25 вузлів є достатнім для забезпечення повного покриття досліджуваної площини завдяки застосуванню метода оптимального розподілу вузлів.

– зоновому розташування

Сучасні БСМ активно використовуються для моніторингу довкілля, інтелектуальних транспортних систем, сільського господарства та промисловості. Одним з ключових завдань при їх проєктуванні є забезпечення максимально повного покриття території сенсорами за умови раціонального використання енергетичних та обчислювальних ресурсів.

У цьому контексті важливого значення набуває зональний підхід, за якого територія поділяється на області з різними вимогами до розміщення вузлів. В одних зонах доцільним є використання сенсорів з великим радіусом дії для охоплення великих площ, тоді як в інших – сенсорів із меншим радіусом для детального локального спостереження. Це забезпечує гнучкість архітектури БСМ, підвищує точність збору інформації та знижує ризики утворення неохоплених ділянок або надлишкових зон перекриття.

У зв'язку з цим даний пункт дисертаційної роботи присвячений дослідженню зонового розташування сенсорних вузлів шляхом застосування розробленого методу, описаного в п. 4.3.

Для моделювання розглянуто сенсорне поле розміром 300×300 м, на якому виділено п'ять зон. Чотири з них представлені квадратами із фіксованими розмірами 80×80 м, призначеними для розміщення вузлів із меншим радіусом дії. П'ята зона відповідає всій площині досліджуваного поля, крім площі виділених квадратів, та використовується для розміщення вузлів із більшим радіусом дії.

Дослідження проводилися для двох сценаріїв:

- первинне розташування заданої кількості вузлів;
- розташування заданої кількості вузлів при наявності існуючих.

а) 136 сенсорних вузлів

Для цього сценарію розглянуто розміщення 72 сенсорів із радіусом дії 40 м та мінімальною міжвузловою відстанню 12 м, 64 сенсорів із радіусом дії 30 м та мінімальною міжвузловою відстанню 10 м.

Рис. 4.55 демонструє ітераційні результати роботи авторського методу.

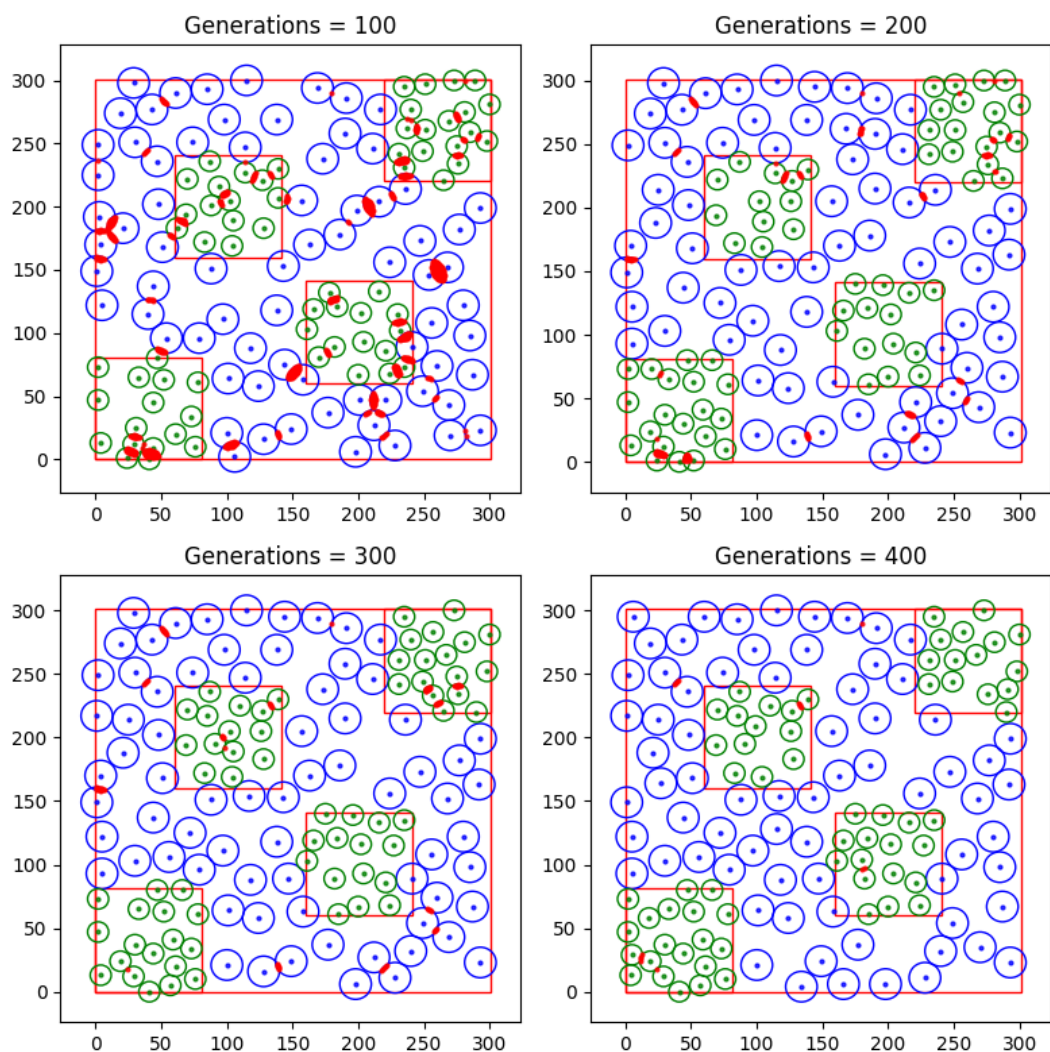


Рис. 4.55. Ітераційні результати роботи методу для зонавого розташування сенсорних вузлів різного радіусу дії

Відповідно до результатів, наведених на рис. 4.55, при збільшенні кількості поколінь спостерігається зменшення накладання зон дії сенсорних вузлів, що позначено червоним кольором.

Знаходження розташування 136 вузлів без накладання зон перекриття досягнуто при $G=680$, отримане при цьому розміщення вузлів наведено на рис. 4.56.

На рис. 4.57 наведено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$ для розміщення 136 вузлів.

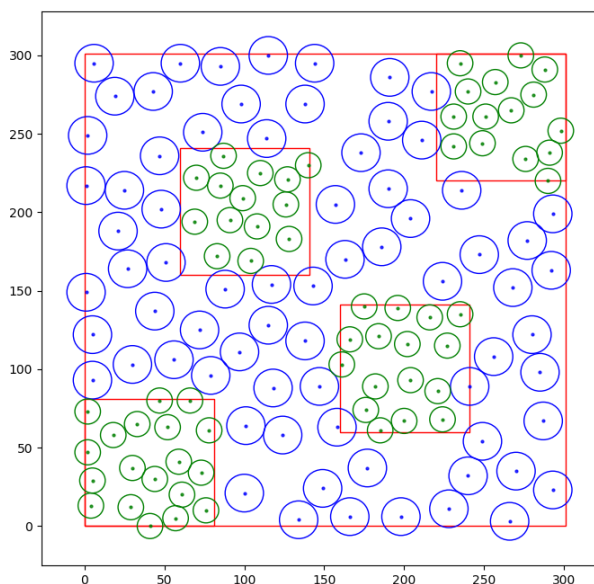


Рис. 4.56. Оптимальне розміщення 136 вузлів

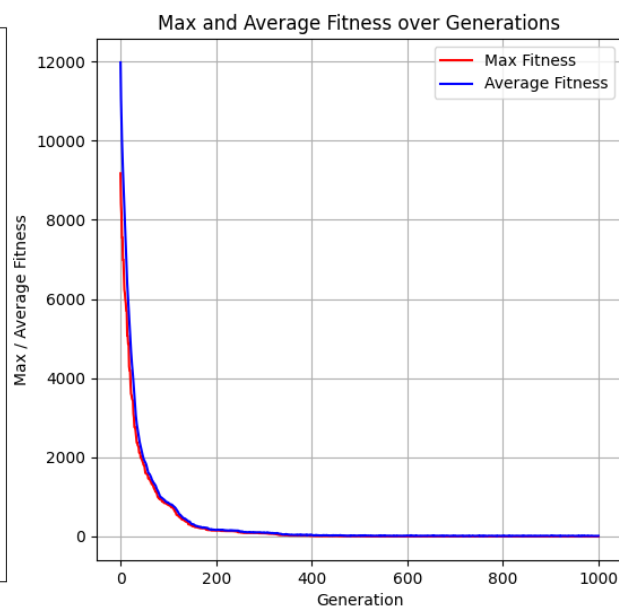


Рис. 4.57. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Отже, рис. 4.57 показує досягнення оптимального значення цільової функції для поставленого завдання.

Рис. 4.58 демонструє результати зонового розміщення сенсорних вузлів різного радіусу дії (синій колір – вузли із радіусом дії 40 м, зелений – вузли із радіусом дії 30 м.)

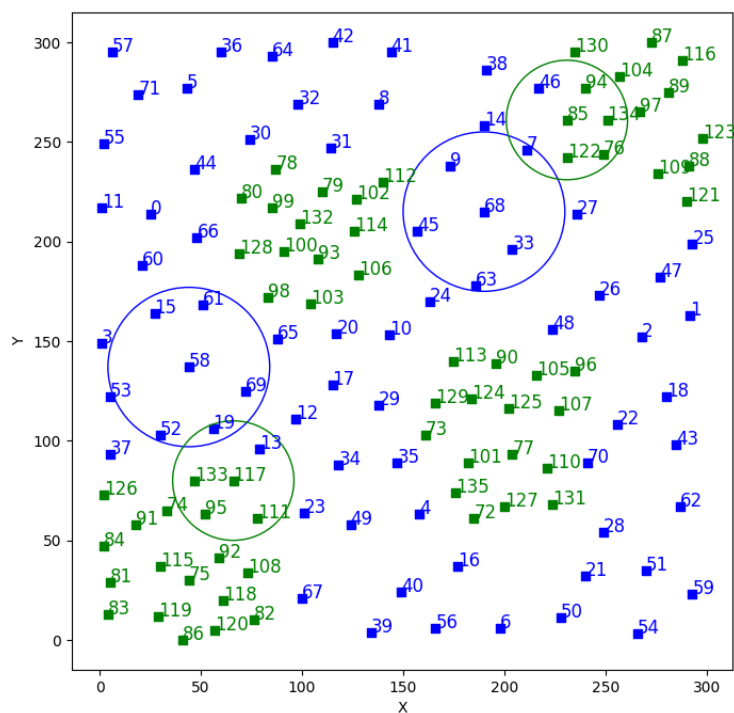


Рис. 4.58. Зонове розміщення сенсорних вузлів різного радіусу дії

Як бачимо, на даній площині наявні 5 зон (4-ри зони із вузлами зеленого кольору, та 5-та зона – із вузлами синього кольору), де успішно розміщено задану кількість вузлів із різними радіусами дії, які здійснюють покриття досліджуваної території.

Граф сформованої мережі із 136 вузлів представлено на рис. 4.59.

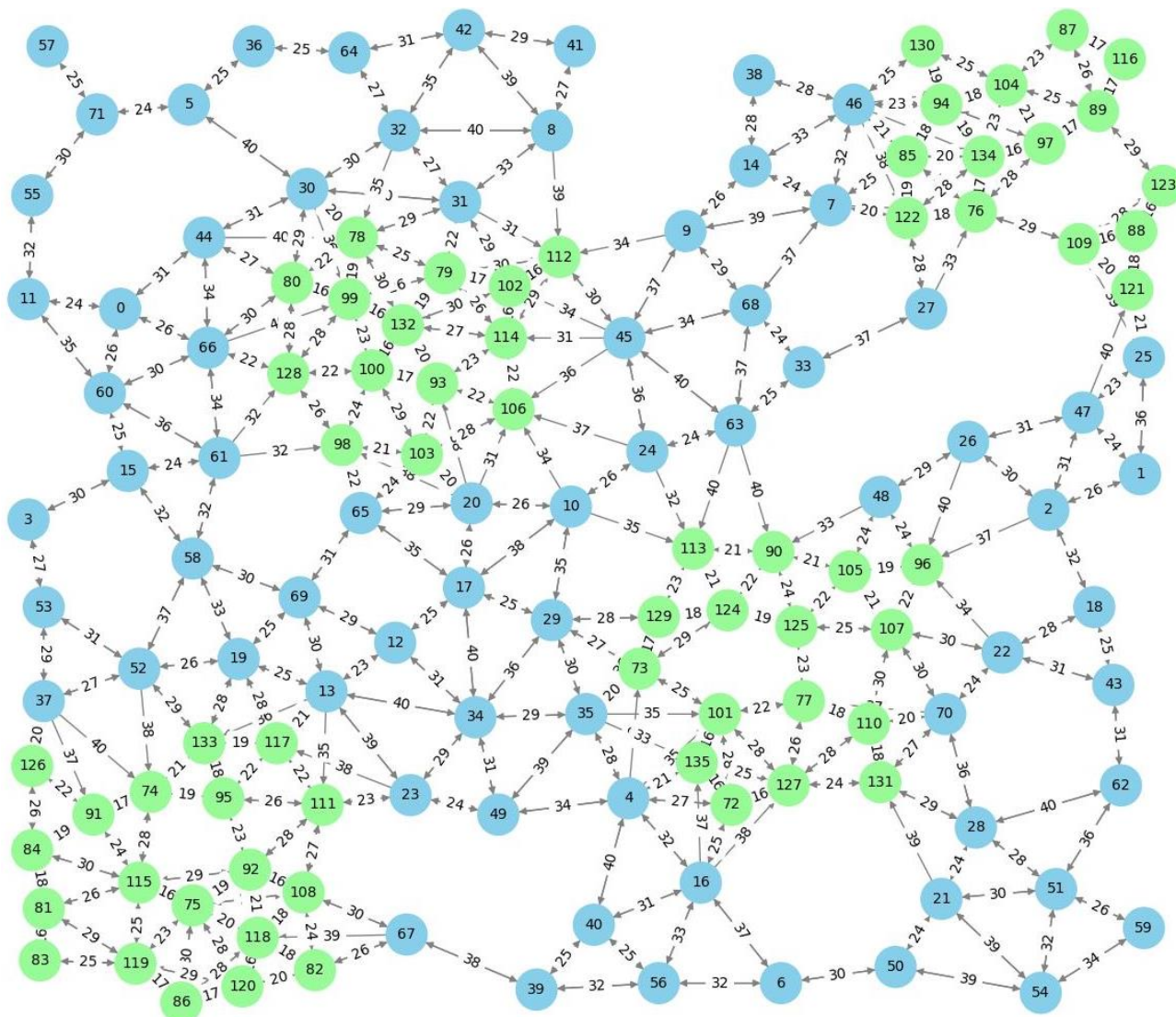


Рис. 4.59. Граф сформованої мережі із 136 вузлів

На рис. 4.60 представлено результати розміщення 136 сенсорних вузлів (72 сенсорів із радіусом дії 40 м та мінімальною міжвузловою відстанню 12 м, 64 сенсорів із радіусом дії 30 м та мінімальною міжвузловою відстанню 10 м) на основі використання розробленого Genetic та Random алгоритмів для візуальної оцінки ефективності їх роботи.

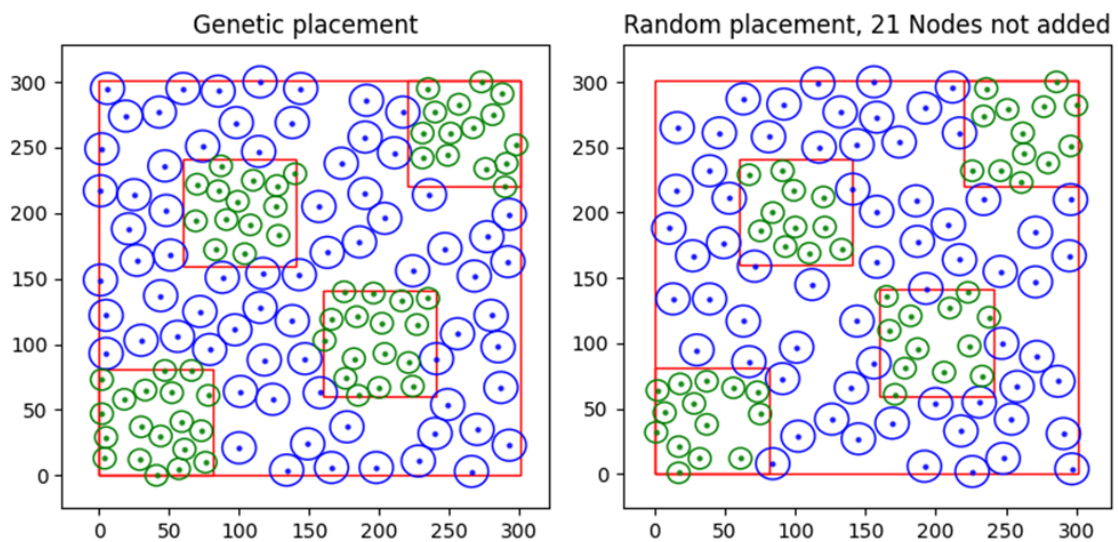


Рис. 4.60. Результати роботи Genetic та Random алгоритмів розміщення 136 нових сенсорних вузлів

Як бачимо з рис. 4.60, розроблене рішення успішно розмістило 136 нових сенсорних вузлів на досліджуваній площині у заданих умовах. Застосування випадкового пошуку (Random) продемонструвало відсутність зон перекриття між вузлами, проте не дозволило розмістити 21 вузол, що свідчить про обмеженість даного підходу для задач повного покриття мережі.

Отже, пропонований Genetic алгоритм є більш ефективним, ніж Random алгоритм за критерієм повноти розміщення вузлів, забезпечуючи кращі умови для практичного використання у БСМ.

б) 112 сенсорних вузлів при наявності 24 існуючих

Для цього випадку розглянуто задачу розміщення 48 сенсорів із радіусом дії 40 м та мінімальною міжвузловою відстанню 12 м, 64 сенсорів із радіусом дії 30 м та мінімальною міжвузловою відстанню 10 м при наявності 24 сенсорів із радіусом дії 30 м. У процесі імітаційного моделювання використано параметри ГА, аналогічні як у попередньому випадку.

Рис. 4.61 демонструє ітераційні результати роботи авторського методу.

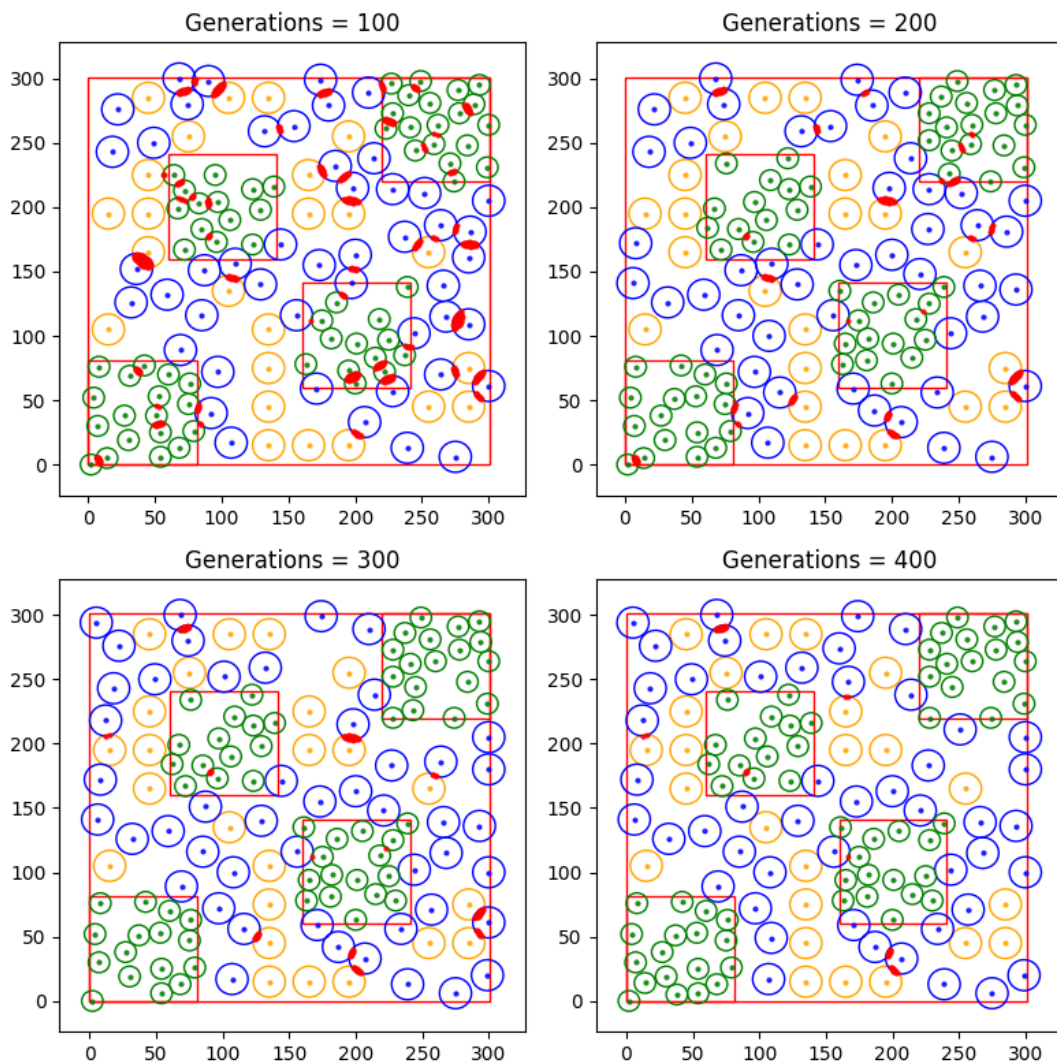


Рис. 4.61. Проміжні результати роботи методу для зонового розташування сенсорних вузлів різного радіусу дії при наявності існуючих вузлів

При збільшенні кількості поколінь спостерігається зменшення накладання зон дії сенсорних вузлів, що позначено червоним кольором. При цьому існуючі вузли позначені жовтим кольором, нові вузли із радіусом дії 40 м – синім, нові вузли із радіусом дії 30 м – зеленим.

Знаходження оптимального розташування 112 сенсорних вузлів при наявності 24 існуючих досягнуто при $G=948$, отримане при цьому розміщення вузлів наведено на рис. 4.62.

На рис. 4.63 наведено вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$ для розміщення 112 нових вузлів при наявності 24 існуючих.

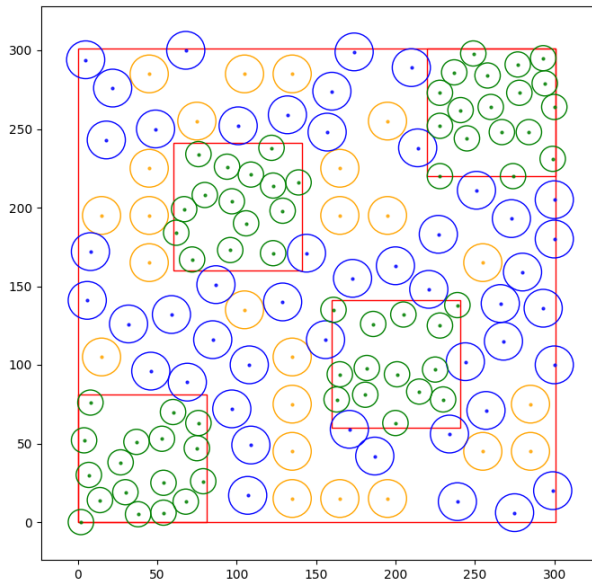


Рис. 4.62. Оптимальне розміщення 112 нових вузлів при наявності 24 існуючих

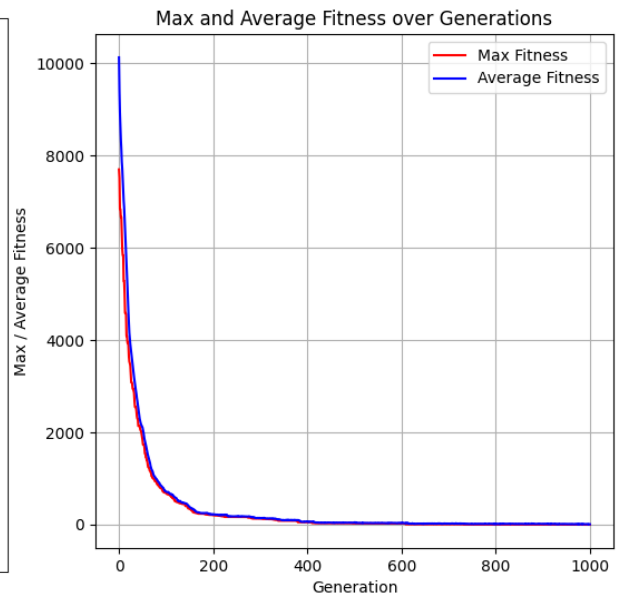


Рис. 4.63. Вплив кількості поколінь G на величину фітнес-функції $f(t_{net})$

Наведений графік (рис. 4.63) демонструє досягнення оптимального значення цільової функції для поставленого завдання. Рис. 4.64 демонструє результати зонового розміщення сенсорних вузлів різного радіусу дії.

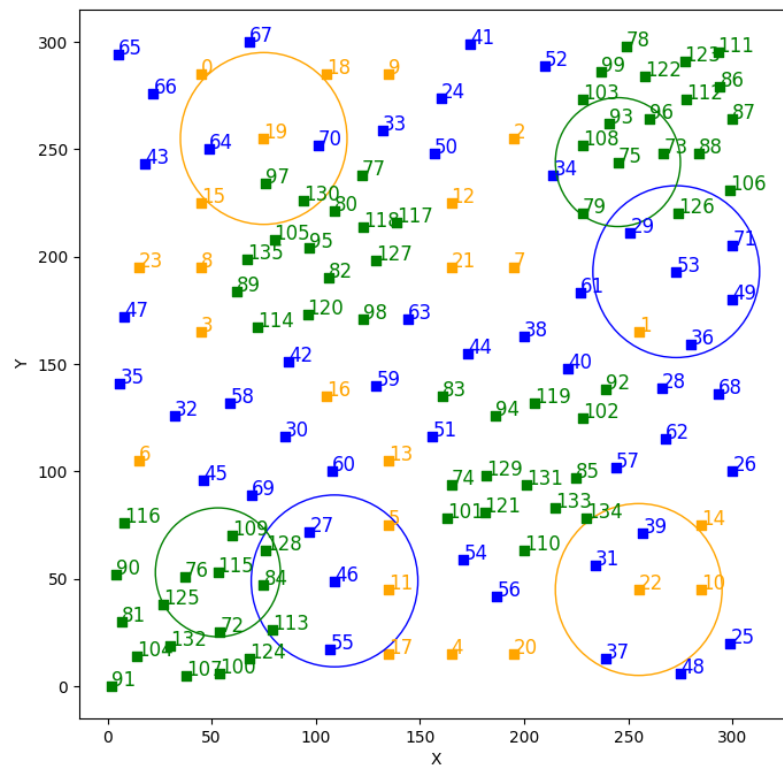


Рис. 4.64. Зонове розміщення сенсорних вузлів різного радіусу дії

Граф сформованої мережі із 112 нових вузлів при наявності 24 існуючих представлено на рис. 4.65.

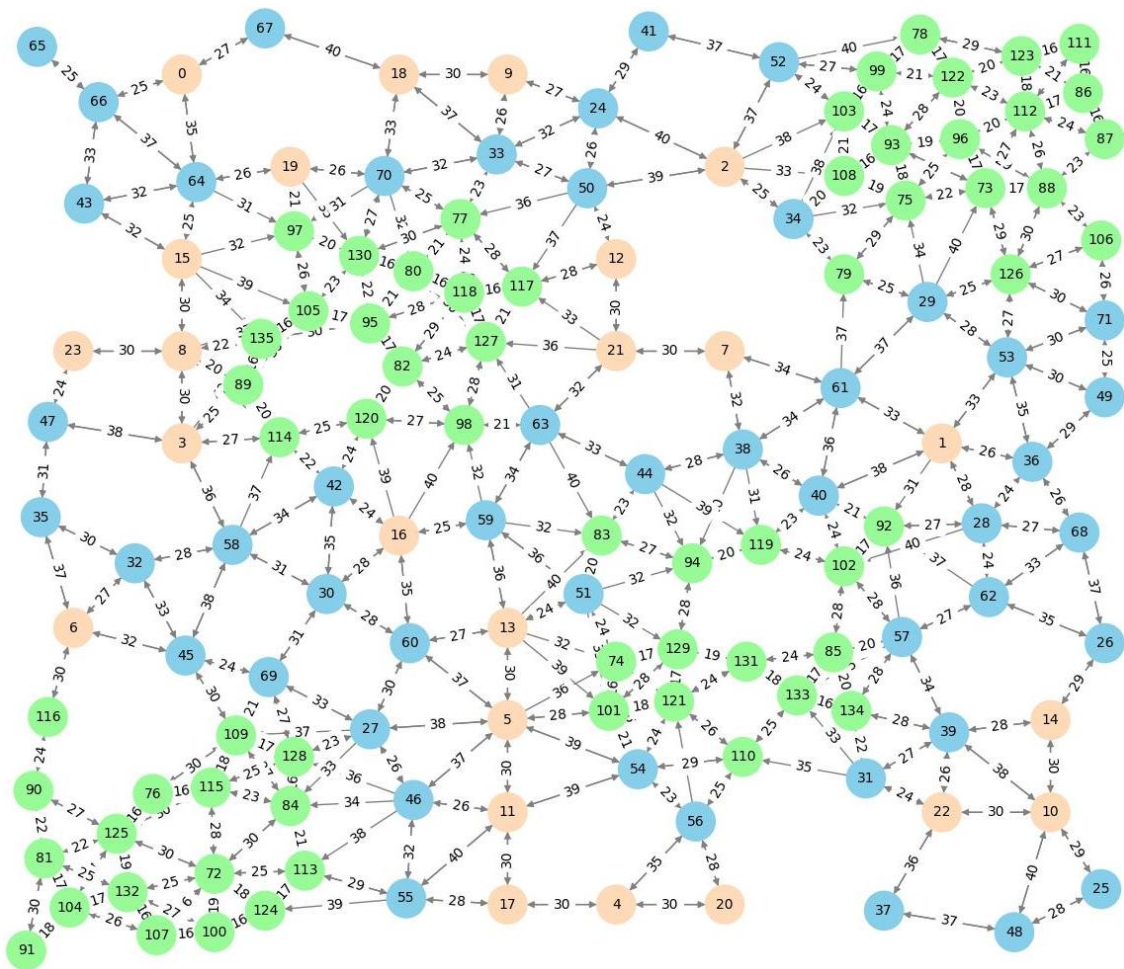


Рис. 4.65. Граф сформованої мережі із 112 нових вузлів при наявності 24 існуючих

На рис. 4.66 представлено результати розміщення 112 вузлів (48 – із радіусом дії 40 м та мінімальною міжвузловою відстанню 12 м, 64 – із радіусом дії 30 м та мінімальною міжвузловою відстанню 10 м) при наявності 24 існуючих (із радіусом дії 30 м та мінімальною міжвузловою відстанню 10 м) на основі використання розробленого Genetic та Random алгоритмів для візуальної оцінки ефективності їх роботи.

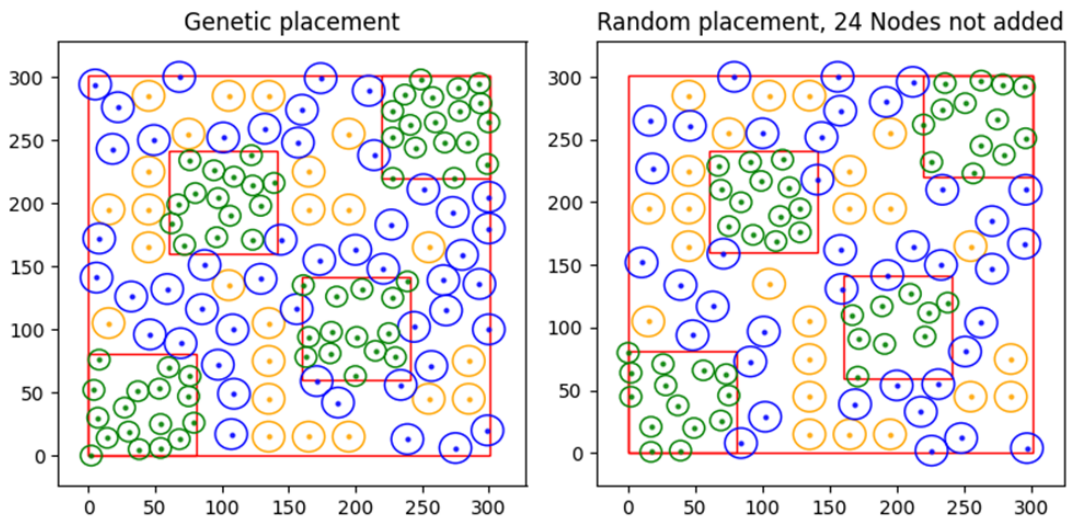


Рис. 4.66. Результати роботи Genetic та Random алгоритмів розміщення 112 нових сенсорних вузлів при наявності 24 існуючих

Як бачимо з рис. 4.66, розроблене Genetic рішення успішно розмістило 112 нових сенсорних вузлів без перекриття їх зон на досліджуваній площині у заданих умовах. Застосування випадкового пошуку (Random) продемонструвало відсутність зон перекриття між вузлами, проте не дозволило розмістити 24 вузли із заданих 112.

Таким чином, результати моделювання демонструють ефективність запропонованого підходу до зонавого просторового розміщення вузлів, що підтверджується повним покриття досліджуваної території без зон перекриття сенсорних вузлів.

4.6. Технічні рекомендації для налаштування запропонованих генетичних алгоритмів

Цей пункт присвячений формуванню рекомендацій щодо ефективного налаштування розроблених ГА на основі отриманих результатів для розміщення вузлів та маршрутизації даних.

а) задача розташування вузлів мережі на досліджуваній площині 100 на 100 м

– Розмір популяції. Цей параметр залежить від виду топології. Наприклад у mesh топології розміщення кожного вузла може суттєво впливати на якість маршрутизації, тому в цьому випадку доцільно використовувати більший розмір популяції. Таким чином, для mesh топології для задачі розміщення 25 вузлів рекомендується використовувати розмір популяції – 1000.

Для випадкового розміщення вузлів характерна можливість для кожного вузла мати зв'язки з іншими вузлами, що створює складний простір пошуку. Для цього випадку у роботі досліджувались 25 вузлів як із однаковим, так із різним радіусом дії.

Для вузлів з однаковим радіусом дії оптимізація розміщення вимагає точного налаштування кожного вузла для досягнення покриття без перекриття і забезпечення зв'язності. Це вимагає більшого розміру популяції, щоб дослідити всі можливі варіанти розміщення та уникнути локальних оптимумів [151]. Вузли з різними радіусами дії (20, 30 та 40 м) знижують необхідність такого точного налаштування, оскільки більші радіуси можуть покрити «сліпі» зони або зв'язності, створені вузлами з меншими радіусами дії. Тому розмір популяції може бути меншим, оскільки вже існує більша ймовірність отримання рішень, що задовольняють вимоги.

Відповідно на основі проведених досліджень для випадкового розміщення 25 вузлів із однаковим радіусом дії рекомендується використовувати розмір популяції 800, для вузлів із різними радіусами дії – 600.

– Кількість поколінь. Значення цього параметру для mesh топології та для випадкової топології є різним, оскільки вони характеризуються відмінними особливостями простору пошуку та обмеженнями.

Mesh топологія передбачає розміщення вузлів на фіксованих місцях у вигляді регулярної сітки. Цей тип топології може мати жорсткі вимоги до розміщення вузлів, наприклад, для максимального покриття або забезпечення максимальної зв'язності. Відповідно потрібно коректно розташувати кожен вузол, щоб зберегти певну структуру і досягти заданих критеріїв (мінімізація перекриття зон покриття, максимізація зв'язності тощо). Це призводить до того, що ГА потрібно більше поколінь, щоб оптимально налаштувати розміщення всіх вузлів з урахуванням цих обмежень.

У випадковій топології вузли можуть розміщуватися в довільних точках області. Це створює більший простір для розміщення, але водночас пропонує більше можливостей для швидкого знаходження прийнятних рішень, оскільки розміщення

вузлів не обмежене жорсткими структурними вимогами. Таким чином, при меншій кількості поколінь ГА може швидше знайти оптимальне рішення.

Отже, для mesh топології рекомендується використовувати 400 поколінь, для випадкової – 200.

– Імовірність схрещування та мутації. Значення даних параметрів у роботі застосовувалось як динамічний діапазон на основі оцінки значення фітнес-функції у межах для схрещування $[0.5; 0.8]$, для мутації $[0.05; 0.2]$. Межі були визначені шляхом аналізу ряду досліджень робіт, присвячених дослідженню ГА.

Застосування адаптивних значень імовірності мутації та схрещування дозволяє ГА ефективніше реагувати на поточний стан пошуку, краще балансувати між пошуком нових рішень і уточненням вже знайдених, зменшувати ризики передчасної збіжності та забезпечувати високу ефективність обчислень. Це робить його більш потужним інструментом для оптимізації складних задач, ніж застосування певних одиничних значень.

б) задача маршрутизації даних у БСМ

На основі результатів імітаційного моделювання для мережі з 25 сенсорних вузлів, випадково розміщених у просторі розміром 100×100 м, сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів ГА, які забезпечують ефективне знаходження найкоротшого маршруту передачі даних:

– Розмір популяції. Оптимальним виявився розмір популяції 300 особин, що дозволило досягти найкращих результатів за критерієм довжини маршруту при мінімальних часових витратах.

– Кількість поколінь. Для мереж із однаковими та різними радіусами дії сенсорних вузлів (20, 30 та 40 м) доцільно використовувати значення 150 поколінь, що забезпечує баланс між якістю рішення та обчислювальною складністю.

– Імовірність схрещування та мутації. Значення цих параметрів доцільно визначати у межах динамічного діапазону, аналогічно до попередніх сценаріїв моделювання, що забезпечує достатню різноманітність популяції та стійкість до локальних екстремумів.

Таким чином, рекомендовані налаштування ГА (розмір популяції – 300, кількість поколінь – 150, адаптивні параметри схрещування та мутації) можуть вважатися доцільними для задачі оптимізації маршрутизації в БСМ із випадковим розташуванням 25 вузлів радіусами дії 20, 30 та 40 м.

Висновки до розділу 4

Цей розділ присвячено задачі оптимального розміщення сенсорних вузлів без накладання зон їх дії на основі генетичного пошуку, що сприятиме подальшому покращенню ефективності роботи мережі.

Розроблено метод розміщення вузлів на основі ГА, що здійснює оцінку площини через щільність розміщення вузлів із застосуванням штрафів для визначення збалансованих конфігурацій щодо оптимізації покриття досліджуваної території із урахуванням радіусів дії та мінімальної міжвузлової відстані як при розгортанні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

Реалізовано програмний модуль, який являє собою спеціалізоване програмне забезпечення, що призначене для моделювання та симуляційних досліджень функціонування БСМ з урахуванням динамічно змінної топології та обмеженості енергетичних і мережевих ресурсів.

Здійснено оцінку ефективності використання розробленого методу розміщення вузлів для mesh топології та для топології із випадковим розміщенням вузлів при однаковому та різних радіусах їх дії.

Розглянуто сценарії розміщення сенсорних вузлів із однаковими радіусами дії за умов різної кількості нових та вже існуючих вузлів, при мінімальній міжвузловій відстані 10 м. Розроблений метод порівнювався з відомими підходами: рівномірним, жадібним та випадковим розташуванням. Для оцінки ефективності алгоритмів застосовано такі критерії як кількість успішно розміщених вузлів та площу перекриття їхніх зон дії.

У п'яти розглянутих сценаріях розроблений алгоритм забезпечив повне розміщення необхідної кількості нових сенсорних вузлів, незалежно від наявності вже існуючих елементів мережі. Для рівномірного пошуку у всіх випадках також було розміщено повний набір вузлів, однак спостерігалось значне надлишкове

перекриття площі, яке зменшувалося із зростанням частки вже існуючих вузлів – від 13,23% у сценарії з 25 новими вузлами до 2,85% при розміщенні лише 5 вузлів.

Жадібний пошук продемонстрував неповне розміщення нових сенсорів: відсутність 2 вузлів при розміщенні 25 нових елементів і до 4 нерозміщених вузлів при наявності 15 вже існуючих. Випадковий пошук показав ще нижчі результати, в окремих сценаріях не розмістивши до 6 вузлів.

Таким чином, отримані результати свідчать про стабільну перевагу розробленого алгоритму над базовими підходами для оптимального розміщення сенсорних вузлів із однаковим радіусом дії з урахуванням мінімальної міжвузлової відстані 10 м.

Також розглянуто сценарії розміщення сенсорних вузлів із різними радіусами дії та обмеженнями на мінімальну міжвузлову відстань. У першому сценарії (радіуси дії 20, 30 та 40 м; мінімальна міжвузлова відстань 8, 10 та 12 м відповідно) запропонований підхід забезпечив повне розміщення всіх 25 сенсорних вузлів без утворення зон надлишкового перекриття, тоді як рівномірний пошук хоча й розмістив усі вузли, проте створив понад 11% зайвого перекриття площі. Жадібний і випадковий методи показали нижчу результативність, не забезпечивши повноти розміщення. Аналогічні результати було отримано і в другому сценарії (радіуси дії 20, 30 та 40 м; мінімальна міжвузлова відстань 5, 10 та 15 м відповідно): розроблений алгоритм продемонстрував найвищу ефективність, забезпечивши повне розміщення вузлів без перекриття, тоді як рівномірний метод супроводжувався надлишковим перекриттям площі, а жадібний та випадковий алгоритми знову виявилися менш ефективними.

Таким чином, запропонований метод підтвердив свою перевагу над відомими підходами, поєднуючи повноту розміщення з відсутністю надлишкового перекриття, що є ключовою умовою для підвищення енергоефективності та надійності роботи БСМ.

Розглянуто зональний підхід до організації мережі, коли територія дослідження поділяється на окремі області із різними характеристиками покриття. Здійснено дослідження ефективності роботи розробленого методу для розміщення

вузлів із різними характеристиками у 5 зонах. Показано, що розроблений алгоритм продемонстрував високу ефективність, зокрема, забезпечив успішне розташування як 136, так і 112 нових сенсорних вузлів у різних конфігураціях, із врахуванням заданих обмежень без виникнення перекриття. Тоді як застосування Random алгоритму не забезпечувало повного розміщення заданої кількості вузлів (21 невстановлений вузол для задачі розміщення 136 вузлів та 24 – для задачі розміщення 112 вузлів).

Отже, отримані результати підтверджують доцільність застосування розробленого методу розміщення вузлів із використанням генетичних механізмів, що дозволяє уникнути накладання вузлів, забезпечуючи їх оптимальний розподіл на досліджуваній площині із урахуванням радіусів дії, міжвузлової відстані як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-практичного завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розробки методів розміщення сенсорних вузлів та визначення оптимального маршруту і множини резервних маршрутів на основі генетичного алгоритму в умовах їх мобільності та різних радіусів дії.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Здійснено аналіз особливостей застосування ГА у БСМ. Встановлено, що ГА є важливим інструментом для покращення мережових процесів в умовах зростаючого обсягу трафіку, кількості мережових вузлів та зміни їх розташування, при цьому його ефективне використання потребує налаштування відповідно до особливостей розв'язуваної задачі.

2. Для систематизації знань про принципи функціонування ГА та покращення розуміння факторів, які впливають на їх ефективність в контексті сучасних мереж, запропоновано авторську класифікацію за такими критеріями: принцип налаштування параметрів для схрещування та мутації, вид фітнес-функції, вид алгоритму та тип мережових задач.

3. Удосконалено метод формування маршруту за критерієм мінімальної довжини, який використовує розроблений ГА із динамічною адаптацією імовірності схрещування та мутації для визначення шляху між вузлом-джерелом та вузлом-одержувачем із урахуванням різних радіусів дії та зміни топологічної структури мережі.

Здійснено комплексне дослідження ефективності розробленого ГА при різних умовах, зокрема при використанні таких метрик відстані як Евклідова, Манхеттенська, Чебишова, Мінковського, наявності сенсорних вузлів із трьома різними радіусами дії та при додаванні нових / виходу із ладу існуючих вузлів. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що для сценарію:

– із вузлами, що мають однаковий радіус дії пропонується ГА формує маршрути, довжина яких істотно менша: на 47,14% порівняно з ЖА та на 28,39%

порівняно з МА. Крім того, кількість переходів між вузлами зменшується у три рази відносно ЖА та у два рази відносно МА, що на пряму впливає на енергоспоживання та надійність передачі даних.

– із трьома радіусами дії вузлів при використанні різних метрик відстані пропонуваній ГА стабільно перевищує ЖА для всіх типів метрик: 42.38% (Евклідова), 32.10% (Манхеттенська), 48.80% (Чебишова), 45.41% (Мінковського). Порівняно з МА також зафіксовано переваги розробленого рішення: від 4.62% до 26.67%, залежно від типу метрики. Це підтверджує універсальність авторського ГА.

– поступового видалення вузлів пропонуваній ГА зберігає здатність формувати оптимізовані маршрути, перевищуючи МА в середньому на 16.14%. ЖА у цьому сценарії проявив нестійкість: у п'яти із проаналізованих випадків він взагалі не зміг сформувати маршрут, що свідчить про його низьку адаптивність у динамічних мережах.

– додавання нових вузлів авторський ГА показує стабільну перевагу над МА, скорочуючи довжину маршруту в середньому на 8.72–22.87%. ЖА виявився непридатним до адаптації: після додавання вузлів 25, 26 та 27 він не знаходив жодного дійсного маршруту.

Отже, запропонований ГА забезпечує високу стабільність, адаптивність та точність оптимізації маршрутів, залишаючись ефективним як у статичних, так і в динамічних умовах зміни топології БСМ.

4. Набув подальшого розвитку багатокритеріальний метод маршрутизації в БСМ, який використовує ГА з оцінкою придатності маршруту за сукупністю нормалізованих параметрів для забезпечення адаптації маршруту до обмежених мережевих ресурсів та динамічно змінної топології.

В якості критеріїв для пошуку оптимального маршруту між сенсорними вузлами БСМ використано Евклідову відстань, заряд батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримку передачі даних, вхідний / вихідний ступінь вузла та комплексний критерій, який включає поєднання 6 наведених критеріїв.

Для оцінки ефективності роботи розробленого алгоритму здійснено порівняння із ЖА та МА, використовуючи імітаційне моделювання топології БСМ із

25 вузлів. На основі отриманих результатів для комплексного критерію показано, що авторський ГА формує маршрут, який є на 15.75% коротшим порівняно з МА, при цьому ЖА не здійснює успішне формування маршруту. Також сформовано множину альтернативних маршрутів, яку доцільно використовувати для підвищення надійності роботи БСМ при динамічно змінних умовах.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність застосування авторського ГА для задач маршрутизації в БСМ, зокрема у випадках зі динамічно змінною топологією.

Досліджено планування маршрутів ТЗ для «розумної» міської інфраструктури на основі розробленого ГА, який враховує такі критерії як відстань, рівень завантаженості доріг та їх непрохідність. На основі результатів імітаційного моделювання показано, що запропоноване рішення забезпечує зменшення часу руху транспортного засобу на 15.28% порівняно із МА завдяки оптимальному вибору маршруту, при цьому ЖА не досягає вузла - призначення.

Отже, запропоноване рішення може бути інтегроване в інтелектуальні транспортні системи «розумного» міста для аналізу дорожньої ситуації та адаптивного планування маршрутів ТЗ.

5. Вперше запропоновано метод просторового розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму, який здійснює оцінку щільності їх розподілу на площині із застосуванням штрафів та врахуванням мінімальної міжвузлової відстані для визначення оптимальних конфігурацій у процесі еволюційного відбору, що дало змогу мінімізувати надлишкове перекриття із урахуванням різних радіусів дії як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

Ефективність розробленого методу порівнювалась з відомими підходами: рівномірним, жадібним та випадковим, які враховують мінімальну міжвузлову відстань, для таких сценаріїв:

- 5-ти випадків розміщень сенсорних вузлів із однаковими радіусами дії за умов різної кількості нових та вже існуючих вузлів при мінімальній міжвузловій відстані 10 м,

- 2-ох випадків розміщення сенсорних вузлів із різними радіусами дії (20, 30 та 40 м) та різними обмеженнями на мінімальну міжвузлову відстань.

Отримані результати свідчать про стабільну перевагу розробленого рішення над розглянутими для оптимального розміщення сенсорних вузлів із однаковим радіусом дії. При рівномірному підході спостерігалось значне надлишкове перекриття площі, яке зменшувалося із зростанням частки вже існуючих вузлів – від 13,23% у сценарії з 25 новими вузлами до 2,85% при розміщенні лише 5 вузлів. Жадібний пошук продемонстрував неповне розміщення нових сенсорів: відсутність 2 вузлів при розміщенні 25 нових елементів і до 4 нерозміщених вузлів при наявності 15 вже існуючих. Випадковий пошук показав ще нижчі результати, в окремих випадках не розмістивши до 6 вузлів.

При розміщенні сенсорних вузлів із радіусами дії 20, 30 та 40 м, мінімальною міжвузловою відстанню 8, 10 та 12 м відповідно, розроблений алгоритм забезпечив повне розміщення всіх 25 сенсорних вузлів без утворення зон надлишкового перекриття, тоді як рівномірний пошук хоча й розмістив усі вузли, проте створив понад 11% зайвого перекриття площі. Жадібний і випадковий методи показали нижчу результативність, не забезпечивши повноти розміщення заданих вузлів.

При розміщенні сенсорних вузлів із радіусами дії 20, 30 та 40 м, мінімальною міжвузловою відстанню 5, 10 та 15 м відповідно, розроблений алгоритм продемонстрував найвищу ефективність, забезпечивши повне розміщення вузлів без перекриття, тоді як рівномірний супроводжувався надлишковим перекриттям площі, а жадібний та випадковий алгоритми виявилися менш ефективними.

Отже, отримані результати підтверджують доцільність застосування розробленого методу розміщення сенсорів із використанням генетичних механізмів, що дозволяє уникнути накладання вузлів, забезпечуючи їх оптимальний розподіл на досліджуваній площині із урахуванням радіусів дії, міжвузлової відстані як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів.

6. Розроблено програмний модуль, що являє собою спеціалізоване програмне забезпечення, призначене для моделювання та симуляційних досліджень функціонування БСМ з урахуванням динамічно змінної топології та обмеженості

енергетичних і мережевих ресурсів. Архітектура програмного модуля побудована на основі модульного принципу, що забезпечує гнучкість та масштабованість системи. Такий підхід дозволяє реалізовувати розширений функціонал та адаптувати програмне забезпечення до різних сценаріїв функціонування БСМ.

Все це у сукупності забезпечує універсальність архітектури та її придатність для симуляційних досліджень з різними умовами, метриками продуктивності та сценаріями розміщення та маршрутизації сенсорних вузлів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз аспектів застосування генетичного алгоритму у сучасних мережах", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 349, №2, с. 327-331, 2025.
2. J. J. Baun et al., "Hybrid Stochastic Genetic Evolution-Based Prediction Model of Received Input Voltage for Underground Imaging Applications," 2023 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR), Bangkok, Thailand, 2023, pp. 549-555, doi: 10.1109/ICBIR57571.2023.10147464.
3. Q. Zheng, D. Chen, F. Zhao and D. Tang, "Intelligent Dispatching Model of Power System Based on Improved Genetic Algorithm," 2023 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control (PEEEEC), Athens, Greece, 2023, pp. 993-997, doi: 10.1109/PEEEEC60561.2023.00194.
4. Q. Shang, L. Chen and R. Tong, "Hardware/Software Co-design for Evolvable Hardware by Genetic Algorithm," 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), Dalian, China, 2020, pp. 306-309, doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194828.
5. I. Jahan and M. Kumar, "Genetic Algorithm Based Neural Network Framework for Fraudulent Transaction Detection," 2023 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), Greater Noida, India, 2023, pp. 631-635, doi: 10.1109/ICCCIS60361.2023.10425407.
6. S. Kavita and S. S. K., "Metaheuristic Evolutionary Algorithms: Types, Applications, Future Directions, and Challenges," 2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), Hubli, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONIT59222.2023.10205592.
7. X. Qian and L. Liu, "An Improved Genetic Evolutionary Algorithm for Commuter Route Optimization," 2018 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES), Wuxi, China, 2018, pp. 234-237, doi: 10.1109/DCABES.2018.00067.
8. A. Anwaar, A. Ashraf, W. H. K. Bangyal and M. Iqbal, "Genetic Algorithms: Brief review on Genetic Algorithms for Global Optimization Problems," 2022 Human-

Centered Cognitive Systems (HCCS), Shanghai, China, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/HCCS55241.2022.10090327.

9. О. І. Суприган, Л. М. Ваховська, «Комбінування генетичних алгоритмів в елементах штучної нейронної мережі», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 37, вип. 1, с. 5–10, Лис 2019.

10. G. Chen and H. -X. Hu, "Finding the Optimal Network Topology for the Distributed Multi-Short-Paths Routing Algorithm – A Genetic Algorithm-Based Approach," 2022 International Conference on Intelligent Systems and Computational Intelligence (ICISCI), Changsha, China, 2022, pp. 35-38, doi: 10.1109/ICISCI53188.2022.9941373.

11. P. Pengfei, Y. Qian i C. Naotian, "Ship to Air Collaborative Communication Network Optimization Method Based on Genetic Algorithm", 2016 8-а Міжнародна конференція з інтелектуальних систем людини і машини та кібернетики (IHMSC), Ханчжоу, Китай, 2016, С. 412-415, doi: 10.1109/IHMSC.2016.114.

12. L. Zhang, M. Lampe and Z. Wang, "Topology design of industrial ethernet networks using a multi-objective genetic algorithm," 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Harbin, China, 2011, pp. 735-741, doi: 10.1109/ChinaCom.2011.6158251.

13. B. Lorenzo and S. Glisic, "Optimal Routing and Traffic Scheduling for Multihop Cellular Networks Using Genetic Algorithm," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 11, pp. 2274-2288, Nov. 2013, doi: 10.1109/TMC.2012.204.

14. H. Chen, Y. Zhou, C. Du and J. Li, "A satellite cluster data transmission scheduling method based on genetic algorithm with rote learning operator," 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Vancouver, BC, Canada, 2016, pp. 5076-5083, doi: 10.1109/CEC.2016.7748333.

15. Y. Pyrih, M. Kaidan, I. Tchaikovskiy and M. Pleskanka, "Research of Genetic Algorithms for Increasing the Efficiency of Data Routing," 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 157-160, doi: 10.1109/AIACT.2019.8847814.

16. Z. Niu and Z. Jiang, "Energy Efficiency Optimization of Super Dense Heterogeneous Network Based on Improved Genetic Algorithm," 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Vientiane, Laos, 2020, pp. 435-439, doi: 10.1109/ICITBS49701.2020.00094.
17. J. Galán-Jiménez, J. Berrocal, J. L. Herrera and M. Polverini, "Multi-Objective Genetic Algorithm for the Joint Optimization of Energy Efficiency and Rule Reduction in Software-Defined Networks," 2020 11th International Conference on Network of the Future (NoF), Bordeaux, France, 2020, pp. 33-37, doi: 10.1109/NoF50125.2020.9249089.
18. Š. Bojan and Z. Nikola, "Genetic algorithm as energy optimization method in WSN," 2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2013, pp. 97-100, doi: 10.1109/TELFOR.2013.6716181.
19. M. Elhoseny, X. Yuan, Z. Yu, C. Mao, H. K. El-Minir and A. M. Riad, "Balancing Energy Consumption in Heterogeneous Wireless Sensor Networks Using Genetic Algorithm," in IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2194-2197, Dec. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2381226.
20. A. Damia, M. Esnaashari and M. Parvizimosaed, "Adaptive Genetic Algorithm Based on Mutation and Crossover and Selection Probabilities," 2021 7th International Conference on Web Research (ICWR), Tehran, Iran, 2021, pp. 86-90, doi: 10.1109/ICWR51868.2021.9443124.
21. C. Wang, X. Liu, H. Hu, Y. Han and M. Yao, "Energy-Efficient and Load-Balanced Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Using a Chaotic Genetic Algorithm," in IEEE Access, vol. 8, pp. 158082-158096, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020158.
22. S. Doostie, T. Nakashima-Paniagua and J. Doucette, "A Novel Genetic Algorithm-Based Methodology for Large-Scale Fixed Charge Plus Routing Network Design Problem With Efficient Operators," in IEEE Access, vol. 9, pp. 114836-114853, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3104794.
23. Y. Salman, Razali, R. Azlin Razali and Ong Hang See, "Investigation of Using Parallel Genetic Algorithm for Solving the Shortest Path Routing Problem", Journal of Computer Science, 7 (2): 206-215, 2011.

24. F. Wang, Y. Man and L. Man, "Intelligent optimization approach for the k shortest paths problem based on genetic algorithm," 2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC), Xiamen, China, 2014, pp. 219-224, doi: 10.1109/ICNC.2014.6975838.
- 25 M. Elhoseny, X. Yuan, Z. Yu, C. Mao, H. K. El-Minir and A. M. Riad, "Balancing Energy Consumption in Heterogeneous Wireless Sensor Networks Using Genetic Algorithm," in IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2194-2197, Dec. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2381226.
26. Huang F, Li X, Zhang S, Zhang J. Harmonious Genetic Clustering. IEEE Trans Cybern. 2018 Jan;48(1):199-214. doi: 10.1109/TCYB.2016.2628722. Epub 2017 Jan 5. PMID: 28103198.
27. Z. Xue, "Routing Optimization of Sensor Nodes in the Internet of Things Based on Genetic Algorithm," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 22, pp. 25142-25150, 15 Nov.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3068726.
28. M. Asim, W. K. Mashwani, S. B. Belhaouari and S. Hassan, "A Novel Genetic Trajectory Planning Algorithm With Variable Population Size for Multi-UAV-Assisted Mobile Edge Computing System," in IEEE Access, vol. 9, pp. 125569-125579, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111318.
29. N. Shah, H. El-Ocla and P. Shah, "Adaptive Routing Protocol in Mobile Ad-Hoc Networks Using Genetic Algorithm," in IEEE Access, vol. 10, pp. 132949-132964, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3230991.
30. M. Moshref, R. Al-Sayyed and S. Al-Sharaeh, "An Enhanced Multi-Objective Non-Dominated Sorting Genetic Routing Algorithm for Improving the QoS in Wireless Sensor Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 149176-149195, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3122526.
31. M. Mardi and M. R. Keyvanpour, "GBKM: A New Genetic Based K-Means Clustering Algorithm," 2021 7th International Conference on Web Research (ICWR), Tehran, Iran, 2021, pp. 222-226, doi: 10.1109/ICWR51868.2021.9443113.
32. D. Arivudainambi, S. Balaji, S. Deepika and S. Swetha, "Connected coverage in wireless sensor networks using genetic algorithm," 2015 IEEE Workshop on

Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions (WCI), Kanpur, India, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCI.2015.7495508.

33. M. R. S. Baygi, M. R. Ghods and G. Veisi, "Sensor clustering and base station mobilizing in Wireless Sensor Networks using genetic algorithms," 2015 International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK), Mashhad, Iran, 2015, pp. 542-546, doi: 10.1109/ICTCK.2015.7582726.

34. A. Rodriguez, P. Falcarin and A. Ordóñez, "Energy optimization in wireless sensor networks based on genetic algorithms," 2015 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys), London, UK, 2015, pp. 470-474, doi: 10.1109/IntelliSys.2015.7361182.

35. R. N. Shukla, A. S. Chandel, S. K. Gupta, J. Jain and A. Bhansali, "GAE3BR: Genetic algorithm based energy efficient and energy balanced routing algorithm for Wireless Sensor Networks," 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Kochi, India, 2015, pp. 942-947, doi: 10.1109/ICACCI.2015.7275732.

36. C. Yin, "Research on Genetic Algorithm for Solving Optimal Path System," 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Nanchang, China, 2015, pp. 866-871, doi: 10.1109/ICMTMA.2015.214.

37. O. Zorlu, "Routing unmanned aerial vehicles as adapting to capacitated vehicle routing problem with genetic algorithms," 2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, 2015, pp. 675-679, doi: 10.1109/RAST.2015.7208428.

38. P. K. Batra and K. Kant, "An energy efficient GA based routing algorithm for two-tiered sensor networks," 2016 1st India International Conference on Information Processing (IICIP), Delhi, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICIP.2016.7975318.

39. S. Das, Barani S, S. Wagh and S. S. Sonavane, "Energy efficient and trustable routing protocol for Wireless Sensor Networks based on Genetic Algorithm (E2TRP)," 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), Pune, India, 2016, pp. 154-159, doi: 10.1109/ICACDOT.2016.7877569.

40. E. Farahmand, S. Sheikhpour, A. Mahani and N. Taheri, "Load balanced energy-aware genetic algorithm clustering in wireless sensor networks," 2016 1st Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), Bam, Iran, 2016, pp. 119-124, doi: 10.1109/CSIEC.2016.7482108.
41. S. K. Gupta, P. Kuila and P. K. Jana, "Energy efficient multipath routing for wireless sensor networks: A genetic algorithm approach," 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Jaipur, India, 2016, pp. 1735-1740, doi: 10.1109/ICACCI.2016.7732298.
42. Z. Liu, Y. Kong and B. Su, "An improved genetic algorithm based on the shortest path problem," 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Ningbo, China, 2016, pp. 328-332, doi: 10.1109/ICInfA.2016.7831845.
43. A. R. Najeeb, A. M. Aibinu, M. N. Nwohu, M. J. E. Salami and a. H. B. Salau, "Performance Analysis of Clustering Based Genetic Algorithm," 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 327-331, doi: 10.1109/ICCCE.2016.76.
44. D. N. Sotiropoulos, D. E. Pournarakis and G. M. Giaglis, "A genetic algorithm approach for topic clustering: A centroid-based encoding scheme," 2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), Chalkidiki, Greece, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/IISA.2016.7785378.
45. Yan Qingli and Chen Jianfeng, "Node placement optimization for distributed sensor network using adaptive genetic algorithm," 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Hong Kong, China, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSPCC.2016.7753692.
46. Z. Tian, "Analysis of Route Optimization Based on Genetic Algorithm," 2017 International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), Wuhan, China, 2017, pp. 112-116, doi: 10.1109/ICIICII.2017.53.
47. A. Sirbu and I. -E. Alecsandrescu, "Enhanced genetic algorithm for energy efficient dynamic ad hoc wireless sensor networks," 2017 International Symposium on

Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISSCS.2017.8034920.

48. A. Taha, S. S. Soliman and A. Badawi, "Genetic algorithms for lifetime elongation of clustered WSN," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292597.

49. B. Zhao and Z. Xiong, "Research and Application of Genetic Algorithm Based on Variable Crossover Probability," 2017 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV), Zhengzhou, China, 2017, pp. 156-159, doi: 10.1109/ICVRV.2017.00039.

50. O. Zorlu, S. Dilek and A. Özsoy, "GPU-Based Parallel Genetic Algorithm for Increasing the Coverage of WSNs," 2017 IEEE 23rd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Shenzhen, China, 2017, pp. 640-647, doi: 10.1109/ICPADS.2017.00088.

51. L. Moses and S. Karthikeyan, "A Strategic Genetic Algorithm for Resource Allocation in LTE Uplink Networks," 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, 2018, pp. 436-441, doi: 10.1109/ICCMC.2018.8488024.

52. J. Chen, D. Zhang, D. Liu and Z. Pan, "A Network Selection Algorithm Based on Improved Genetic Algorithm," 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), Chongqing, China, 2018, pp. 209-214, doi: 10.1109/ICCT.2018.8600265.

53. M. K. Tan, H. S. E. Chuo, R. K. Y. Chin, K. B. Yeo and K. T. K. Teo, "Hierarchical Multi-agent System in Traffic Network Signalization with Improved Genetic Algorithm," 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET), Kota Kinabalu, Malaysia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICAIET.2018.8638464.

54. A. Rady, N. Sabor, M. Shokair and E. -S. M. El-Rabaie, "Mobility Based Genetic Algorithm Hierarchical Routing Protocol in Mobile Wireless Sensor Networks," 2018 International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications

and Computations (JAC-ECC), Alexandria, Egypt, 2018, pp. 83-86, doi: 10.1109/JEC-ECC.2018.8679548.

55. P. Naithani, "Genetic Algorithm Based Scheduling To Reduce Energy Consumption In Cloud," 2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), Solan, India, 2018, pp. 616-620, doi: 10.1109/PDGC.2018.8745801.

56. R. Anwit and P. K. Jana, "A Variable Length Genetic Algorithm approach to Optimize Data Collection using Mobile Sink in Wireless Sensor Networks," 2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2018, pp. 73-77, doi: 10.1109/SPIN.2018.8474259.

57. C. -K. Liang and Y. -H. Lin, "A coverage optimization strategy for mobile wireless sensor networks based on genetic algorithm," 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI), Chiba, Japan, 2018, pp. 1272-1275, doi: 10.1109/ICASI.2018.8394523.

58 S. Stanković and L. Söder, "Optimal Power Flow Based on Genetic Algorithms and Clustering Techniques," 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), Dublin, Ireland, 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/PSCC.2018.8442583.

59. Y. Wang et al., "Optimizing multi-criteria k-shortest paths in graph by a natural routing genotype-based genetic algorithm," 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, China, 2018, pp. 341-345, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397739.

60. H. Wang, W. Huangfu, Y. Liu, C. Gong, Y. Ren and W. Liu, "Spatial Feature Aware Genetic Algorithm of Network Base Station Configuration for Internet of Things," 2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), Takayama, Japan, 2018, pp. 53-58, doi: 10.1109/CANDARW.2018.00018.

61. N. Lin, Y. Shi, T. Zhang and X. Wang, "An Effective Order-Aware Hybrid Genetic Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problems in Internet of Things," IEEE Access, vol. 7, pp. 86102-86114, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925831.

62. R. J. Kuo, J. -Y. Lin and T. P. Q. Nguyen, "Genetic Algorithm Based Fuzzy c-Ordered-Means to Cluster Analysis," 2019 IEEE 6th International Conference on

Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 918-922, doi: 10.1109/IEA.2019.8714907.

63. N. M. H. Robbi, I. W. Mustika and W. Widyawan, "A Modified Genetic Algorithm for Resource Allocation in Cognitive Radio Networks in the Presence of Primary Users," 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 2019, pp. 19-23, doi: 10.1109/ISITIA.2019.8937229.

64. S. H. Sackey, J. Chen, A. J. Henry and X. Zhang, "A Clustering Approach Based on Genetic Algorithm for Wireless Sensor Network Localization," 2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Macao, China, 2019, pp. 54-58, doi: 10.1109/CIS.2019.00020.

65. W. Sun, W. Xie and J. He, "Data link network resource allocation method based on genetic algorithm," 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 1875-1880, doi: 10.1109/ITNEC.2019.8729348.

66. T. Zhang and J. Lin, "A Genetic Algorithm Design Based on Self-Organizing Dynamic Network," 2019 Chinese Control Conference (CCC), Guangzhou, China, 2019, pp. 1039-1044, doi: 10.23919/ChiCC.2019.8865566.

67. S. Lu, X. Zhang, Y. Zhou and S. Sun, "A Hybrid Genetic Algorithm for Sustainable Wireless Coverage of Drone Networks," 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/CEC48606.2020.9185862.

68. M. Gao, Y. Liu and P. Wei, "Opposite and Chaos Searching Genetic Algorithm Based for UAV Path Planning," 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2020, pp. 2364-2369, doi: 10.1109/ICCC51575.2020.9345125.

69. W. Tao, S. Yan, F. Pan and G. Li, "AUV Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm," 2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), Dalian, China, 2020, pp. 195-199, doi: 10.1109/CACRE50138.2020.9230339.

70. M. Khan, "Steganography: A Secure way for Transmission in Wireless Sensor Networks," Computer Science – Multimedia, 2015, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08865>.

71. Ю.М. Бойко, В.М. Локазюк, В.В. Мішан, "Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж", Вісник Хмельницького національного університету «Технічні науки», №2, 2010, с. 94-98.

72. A.R. Muhammad, X. Huang, D. Sharma and H. Cui, "Wireless Sensor Network: Characteristics and Architectures", International Journal of Information and Communication Engineering, 6 (12), 2012, p. 1398-1401.

73. B. Bhuyan, H.K. Sarma, N. Sarma, A. Kar, and R. Mall, "Quality of Service (QoS) Provisions in Wireless Sensor Networks and Related Challenges, "Wirel. Sens. Netw., 2, 2010, p. 861-868.96

74. G. Horvat, D. Zagar and D. Vinko, "Influence of node deployment parameters on QoS in large-scale WSN," 2014 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2014, pp. 202-205, doi: 10.1109/MECO.2014.6862694.

75. S. A. Abdulhussien and S. K. Ibrahim, "Effects of Wireless Sensor Network Topology on Response Time," 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179353.

76. Ю.В. Ковальова, "Моделювання топології бездротових сенсорних мереж," Системні технології, 1(132), 2021, с. 92-98.

77. Інформаційна безпека в середовищі безпроводових сенсорних мереж: монографія / Александер М.Б., Балабан С.М., Карпінський М.П., Райба С.А., Чиж В.М. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016, 160 с.

78. N. Heydarishahreza, S. Ebadollahi, R. Vahidnia та FJ Dian, "Wireless Sensor Networks Fundamentals: A Review", 2020 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, 2020, pp 1-7, doi: 10.1109/IEMCON51383.2020.9284873.

79. Т.С. Стрела, А.В. Жук, А.В. Романюк, "Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах, " Збірник наукових праць ВІТІ, № 4, 2017, с. 129-143.

80. M.S. Thekiya, M.D. Nikose, Role of Routing Techniques in Wireless Sensor Networks – A Survey. In: Majhi, S., Prado, R.P.d., Dasanapura Nanjundaiah, C. (eds) Distributed Computing and Optimization Techniques. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 903. Springer, Singapore, 2022, https://doi.org/10.1007/978-981-19-2281-7_70.

81. R. R. Ema, A. Anik, N. Nahar, M. A. Rahman, K. P. Eti and T. Islam, "Simulation Based Performance Analysis of Proactive, Reactive and Hybrid Routing Protocols in Wireless Sensor Network," 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kharagpur, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225672.

82. F. Arat and S. Demirci, "Energy and QoS Aware Analysis and Classification of Routing Protocols for IoT and WSN," 2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Antalya, Turkey, 2020, pp. 221-225, doi: 10.1109/ICEEE49618.2020.9102614.

83. F. S. Mukti, J. E. Lorenzo, R. Zuhdianto, A. Junikhah, A. Soetedjo and A. U. Krismanto, "A Comprehensive Performance Evaluation of Proactive, Reactive and Hybrid Routing in Wireless Sensor Network for Real Time Monitoring System," 2021 International Conference on Computer Science and Engineering (IC2SE), Padang, Indonesia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IC2SE52832.2021.9791992.

84. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 351, №3.1, с. 410-414, 2025.

85. T. Sabbah, "Enhanced Genetic Algorithm for Optimized Classification," 2020 International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET), Jerusalem, Palestine, 2020, pp. 161-166, doi: 10.1109/ICPET51420.2020.00039.

86. Я. Пиріг, М. Климаш, Ю. Пиріг, О. Лаврів, "Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2023, №3(2), с. 95-107.

87. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Investigating the Efficiency of Tournament Selection Operator in Genetic Algorithm for Solving TSP," 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 170-173, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452423.

88. Y. Pyrih, A. Masiuk, Yu. Pyrih, O. Urikova, "Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem," In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024, vol 1198. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_24. (Scopus Q3)

89. Я. Пиріг, "Пошук маршруту передачі даних у безпроводній сенсорній мережі із використанням генетичного алгоритму," Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, вип. 4, №2, с. 72-81.

90. A. Shukla, H. M. Pandey and D. Mehrotra, "Comparative review of selection techniques in genetic algorithm," 2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE), Greater Noida, India, 2015, pp. 515-519, doi: 10.1109/ABLAZE.2015.7154916.

91. М.М. Глибовець, Еволюційні алгоритми: підручник / М. М. Глибовець, Н. М. Гулаєва. – Київ: НаУКМА, 2013. – 828 с.

92. E. Wirsansky, Hands-On Genetic Algorithms with Python: Applying Genetic Algorithms to Solve Real-World Deep Learning and Artificial Intelligence Problems. Packt Publishing, 2020, 346 p. ISBN: 978-1838557744.

93. K. Y. Kok, P. Rajendran, R. Rainis and W. M. Muhiyuddin Wan Ibrahim, "Investigation on selection schemes and population sizes for genetic algorithm in unmanned aerial vehicle path planning," 2015 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), Langkawi, Malaysia, 2015, pp. 6-10, doi: 10.1109/ISTMET.2015.7358990.

94. A. Cervantes-Castillo, E. Mezura-Montes and C. A. C. Coello, "An empirical comparison of two crossover operators in real-coded genetic algorithms for constrained numerical optimization problems," 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ROPEC.2014.7036347.
95. R. Pinho and F. Saraiva, "A Comparison of Crossover Operators in Genetic Algorithms for Switch Allocation Problem in Power Distribution Systems," 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/CEC48606.2020.9185795.
96. N.-E. Croitoru, "High Probability Mutation and Error Thresholds in Genetic Algorithms," 2015 17th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC), Timisoara, Romania, 2015, pp. 271-276, doi: 10.1109/SYNASC.2015.51.
97. M. Rares, "Adaptive mutation in genetic algorithms for shortest path routing problem," 2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Bucharest, Romania, 2015, pp. S-69-S-74, doi: 10.1109/ECAI.2015.7301163.
98. S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak and M. B. Srivastava, "Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks," Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat.No.01CH37213), Anchorage, AK, USA, 2001, pp. 1380-1387 vol.3, doi: 10.1109/INFCOM.2001.916633.
99. A. Konstantinidis, K. Yang and Q. Zhang, "An Evolutionary Algorithm to a Multi-Objective Deployment and Power Assignment Problem in Wireless Sensor Networks," IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, LA, USA, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.98.
100. A. Konstantinidis, K. Yang, H.-H. Chen, Q. Zhang, "Energy-aware topology control for wireless sensor networks using memetic algorithms, " Computer

Communications, vol. 30, is. 14–15, 2007, pp. 2753-2764, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.05.013>.

101. A. Sharma, S. Chauhan, "A distributed reinforcement learning based sensor node scheduling algorithm for coverage and connectivity maintenance in wireless sensor network, " *Wireless Netw* 26, 2020, pp. 4411–4429, <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02350-y>.

102. S.K. Gupta, P. Kuila, P.K. Jana, "Genetic Algorithm for k-Connected Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks, " *Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol 379. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2517-1_69.

103. I. Gravalos, P. Kokkinos and E. A. Varvarigos, "Multi-criteria cooperative energy-aware routing in wireless ad-hoc networks," 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy, 2013, pp. 387-393, doi: 10.1109/IWCMC.2013.6583590.

104. Q. Guo, V. Semenets, V. Bezruk, M. Kaliuzhnyi, Y. Zheng, "Methods for multicriterial selection of optimal routes in communication networks, " *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, pp. 52–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176783>.

105. S. AlQahtani, A. Alotaibi, "A route stability-based multipath QoS routing protocol in cognitive radio ad hoc networks, " *Wireless Netw* 25, 2019, pp. 2931–2951, <https://doi.org/10.1007/s11276-019-02014-6>.

106. S. S. Bhunia, S. Roy and N. Mukherjee, "Adaptive learning assisted routing in Wireless Sensor Network using Multi Criteria Decision model," 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Delhi, India, 2014, pp. 2149-2154, doi: 10.1109/ICACCI.2014.6968354.

107. H. Fouad El, L. Cherkaoui, D. Khadija, "Adaptive Routing Protocol for Lifetime Maximization in Multi-Constraint Wireless Sensor Networks, " *Journal of Communications and Information Networks*, 2018, 3(1): 67-83 <https://doi.org/10.1007/s41650-018-0008-3>.

108. Y. H. Suh, K. T. Kim, D. R. Shin and H. Y. Youn, "Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor Network," 2015 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.
109. K. Khan, W. Goodridge, "Fault Tolerant Multi-Criteria Multi-Path Routing in Wireless Sensor Networks", International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA), vol.7, no.6, pp.55-63, 2015. DOI:10.5815/ijisa.2015.06.06.
110. Z. Rehana, S. Roy and N. Mukherjee, "Efficient data forwarding techniques in Wireless Sensor Networks," 2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC), Ghaziabad, India, 2013, pp. 449-457, doi: 10.1109/IAdCC.2013.6514268.
111. N. Sahli, N. Jabeur, I. M. Khan and M. Badra, "Towards a Generic Framework for Wireless Sensor Network Multi-Criteria Routing," 2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), Istanbul, Turkey, 2012, pp. 1 -6, doi: 10.1109/NTMS.2012.6208737.
112. Т.А. Царенко, А.Р. Карапетян, К.В. Колесніков, "Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних," Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 2015, 1(56), с. 44–50.
113. J. Mishra, J. Bagga, S. Choubey and I. K. Gupta, "Energy optimized routing for wireless sensor network using elitist genetic algorithm," Proceedings of the 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCNT.2017.8204110.
114. S. Biswas, S. Biswas, S. Zafar and M. A. Ahad, "Genetic Algorithm Based Optimized Routing Methodology through Big Data Analytics in MANET," Proceedings of the 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), New Delhi, India, 2019, pp. 645-649.
115. A. Hassanat, K. Almohammadi, E. Alkafaween, E. Abunawas, A. Hammouri, V.B.S. Prasath, "Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms – A Review with a New Dynamic Approach," Information. 2019; 10(12):390. <https://doi.org/10.3390/info10120390>.

116. M. Rares, "Adaptive mutation in genetic algorithms for shortest path routing problem," Proceedings of the 2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Bucharest, Romania, 2015, pp. 69-74, doi: 10.1109/ECAI.2015.7301163.

117. K. Almakadmeh and W. Alma'aitah, "Comparison of Crossover Types to Build Improved Queries Using Adaptive Genetic Algorithm," Proceedings of the 2017 International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS), Amman, Jordan, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICTCS.2017.18.

118. V. Filipovic, "Fine-Grained Tournament Selection Operator in Genetic Algorithms," Computing and Informatics, Vol. 22, No. 2, 2003, pp. 143-161.

119. Gen, M.; Runwei, C. Genetic Algorithms and Engineering Optimization; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2000.

120. O. Abdoun, J. Abouchabaka, "A Comparative Study of Adaptive Crossover Operators for Genetic Algorithms to Resolve the Traveling Salesman Problem", International Journal of Computer Applications, Volume 31, No.11, October 2011.

121. Я. Пиріг, "Оцінка обчислювальної складності генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, № 4 (1), с. 52-60.

122. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, O. Hordiichuk-Bublivska and L. Nodzhak, "Investigating the Computational Complexity of the Genetic Algorithm with Variations in Population Size and the Number of Generations," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755729.

123. A. Lissovoi, P.S. Oliveto, "On the time and space complexity of genetic programming for evolving Boolean conjunctions," Journal of Artificial Intelligence Research, 2019, pp. 655-689. <https://doi.org/10.1613/jair.1.11821>.

124. G. Durrett, F. Neumann, U.M. O'Reilly, "Computational complexity analysis of simple genetic programming on two problems modeling isolated program semantics," Proceedings of the Foundations of Genetic Algorithms workshop (FOGA 2011), 2011, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1145/1967654.196766>.

125. P.S. Oliveto, J. He, X. Yao, "Time complexity of evolutionary algorithms for combinatorial optimization: A decade of results," *International Journal of Automation and Computing*, 2017, 4 (3), pp. 281–293.
126. H. Crosby, T. Damoulas, T., S.A. Jarvis, "Embedding road networks and travel time into distance metrics for urban modelling, " *International Journal of Geographical Information Science*, 33(3), pp.512–536, 2018, <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1547386>.
127. H.S. Ranjitkar, S. Karki, "Comparison of A*, Euclidean and Manhattan distance using Influence map in MS. Pac-Man, " Sweden, 2016, 61 p. <https://core.ac.uk/outputs/36367709/>.
128. S. A. Salihu, I. P. Onyekwere, M. A. Mabayoje, H. A. Mojeed, "Performance Evaluation of Manhattan and Euclidean Distance Measures For Clustering Based Automatic Text Summarization", *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 135-139, <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v4i1.316>.
129. A. Muhammad et al., "Distance Measurements Method for The Demite Pronunciation Assessment," 2018 IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Bandung, Indonesia, 2018, pp. 189-194, doi: 10.1109/ICSEngT.2018.8606375.
130. Y. Pyrih, Yu. Pyrih, T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Klymash, "Genetic Algorithm based Routing in Wireless Sensor Networks with Various Distance Metrics", *International Journal of Computing*, 23(4), 715-725. <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3774>. (Scopus Q3)
131. Pyrih, Y., Klymash, M., Pyrih, Y., Hordiichuk-Bublivska, O. (2025). Genetic Algorithm for Routing in Sensor Networks with Dynamic Topology. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Gütter, D. (eds) *Networks and Sustainability. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1473. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_30
132. Okdem and D. Karaboga, "Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization (ACO) Router Chip," *Sensors*, vol. 9, no. 2, pp. 909–921, 2009, doi: 10.3390/s90200909.

133. С. Д. Штовба, О.М. Рудий, "Мурашині алгоритми оптимізації", Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2004, № 4, с. 62-69.
134. М.М. Маляр, Моделі і методи багатокритеріального обмежено-раціонального вибору: Монографія. – Ужгород: РА "АУТДОР-ШАРК", 2016, 222 с.
135. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Багатокритеріальний підхід на основі генетичної еволюції для пошуку оптимального маршруту передачі даних у безпроводних сенсорних мережах", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2024, вип. 3, с. 88–94.
136. Raja Basha, A. A Review on Wireless Sensor Networks: Routing. Wireless Pers Commun 125, 897–937 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09583-4>.
137. K. Gulati, R. S. Kumar Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, G. Saravanan, "A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT)," Materials Today: Proceedings, volume 51, part 1, 2022, pp. 161-165, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.067>.
138. H. Khujamatov, M. Pitchai, A. Shamsiev, A. Mukhamadiyev, J. Cho, "Clustered Routing Using Chaotic Genetic Algorithm with Grey Wolf Optimization to Enhance Energy Efficiency in Sensor Networks, " Sensors. 2024; 24(13):4406. <https://doi.org/10.3390/s24134406>.
139. B. Das, S. S. Bhunia, S. Roy and N. Mukherjee, "Multi criteria routing in wireless sensor network using weighted product model and relative rating," 2015 Applications and Innovations in Mobile Computing (AIMoC), Kolkata, India, 2015, pp. 132-136, doi: 10.1109/AIMOC.2015.7083841.
140. B. -S. Kim, B. Suh, K. -I. Kim, I. J. Seo, H. B. Lee and J. S. Gong, "An Enhanced Tree Routing through Multi-criteria Decision Making over Wireless Sensor Networks," 2022 IEEE 19th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS), Denver, CO, USA, 2022, pp. 570-576, doi: 10.1109/MASS56207.2022.00085.
141. Y. H. Suh, K. T. Kim, D. R. Shin and H. Y. Youn, "Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor

Network," 2015 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.

142. N. Anand, R. Ranjan, B. Shamantha Rai, S. Varma, "Improved Coverage of Node Placement using Greedy Approach on Scent Marking of Territorial Predator," International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD), vol. 5, no. 1, pp. 264–270, 2018.

143. N. Anand, R. Ranjan, B. S. Rai, and S. Varma, "A novel computational geometry-based node deployment scheme in 3D wireless sensor network," International Journal of Sensor Networks (IJSNET), vol. 25, no. 3, pp. 135–145, 2017, doi: 10.1504/IJSNET.2017.087708.

144. G. Zhi-yan and W. Jian-zhen, "Research on coverage and connectivity for heterogeneous wireless sensor network," 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Melbourne, VIC, Australia, 2012, pp. 1239-1242, doi: 10.1109/ICCSE.2012.6295289.

145. W. Wu, Z. Zhang, W. Lee, D.-Z. Du, Optimal Coverage in Wireless Sensor Networks, Springer Nature Switzerland AG 2020, 297p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52824-9>.

146. B. Liu, P. Brass, O. Dousse, "Mobility improves coverage of sensor networks," Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc'05, Urbana-Champaign, IL, 2005.

147. M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, Y. Pyrih, Yu. Pyrih, "Method for Estimating the Topological Structure of Self-Organized Networks," 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 14-17, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076498.

148. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод еволюційної оптимізації структури безпроводної сенсорної мережі", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, вип. №3, с.71-75, 2025.

149. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 341, №5, с. 87-91, 2024.

150. Z. Zhuang, Y. Weng, Y.Min Xie, C. Wang, X. Zhang, S. Zhou, "A node moving-based structural topology optimization method in the body-fitted mesh", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 419, 2024, 116663, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116663>.

151. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Дослідження розміщення сенсорних вузлів на площині на основі генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2025, №5(1), с. 82-88.

152. M. S. Kukade and K. N. Hande, "Analysis of Uniform Distribution of Storage Nodes in Wireless Sensor Network," International Journal of Computer Sciences and Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 43–47, 2014.

153. J. K. Tiwari and N. Bhardwaj, "Improved coverage of node placement using greedy approach on scent marking of territorial predator," International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD), vol. 5, no. 1, pp. 264–270, 2018.

154. N. Anand, R. Ranjan, B. S. Rai, and S. Varma, "A novel computational geometry-based node deployment scheme in 3D wireless sensor network," International Journal of Sensor Networks, vol. 25, no. 3, pp. 135–145, 2017, doi: 10.1504/IJSNET.2017.087708.

Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор

ТОВ «МаксіТех»

Сергій ЗАБЛОЦЬКИЙ

2025 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Пирога Ярослава Романовича

**«Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж
на основі генетичного алгоритму»**

Даний акт складений про те, що у ТОВ «МаксіТех» для модернізації наявних сенсорних систем шляхом оптимізації просторового розміщення вузлів при інтеграції нових елементів та забезпечення стабільності маршрутизації використано результати дисертаційної роботи Пирога Я.Р. «Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж на основі генетичного алгоритму», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме:

– метод просторового розміщення сенсорних вузлів на основі удосконаленого генетичного алгоритму, що дозволило суттєво мінімізувати надлишкове перекриття, підвищити точність планування топології та оптимізувати використання сенсорних вузлів.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТОВ «МаксіТех», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

Інженер ТОВ «МаксіТех»

Людмила МАТІШИН



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

Львівської філії АТ «Укртелеком»

Тарас АНДРУХІВ

2025 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Пирога Ярослава Романовича

**«Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж
на основі генетичного алгоритму»**

Цей акт підтверджує, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Пирога Ярослава Романовича були використані та впроваджені в практичну діяльність для підвищення якості та стійкості роботи телекомунікаційної інфраструктури.

Використання багатокритеріального методу маршрутизації на основі еволюційного механізму пошуку шляху з урахуванням таких критеріїв як Евклідова відстань, рівень заряду батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримка передачі даних та вхідний/вихідний ступінь вузла, дозволило підвищити енергоефективність роботи мережевого обладнання та якість обслуговування абонентів Львівської філії АТ «Укртелеком», зокрема у пікові періоди навантаження.

Члени комісії:

Начальник регіонального центру
ядра мережі ЛФ АТ «Укртелеком»

Роман МАЧИНСЬКИЙ

Начальник відділу правового забезпечення
ЛФ АТ «Укртелеком»

Наталія ФІЛЯРОВСЬКА



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор
Національного університету
"Львівська політехніка"

Володимир ЖЕЖУХА

" 11 " 2025 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів
дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Пирога Ярослава Романовича

Цей акт складений комісією у складі завідувача кафедри ІКТ, д.т.н., проф. Михайла КЛИМАША, д.т.н., доц., професора кафедри ІКТ Тараса МАКСИМЮКА, д.т.н., доц., професора кафедри ІКТ Миколи БЕШЛЕЯ, к.т.н., доц., доцента кафедри ІКТ Мар'яна СЕЛЮЧЕНКА, про те, що результати дисертаційної роботи Пирога Ярослава Романовича на тему «Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж на основі генетичного алгоритму», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, використовуються у навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час викладання дисципліни «Архітектура інформаційно-комунікаційних мереж» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка». Зокрема, модернізовано лекцію «Основи безпроводних сенсорних мереж» та лабораторну роботу «Оцінка впливу мобільності вузлів на роботу безпроводної сенсорної мережі», де використано запропонований у роботі метод просторового розміщення сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму, що дало змогу здійснити покриття цільової території при мінімізації перекриття зон дії вузлів та уникненні надмірних витрат мережевих ресурсів.

Також матеріали дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес під час викладання навчальної дисципліни «Технології машинного навчання та штучного інтелекту» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». Зокрема, модернізовано лекцію «Методи оптимізації на основі штучного інтелекту» та лабораторну роботу «Адаптивна маршрутизація у безпроводних сенсорних мережах на основі генетичного алгоритму», де використано модифікований генетичний алгоритм для формування маршруту за критерієм мінімальної довжини, що дозволило забезпечити його адаптацію при зміні топології, забезпечуючи стабільність функціонування мережі.

Голова комісії:
завідувач кафедри ІКТ, д.т.н., проф.

Михайло КЛИМАШ

Члени комісії:

професор кафедри ІКТ, д.т.н., доц.

Тарас МАКСИМЮК

професор кафедри ІКТ, д.т.н., доц.

Микола БЕШЛЕЙ

доцент кафедри ІКТ, к.т.н., доц.

Мар'ян СЕЛЮЧЕНКО



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Пирога Ярослава Романовича
«Підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж на основі
генетичного алгоритму»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 –
Телекомунікації та радіотехніка

Комісія у складі голови – начальника науково-дослідної частини, д.т.н., ст. докл. Небесного Р.В. та членів: завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В., заст. начальника планово-фінансового відділу Бакай Т.Г., завідувача кафедри інформаційно-комунікаційних технологій, д.т.н., проф. Климаша М.М., цим актом підтверджують, що окремі результати дисертаційної роботи Пирога Я.Р. виконано в межах:

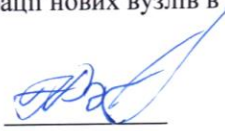
- держбюджетних науково-дослідних роботах:
 - «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості» (№ держреєстрації 0122U000817; 2022-2024 рр.);
 - «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України» (№ держреєстрації 0123U100232; 2023-2025 рр.);
 - «Розробка методів і засобів побудови мобільних кіберфізичних систем із штучним інтелектом для соціальних, безпекових та оборонних завдань» (№ держреєстрації 0125U000645) (2025-2027 рр.);
- у госпдоговірній роботі «Розробка модуля моніторингу інформаційних сервісів для розподілених інфокомунікаційних систем» (ГД №0726 Н-109; 2025 р.),
зокрема Пиріг Ярослав Романович розробив:
 - метод формування маршруту між сенсорними вузлами за критерієм мінімальної довжини, що дозволяє автоматично перебудовувати маршрут при зміні топології та вибирати найкоротший, забезпечуючи стабільність функціонування мережі;
 - багатокритеріальний метод маршрутизації із використанням еволюційного механізму пошуку маршруту, що дозволяє визначити оптимальний маршрут та множину резервних маршрутів в умовах обмежених мережевих ресурсів та динамічно змінної сенсорної топології;

- метод просторового розміщення сенсорних вузлів на площині, що дозволяє мінімізувати надлишкове перекриття із урахуванням різних радіусів дії як при створенні нової мережі, так і при інтеграції нових вузлів в існуючу топологію.

Голова комісії,

начальник науково-дослідної частини

д.т.н., ст. досл.



Роман НЕБЕСНИЙ

Члени комісії:

зав. відділу науково-організаційного
супроводу наукових досліджень, к.т.н.



Галина ЛАЗЬКО

заст. нач. планово-фінансового відділу



Тетяна БАКАЙ

зав. каф. інформаційно-комунікаційних
технологій, д.т.н., проф.



Михайло КЛИМАШ

Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Я. Пиріг, М. Климаш, Ю. Пиріг, О. Лаврів, "Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2023, №3(2), с. 95-107.

2. Я. Пиріг, "Оцінка обчислювальної складності генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, № 4 (1), с. 52-60.

3. Y. Pyrih, A. Masiuk, Yu. Pyrih, O. Urikova, "Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem, " In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024, vol 1198. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_24. (Scopus Q3)

4. Я. Пиріг, "Пошук маршруту у безпроводній сенсорній мережі із використанням генетичного алгоритму," Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2024, вип. 4, №2, с. 72-81.

5. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Багатокритеріальний підхід на основі генетичної еволюції для пошуку оптимального маршруту передачі даних у безпроводних сенсорних мережах", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, вип. 3, с. 88–94, 2024.

6. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 341, №5, с. 87-91, 2024.

7. Y. Pyrih, Yu. Pyrih, T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Klymash, "Genetic Algorithm based Routing in Wireless Sensor Networks with Various Distance Metrics", International Journal of Computing, 23(4), 715-725. (Scopus Q3)

8. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Дослідження розміщення сенсорних вузлів на площині на основі генетичного алгоритму", Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2025, №5(1), с. 82-88.

9. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз аспектів застосування генетичного алгоритму у сучасних мережах", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 349, №2, с. 327-331, 2025.

10. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Аналіз стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, том 351, №3.1, с. 410-414, 2025.

11. Я. Пиріг, Ю. Пиріг, "Метод еволюційної оптимізації структури безпроводної сенсорної мережі", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, вип. №3, с.71-75, 2025.

12. Y. Pyrih, M. Klymash, Yu. Pyrih, O. Hordiichuk-Bublivska, "Genetic Algorithm for Routing in Sensor Networks with Dynamic Topology", In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Gütter, D. (eds) Networks and Sustainability. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2025, vol 1473. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_30.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, Y. Pyrih, Yu. Pyrih, "Method for Estimating the Topological Structure of Self-Organized Networks," 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 14-17. (Scopus)

14. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Investigating the Efficiency of Tournament Selection Operator in Genetic Algorithm for Solving TSP," 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 170-173, doi: 10.1109/AICT61584.2023.10452423. (Scopus)

15. Y. Pyrih, M. Klymash, M. Kaidan, O. Hordiichuk-Bublivska and L. Nodzhak, "Investigating the Computational Complexity of the Genetic Algorithm with Variations in Population Size and the Number of Generations," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755729. (Scopus)