

ПИРІГ Ярослав

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-2104-8439>

e-mail: [yaroslavpyrih@gmail.com](mailto:yaroslavpyrih@gmail.com)

ПИРІГ Юлія

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-8973-4005>

e-mail: [yuliia.v.klymash@lpnu.ua](mailto:yuliia.v.klymash@lpnu.ua)

## МЕТОД ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У межах цієї роботи розглядається задача структурної оптимізації топології БСМ, яка полягає у визначенні координат сенсорних вузлів таким чином, щоб забезпечити максимальне покриття контрольованої області при заданій кількості вузлів; уникнути надмірного перекриття зон дії сенсорів; дотримуватись обмеження на мінімальну міжвузлову відстань, що дозволяє уникнути злиття зон покриття. Представлено блок-схему пропонуваного генетичного алгоритму для оптимізації структури безпроводних мережевих вузлів при їх випадковому розміщенні. Здійснено ряд імітаційних експериментів із розміщення вузлів при різних значеннях радіусу дії (20 м, 30 м, 40 м), змінюючи обмеження на мінімальну міжвузлову відстань. Отримані результати показують, що при збільшенні кількості поколінь алгоритм демонструє покращення ефективності роботи, що відображається зменшенням накладання зон вузлів.

Ключові слова: структура мережі, генетичний алгоритм, сенсорний вузол, міжвузлова відстань.

PYRIH Yaroslav, PYRIH Yuliia

Lviv Polytechnic National University

## EVOLUTIONARY OPTIMISATION METHOD FOR THE STRUCTURE OF A WIRELESS SENSOR NETWORK

The paper focuses on the evolutionary optimisation of wireless sensor network (WSN) topology using a genetic algorithm (GA) as the main computational tool. The research addresses the critical problem of sensor node placement within a monitored area, which directly impacts coverage efficiency, energy consumption, and overall network resilience. The optimisation task is formulated as a structural problem that aims to determine node coordinates to achieve maximum coverage with a limited number of nodes, avoid redundant overlaps of sensing zones, and comply with minimum inter-node distance constraints to prevent coverage merging. To this end, the authors propose a GA-based approach that incorporates adaptive crossover and mutation probabilities, enabling the algorithm to escape premature convergence and to explore the solution space more effectively.

A block diagram of the proposed method is presented, detailing the algorithmic stages of initial population generation, fitness evaluation, selection, crossover, and mutation. The fitness function is designed to minimise the overlap of coverage areas while maximising spatial distribution uniformity. The method was validated through a series of simulation experiments under conditions of random node deployment with varying sensing radii (20 m, 30 m, and 40 m) and different minimum inter-node distance thresholds. Visualisations of intermediate and final optimisation stages are provided, demonstrating how the algorithm progressively improves deployment quality with increasing generations. The results show that the proposed method effectively reduces redundant coverage and enhances network structure adaptability. The global optimum was achieved at generation  $G=117$ , yielding a balanced deployment of nodes across the target area.

The experimental findings highlight the effectiveness of evolutionary approaches for WSN design, showing that the GA can provide near-optimal solutions in complex and large-scale environments where traditional analytical or brute-force methods fail. Furthermore, the adaptability of the algorithm makes it suitable for dynamic scenarios requiring rapid deployment with limited prior knowledge of terrain or application-specific constraints. The study also emphasises the potential integration of the proposed method with other evolutionary paradigms, such as particle swarm optimisation and differential evolution, to further improve accuracy and convergence speed.

In conclusion, the work demonstrates that GA-based optimisation of WSN topology is a promising tool for achieving efficient coverage, reducing energy waste, and ensuring the reliability of sensor networks. Future research directions include hybridisation with other metaheuristics, real-world deployment testing, and applications in large-scale Internet of Things (IoT) systems where adaptive and scalable network design is essential.

Keywords: network structure, genetic algorithm, sensor node, inter-node distance.

Стаття надійшла до редакції / Received 29.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 19.08.2025

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Одним із основних викликів при проектуванні безпроводних сенсорних мереж (БСМ) є забезпечення ефективного просторового розміщення сенсорних вузлів, яке дозволяє досягти максимального покриття території при мінімальних витратах енергоресурсів та зниженні надмірності структури мережі. Зважаючи на

складність і багатокритеріальність задачі оптимального розміщення вузлів, традиційні методи (аналітичні або ж прямого перебору) часто виявляються недостатньо ефективними, особливо для великих і динамічних середовищ. У зв'язку з цим усе більшої популярності набувають еволюційні підходи, зокрема генетичні алгоритми (ГА), які дозволяють знаходити наближено оптимальні рішення у складних дискретних просторах за розумний обсяг обчислювальних ресурсів [1,2].

Генетичні алгоритми імітують процес природного добору, використовуючи генетичні оператори для поступового покращення рішень на основі фітнес функції (пристосованості). Таким чином, еволюційна оптимізація відкриває нові можливості для проєктування більш адаптивних і ефективних сенсорних систем [3, 4], що в свою чергу обумовлює актуальність відповідного дослідження.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Сценарій випадкового розташування сенсорних вузлів у безпроводній сенсорній мережі (БСМ) зазвичай застосовується в ситуаціях, коли необхідно забезпечити швидке розгортання мережевої інфраструктури з мінімальними ресурсними витратами на її проєктування та конфігурацію. У такому підході вузли встановлюються без дотримання чіткої схеми – їх координати визначаються випадковим чином у межах заданої географічної області. Однак подібне неконтрольоване розміщення часто спричиняє нерівномірне покриття сенсорного поля та погіршення топологічної зв'язності окремих вузлів. Унаслідок цього можуть виникати труднощі в організації ефективної маршрутизації, що негативно впливає на загальну стійкість і надійність функціонування мережі [5, 6]. Для усунення такого негативного впливу пропонується застосувати розроблений метод, алгоритм роботи якого наведено на рис. 1.

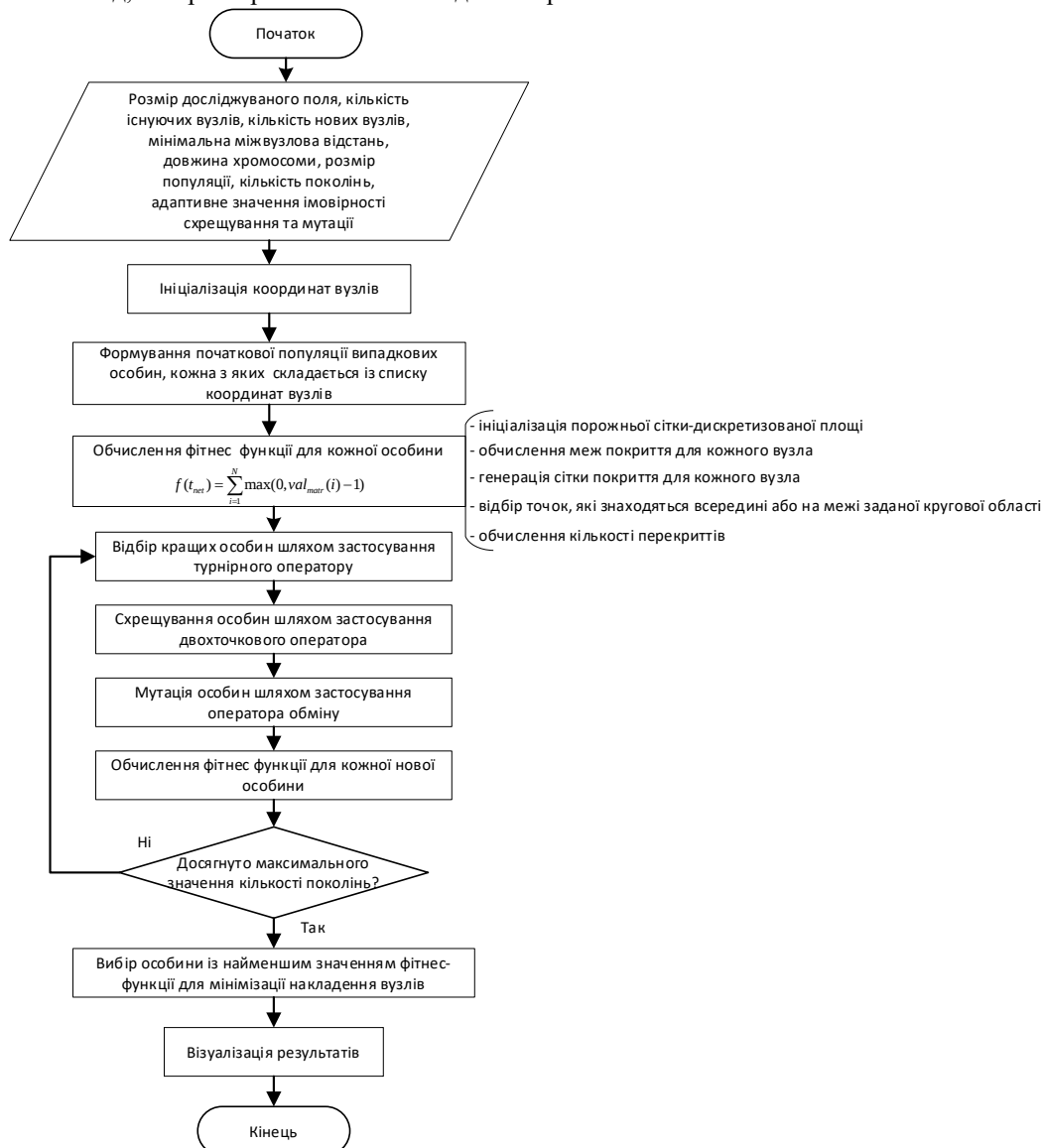


Рис. 1. Розроблений алгоритм оптимізації розташування мережевих вузлів

На етапі вхідних даних задаються необхідні параметри. Далі випадковим чином задаються координати розміщення СВ. Після цього формується початкова популяція хромосом, де кожна особина представлена у вигляді впорядкованого набору координат, які відповідають розташуванню вузлів у межах досліджуваної області. Таким чином, кожна хромосома в популяції представляє можливу конфігурацію мережевої структури [7]. Оцінювання ефективності кожної особини проводиться шляхом обчислення фітнес-функції, яка аналізує рівень заповненості окремих квадратів у досліджуваній зоні [8, 9]. Для цього підраховується кількість вузлів у кожному квадраті шляхом підсумовування двох матриць: однієї – для вже наявних вузлів, та іншої – для нових, що пропонуються даною хромосомою.

У матриці існуючих вузлів значення елементів обмежуються 0 і 1: 1 означає наявність вузла в квадраті, 0 – його відсутність. У матриці нових вузлів значення можуть варіюватися від 0 до певного максимального значення, яке відповідає кількості вузлів, що можуть одночасно перебувати в одному квадраті. Якщо в результаті обчислень виявляється більше одного вузла в окремій області, застосовується збільшення значення шляхом додавання одиниці.

Таким чином, ГА орієнтується на пошук таких рішень, які зменшують кількість перевантажених квадратів, сприяючи рівномірному просторовому розподілу вузлів [10]. Такий підхід є критично важливим для забезпечення ефективного покриття території та стабільної роботи БСМ.

Здійснено дослідження розміщення сенсорних вузлів при різних радіусах їх дії: 20, 30 та 40 м, при цьому відповідно змінювалось обмеження на мінімальну міжвузлову відстань на  $\pm 2$  м.

На рис. 2 представлено візуалізацію розподілу СВ на етапі проміжної оптимізації при мінімальній міжвузловій відстані 8, 10 та 12 м для таких радіусів дії вузла як 20, 30 та 40 м відповідно.

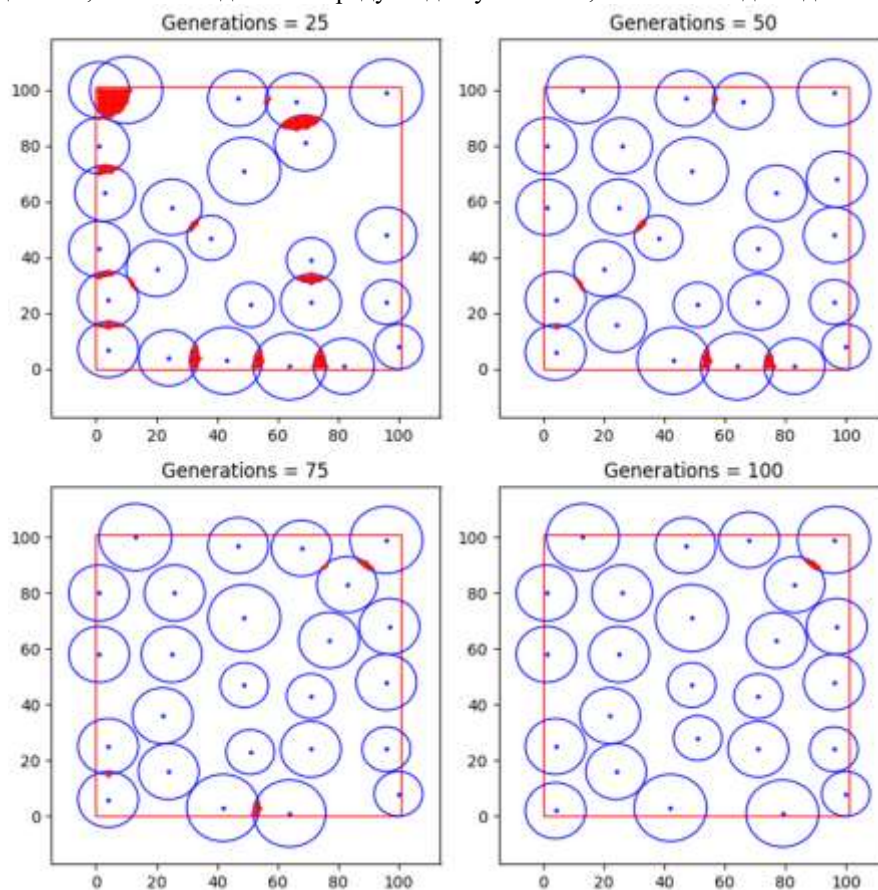


Рис. 2. Проміжні результати при обмеженні мінімальної міжвузлової відстані 8, 10 та 12 м

Наведені результати (рис. 2) показують, що при збільшенні кількості поколінь алгоритм демонструє покращення ефективності роботи, що відображається зменшенням накладання зон вузлів.

Знаходження глобального оптимуму здійснено при  $G=117$ , отримане при цьому розміщення вузлів наведено на рис. 3. 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].

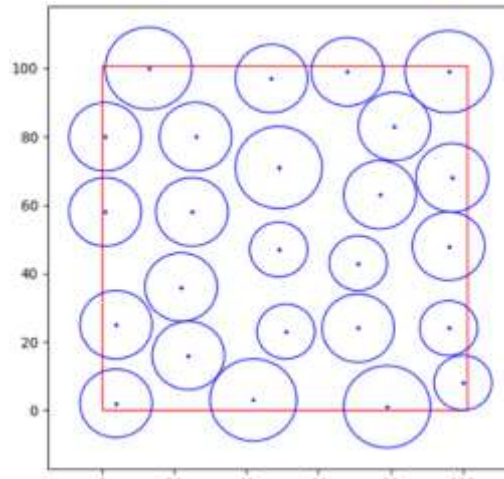


Рис. 3. Результат оптимізації розташування вузлів із різними обмеженнями на мінімальну міжвузлову відстань

Таким чином, результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність роботи запропонованого рішення для оптимізації розташування вузлів із різними радіусами дії. Представлені візуалізації важливі для оцінки ефективності розв'язання поставленої задачі, що дозволяє прийняти рішення про завершення роботи алгоритму або про необхідність його додаткової оптимізації.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Робота присвячена методу оптимізації структури безпроводної сенсорної мережі на основі генетичного алгоритму. Наведено блок-схему відповідного алгоритму із адаптивними значеннями імовірності мутації та схрещування, що дозволяє здійснювати більш ефективний пошук нових рішень та зменшувати ризики передчасної збіжності. Здійснено ряд імітаційних експериментів із розміщення вузлів при різних значеннях радіусу їх дії (20 м, 30 м, 40 м), змінюючи обмеження на мінімальну міжвузлову відстань. Отримані результати показують, що при збільшенні кількості поколінь розроблений алгоритм демонструє покращення ефективності роботи, що відображається зменшенням накладання зон вузлів. Перспективним подальшим напрямом є дослідження ефективності інших еволюційних підходів, таких як диференційна еволюція, алгоритм з роями частинок, що можуть бути об'єднані з ГА для підвищення точності та швидкості збіжності.

### Література

1. Gao D., Qin H., Li F. Research on the Comprehensive Performance Evaluation Method of Genetic Algorithm Based on Euclidean Distance Minimization // 2024 8th International Workshop on Control Engineering and Advanced Algorithms (IWCEAA), China. – 2024. – P. 76–80.
2. Sharma A., Chauhan S. A distributed reinforcement learning based sensor node scheduling algorithm for coverage and connectivity maintenance in wireless sensor network // Wireless Netw. – 2020, Vol. 26. – P. 4411–4429.
3. Gupta S.K., Kuila P., Jana P.K. Genetic Algorithm for k-Connected Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies. – New Delhi: Springer, 2016. – Vol. 379.
4. Konstantinidis A., Yang K., Zhang Q. 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. – P. 1–6.
5. Wang C., Liu X., Hu H. Energy-Efficient and Load-Balanced Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Using a Chaotic Genetic Algorithm // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 158082–158096.
6. Tadas P., Selokar P. Design of optimal nodes topology using efficient topology maintenance algorithm in wireless sensor network // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India. – 2015. – P. 1–5.
7. Пиріг Я., Пиріг Ю. Метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції // Вісник Хмельницького національного університету. Серія Технічні науки. – 2024. – № 5(341). – С. 87–91. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-12>
8. Li X., Cai J., Zhang H. Topology control for guaranteed connectivity provisioning in heterogeneous sensor networks // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, № 12. – P. 5060–5071.
9. Rahman F., Lalnunthari. Optimizing Wireless Mesh Networks for IoT Using Hybrid Genetic-PSO Algorithm // 2025 International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM), Dehradun, India. – 2025. – P. 1279–1283. – DOI: 10.1109/AUTOCOM64127.2025.10956380.

10. Пиріг Я., Пиріг Ю. Дослідження розміщення сенсорних вузлів на площині на основі генетичного алгоритму // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2025. – Т. 5, № 1. – С. 82–88. – DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.082>.

### References

1. Gao D., Qin H., Li F. Research on the Comprehensive Performance Evaluation Method of Genetic Algorithm Based on Euclidean Distance Minimization // 2024 8th Int. Workshop on Control Engineering and Advanced Algorithms (IWCEAA), China. – 2024. – P. 76–80.
2. Sharma A., Chauhan S. A distributed reinforcement learning based sensor node scheduling algorithm for coverage and connectivity maintenance in wireless sensor network // Wireless Netw. – 2020, Vol. 26. – P. 4411–4429.
3. Gupta S.K., Kuila P., Jana P.K. Genetic Algorithm for k-Connected Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks // Proceedings of the Second International Conference on Computer and Communication Technologies. – New Delhi: Springer, 2016. – Vol. 379.
4. Konstantinidis A., Yang K., Zhang Q. 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. – P. 1–6.
5. Wang C., Liu X., Hu H. Energy-Efficient and Load-Balanced Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Using a Chaotic Genetic Algorithm // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 158082–158096.
6. Tadas P., Selokar P. Design of optimal nodes topology using efficient topology maintenance algorithm in wireless sensor network // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India. – 2015. – P. 1–5.
7. Pyrih Ya., Pyrih Yu. An optimal sensor node placement method based on genetic evolution // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 2024, 341(5), 87-91. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-12>
8. Li X., Cai J., Zhang H. Topology control for guaranteed connectivity provisioning in heterogeneous sensor networks // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, № 12. – P. 5060–5071.
9. Rahman F., Lalnunthari. Optimizing Wireless Mesh Networks for IoT Using Hybrid Genetic-PSO Algorithm // 2025 International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM), Dehradun, India. – 2025. – P. 1279–1283. – DOI: 10.1109/AUTOCOM64127.2025.10956380.
10. Pyrih Ya., Pyrih Yu. Investigation of sensor node placement on a plane using a genetic algorithm // Information and communication technologies, electronic engineering. – 2025. – Vol. 5, No.1. – P. 82–88. – DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.082>.