



№ 5 (1), 2025

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМІЩЕННЯ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ НА ПЛОЩИНІ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Я. Пиріг [ORCID: 0009-0001-2104-8439], Ю. Пиріг [ORCID: 0000-0002-8973-4005]

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: Юлія Пиріг (e-mail: yuliia.v.klymash@lpnu.ua)

(Подано 23 грудня 2024)

Робота присвячена дослідженню ефективності використання методу розташування сенсорних вузлів на основі генетичного алгоритму для випадкової топології. Основна мета полягає у визначенні конфігурації вузлів, яка мінімізує кількість «сліпих зон» та забезпечує максимально ефективне покриття заданої області. 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 із однаковим радіусом дії. На основі авторських досліджень шляхом використання розробленого програмного забезпечення визначено оптимальні значення основних параметрів генетичного алгоритму та представлено результати імітаційного моделювання. Здійснено оцінку ефективності методу розміщення сенсорів зі збільшенням кількості поколінь, що відображає його здатність знаходити оптимальні розв'язки. У випадку, коли кількість поколінь становить 25, наявна велика кількість зон «перекриття» вузлів, проте при збільшенні значення спостерігається більш оптимальне розміщення вузлів. Для аналізу роботи алгоритму використано залежність значення фітнес функції від кількості поколінь. Показано, що при початкових значеннях кількості поколінь 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. Таким чином, найбільш оптимальне розташування 25 вузлів із радіусом дії 30 метрів на площині розміром 100 на 100 метрів отримано при значенні кількості поколінь 152. Представлено хромосому із 25 вузлів, яка відповідає їх найкращому розміщенню на досліджуваній площині. Для досягнення синергії між топологією та алгоритмом маршрутизації, здійснено побудову маршруту між двома сенсорними вузлами, при цьому наведено матрицю відстаней вузлів, графову модель мережі та утворений маршрут. Наведені результати дослідження мають практичне значення для проектування та функціонування сенсорних мереж з довільною топологією, що дозволить підвищити їх надійність і продуктивність в умовах невизначеності розташування вузлів.

Ключові слова: сенсорні вузли, генетичний алгоритм, кількість поколінь, графова модель мережі.
УДК: 519.876

Вступ

Розгортання сенсорних мереж у реальних умовах часто супроводжується випадковим розташуванням вузлів. Це обумовлено особливостями середовища, в якому функціонує мережа, а

також економічними та технічними факторами. Рандомна (випадкова) топологія [1,2] є типовою для застосувань у сфері моніторингу навколишнього середовища, сільського господарства, військових та промислових задач, де сенсори можуть бути розміщені з повітря або встановлені у важкодоступних зонах.

Оптимізація місцезорозташування сенсорних вузлів у випадкових топологіях має важливе значення для забезпечення надійної передачі даних, мінімізації енергоспоживання та збільшення часу роботи мережі [3,4]. Випадкове розміщення, хоча і є простим з точки зору реалізації, призводить до нерівномірного покриття та зон з надлишковою або недостатньою кількістю вузлів. Це зумовлює потребу в методах оптимального місцезорозташування вузлів як при початковому розгортанні мережі, так і при інтеграції в існуючу топологію нових вузлів [5,6].

Таким чином, актуальним є дослідження адаптивного коригування випадкового розміщення сенсорних вузлів.

2. Постановка задачі дослідження

Робота [7] представляє метод оптимального розміщення сенсорів на основі генетичного алгоритму та здійснено дослідження ефективності його використання для mesh топології. Цей метод довів свою здатність забезпечувати якісне покриття області при певній структурованості мережі. Проте, існує значний науковий і практичний інтерес до аналізу ефективності цього підходу в умовах мереж із випадковою топологією, де розміщення вузлів не має строго визначеного порядку.

У даній роботі ставиться задача подальшого дослідження ефективності застосування розробленого методу [7] для оптимального розміщення сенсорних вузлів при випадковій топології мережі. Основна мета полягає у визначенні конфігурації вузлів, яка мінімізує кількість «сліпих зон» та забезпечує максимально ефективне покриття заданої області. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- визначити значення основних параметрів генетичного алгоритму при випадковому розміщенні вузлів мережі;
- здійснити оцінку ефективності методу розміщення сенсорів зі збільшенням кількості поколінь.

3. Результати моделювання розміщення сенсорних вузлів при використанні методу на основі генетичного алгоритму

Випадкове розміщення вузлів у сенсорних мережах застосовується, коли необхідно розгорнути мережу швидко, з мінімальними витратами на планування та налаштування. У такому випадку сенсорні вузли 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.

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. На основі ряду авторських досліджень визначено, що ефективність роботи розробленого методу на основі генетичного алгоритму є найбільшою при таких параметрах: розмір популяції – 800, кількість поколінь – 200, радіус дії вузлів – 30 м, обмеження на мінімально допустиму відстань між двома вузлами – 20 м (10 м для кожного вузла).

У цьому пункті представлено результати моделювання, отримані при вказаних значеннях вхідних параметрів, та при розгляді 25 сенсорних вузлів.

На рис. 1 представлено проміжні результати процесу формування для раціонального розташування сенсорів на досліджуваній площині для кількості поколінь $G = 25 \div 100$ із кроком 25.

Як бачимо з рис. 1, 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.

Рис. 2 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).

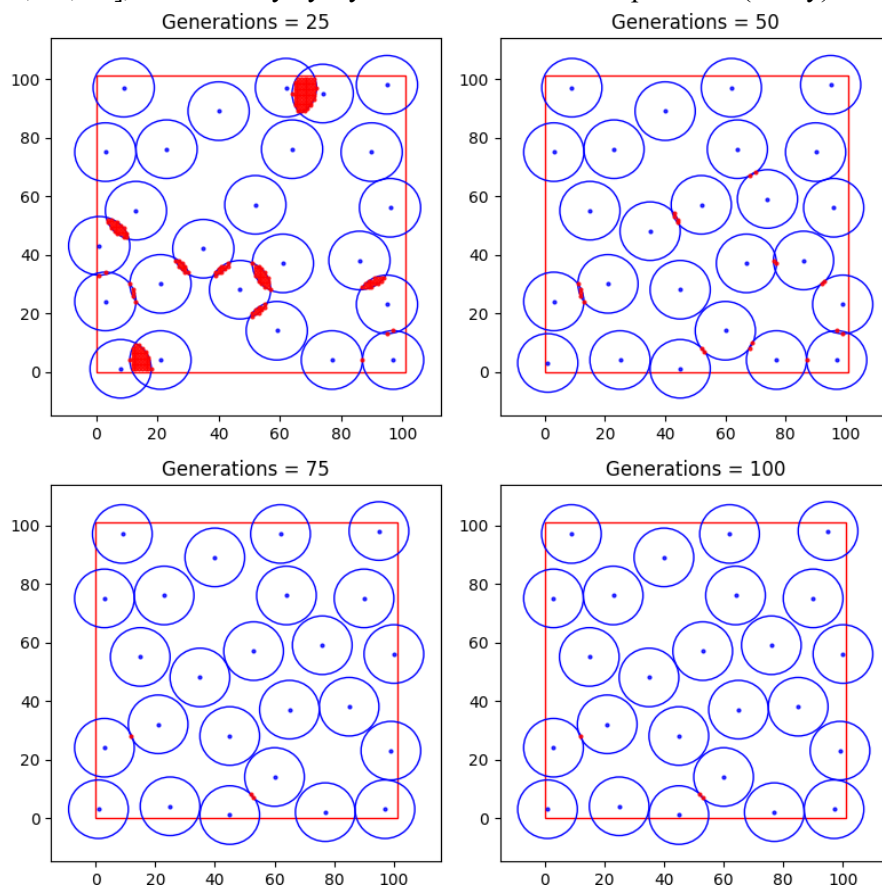


Рис. 1. Результати застосування методу [7] для раціонального розташування сенсорів

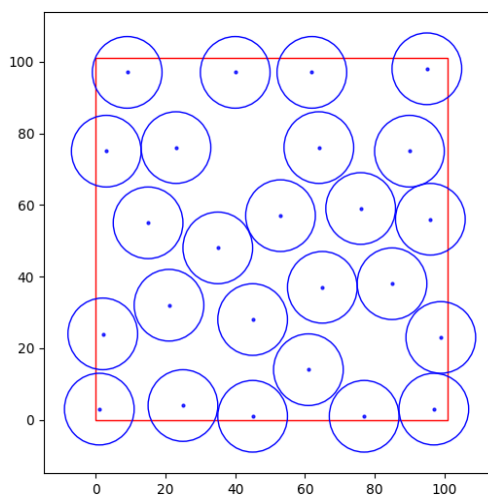


Рис. 2. Оптиміальне розміщення 25 вузлів за заданих умов

Для аналізу роботи алгоритму представлено залежність значення фітнес функції $f(t_{net})$ від кількості поколінь G на рис. 3.

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 $G = 152$.

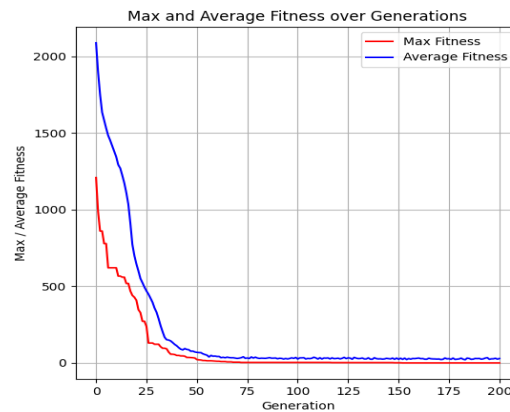


Рис. 3. Залежність значення фітнес функції від кількості поколінь

Як бачимо з рис. 3, 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. Наведений рисунок демонструє ефективну роботу використаного методу. Стабілізація як максимальних, так і середніх значень фітнес функції вказує на успішне вирішення задачі оптимізації. Отримані результати визначають фізичне розміщення вузлів для забезпечення максимальної ефективності покриття досліджуваної території. Очевидно, що розміщення вузлів впливає на середню відстань між вузлами та кількість переходів (хопів), необхідних для передачі даних від вузла-джерела до вузла-отримувача.

Для досягнення синергії між топологією та алгоритмом маршрутизації, представленим у роботі [10], здійснено побудову маршруту. На рис. 4 представлено сформовану матрицю відстаней для 25 вузлів.

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

Рис. 4. Матриця відстаней для 25 вузлів

Відповідна графова модель сенсорної мережі наведена на рис. 5.

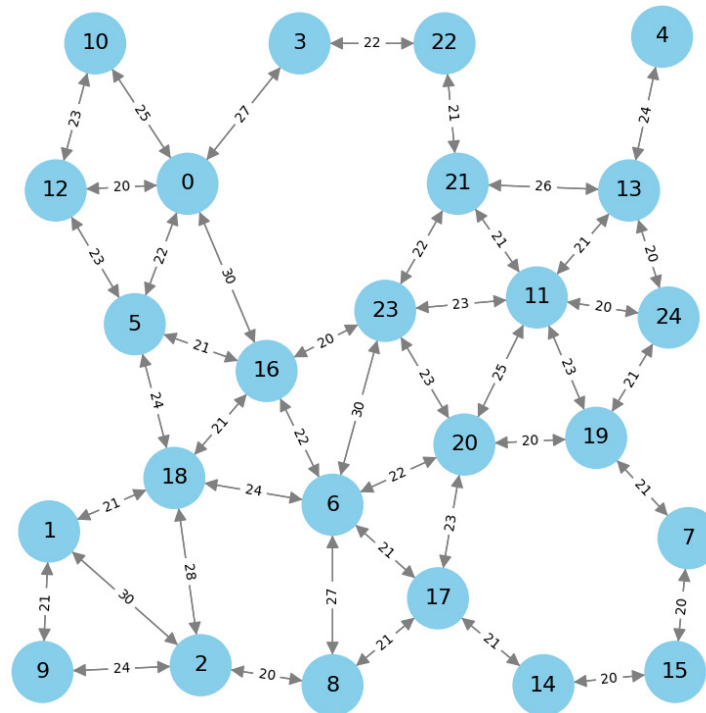


Рис. 5. Графова модель мережі із 25 вузлів

Рис. 6 демонструє отриманий маршрут між вузлом-джерелом («9») і вузлом-отримувачем («4»), довжина якого становить 151 м.

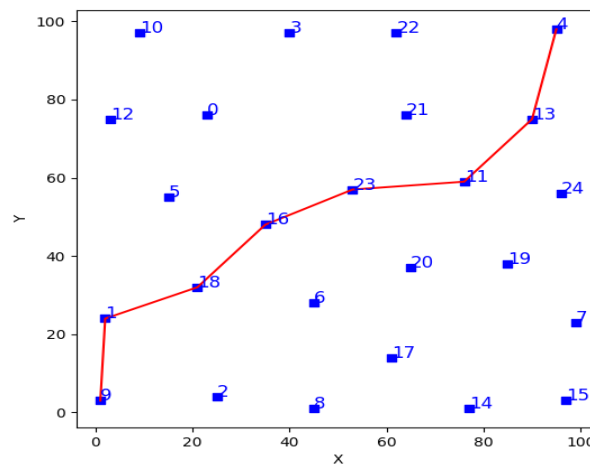


Рис. 6. Побудований маршрут

Таким чином, оптимальне розташування вузлів дозволило забезпечити необхідний рівень зв'язності для успішного обміну даними між вузлами сенсорної мережі.

Висновки

У роботі представлено процес оптимального розташування сенсорних вузлів із однаковим радіусом дії при використанні методу на основі генетичного алгоритму. Експериментально визначено значення основних параметрів генетичного алгоритму для випадкової топології мережі. Здійснено оцінку ефективності методу розміщення сенсорів зі збільшенням кількості поколінь, що відображає його здатність знаходити оптимальні розв'язки. Показано, що найбільш оптимальне

розташування 25 вузлів із радіусом дії 30 метрів на площині розміром 100 на 100 метрів отримано при значенні кількості поколінь 152.

Список використаних літературних джерел

- [1]. Panichpapiboon, S., Ferrari, G. and Tonguz, O.K. (2004), "Sensor networks with random versus uniform topology: MAC and interference considerations," 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514), Milan, Italy, pp. 2111-2115 Vol.4. doi: 10.1109/VETECS.2004.1390646.
- [2]. Liu, X. and Haenggi, M. (2005), "Throughput analysis of fading sensor networks with regular and random topologies," *Journal of Wireless Communications and Networking*, vol. 2005, article ID 397962, pp. 554-562. doi: <https://doi.org/10.1155/WCN.2005.554>.
- [3]. Klymash, M., Kaidan, M., Strykhalyuk, B., Pyrih, Y. and Pyrih, Y. (2023), "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, pp. 14-17. doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076498.
- [4]. Tadas, P. and Selokar, P. (2015), "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, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193265.
- [5]. Xin, C., Guoqiang, W., Minghui, Y., Xiaoduo, L. and He, L. (2020), "A topology control algorithm based on 3-dimensional minimally rigid graph in wireless sensor networks," 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, pp. 322-326. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326652.
- [6]. Bhajantri, L.B. and Nalini, N. (2012), "A fault tolerance approach to topology control in distributed sensor networks," 2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram, India, pp. 208-212. doi: 10.1109/ICACCCT.2012.6320772.
- [7]. Пиріг, Я., Пиріг, Ю. (2024), "Метод оптимального розміщення сенсорних вузлів на основі генетичної еволюції," *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, vol. 341, no. 5, pp. 87-91. doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-12>.
- [8]. Han, F., Tong, M., Li, Y., Tang, S., Cai, L. and Dong, H. (2011), "Design of coal mine wireless sensor networks based on piezoelectric sensors for gas monitoring," 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), Dengleng, pp. 3879-3882. doi: 10.1109/AIMSEC.2011.6010093.
- [9]. Li, X., Cai, J. and Zhang, H. (2016), "Topology control for guaranteed connectivity provisioning in heterogeneous sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 12, pp. 5060-5071. doi: 10.1109/JSEN.2016.2549543.
- [10]. Пиріг, Я. (2024), "Пошук маршруту передачі даних у безпроводній сенсорній мережі із використанням генетичного алгоритму," *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*, vol. 4, no. 2, pp. 72-81. doi: <https://doi.org/10.23939/ict2024.02.072>.

INVESTIGATION OF SENSOR NODE PLACEMENT ON A PLANE USING A GENETIC ALGORITHM

Yaroslav Pyrih, Yuliia Pyrih

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The study focuses on investigating the efficiency of a genetic algorithm-based sensor node placement method for a random topology. The primary objective is to identify a node configuration that minimizes the number of "blind spots" and ensures the most efficient coverage of a given area. Random node placement is characterized by the potential for each node to establish connections with other nodes, resulting in a complex search space. For this study, 25 nodes with identical sensing radii were analyzed. Based on the authors' research and the use of custom-developed software, optimal parameter values for the genetic algorithm were determined, and simulation results were presented. The effectiveness of the sensor placement method was evaluated with an increasing number of generations, reflecting the algorithm's ability to identify optimal solutions. In scenarios with 25 generations, there were numerous overlapping zones between nodes. However, as the number of generations increased, a more optimal node placement was observed. To analyze the algorithm's performance, the relationship

between the fitness function value and the number of generations was used. The results demonstrated that the maximum fitness function value increased most significantly during the initial phase of the evolutionary process. Subsequently, the quality of the solutions (maximum and average fitness values) improved substantially with an increasing number of generations. The most optimal placement of 25 nodes with a sensing radius of 30 meters on a 100×100 m plane was achieved with 152 generations. A chromosome representing the optimal placement of the 25 nodes on the studied area was provided. To achieve synergy between topology and the routing algorithm, a route was constructed between two sensor nodes. The distance matrix for the nodes, a graph model of the network, and the generated route were presented. The research findings hold practical significance for the design and operation of sensor networks with arbitrary topology, enhancing their reliability and performance under uncertain node placement conditions.

Keywords: *sensor nodes, genetic algorithm, number of generations, network graph model.*

UDC: 519.876