



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, Львів, 79013, Україна

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

(Подано 23 грудня 2024)

У роботі досліджено ефективність 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. У разі випадкового розміщення вузлів кожен вузол мати зв’язки з іншими вузлами, що створює складний простір пошуку. Для цього випадку у роботі досліджено 25 вузлів із однаковим радіусом дії. На основі авторських досліджень, із використанням розробленого програмного забезпечення визначено оптимальні значення основних параметрів генетичного алгоритму та подано результати імітаційного моделювання. Оцінено ефективність методу розміщення сенсорів зі збільшенням кількості поколінь, що відображає його здатність знаходити оптимальні розв’язки. Якщо є 25 поколінь, наявна велика кількість зон “перекриття” вузлів, проте у разі збільшення значення спостерігається оптимальніше розміщення вузлів. Для аналізу роботи алгоритму використано залежність значення фітнес-функції від кількості поколінь. Показано, що за початкових значення кількості поколінь спостерігається найбільше зростання максимального значення фітнес-функції, що характерно для початкової фази еволюційного процесу. Надалі якість рішень (максимальне / середнє значення фітнес-функції) істотно поліпшується зі збільшенням кількості поколінь. Отже, найоптимальніше розташування 25 вузлів із радіусом дії 30 метрів на площині розміром 100 на 100 метрів отримано для значення кількості поколінь 152. Подано хромосому із 25 вузлів, яка відповідає їх найкращому розміщенню на досліджуваній площині. Для досягнення синергії між топологією та алгоритмом маршрутизації побудовано маршрут між двома сенсорними вузлами. Наведено матрицю відстаней вузлів, графову модель мережі та утворений маршрут. Викладені результати дослідження мають практичне значення для проектування та функціонування сенсорних мереж з довільною топологією, що дасть змогу 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 зумовлено особливостями середовища, в якому функціонує мережа, а також економічними та технічними факторами. Рандомна (випадкова) топологія [1, 2] типова для

застосувань у сфері моніторингу навколишнього середовища, сільського господарства, військових та промислових завдань, де сенсори можуть бути розміщені з повітря або встановлені у важкодоступних зонах.

Оптимізація місцезнаходження сенсорних вузлів у випадкових топологіях має важливе значення для забезпечення надійного передавання даних, мінімізації енергоспоживання та збільшення часу роботи мережі [3, 4]. Випадкове розміщення, хоча і є простим за реалізацією, призводить до нерівномірного покриття та зон із надлишковою або недостатньою кількістю вузлів. Це зумовлює потребу в методах оптимального місцезнаходження вузлів як під час початкового розгортання мережі, так і під час інтеграції у наявну топологію нових вузлів [5, 6].

Отже, актуальне дослідження адаптивного коригування випадкового розміщення сенсорних вузлів.

2. Постановка задачі дослідження

У роботі [7] подано метод оптимального розміщення сенсорів на основі генетичного алгоритму та здійснено дослідження ефективності його використання для mesh топології. Доведено здатність цього методу забезпечувати якісне покриття області за певної 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 роботі поставлено завдання подальшого дослідження ефективності застосування розробленого методу [7] для оптимального розміщення сенсорних вузлів за випадкової 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 за випадкового розміщення вузлів мережі;
- здійснити оцінку ефективності методу розміщення сенсорів зі збільшенням кількості поколінь.

3. Результати моделювання розміщення сенсорних вузлів із використанням методу на основі генетичного алгоритму

Випадкове розміщення вузлів у сенсорних мережах застосовують, коли необхідно розгорнути мережу швидко, з мінімальними витратами на планування та налаштування. У такому випадку сенсорні вузли розміщують без певного порядку, довільно розташовуючи в межах заданої області. Проте це може призвести до нерівномірного покриття мережі й низької зв’язності певних вузлів, що ускладнює передавання даних та знижує надійність мережі.

Для вузлів із однаковим радіусом дії оптимізація розміщення вимагає точного налаштування кожного вузла, щоб досягти покриття без перекриття і забезпечити зв’язність. Необхідна популяція більшого розміру, щоб дослідити всі можливі варіанти розміщення та уникнути локальних оптимумів. На основі низки авторських досліджень визначено, що ефективність роботи розробленого методу на основі генетичного алгоритму найвища за таких параметрів: 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).

Наведемо результати моделювання, отримані за вказаних значень вхідних параметрів та із розглядом 25 сенсорних вузлів.

На рис. 1 подано 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 є велика кількість зон “перекриття” вузлів, що позначено червоним кольором. Зі зростанням значення G спостерігається оптимальніше розміщення вузлів.

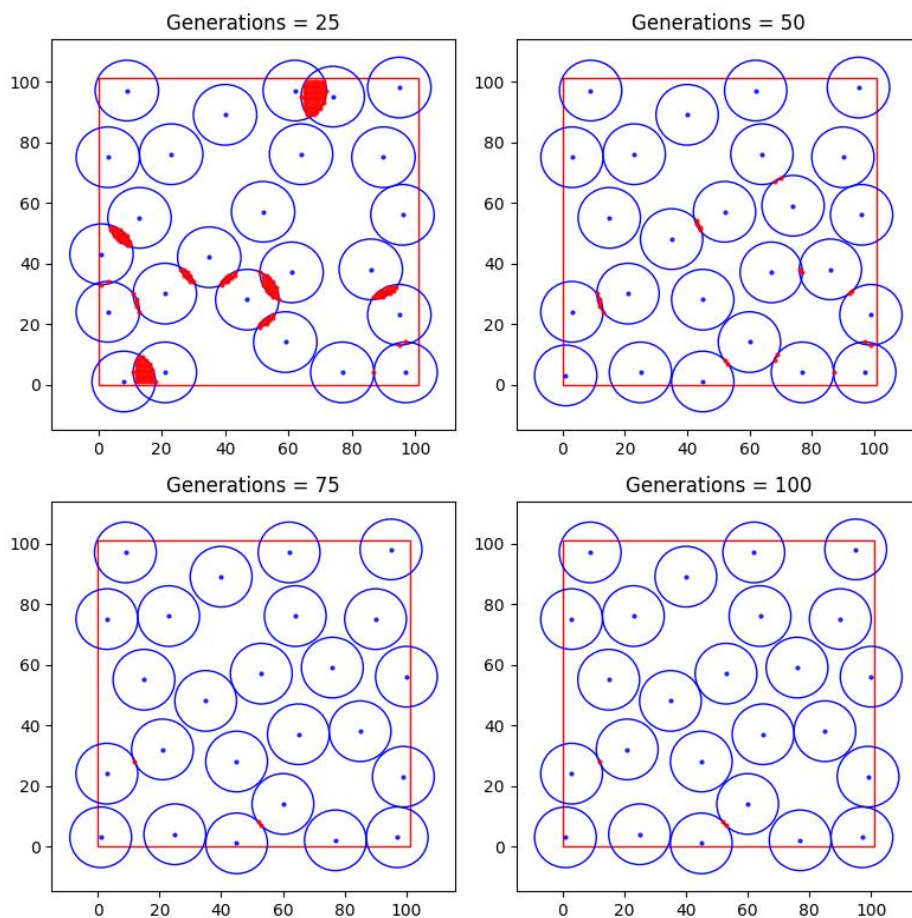


Рис. 1. Результати застосування методу [7] для раціонального розташування сенсорів

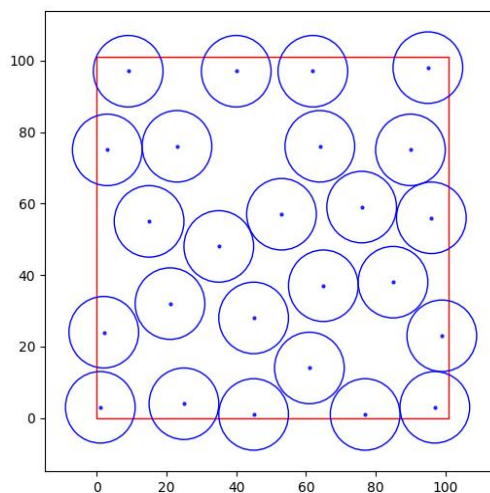


Рис. 2. Оптимальне розміщення 25 вузлів за заданих умов

Рис. 2 демонструє найкраще розміщення 25 вузлів на розглянутій площині, яке отримано за $G = 152$. Одержано хромосому 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 алгоритму на рис. 3 наведено залежність значення фітнес-функції $f(t_{net})$ від кількості поколінь G .

За початкових значень G спостерігається найбільше зростання максимального значення фітнес-функції, що характерно для початкової фази еволюційного процесу. Надалі відбувається істотне покращення якості рішень (максимального / середнього значення фітнес-функції) зі збільшенням кількості поколінь. Оптимальне рішення досягається за $G = 152$.

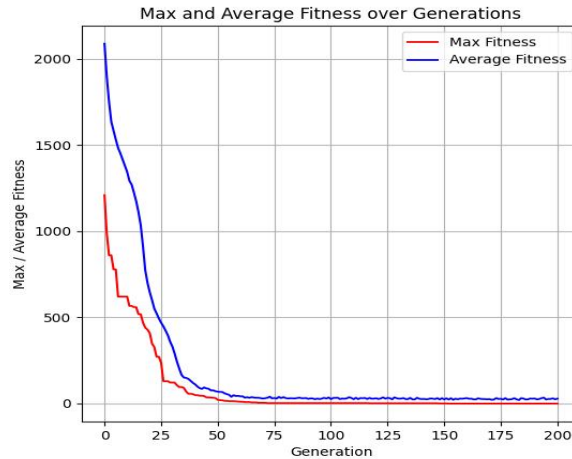


Рис. 3. Залежність значення фітнес-функції від кількості поколінь

Як бачимо із рис. 3, орієнтовно після 50-го покоління максимальне значення фітнес-функції досягає доволі 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 забезпечать помітного покращення результату. Рис. 3 демонструє ефективну роботу використаного методу. Стабілізація як максимальних, так і середніх значень фітнес-функції свідчить про успішне розв'язання 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 передавання даних від вузла-джерела до вузла-отримувача.

Для досягнення синергії між топологією та алгоритмом маршрутизації, наведеним у роботі [10], здійснено побудову маршруту. На рис. 4 подано 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	1000	1000	1000	1000
2	1000	0	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	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	1000	22	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	24	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	21	1000	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0	1000	27	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	22	21	24	1000	22	1000	1000	30	1000
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0	1000	27	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20	1000	1000	1000	21	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	23	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	26	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	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0	20	1000	1000	1000	21
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	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	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21	0	1000	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	23	22	1000	0
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

Відповідну графову модель сенсорної мережі наведено на рис. 5.

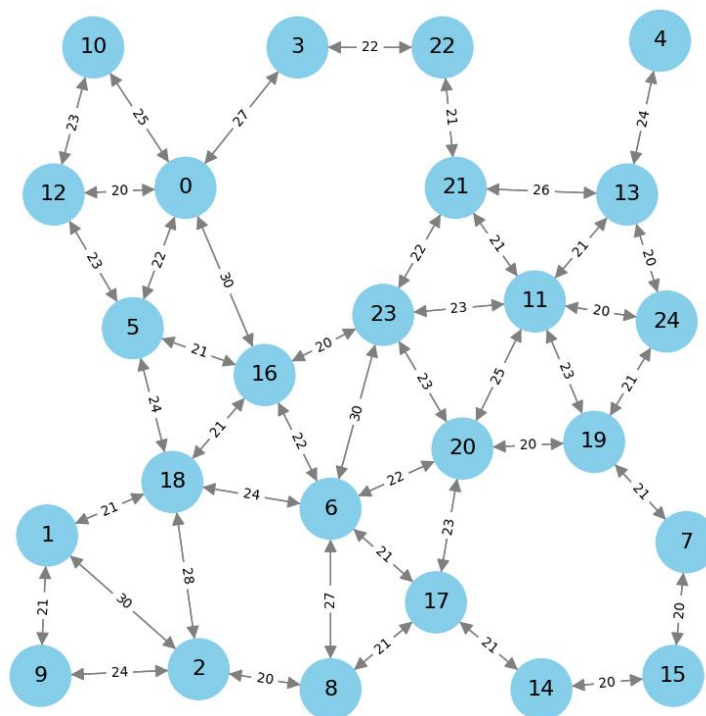


Рис. 5. Графова модель мережі із 25 вузлів

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

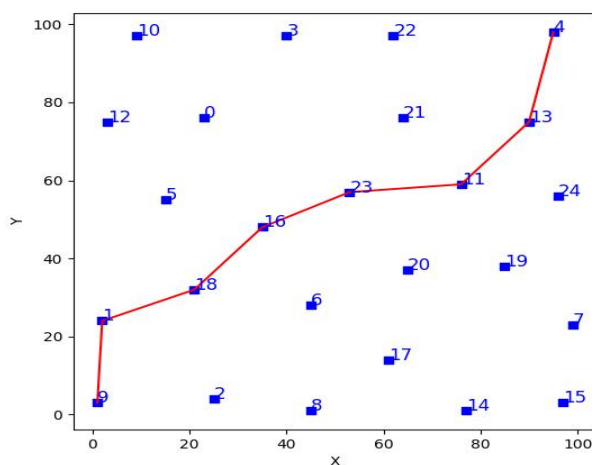


Рис. 6. Побудований маршрут

Отже, оптимальне розташування вузлів дало змогу забезпечити необхідний рівень зв'язності для успішного обміну даними між вузлами сенсорної мережі.

Висновки

У роботі висвітлено оптимальне розташування сенсорних вузлів із однаковим радіусом дії із використанням 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 найоптимальніше розташування 25 вузлів із радіусом дії 30 м на площині розміром 100 на 100 м досягнуто, якщо 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), Dengcheng, 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, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, 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