

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-12>

УДК 004.021

ПИРИГ Ярослав

Національний університет «Львівська політехніка»

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

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

ПИРИГ 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)

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ ДЛЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

*В роботі наведено багатокритеріальний метод маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі принципів генетичної еволюції, із врахуванням динамічно змінної топології та радіусів дії вузлів. Представлено блок-схему генетичного алгоритму, який дозволяє знайти оптимальний маршрут на основі шести критеріїв, використання яких дозволяє врахувати специфіку роботи безпроводних сенсорних мереж, а саме: Евклідову відстань, рівень заряду батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримку передачі даних, вхідний/вихідний ступінь вузла. Для перевірки ефективності розробленого генетичного алгоритму здійснено його порівняння із жадібним, використовуючи імітаційне моделювання. На основі отриманих результатів показано ефективність роботи запропонованого рішення.*

*Ключові слова:* генетична еволюція, безпроводні сенсорні мережі, маршрутизація, багатокритеріальність.

PYRIH Yaroslav, PYRIH Yuliia

Lviv Polytechnic National University

## A MULTI-CRITERIA APPROACH BASED ON GENETIC EVOLUTION FOR FINDING THE OPTIMAL DATA TRANSMISSION ROUTE IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

*In wireless sensor networks (WSNs), data routing is critical to ensure their efficient operation. Traditional single-criteria routing algorithms do not take into account all aspects of the dynamically changing data transmission environment, which leads to a decrease in overall network performance. The choice between single-criteria and multi-criteria routing algorithms depends on the specific conditions and requirements of the BSM. Single-criteria algorithms are suitable for simpler and more stable environments where a single parameter is critical. Multi-criteria algorithms, although more difficult to implement, provide significant advantages in adaptability and performance optimization in complex and dynamic networks.*

*This paper is devoted to the application of modern evolutionary computing to solve complex and multi-criteria route finding problems in modern wireless sensor networks. Genetic algorithms provide high flexibility and adaptability, which allows taking into account various criteria, which is especially important for sensor nodes with limited resources. The paper presents a multicriteria method for routing data in wireless sensor networks based on the principles of genetic evolution, taking into account the dynamically changing topology and range of nodes. A block diagram of the genetic algorithm is presented, which allows finding the optimal route based on a set of criteria, the use of which allows taking into account the specifics of wireless sensor networks. The proposed method can be applied to the implementation of both single- and multi-path routing protocols. To verify the effectiveness of the developed genetic algorithm, it is compared with the greedy one using simulation modelling. Based on the obtained results, the efficiency of the proposed solution for sensor nodes with different ranges is shown. A set of alternative routes is obtained, which is advisable to use in case of failure of the optimal route, which increases the reliability of wireless sensor networks under dynamically changing conditions.*

*Keywords:* genetic evolution, wireless sensor networks, routing, multicriteria.

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

У безпроводних сенсорних мережах (БСМ) маршрутизація даних є критично важливою для забезпечення їх ефективного функціонування. 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, хоча і складніші в реалізації, надають значні переваги в адаптивності та оптимізації продуктивності в умовах складних та динамічних мереж.

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, зокрема заряду батареї, радіусу дії вузлів, значно впливає на процес

маршрутизації даних, що зумовлює потребу в розробці енергоефективних та надійних алгоритмів. Оптимізація маршрутизації з урахуванням цих обмежень є ключовим фактором для забезпечення ефективного та стабільного функціонування БСМ. 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 енергоспоживання, затримку передачі даних, рівень сигналу, втрат даних, а також зберігати баланс між ними. Це особливо актуально для БСМ, де обмежені ресурси та високі вимоги до якості надання послуг потребують більш складних підходів до маршрутизації даних.

Отже, дослідження генетичних алгоритмів як основи функціонування багатокритеріального підходу для пошуку оптимального маршруту у БСМ є актуальним.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Пошук робіт, який відповідає тематиці даної роботи, здійснювався у бібліотеці IEEE за ключовими словами: multi-criteria routing in wireless sensor networks.

У роботі [1] 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 [2] здійснили дослідження практичних особливостей багатокритеріального підходу до вирішення задачі оптимальної маршрутизації в мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості: час затримки пакетів, рівень втрат пакетів, вартість використання лінії зв'язку. При використанні запропонованого рішення отримано виграв у три рази за показником втрат пакетів і у півтора рази за показником вартості використання ліній зв'язку порівняно зі скалярним підходом.

Робота [3] присвячена протоколу багатошляхової QoS-маршрутизації на основі стабільності маршруту. Авторами запропонована метрика маршрутизації для маршруту з 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 [4] 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 [5] 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 [6] 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).

Отже, багатокритеріальна маршрутизація даних в БСМ є складною, але необхідною задачею для забезпечення ефективної роботи мережі. При цьому на основі аналізу робіт [1-6] варто відзначити, що практично не приділялась увага дослідженням щодо використання принципів еволюційних стратегій, зокрема генетичної. Таким чином, доцільним є здійснення досліджень щодо багатокритеріальної оптимізації за допомогою генетичного алгоритму для підвищення ефективності маршрутизації даних у БСМ.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: розробка багатокритеріального методу маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі принципів генетичної еволюції, який здійснює пошук оптимального маршруту із врахуванням сукупності критеріїв.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

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 [7-11]. 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.

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 .

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

де  $n$  – кількість критеріїв.

Наступний етап – це утворення однієї багатокритеріальної матриці шляхом сумування нормалізованих матриць по 6-ти критеріям. Після цього переходимо до запуску розробленого ГА, основними етапами роботи якого є застосування таких генетичних операторів: турнірний оператор відбору, впорядкований оператор схрещування, оператор перемішування для мутації, що дозволяє знайти маршрут у заданих умовах. Для покращення збіжності ГА пропонується використовувати динамічне корегування значення імовірності схрещування  $p_{cross}$  на основі оцінки значення фітнес-функції  $F(x)_{set\ r}$  для множини маршрутів та  $i$ -ого маршруту  $F(x)_{r\ i}$  у певному поколінні. Таким чином, здійснюється порівняння цих двох значень, на основі чого визначається рівень якості певної особини. Динамічну зміну  $p_{cross}$  можна представити як:

$$p_{cross} = \begin{cases} \frac{a + (b - a)(F(x)_{max\_set\ r} - F(x)_{r\ i})}{F(x)_{max\_set\ r} - F(x)_{aver}}, \text{ при } F(x)_{r\ i} > F(x)_{aver} \\ \frac{a + b}{2}, \text{ при } F(x)_{r\ i} \approx F(x)_{aver} \\ b, \text{ при } F(x)_{r\ i} < F(x)_{aver} \end{cases} \quad (2)$$

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.

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.

На рис. 1 представлено алгоритм для багатокритеріального пошуку оптимального маршруту та множини альтернативних маршрутів .

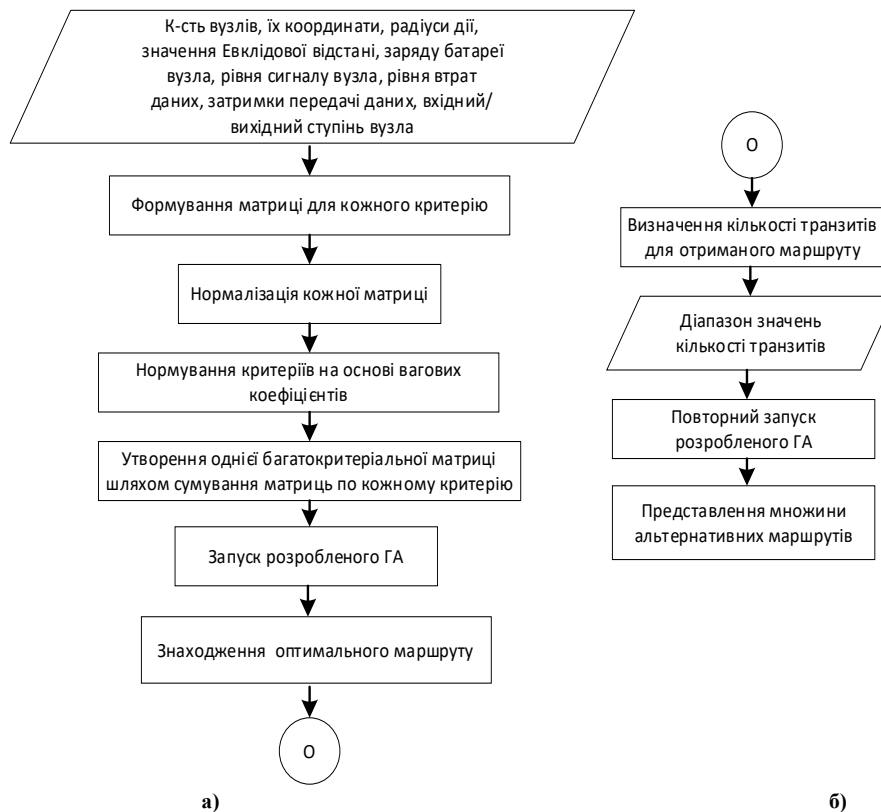


Рис. 1. Узагальнена блок-схема багатокритеріального пошуку: а) – оптимального маршруту; б) – множини резервних маршрутів по критерію кількості транзитів

Для перевірки ефективності розробленого алгоритму багатокритеріального пошуку оптимального маршруту для БСМ створено програму на мові програмування Python, основою якої є бібліотека DEAP. Для порівняння вибрано жадібний алгоритм (ЖА), який характеризується простою та ефективною обчислювальною реалізацією [12]. Крім цього цей алгоритм володіє здатністю швидко адаптуватися до змін у мережі, таких як вихід з ладу вузлів або зміна топології, що робить його доцільним для використання в динамічно змінних мережевих умовах.

Рис. 2 демонструє графову модель мережі БСМ для комплексного критерію, де круг позначає вузол мережі, у якому вказано його порядковий номер відповідно до топології, ребра – з'єднання між вузлами, на яких вказано їх вагу – нормалізоване значення. Для графової моделі використовуються вузли різних кольорів, які позначають різні радіуси їх дії: ● – 20 метрів, ● – 30 метрів, ● – 40 метрів.

На рис. 3 представлено відповідну нормалізовану матрицю.

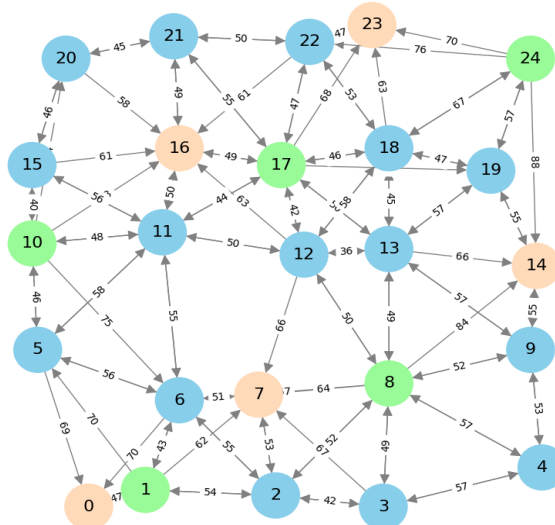


Рис. 2. Графова модель мережі БСМ для комплексного критерію

Normalized 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	50	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	47	0	54	1000	1000	70	43	62	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	54	0	45	1000	1000	55	54	55	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	1000	1000	42	0	58	1000	1000	67	47	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	1000	1000	1000	57	0	1000	1000	1000	58	52	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	69	1000	1000	1000	1000	0	57	1000	1000	1000	47	55	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	70	43	55	1000	1000	56	0	52	1000	1000	1000	56	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	1000	1000	53	1000	1000	1000	51	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	1000	1000	52	49	57	1000	67	64	0	50	1000	1000	49	49	84	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	1000	1000	1000	1000	53	1000	1000	1000	52	0	1000	1000	1000	58	53	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	1000	1000	1000	1000	1000	46	75	1000	1000	1000	0	55	1000	1000	1000	38	78	1000	1000	1000	74	1000	1000	1000	1000
12	1000	1000	1000	1000	1000	58	55	1000	1000	1000	48	0	50	1000	1000	54	50	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	66	50	1000	1000	50	0	39	1000	1000	63	40	54	1000	1000	1000	1000	1000
14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	49	57	1000	1000	36	0	66	1000	1000	50	41	59	1000	1000	1000	1000
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	55	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	1000	55	1000	1000	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	40	56	1000	1000	1000	0	61	1000	1000	1000	43	1000	1000	1000	1000
17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	50	1000	1000	1000	0	46	1000	1000	1000	50	1000	1000	1000	1000
18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	44	42	50	1000	1000	49	0	42	67	1000	54	50	68	1000
19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	58	45	1000	1000	1000	46	0	46	1000	1000	54	63	61
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	57	55	1000	1000	1000	47	0	1000	1000	1000	1000	58
21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	46	58	1000	1000	1000	0	43	1000	1000	1000
22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	49	55	1000	1000	1000	45	0	51	1000	1000
23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	61	47	53	1000	1000	50	0	50	1000	1000
24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	47	0	1000
25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	88	1000	1000	1000	67	57	1000	1000	76	70	0

Рис. 3. Нормалізована матриця

На рис. 4 показано отриманий маршрут при використанні комплексного критерію у розробленому алгоритмі та у жадібному алгоритмі (ЖА). Варто зауважити, що для цього дослідження ЖА було модифіковано для роботи із сукупністю розглянутих критеріїв.

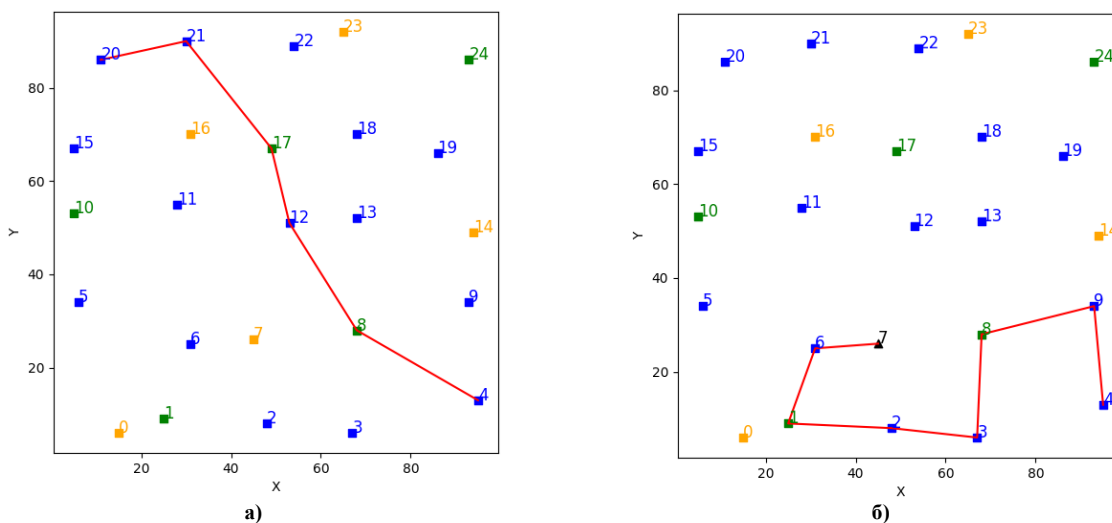


Рис. 4. Отриманий маршрут у БСМ при використанні: а) – розробленого алгоритму; б) – жадібного алгоритму

Як бачимо з рис. 4, використання ЖА не дозволило сформувати успішний маршрут між вузлами 4 і 20, у цьому випадку його робота завершена на вузлі 7.

На рис. 5 представлено результати моделювання при визначенні множини резервних маршрутів. Оскільки отриманий маршрут (рис. 4 (а)) містить 5 транзитів, то це значення було прийняте в якості номінального для формування діапазону значень кількості транзитів [4: 8].

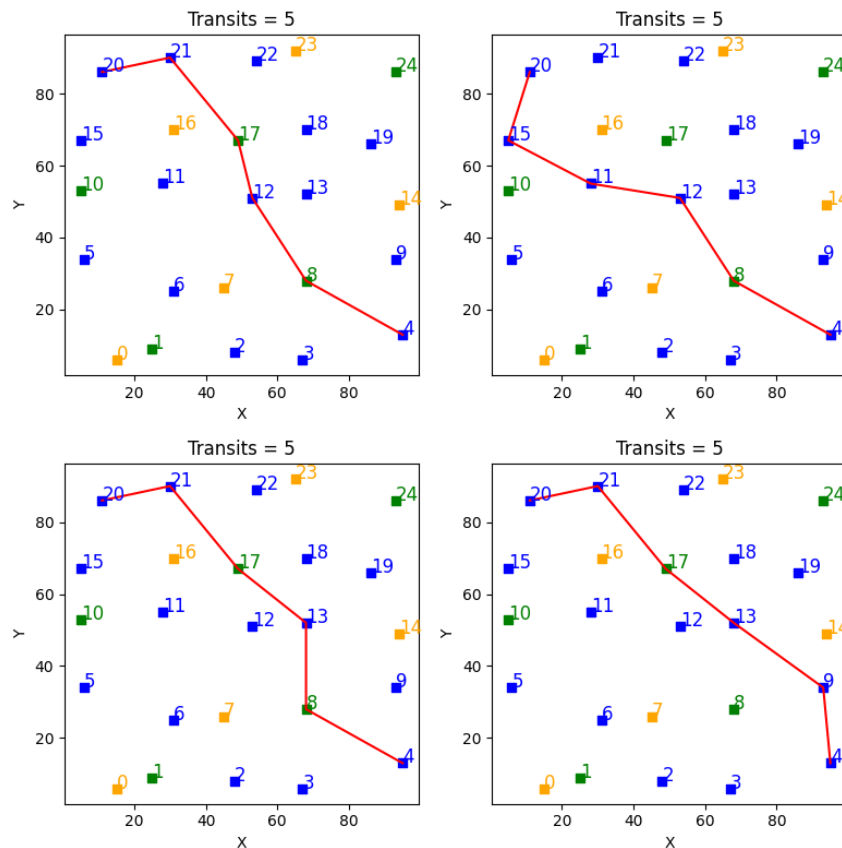


Рис. 5. Множина найкращих резервних маршрутів для  $h \in [4:8]$

Таким чином, наведені результати демонструють працездатність запропонованого рішення при використанні сукупності розглянутих критеріїв для пошуку як найкращого маршруту, так і множини резервних маршрутів у БСМ при різних радіусах дії вузлів.

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

Запропоновано багатокритеріальний метод маршрутизації даних у безпроводних сенсорних мережах на основі принципів генетичної еволюції, із врахуванням динамічно змінної топології та радіусів дії вузлів. Представлено блок-схему генетичного алгоритму, який дозволяє знайти оптимальний маршрут на основі шести критеріїв, використання яких дозволяє врахувати специфіку роботи БСМ, а саме: Евклідову відстань, рівень заряду батареї вузла, рівень сигналу вузла, рівень втрат даних, затримку передачі даних, вхідний/вихідний ступінь вузла. Запропонований метод маршрутизації може бути застосований для реалізації протоколів як одно-, так і багатопляхової маршрутизації. На основі отриманих результатів показано ефективність роботи запропонованого рішення при використанні комплексного критерію для пошуку маршруту передачі даних між сенсорними вузлами із різними радіусами дії. Перспективним напрямком подальших досліджень є інтеграція методів машинного навчання для динамічного налаштування параметрів генетичного алгоритму з метою покращення ефективності маршрутизації.

#### Література

1. Gravalos I., Kokkinos P., Varvarigos E. A. Multi-criteria Cooperative Energy-Aware Routing in Wireless Ad-hoc Networks // 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy, 2013. – P. 387-393. – DOI: 10.1109/IWCMC.2013.6583590.
2. Guo Q., Semenets V., Bezruk V., Kaliuzhnyi M., Zheng Y. Methods for Multicriterial Selection of Optimal Routes in Communication Networks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 52–57. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176783.
3. AlQahtani S., Alotaibi A. A Route Stability-Based Multipath QoS Routing Protocol in Cognitive Radio Ad Hoc Networks // Wireless Netw. – 2019. – Vol. 25. – P. 2931–2951. – DOI: 10.1007/s11276-019-02014-6.
4. Bhunia S. S., Roy S., Mukherjee N. Adaptive Learning Assisted Routing in Wireless Sensor Network Using Multi Criteria Decision Model // International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Delhi, India, 2014. – P. 2149-2154. – DOI: 10.1109/ICACCI.2014.6968354.

5. Fouad El H., Cherkaoui L., Khadija D. Adaptive Routing Protocol for Lifetime Maximization in Multi-Constraint Wireless Sensor Networks // Journal of Communications and Information Networks. – 2018. – Vol. 3(1). – P. 67-83. – DOI: 10.1007/s41650-018-0008-3.
6. Suh Y. H., Kim K. T., Shin D. R., Youn H. Y. Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor Network // 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.
7. Пиріг Я., Климаш М., Пиріг Ю., Лаврів О. Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2023. – № 3(2). – С. 95-107.
8. Pavlenko O., Tymoshenko A., Tymoshenko O., Luntovskyy A. Searching Extreme Paths Based on Travelling Salesman's Problem for Wireless Emerging Networking // Emerging Networking in the Digital Transformation Age. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2022. – Vol. 965. – P. 284-304. – DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1\_16.
9. Колесніков К. В., Карапетян А. Р., Царенко Т. А. Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 56 (1029). – С. 44-50.
10. Pyrih Y., Masiuk A., Pyrih Yu., Urikova O. Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem // Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024. – Vol. 1198. – P. 506-521. – DOI: 10.1007/978-3-031-61221-3\_24.
11. Rehena Z., Roy S., Mukherjee N. Efficient Data Forwarding Techniques in Wireless Sensor Networks // 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC), Ghaziabad, India, 2013. – P. 449-457. – DOI: 10.1109/IAdCC.2013.6514268.
12. Klymash Y., Strykhalyuk B., Strykhalyuk I. Algorithm for Greedy Routing Based on the Thurston Algorithm in Sensor Networks // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine, 2016. – P. 652-654. – DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452142.

#### References

1. Gravalos I., Kokkinos P., Varvarigos E. A. Multi-criteria Cooperative Energy-Aware Routing in Wireless Ad-hoc Networks // 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy, 2013. – P. 387-393. – DOI: 10.1109/IWCMC.2013.6583590.
2. Guo Q., Semenets V., Bezruk V., Kaliuzhnyi M., Zheng Y. Methods for Multicriterial Selection of Optimal Routes in Communication Networks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 52-57. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176783.
3. AlQahtani S., Alotaibi A. A Route Stability-Based Multipath QoS Routing Protocol in Cognitive Radio Ad Hoc Networks // Wireless Netw. – 2019. – Vol. 25. – P. 2931-2951. – DOI: 10.1007/s11276-019-02014-6.
4. Bhunia S. S., Roy S., Mukherjee N. Adaptive Learning Assisted Routing in Wireless Sensor Network Using Multi Criteria Decision Model // International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Delhi, India, 2014. – P. 2149-2154. – DOI: 10.1109/ICACCI.2014.6968354.
5. Fouad El H., Cherkaoui L., Khadija D. Adaptive Routing Protocol for Lifetime Maximization in Multi-Constraint Wireless Sensor Networks // Journal of Communications and Information Networks. – 2018. – Vol. 3(1). – P. 67-83. – DOI: 10.1007/s41650-018-0008-3.
6. Suh Y. H., Kim K. T., Shin D. R., Youn H. Y. Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor Network // 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.
7. Pyrih Ya., Klymash M., Pyrih Yu., Lavriv O. Henetychnyi alhorytm yak zasib rozv'iazannia optymizatsiinykh zadach // Infokomunikatsiini tehnolohii ta elektronna inzheneriia. – 2023. – № 3(2). – С. 95-107.
8. Pavlenko O., Tymoshenko A., Tymoshenko O., Luntovskyy A. Searching Extreme Paths Based on Travelling Salesman's Problem for Wireless Emerging Networking // Emerging Networking in the Digital Transformation Age. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Cham, 2022. – Vol. 965. – P. 284-304. – DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1\_16.
9. Kolesnikov K. V., Karapetian A. R., Tsarenko T. A. Henetychni alhorytmy dlia zadach bahatokryterialnoi optymizatsii v merezhakh adaptivnoi marshrutyzatsii danykh // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tehnolohiiakh. – 2013. – № 56 (1029). – С. 44-50.
10. Pyrih Y., Masiuk A., Pyrih Yu., Urikova O. Investigation of a Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem // Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2024. – Vol. 1198. – P. 506-521. – DOI: 10.1007/978-3-031-61221-3\_24.
11. Rehena Z., Roy S., Mukherjee N. Efficient Data Forwarding Techniques in Wireless Sensor Networks // 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC), Ghaziabad, India, 2013. – P. 449-457. – DOI: 10.1109/IAdCC.2013.6514268.
12. Klymash Y., Strykhalyuk B., Strykhalyuk I. Algorithm for Greedy Routing Based on the Thurston Algorithm in Sensor Networks // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine, 2016. – P. 652-654. – DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452142.