

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-143-152>

УДК 004.7:519.816

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ТА АЛГОРИТМУ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ

Пиріг Ю.В., Пиріг Я.Р.

OPTIMIZATION OF DATA TRANSMISSION ROUTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING A GENETIC ALGORITHM AND THE ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM

Pyrih Yu.V., Pyrih Ya.R.

Стаття присвячена задачі визначення маршруту передавання даних між сенсорними вузлами безпроводної сенсорної мережі за допомогою двох метаевристичних підходів – генетичного алгоритму та алгоритму оптимізації мурашиною колонією. Актуальність дослідження зумовлена тим, що вибір послідовності проміжних вузлів безпосередньо впливає на протяжність шляху, кількість операцій приймання і повторного передавання пакетів, затримку тощо. Метою роботи є методично узгоджене порівняння генетичного алгоритму та алгоритму мурашиної колонії за спільної топології, однакового радіуса зв'язку (30 м), фіксованої пари вузлів «джерело-отримувач» і єдиного критерію мінімізації сумарної довжини маршруту для здійснення оцінки щодо впливу механізму пошуку на вибір найкращого маршруту. У генетичному алгоритмі кандидатне рішення кодується впорядкованою послідовністю вузлів від джерела до отримувача. Еволюційне вдосконалення популяції виконується із застосуванням турнірного відбору, схрещування маршрутів за спільним проміжним вузлом та мутації підмаршруту. Якість особини визначається за сумарною довжиною ребер, що входять до відповідного шляху. Аналіз зміни найкращого й середнього значень цільової функції протягом 200 поколінь показав швидке поліпшення популяції на початковій стадії та подальше уповільнення пошуку. Орієнтовно після ста поколінь спостерігалася стабілізація оцінок, що вказує на зосередження еволюційного процесу поблизу найкращого знайденого рішення. Алгоритм мурашиної колонії (ACO) реалізує послідовне формування маршруту штучними агентами. Імовірність вибору наступного сенсорного вузла визначається поєднанням феромонної інформації та евристичної привабливості доступного переходу. Після завершення руху агентів концентрація феромону коригується шляхом випаровування та підсилення ребер, що входять до коротших шляхів. Завдяки багаторазовому оновленню феромонної матриці колонія поступово накопичує інформацію про перспективні напрями передавання даних. За результатами імітаційного

моделювання, в межах досліджуваного сценарію застосування генетичного алгоритму забезпечило формування маршруту, сумарна довжина якого була меншою порівняно з маршрутом, отриманим методом АСО: на 28,39 % для топології з 25 вузлів і на 30,75 % для топології зі 100 вузлів. Отримані результати показують, що для заданих координатних конфігурацій еволюційне опрацювання повних маршрутних хромосом дозволило сформувати компактнішу послідовність передавання даних, тоді як покрокова феромонна стратегія привела до довшого шляху.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, маршрутизація, генетичний алгоритм, алгоритм мурашиної колонії, метаевристична оптимізація.

Вступ. Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) застосовують для збирання, первинного опрацювання та передавання відомостей про стан розподілених об'єктів і середовищ. Сенсорні вузли таких мереж зазвичай мають обмежений запас енергії, невелику обчислювальну потужність і визначений радіус безпроводної взаємодії. Через це спосіб передавання пакетів від вузла-джерела до вузла-отримувача істотно впливає на витрати ресурсів, затримку доставки та тривалість функціонування мережі [1-3].

У БСМ повідомлення часто не може бути доставлене адресатові безпосередньо, оскільки послідовно проходить через проміжні сенсори, кожен із яких виконує приймання та повторне передавання пакета. Задача маршрутизації полягає у визначенні допустимої послідовності вузлів, з'єднаних відповідно до умов радіодоступності. Кількість можливих шляхів швидко зростає зі збільшенням розміру мережі, тому повний перебір

варіантів стає обчислювально складним при великих розмірах мережі. Практична складність полягає в тому, що найкоротший геометричний шлях не завжди збігається з найдоцільнішим маршрутом для реальної БСМ. Під час його формування можуть ураховуватися залишкова енергія вузлів, число переходів, завантаженість каналів, надійність окремих з'єднань, затримка та можливість обходу пошкоджених елементів. Однак на початковому етапі дослідження доцільно порівняти алгоритми за базовим критерієм – сумарною довжиною утвореного шляху за однакової топології та незмінних початкових умов.

Для опрацювання великої множини маршрутів застосовують метаевристичні засоби пошуку. Генетичний алгоритм (ГА) належить до еволюційних обчислень і вдосконалює множину кандидатних рішень за допомогою відбору, рекомбінації та мутації [4-6]. Алгоритм оптимізації мурашиної колонією (АСО) відноситься до ройового інтелекту: вибір чергового переходу залежить від евристичної привабливості ребра та накопиченої феромонної інформації [7-9]. Обидва підходи є методами штучного інтелекту [10], оскільки здійснюють адаптивний пошук у просторі альтернатив без жорсткого задання готового маршруту.

У зв'язку з цим актуальним є порівняння ефективності застосування генетичного та мурашиного алгоритму при однаковій мережевій конфігурації для визначення впливу популяційно-еволюційного і колективно-ройового механізму пошуку на довжину шляху та кількість проміжних переходів.

Метою роботи є методично узгоджене порівняльне оцінювання генетичного алгоритму та алгоритму мурашиної колонії для пошуку маршрутів передавання даних у безпроводних сенсорних мережах на однакових топологіях, за фіксованої пари вузлів «джерело-отримувач» і єдиного критерію мінімізації сумарної довжини маршруту, з метою встановлення впливу механізмів пошуку на довжину сформованого маршруту та кількість міжвузлових переходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ГА активно використовують для побудови маршрутів у БСМ завдяки їхній здатності опрацювати одночасно декілька альтернативних шляхів. У роботі [11] досліджено маршрутизацію за допомогою ГА з використанням евклідової, мангеттенської, чебишовської та мінковської метрик. Автори показали, що вибір способу обчислення відстані впливає на сформований маршрут, а налаштування розміру популяції та кількості поколінь є важливим для результативності еволюційного пошуку.

У дослідженні [12] генетичний підхід застосовано для вибору головних вузлів кластерів і подальшої оптимізації передавання даних у сітковій топології. Оцінювання кандидатних рішень виконувалося з урахуванням щільності вузлів, відстаней, енергетичного стану, затримки та

покриття. Ця робота демонструє можливість включення до функції пристосованості кількох характеристик мережі, однак зосереджується переважно на кластерній організації та енергозбереженні.

Інший напрям представлений алгоритмами мурашиної колонії, зокрема у [13] представлено АСО-орієнтований підхід до передавання даних у БСМ, спрямований на скорочення енергетичних витрат і подовження періоду працездатності мережі. Мурахи формують можливі шляхи, спираючись на феромонний слід та евристичні оцінки, а повторне оновлення феромонів посилює переходи, що входять до перспективних маршрутів.

Автори [14] розглянули вдосконалений мурашиний алгоритм для маршрутизації в мережах Інтернету речей. У роботі змінено правило переходу між вузлами для зниження ризику передчасної стабілізації пошуку. Експериментальне оцінювання охоплювало енергоспоживання, затримку, пропускну здатність і кількість непрацездатних вузлів. Отримані результати підтвердили, що модифікація правил переходу та оновлення феромонів може покращувати експлуатаційні показники БСМ.

У роботі [15] запропоновано гібридний підхід, що поєднує хаотичний генетичний алгоритм з оптимізацією сірих вовків для кластеризації та маршрутизації. Розвиток гібридних метаевристик свідчить про прагнення дослідників компенсувати слабкі сторони одного алгоритму механізмами іншого, особливо під час розв'язання багатоцільових задач енергоефективної маршрутизації.

Аналіз публікацій [11-15] засвідчує поступовий перехід від протоколів із фіксованими правилами до адаптивних оптимізаційних методів. Метаевристичні алгоритми застосовують у БСМ через комбінаторний характер задач маршрутизації та кластеризації, наявність обмежених енергетичних ресурсів і необхідність одночасно враховувати довжину шляху, кількість переходів, залишкову енергію, завантаження вузлів, зв'язність і тривалість роботи мережі. ГА належать до еволюційного напрямку та опрацюють популяцію альтернативних рішень, тоді як алгоритми мурашиної колонії реалізують ройовий пошук, у якому вибір переходів коригується накопиченою феромонною інформацією. Оглядом дослідження не визначають універсальної метаевристики, що була б найкращою для всіх конфігурацій БСМ: результат залежить від способу кодування рішення, цільової функції, параметрів алгоритму та характеристик мережі. Водночас у розглянутих роботах запропоновані модифікації перевіряються за різних розмірів мережі, моделей енергоспоживання, початкових умов і наборів показників. Така неоднорідність експериментальних сценаріїв обмежує можливість безпосереднього зіставлення алгоритмів і не дозволяє переносити перевагу одного підходу на довільну топологію.

Отже, невіршеним залишається експериментально узгоджене оцінювання різних метаевристичних способів пошуку маршруту на одній і тій самій топології. Для усунення впливу сторонніх чинників алгоритми необхідно досліджувати за спільної множини сенсорних вузлів, однакового радіуса їхньої дії, незмінної пари «джерело–отримувач» та єдиного критерію оцінювання. Все це в сукупності обумовлює актуальність даного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рисунку 1 наведено послідовність функціонування ГА, призначеного для визначення маршруту передавання даних між заданими сенсорними вузлами.

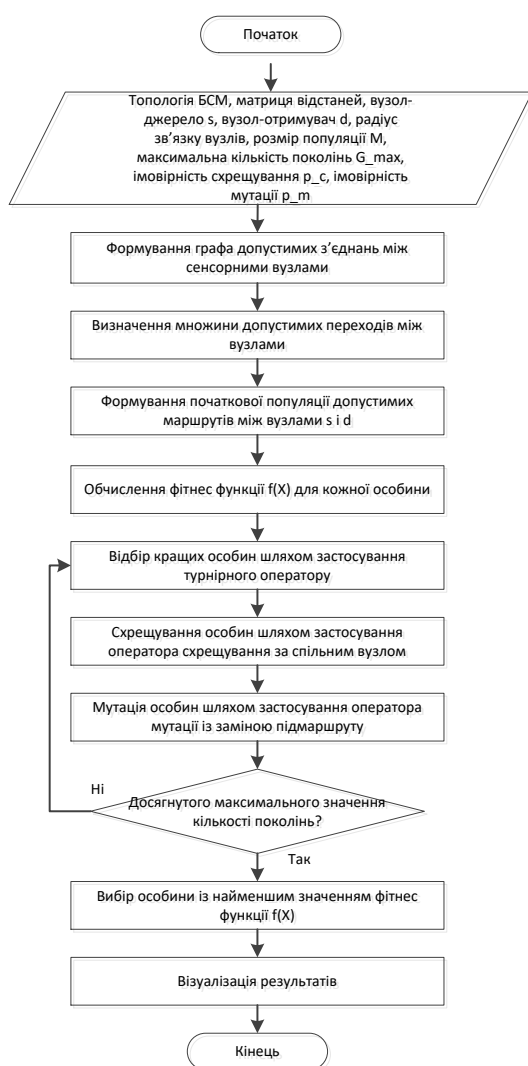


Рис. 1. ГА пошуку маршруту передавання даних між заданою парою сенсорних вузлів

Досліджувана БСМ розглядається як зважений граф, вершинами якого є сенсорні вузли, а ребрами – допустимі переходи між ними. Значення ваг ребер визначаються відповідно до відстаней між вузлами.

На початковому етапі задаються топологія БСМ, матриця відстаней, вузол-джерело s , вузол-

отримувач d , радіус зв'язку, чисельність популяції M , максимальна кількість поколінь, імовірність схрещування та мутації. Зазначені параметри визначають як структуру простору можливих маршрутів, так і інтенсивність еволюційного оновлення популяції.

На основі топологічної інформації формується граф допустимих з'єднань. Ребро між двома сенсорними вузлами включається до графа лише за умови, що відповідний перехід задовольняє встановлене обмеження радіодоступності. Якщо всі вузли мають однаковий радіус r , умову безпосереднього зв'язку можна подати як $d_{ij} \leq r$, де

d_{ij} – відстань між вузлами i, j . Після побудови графа визначаються допустимі переходи між вершинами. Для кожного вузла формується множина сусідніх сенсорів, до яких дані можуть бути передані безпосередньо. Така попередня підготовка дає змогу під час створення та модифікації особин використовувати лише наявні ребра графа.

Кожна особина популяції представляє окремий маршрут від джерела до отримувача:

$$P^{(k)} = [s, v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \dots, v_{h_k}^{(k)}, d], \quad (1)$$

де $v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \dots, v_{h_k}^{(k)}$ – проміжні вузли, а h_k залежить від кількості переходів у конкретному маршруті. Отже, особини можуть мати різну довжину, що є характерною особливістю прямого кодування шляхів у графі.

Початкова популяція формується з множини допустимих маршрутів між s і d . Кожна послідовна пара вузлів у хромосомі повинна відповідати ребру графа. Для кожної особини обчислюється значення цільової функції, при цьому критерієм є сумарна геометрична довжина, що визначається як

$$f(P^{(k)}) = \sum_{i=0}^{h_k} (v_i^{(k)}, v_{i+1}^{(k)}). \quad (2)$$

Першим генетичним оператором у схемі є турнірний відбір, призначення якого полягає у виборі батьківських маршрутів, які братимуть участь у рекомбінації. Із поточної популяції випадково утворюється група з q особин, серед яких обирається маршрут із найменшим значенням цільової функції. Процедура повторюється доти, доки не буде сформовано необхідну кількість батьківських пар. Турнірний відбір створює перевагу для коротших маршрутів, проте не обмежує вибір лише однією найкращою особиною. Завдяки випадковому формуванню турнірів частина менш пристосованих рішень також може бути відібрана, що допомагає зберігати різноманітність популяції.

Для рекомбінації застосовується оператор схрещування маршрутів за спільним проміжним вузлом. Цей оператор відповідає структурі

маршрутних хромосом краще, ніж звичайне одноточкове або двоточкове позиційне схрещування. Об'єднання виконується в однаковій вершині графа, тому в місці стику успадкованих фрагментів зберігається зв'язність.

Водночас після рекомбінації можуть виникати повторні вершини або цикли, якщо вузли завершальної частини одного маршруту вже містяться в початковій частині іншого. Тому результати схрещування потребують перевірки та, за необхідності, усунення повторень.

Наступним оператором є мутація підмаршруту, яка призначена для внесення структурної зміни до окремої маршрутної хромосоми та розширення множини досліджуваних шляхів. У вибраному маршруті випадково визначаються два вузли, після цього фрагмент, розміщений між ними, вилучається. Далі формується інший допустимий підмаршрут, який з'єднує ті самі граничні вершини. Початкова та завершальна частини хромосоми при цьому зберігаються. Альтернативний підмаршрут створюється відповідно до матриці суміжності, тому всі його послідовні вершини повинні бути з'єднані допустимими ребрами.

Після генетичних перетворень перевіряється умова досягнення максимальної кількості поколінь. Якщо значення лічильника не досягло $G_{\max}$, то робота продовжується. Після завершення всіх поколінь із популяції обирається маршрут із мінімальним значенням цільової функції.

Алгоритм оптимізації мурашиною колонією (ACO) застосовується для пошуку маршруту передавання даних між заданими сенсорними вузлами на основі колективного накопичення інформації про перспективність окремих переходів (рис. 2). Його пошуковий механізм відтворює принцип непрямой взаємодії агентів: кожна мураха самостійно формує один із можливих шляхів, а результати всіх агентів використовуються для коригування феромонних значень на ребрах графа. У наступних ітераціях переходи, що входили до коротших маршрутів, одержують вищу ймовірність повторного вибору.

На початку роботи кожному допустимому ребру графа присвоюється однакове додатне значення феромону: $\tau_{ij}(0) = \tau_0$. Ненульова початкова концентрація потрібна для того, щоб усі допустимі переходи мали можливість бути вибраними на перших ітераціях. Якщо окремим ребрам одразу надати надто велике значення, алгоритм може передчасно зосередити пошук на обмеженій частині мережі. Крім феромонної матриці, для кожного ребра визначається евристична привабливість. За критерієм мінімальної довжини вона може обчислюватися як $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$. Отже, коротші переходи отримують більше значення η_{ij} .

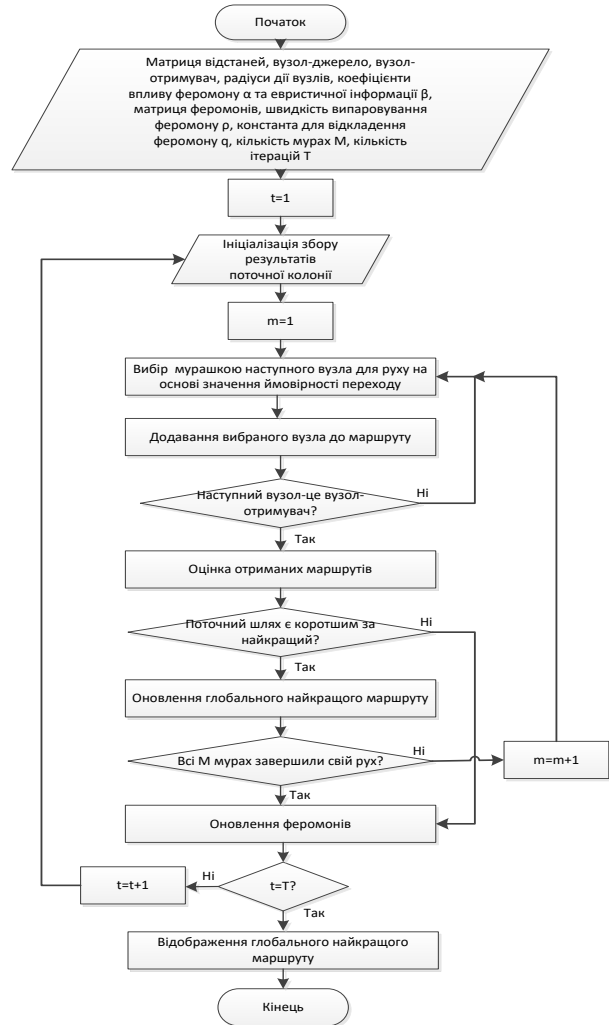


Рис. 2. ACO пошуку маршруту передавання даних між заданою парою сенсорних вузлів

На початку кожної ітерації всі M агентів розміщуються у вузлі-джерелі s . Для m -ї мурахи ініціалізується маршрут, створюється список уже відвіданих вершин для запобігання повторному проходженню того самого сенсора та виникненню циклів.

Перебуваючи у поточному вузлі v_i , агент визначає множину допустимих наступних вершин $A_i^{(m)} = \{v_j \in V, j \in E\}$, з якими існує безпосереднє з'єднання і які ще не були включені до поточного маршруту.

Наступна вершина не задається детерміновано. Ймовірність переходу m -ї мурахи з вузла i до допустимого вузла j на ітерації t визначається співвідношенням [16]

$$p_{ij}^{(m)}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in A_i^{(m)}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, j \in A_i^{(m)} \quad (3)$$

Коефіцієнт α визначає силу впливу накопиченої інформації про попередні проходження. Зі збільшенням α агенти частіше обирають ребра з високим рівнем феромону. Надмірно велике значення може призвести до швидкого закріплення одного маршруту та втрати пошукового різноманіття. Коефіцієнт β регулює роль локальної евристичної оцінки. За великого β перевага надається коротшим ребрам, однак послідовність локально вигідних переходів не завжди формує найкоротший шлях у цілому.

Співвідношення α та β визначає баланс між двома механізмами: використанням інформації, накопиченої колонією; дослідженням маршрутів відповідно до локальних характеристик топології.

Після обчислення значень $p_{ij}^{(m)}$ один із вузлів вибирається методом випадкового відбору відповідно до сформованого розподілу ймовірностей. Обрана вершина додається до маршруту, процедура повторюється до досягнення вузла-отримувача d .

Після того як агент досяг адресата, визначається вартість побудованого маршруту. Для критерію сумарної довжини вона обчислюється як

$$L(P_m) = \sum_{k=0}^{h_m-1} d(v_k^{(m)}, v_{k+1}^{(m)}), \quad (4)$$

де h_m - кількість переходів у маршруті m -ї мурахи. Поточне рішення порівнюється з глобально найкращим маршрутом. Якщо $L(P_m) < L(P_{best})$, то виконується оновлення $P_{best} \leftarrow P_m$. Після завершення руху всіх M мурах здійснюється коригування феромонної матриці. Ця процедура містить два взаємопов'язані процеси: випаровування накопиченої інформації та підсилення ребер, використаних у знайдених маршрутах. Загальне правило можна подати як

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^{(m)}(t), \quad (5)$$

де ρ - коефіцієнт випаровування, $\Delta\tau_{ij}^{(m)}$ - феромон, відкладений m -ою мурахою.

Для маршрутизації за мінімальною довжиною величину відкладення доцільно визначати як:

$$\Delta\tau_{ij}^{(m)}(t) = \begin{cases} \frac{q}{L(P_m)}, & i, j \in P_m \\ 0, & i, j \notin P_m \end{cases} \quad (6)$$

Оскільки $\frac{q}{L(P_m)}$ є більшим для коротших маршрутів, їхні ребра одержують інтенсивніше підсилення. У наступній ітерації це збільшує ймовірність повторного використання відповідних переходів іншими агентами. Випаровування описується складником $(1-\rho)\tau_{ij}(t)$, що послаблює застарілий феромонний слід і не дозволяє початково популярним ребрам необмежено накопичувати перевагу. За малого ρ попередня інформація зберігається довго, тому алгоритм повільніше реагує на нові рішення. Велике значення ρ прискорює забування, але може зменшити стійкість пошуку. Після оновлення феромонів номер ітерації збільшується.

Якщо умова $t < T$ виконується, то створення маршрутів повторюється. Усі агенти знову починають рух із вузла-джерела, але тепер використовують оновлену феромонну матрицю. Таким чином, досвід попередніх ітерацій впливає на нові рішення.

На перших ітераціях маршрути відрізняються значною різноманітністю, оскільки феромон розподілений майже рівномірно. Після декількох циклів ребра перспективних шляхів отримують додаткове підсилення. Поступово більша частина колонії концентрується на обмеженій множині маршрутів із кращими значеннями цільової функції.

Алгоритм завершується після виконання T ітерацій. Результатом є глобально найкращий маршрут:

$$P^* = \operatorname{arg\,min}_{P \in \Omega_{ACO}} L(P), \quad (7)$$

де Ω_{ACO} - множина допустимих шляхів, сформованих усіма агентами протягом пошуку.

Завершальний етап передбачає відображення маршруту на топології БСМ і виведення його характеристик: послідовності номерів вузлів, сумарної довжини, кількості проміжних сенсорів та числа міжвузлових переходів.

Для експериментального порівняння сформовано топології БСМ, що містить 25 та 100 вузлів, розташованих у двовимірній області. Для всіх сенсорів встановлено однаковий радіус безпосереднього зв'язку, що дорівнює 30 м. Пошук маршруту виконувався між вузлами 4 і 20 для 25 вузлів та між вузлами 9 і 90 для 100 вузлів із використанням алгоритмів ГА та АСО. Для обох методів застосовувалася та сама координатна конфігурація, тому відмінності сформованих шляхів зумовлені особливостями пошукових механізмів, а не зміною топології мережі.

На рис. 3 представлено просторову конфігурацію досліджуваної БСМ із 25 та 100 вузлів.

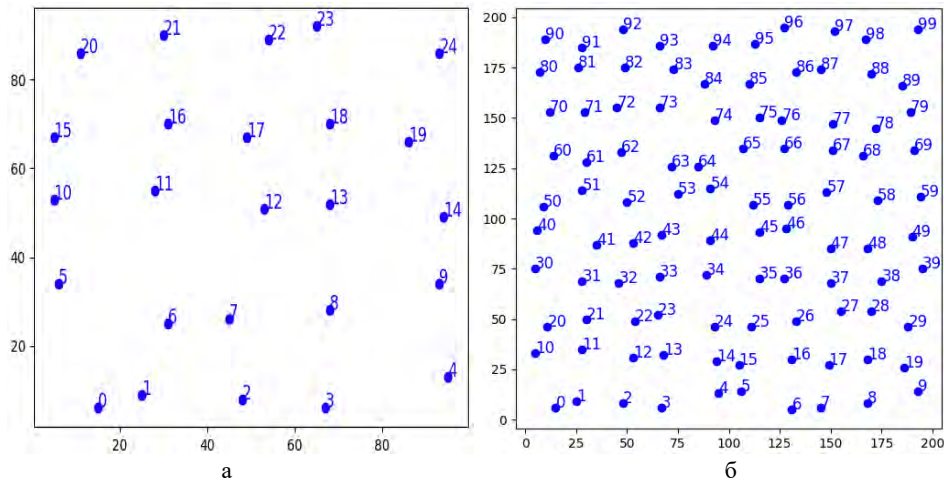
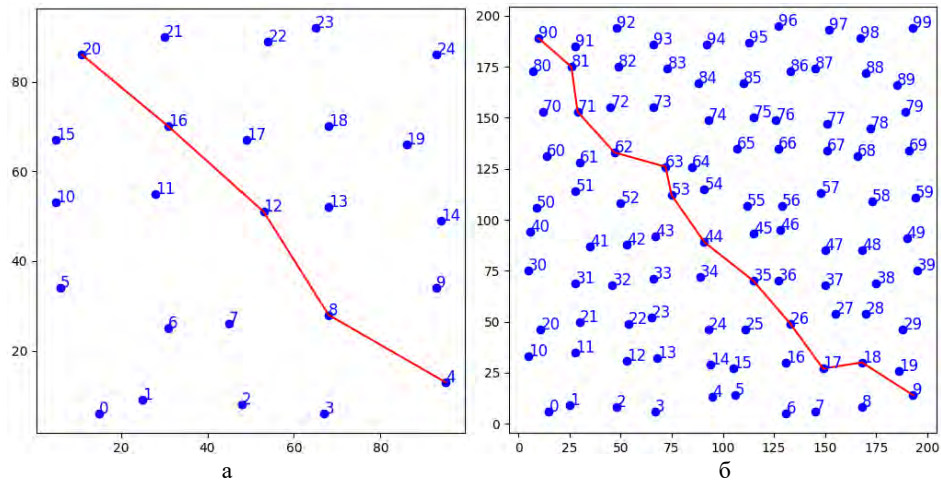


Рис. 3. Просторова конфігурація досліджуваної БСМ: а – із 25 вузлів; б – із 100 вузлів

Рис. 4. Найкращий маршрут, знайдений ГА у досліджуваній топології БСМ:
а – для топології із 25 вузлів; б – для топології із 100 вузлів

Вузли розміщені по всій площі досліджуваної області, унаслідок чого між початковою і кінцевою точками існує декілька можливих ланцюгів ретрансляції. За заданого радіуса зв'язку перехід між двома сенсорами вважається допустимим лише тоді, коли відстань між ними не перевищує 30 м. Отже, маршрут не може формуватися шляхом довільного включення вузлів: кожна пара послідовних елементів повинна відповідати наявному безпроводному з'єднанню. Така структура створює комбінаторну множину можливих шляхів, серед яких алгоритми мають визначити варіант із найменшим значенням прийнятої цільової функції.

У результаті еволюційного пошуку для представлених топологій генетичним алгоритмом сформовано маршрут, представлений на рис. 4.

На рис. 5 показано зміну найкращого та середнього значень функції оцінювання протягом 200 поколінь. На початковому етапі спостерігається різке зменшення обох показників. Це означає, що сформована випадковим чином початкова популяція містила переважно довгі або невідповідні маршрути, які

вже протягом перших поколінь були замінені кращими послідовностями вузлів.

Приблизно протягом перших 40–60 поколінь інтенсивність покращення є найбільшою. Надалі нахил кривих поступово зменшується, що відповідає переходу від пошуку принципово нових напрямів до локального уточнення вже знайдених маршрутів. Після орієнтовно 100 поколінь значення функції змінюються незначно, а криві переходять у майже горизонтальну область. Така поведінка вказує на стабілізацію популяції поблизу найкращого знайденого рішення.

Зменшення відстані між середнім і найкращим значеннями свідчить про поступове вирівнювання якості особин. Значна частина популяції набуває характеристик, близьких до найкращого маршруту, тобто різноманітність рішень зменшується. Це є типовою ознакою збіжності еволюційного алгоритму.

На рис. 6 сформовано маршрут при використанні АСО.

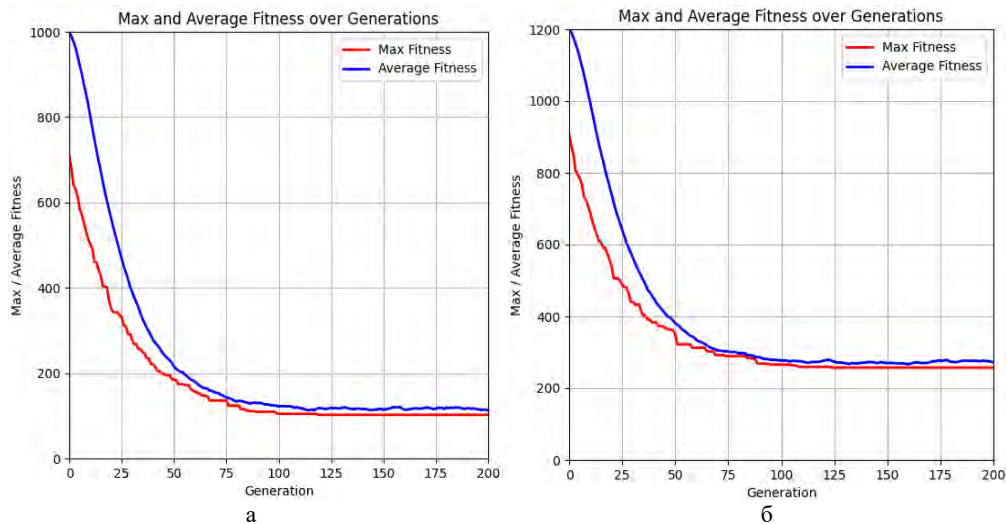


Рис. 5. Динаміка найкращого та середнього значень цільової функції ГА:
а – для топології із 25 вузлів; б - для топології із 100 вузлів

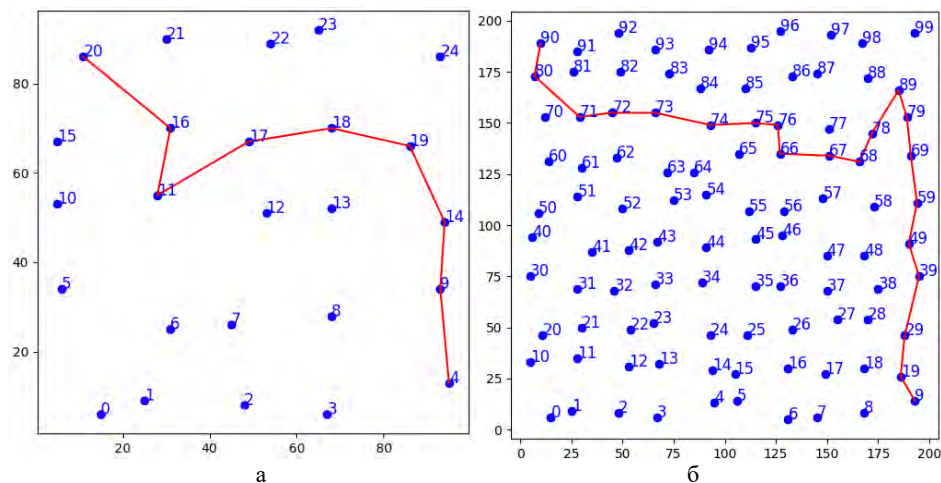


Рис. 6. Найкращий маршрут, знайдений АСО у досліджуваній топології БСМ :
а – для топології із 25 вузлів; б – для топології із 100 вузлів

Таблиця 1

Кількісні характеристики маршрутів, отриманих методами ГА та АСО

Параметри досліджуваної топології	Показник	ГА	АСО
25 вузлів, розмір досліджуваного поля 100×100 м	Маршрут	4–8–12–16–20	4–9–14–19–18–17–11–16–20
	Кількість переходів	4	8
	Сумарна довжина, м	111	155
100 вузлів, розмір досліджуваного поля 200×200 м	Маршрут	9–18–17–26–35–44–53–63–62–71–81–90	9–19–29–39–49–59–69–79–89–78–68–67–66–76–75–74–73–72–71–80–90
	Кількість переходів	11	20
	Сумарна довжина, м	268	387

Порівняно з результатом ГА цей шлях має вираженіший обхідний характер. Така поведінка може бути пов'язана з принципом роботи АСО. Мурахи формують маршрут послідовно, приймаючи рішення в кожному поточному вузлі на основі феромонної інформації та локальної евристичної привабливості доступних переходів. Локально доцільний вибір не завжди приводить до найкоротшої повної послідовності. Якщо на початкових ітераціях певні ребра отримали

інтенсивніше феромонне підсилення, колонія могла поступово зосередитися на довшому напрямі.

Разом із тим отриманий шлях є допустимим результатом алгоритму: він забезпечує послідовне передавання даних між заданими кінцевими вузлами. Його недоліком у розглянутому експерименті є більша кількість ретрансляцій і більша загальна довжина.

Кількісні характеристики отриманих результатів наведено в таблиці 1.

В обох досліджуваних сценаріях ГА сформував коротші маршрути з меншою кількістю міжвузлових переходів порівняно з АСО. Для топології з 25 вузлів маршрут, використання ГА забезпечило скорочення довжини шляху на 28,39 %, а кількості переходів – на 50 %, тоді як для топології зі 100 вузлів – зменшило сумарну довжину маршруту на 30,75 %, а кількість переходів – на 45 %.

Отримані дані засвідчують перевагу еволюційного способу пошуку в межах розглянутих експериментальних сценаріїв.

Висновки. У роботі досліджено застосування генетичного алгоритму та алгоритму мурашиної колонії для визначення маршруту передавання даних у безпроводній сенсорній мережі. Для проведення імітаційного моделювання розроблено програмне середовище на мові Python. Для досліджень використано топологію із 25 та 100 статично розміщених сенсорних вузлів із радіусом зв'язку 30 м. Показано, що за заданих умов застосування ГА забезпечило формування маршруту, сумарна довжина якого була меншою порівняно з маршрутом, отриманим методом АСО: на 28,39 % для топології з 25 вузлів і на 30,75 % для топології зі 100 вузлів.

Отримані результати демонструють різницю між досліджуваними пошуковими стратегіями. Генетичний алгоритм опрацьовує маршрут як цілісну послідовність вузлів і вдосконалює множину альтернативних рішень шляхом відбору, схрещування та мутації. Алгоритм мурашиної колонії формує шлях послідовно, спираючись на феромонну інформацію та локальну евристичну привабливість переходів. У досліджуваних конфігураціях цілісне еволюційне опрацювання маршрутів дало змогу знайти коротший шлях із меншою кількістю ретрансляцій.

Література

- Swati, Arora M. Several categories of energy-efficient routing protocols, features, and security necessities in WSN: A review // 2022 3rd International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT). Ghaziabad, India, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICT55121.2022.10064506>.
- Chen H. Analysis and research of WSN reliable routing protocol // 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN). Sanya, China, 2022. P. 680–683. DOI: <https://doi.org/10.1109/BDICN55575.2022.00131>.
- Пиріг Я., Пиріг Ю. Аналіз стратегій маршрутизації даних для безпроводних сенсорних мереж // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. Т. 351, № 3.1. С. 410–414. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-50>.
- Chanachan C., Sirisethakarn M., Khapla P., Polvichai J. A comparison of route optimization algorithms on capacitated vehicle routing problem // 2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC). Jeju, Republic of Korea, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC58803.2023.10212815>.
- Ju J. Computer network routing algorithm based on genetic algorithm // 2022 World Automation Congress (WAC). San Antonio, TX, USA, 2022. P. 207–211. DOI: <https://doi.org/10.23919/WAC55640.2022.9934294>.
- Pyrih Y., Pyrih Y. Improving the efficiency of data routing in wireless sensor networks using a genetic algorithm with dynamic adaptation of crossover and mutation probabilities // 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288606>.
- Anand S., H. N. R. Enhancing energy efficiency routing protocol for wireless sensor network using ACO algorithm // 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon). Vijaypur, India, 2022. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126842>.
- Sharmin A., Anwar F., Motakabber S. M. A., Hashim A.-H. A. Secure ACO-based wireless sensor network routing algorithm for IoT // 2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Kuala Lumpur, Malaysia, 2021. P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCE50029.2021.9467223>.
- Sharma D., Pandey R. P. Node disjoint local repair using ACO algorithm in MANET-multipath routing // 2022 Second International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE). Bangalore, India, 2022. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICATIECE56365.2022.10047505>.
- Pyrih Y., Pyrih Y., Andrukhiv T. Evolutionary algorithm for determining the data transmission route between sensor nodes // 2026 IEEE 18th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). Lviv, Ukraine, 2026. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET65181.2026.11461136>.
- Pyrih Y., Pyrih Y., Maksymyuk T., Dumych S., Klymash M. Genetic algorithm based routing in wireless sensor networks with various distance metrics // International Journal of Computing. 2024. Vol. 23, No. 4. P. 715–725. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3774>.
- Regilan S., Hema L. K. Optimizing energy efficiency and routing in wireless sensor networks through genetic algorithm-based cluster head selection in a grid-based topology // Journal of High Speed Networks. 2024. Vol. 30, No. 4. P. 569–582. DOI: <https://doi.org/10.3233/JHS-230209>.
- Wu L., Dawod A. Y., Miao F. Data transmission in wireless sensor networks based on ant colony optimization technique // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 12. Article 5273. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125273>.
- Han H., Tang J., Jing Z. Wireless sensor network routing optimization based on improved ant colony algorithm in the Internet of Things // Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 1. Article e23577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23577>.
- Khujamatov H., Pitchai M., Shamsiev A., Mukhamadiyev A., Cho J. Clustered routing using chaotic genetic algorithm with grey wolf optimization to enhance energy efficiency in sensor networks // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 13. Article 4406. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24134406>.
- Shao L., Zhang L., Zhang L., Liu Y., Hu C. An improved swarm intelligence optimization algorithm for Internet routing optimization // 2025 6th International Symposium

on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC). Chongqing, China, 2025. P. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCEIC67854.2025.11405686>.

References

- Swati, Arora M. Several categories of energy-efficient routing protocols, features, and security necessities in WSN: A review // 2022 3rd International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT). Ghaziabad, India, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICT55121.2022.10064506>.
- Chen H. Analysis and research of WSN reliable routing protocol // 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN). Sanya, China, 2022. P. 680–683. DOI: <https://doi.org/10.1109/BDICN55575.2022.00131>.
- Pyrih Ya., Pyrih Yu. Analiz stratehii marshrutyzatsii danykh dlia bezprovodnykh sensorykh merezh // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. T. 351, № 3.1. S. 410–414. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-50>.
- Chanachan C., Sirisethakarn M., Khapla P., Polvichai J. A comparison of route optimization algorithms on capacitated vehicle routing problem // 2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC). Jeju, Republic of Korea, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC58803.2023.10212815>.
- Ju J. Computer network routing algorithm based on genetic algorithm // 2022 World Automation Congress (WAC). San Antonio, TX, USA, 2022. P. 207–211. DOI: <https://doi.org/10.23919/WAC55640.2022.9934294>.
- Pyrih Y., Pyrih Y. Improving the efficiency of data routing in wireless sensor networks using a genetic algorithm with dynamic adaptation of crossover and mutation probabilities // 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288606>.
- Anand S., H. N. R. Enhancing energy efficiency routing protocol for wireless sensor network using ACO algorithm // 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon). Vijaypur, India, 2022. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126842>.
- Sharmin A., Anwar F., Motakabber S. M. A., Hashim A.-H. A. Secure ACO-based wireless sensor network routing algorithm for IoT // 2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Kuala Lumpur, Malaysia, 2021. P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCE50029.2021.9467223>.
- Sharma D., Pandey R. P. Node disjoint local repair using ACO algorithm in MANET-multipath routing // 2022 Second International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE). Bangalore, India, 2022. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICATIECE56365.2022.10047505>.
- Pyrih Y., Pyrih Y., Andrukhiy T. Evolutionary algorithm for determining the data transmission route between sensor nodes // 2026 IEEE 18th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). Lviv, Ukraine, 2026. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET65181.2026.11461136>.
- Pyrih Y., Pyrih Y., Maksymyuk T., Dumych S., Klymash M. Genetic algorithm based routing in wireless sensor networks with various distance metrics // International Journal of Computing. 2024. Vol. 23, No. 4. P. 715–725. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3774>.
- Regilan S., Hema L. K. Optimizing energy efficiency and routing in wireless sensor networks through genetic algorithm-based cluster head selection in a grid-based topology // Journal of High Speed Networks. 2024. Vol. 30, No. 4. P. 569–582. DOI: <https://doi.org/10.3233/JHS-230209>.
- Wu L., Dawod A. Y., Miao F. Data transmission in wireless sensor networks based on ant colony optimization technique // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 12. Article 5273. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125273>.
- Han H., Tang J., Jing Z. Wireless sensor network routing optimization based on improved ant colony algorithm in the Internet of Things // Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 1. Article e23577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23577>.
- Khujamatov H., Pitchai M., Shamsiev A., Mukhamadiyev A., Cho J. Clustered routing using chaotic genetic algorithm with grey wolf optimization to enhance energy efficiency in sensor networks // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 13. Article 4406. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24134406>.
- Shao L., Zhang L., Zhang L., Liu Y., Hu C. An improved swarm intelligence optimization algorithm for Internet routing optimization // 2025 6th International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC). Chongqing, China, 2025. P. 85–88. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCEIC67854.2025.11405686>.

Pyrih Yu.V., Pyrih Ya.R. Optimization of data transmission routing in wireless sensor networks using a genetic algorithm and the ant colony optimization algorithm.

This paper addresses the problem of determining a data transmission route between sensor nodes in a wireless sensor network (WSN) using two metaheuristic approaches: a genetic algorithm (GA) and the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm. The relevance of this study stems from the fact that the selection of intermediate relay nodes directly affects the route length, the number of packet reception and retransmission operations, transmission delay, and overall network performance. The aim of the work is a methodologically consistent comparison of the genetic algorithm and the ant colony optimisation algorithm under a shared topology, an identical communication radius (30 m), a fixed source-destination node pair, and a single criterion of minimising the total route length, in order to evaluate the impact of the search mechanism on the selection of the optimal route.

In the GA, each candidate solution is encoded as an ordered sequence of sensor nodes connecting the source and destination nodes. The population is evolved using tournament selection, route crossover based on a common intermediate node, and sub-route mutation. The fitness of each chromosome is evaluated according to the total length of the edges comprising the corresponding route. Analysis of the best and average fitness values over 200 generations demonstrated rapid improvement during the initial evolutionary stage, followed by a gradual slowdown in the search process. After approximately 100 generations, the fitness values stabilized,

indicating that the evolutionary process had converged toward the vicinity of the best solution found.

The ACO algorithm constructs routes incrementally using artificial agents. The probability of selecting the next sensor node is determined by combining pheromone intensity with the heuristic desirability of each feasible transition. After all ants complete their routes, the pheromone levels are updated through evaporation and reinforcement of the edges belonging to shorter paths. Through repeated updates of the pheromone matrix, the colony progressively accumulates knowledge about promising data transmission routes.

Based on the simulation results, within the investigated scenario, the application of the genetic algorithm ensured the formation of a route whose total length was shorter compared to the route obtained by the ACO method: by 28.39% for the 25-node topology and by 30.75% for the 100-node topology. These findings indicate that, for the given network topology, the evolutionary optimization of complete route chromosomes produced a more compact data transmission path, whereas the stepwise pheromone-guided search strategy resulted in a longer route.

Keywords: wireless sensor network; routing; genetic algorithm; Ant Colony Optimization; metaheuristic optimization.

Пиріг Юлія Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

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

email: yuliia.v.klymash@lpnu.ua

Пиріг Ярослав Романович – PhD, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

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

email: yaroslav.r.pyrih@lpnu.ua

Дата першого надходження статті 23.07.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.

Дата публікації 30.09.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)