УДК 004.25+164.01
DOI: 10.31732/2663-2209-2021-62-125-131

КОМБІНУВАННЯ ЖАДІБНОГО АЛГОРИТМУ З МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЛОГІСТИКИ, В ОСНОВІ ЯКИХ ЛЕЖИТЬ ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА

Троцько В.В.[1], Чернозубкін І.О.[2]
[1] к.військ.н., доцент кафедри комп'ютерних наук, ВНЗ «Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна, e-mail: trotskovv@krok.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4656-0615
[2] к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук, ВНЗ «Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна, e-mail: igorch@krok.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-4714

COMBINING A GREEDY ALGORITHM WITH THE MONTE CARLO METHOD TO SOLVE LOGISTICS PROBLEMS BASED ON THE TSP

Trotsko Volodymyr[1], Chtrnozubkin Ihor[2]
[1] PhD (Military), associate professor of computer science department, "KROK" University, Kyiv, Ukraine, e-mail: trotskovv@krok.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4656-0615
[2] PhD (Technical), associate professor of computer science department, "KROK" University, Kyiv, Ukraine, e-mail: igorch@krok.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3243-4714

Анотація. *Однією із нагальних проблем існуючих систем логістики є транспортування за оптимальними(в ідеальному випадку найкоротшими) маршрутами. Як правило вирішення цієї проблеми зводиться до вирішення задачі комівояжера (TSP-problem) і потребує розробки алгоритмів, які б забезпечували її вирішення за найкоротший час. Найбільш швидким алгоритмом для вирішення задачі комівояжера є жадібний алгоритм, оскільки він передбачає лише одну ітерацію для пошуку маршруту через визначення мінімальних довжин ділянок на кожному кроці. Однак, його результати далекі від оптимальних. Метою статті є оцінка можливості комбінування жадібного алгоритму для вирішення практичних логістичних завдань, в основі яких лежить задача комівояжера. У статті запропоновано комбінований алгоритм для розв'язання задачі комівояжера який ґрунтується на одночасному використанні жадібного алгоритму та алгоритму, який ґрунтується на застосуванні методу Монте-Карло. Запропоноване комбінування передбачає на початковому етапі алгоритму використовувати жадібний алгоритм через те, що саме на цьому етапі він має високу продуктивність. На завершальному етапі запропоновано використовувати метод Монте-Карло для вибору ділянок маршруту – пошук з використанням випадкових значень. Шляхом комп'ютерного моделювання доведено перевагу комбінованого алгоритму над жадібним, що дозволить ефективно його використовувати для вирішення завдань логістики. Перевірка адекватності моделі була здійснена шляхом підрахунку середнього результату для 50 випадкових варіантів задачі комівояжера, що містить десять міст. Виконані розрахунки також дозволили зробити припущення, про недостатню продуктивність метаевристичних алгоритмів для вирішення задачі комівояжера з мінімальним часом, оскільки всі вони містять в своєму складі тривалі обчислювальні процедури, що сповільнюють обчислення. У якості прикладу в статті були наведені формульні залежності двох метаевристичних алгоритмів – алгоритму імітації відпалу та алгоритму мурашиної колонії. Проведення подальших досліджень дозволить підтвердити або спростувати це твердження.*

Ключові слова: *жадібний алгоритм, метод Монте-Карло, задача комівояжера, метаевристичні алгоритми, логістика.*
Формули: 2; рис.: 4; табл.: 1; бібл.: 7

Annotation. One of the urgent problems of existing logistics systems is transportation on optimal (ideally the shortest) routes. As a rule, the solution of this problem is reduced to solving the problem of the salesman (TSP-problem) and requires the development of algorithms that would ensure its solution in the shortest time. The fastest algorithm for solving the problem of a salesman is a greedy algorithm, because it involves only one iteration to find the route by determining the minimum lengths of sections at each step. However, its results are far from optimal. The aim of the article is to evaluate the possibility of combining a greedy algorithm to solve practical logistical problems, which are based on the task of a salesman. The article proposes a combined algorithm for solving the problem of a salesman based on the simultaneous use of a greedy algorithm and an algorithm based on the application of the Monte Carlo method. The proposed combination involves the use of a greedy algorithm at the initial stage of the algorithm due to the fact that it is at this stage that it has high performance. At the final stage, it is proposed to use the Monte Carlo method to select sections of the route - search using random values. The advantage of the combined algorithm over the greedy *one has been proved by computer modeling, which will allow to use it effectively for solving logistics problems. The adequacy of the model was verified by calculating the average result for 50 random variants of the salesman problem containing ten cities. The performed calculations also allowed to make assumptions about the insufficient performance of metaheuristic algorithms to solve the problem of the salesman with minimal time, because they all contain long computational procedures that slow down the calculations. As an example, the formulaic dependences of two metaheuristic algorithms - the annealing simulation algorithm and the ant colony algorithm - were given in the article. Further research will confirm or refute this statement.*

Key words: *greedy algorithm, Monte Carlo method, travelling salesman problem, metaheuristic algorithms, logistic.*
Formulas:2; fig.: 4; tabl.: 1; bibl.: 7

Постановка проблеми. Задача комівояжера (TSP) належить до однієї з найпоширеніших задач комбінаторної логіки. На цій задачі ґрунтується низка рішень в області логістики. Ці рішення набувають особливого значення в умовах динамічного розвитку сучасної економіки, коли швидкими темпами не тільки зростають транспортні потоки глобального чи локального масштабів, а й розв'язуються задачі автоматизованого обслуговування терміналів та сховищ. Оптимальне чи близьке до оптимального розв'язання цієї задачі у конкретних умовах дозволяє суттєво знижувати транспортні затрати та скорочувати маршрути постачання, що дає значний економічний ефект. Необхідність в ефективних оптимізованих рішеннях потребує здійснення досліджень умов застосування різних алгоритмів для розв'язання задачі комівояжера та оцінювання їх практичного застосування. Тому завдання з оцінювання застосування алгоритмів та евристичних алгоритмів, зокрема для розв'язання задачі комівояжера, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині є надзвичайно багато напрацювань вчених щодо розв'язання задачі комівояжера. Поряд із досить відомими методами, такими як алгоритм Літтла, метод гілок і меж, модифікації методу лінійного програмування [1] тощо, що ґрунтуються на точних математичних підходах щодо досягнення оптимального рішення, активно застосовуються також метаевристичні алгоритми.

Особливістю наведених алгоритмів є використання ітераційних процедур, у більшості яких встановлюється асимптотична збіжність найкращого рішення до оптимального результату. До них належать, зокрема, генетичні та еволюційні алгоритми, алгоритм імітації відпалу, алгоритм мурашиної колонії, алгоритм зозулі та багато інших [2, 3]. Однак проблематичним є питання, яким чином скоротити час обчислення маршруту TSP при отриманні практично прийнятного або наближеного до оптимального результату. Особливо актуально це питання для розв'язання логістичних задач, де від результату значним чином залежать ефективність транспортування і отримання прибутку.

Формулювання цілей статті. Метою статті є оцінка можливості комбінування жадібного алгоритму для вирішення практичних логістичних завдань, в основі яких лежить задача комівояжера.

Викладення основного матеріалу дослідження. Бажаним ідеальним результатом розв'язання TSP є знаходження оптимального маршруту для сукупності міст за заданим критерієм відповідності. Найчастіше таким критерієм є відстань, яку прагнуть мінімізувати. За наявності великої кількості міст важливим питанням, з точки зору практичного застосування, є час, за який такий маршрут може бути знайдений. Прийнятні результати пошуку сьогодні демонструють евристичні (метаевристичні) алгоритми, що дозволяють наблизити рішення TSP до оптимального. "Ціною" такого наближення є обчислювальні ресурси, у першу чергу, час розв'язання задачі.

Очевидно, що серед інших евристичних алгоритмів мінімальний час розв'язання задачі TSP має жадібний алгоритм. Ця теза не потребує пояснення, оскільки цей алгоритм здійснює пошук маршруту лише один раз, обираючи на кожному кроці ділянку мінімальної довжини. Решта евристичних алгоритмів, у тому числі й метаевристичні, використовують повторний пошук оптимального маршруту, наближуючись до оптимального. “Ціною” такого пошуку є затрати часу на перебір варіантів.

Показовим у цьому плані є порівняльний аналіз роботи результатів застосування жадібного алгоритму та алгоритму, що реалізовує метод Монте-Карло. Для порівняння авторами було використано варіант TSP із 10 містами. Варіант формувався шляхом випадкового генерування довжин кожної ділянки в межах від 1 до 100. Усього було згенеровано і обчислено 50 варіантів, для кожного із яких застосовувалися почергово жадібний алгоритм та алгоритм з методом Монте-Карло. На рис. 1 показано результат порівняння середньої довжини маршруту для 50 варіантів, коли для алгоритму з методом Монте-Карло застосовувався перебір 100, 5000 та 10000 варіантів. Судячи з наведених на рис. 1 результатів, алгоритм з методом Монте-Карло почав давати кращі (оптимальні) результати порівняно з жадібним алгоритмом тільки після 5000 повторів.

“Ціною” такої результативності став час виконання алгоритму з методом Монте-Карло. Порівняння часу виконання для різної кількості повторів показане на рис. 2. Середній час виконання алгоритму з методом Монте-Карло збільшився у 69 разів.

Для практичного використання, у тому числі й вирішення логістичних завдань, використання евристичних алгоритмів з повторним пошуком є неприйнятним. Ураховуючи те, що всі метаевристичні алгоритми застосовують елементи випадкового пошуку, та ще й додають низку складних обчислень [4], використання їх на практиці також є ускладненим, особливо при зростанні кількості міст. Тому очевидно, що сьогодні жадібний алгоритм застосовують досить широко.

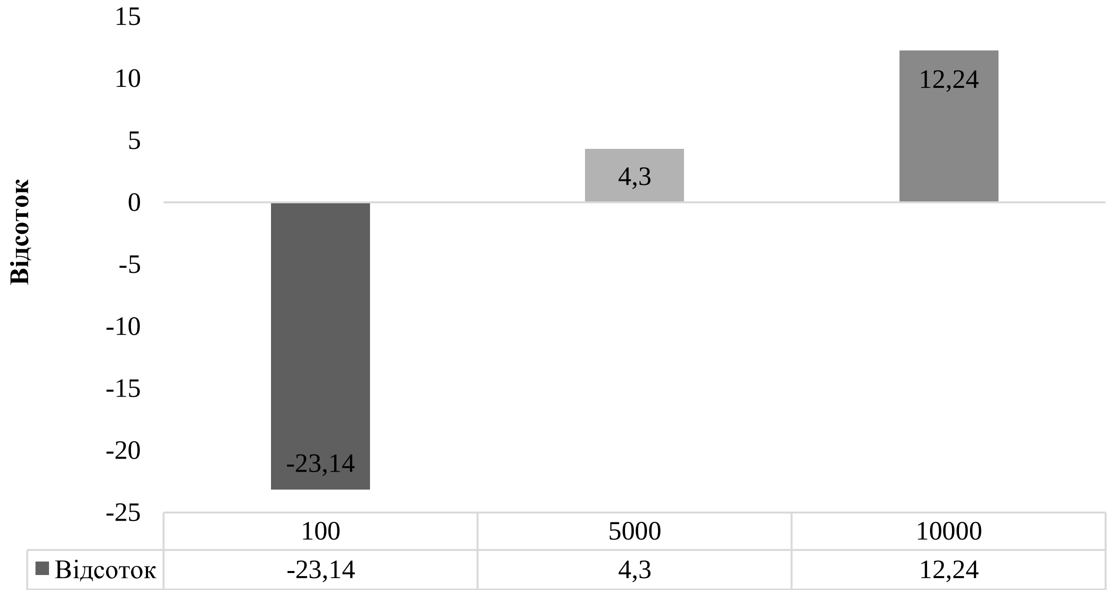

Рис. 1. Збільшення відносного відсотка домінування розрахованої довжини маршрутів алгоритму з методом Монте-Карло над жадібним алгоритмом для 50 варіантів маршрутів TSP з кількістю міст 10

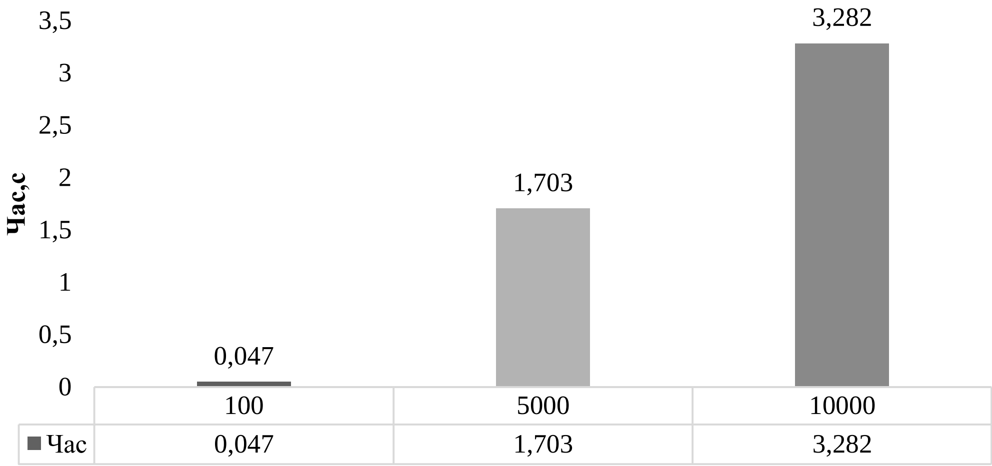

Рис. 2. Збільшення часу виконання алгоритму за методом Монте-Карло порівняно із жадібним алгоритмом для 50 варіантів маршрутів TSP з кількістю міст 10

Зростання результативності жадібного алгоритму можливе, якщо використати комбінування його переваг з іншими евристичними або метаевристичними алгоритмами. Жадібний алгоритм на кожному кроці переходу від міста до міста обирає ділянку маршруту з мінімальною довжиною. Під кінець пошуку кількість варіантів вибору постійно зменшується, відповідно знижується результативність алгоритму. Це особливо відчутно при зростанні кількості міст у TSP. Кількість ділянок зростає в арифметичній прогресії до кількості міст (див. табл. 1).

Відповідно до табл. 1 у TSP із 1000 міст на першому кроці з використанням жадібного алгоритму буде вибір серед 499500 ділянок, на передостанньому кроці – тільки двох, а у TSP із 10000 міст вибір звузиться вже з 49995000 також до двох. Таким чином, за умови випадкового розподілу довжин ділянок зі зростанням кількості міст продуктивність жадібного алгоритму об'єктивно повинна падати. Отримані значення будуть далекими від оптимальних і тому неприйнятними для практичного застосування.

Таблиця 1

Збільшення кількості ділянок маршрутів відповідно до зростання кількості міст у TSP

Кількість міст (кількість кроків вибору), *n*	3	4	10	16	100	1000	10000
Кількість ділянок маршрутів, *m*	3	6	45	120	4950	499500	49995000
Різниця, *m-n*	0	2	35	104	4850	498500	49985000

Підвищення продуктивності в такій ситуації якраз здійснюють шляхом застосування метаевристичних алгоритмів, у яких вводять додаткові обчислювальні процедури та масиви, намагаючись скоротити кількість повторів і уникнути "непродуктивних" шляхів. Однак при цьому обсяг обчислень зростає пропорційно розмірності TSP [5].

В цьому можна переконатися, розглянувши складність аналітичних залежностей, які застосовуються в таких алгоритмах. Наприклад, в мурашиному алгоритмі перед генерацією випадкового вибору маршруту застосовується формула обчислення ймовірності вибору точки маршруту наступного виду[6]

$$P_i = \frac{l_i^q \cdot f_i^p}{\sum_{k=0}^{N} l_k^q \cdot f_k^p} \quad (1)$$

де,

P_i – ймовірність вибору точки маршруту;

l_i – відстань до i-ї точки маршруту;

f_i – кількість феромонів на переході до i-ї точки маршруту;

q – величина, що визначає «жадібність» алгоритму;

p – величина, що визначає «стадність» алгоритму;

$q+p=1$.

Крім цього, такий алгоритм передбачає перерахунок інтенсивності запаху феромонів для кожного мурашиного проходу. Це суттєво збільшує час розрахунку при збільшенні розмірності задачі TSP.

Ще одним прикладом може бути алгоритм імітації відпалу де застосовується експоненціальна функція під час розрахунку ймовірності попадання обраної точки до наступної точки маршруту[7]

$$P\left(\overline{x^*} \to \overline{x_{i+1}} \middle| \overline{x_i}\right) = \begin{cases} 1, & F\left(\overline{x^*}\right) - F\left(\overline{x_i}\right) \geq 0 \\ \exp\left(-\frac{F\left(\overline{x^*}\right) - F\left(\overline{x_i}\right)}{Q_i}\right), & F\left(\overline{x^*}\right) - F\left(\overline{x_i}\right) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

де,

$\overline{x^*}$ – обрана точка пошуку;

$\overline{x_i}$ – поточна точка на маршруті;

$\overline{x_{i+1}}$ – наступна точка на маршруті;

$Q_i > 0$ – i-й елемент довільної спадаючої, що сходиться до нуля.

В цьому алгоритмі генерація випадкового числа здійснюється тричі, що не додає швидкості його виконанню. Існує ще чимало подібних алгоритмів, які в силу свого ускладнення скорочують час виконання [7].

Застосування алгоритму, який ґрунтується на методі Монте-Карло, не потребує додаткових обчислювальних процедур, лише застосування генератора випадкових чисел. Отже, якщо застосовувати на першому етапі обчислень маршруту (наприклад, для 50 % міст) жадібний алгоритм, а на другому етапі – алгоритм з методом Монте-Карло, можна отримати прийнятний результат.

Для перевірки цього припущення було змодельовано комбінований алгоритм, у якому для пошуку ділянки маршруту для перших п’яти міст використовувався жадібний алгоритм, а для решти п’яти міст – алгоритм з методом Монте-Карло з кількістю повторів 200. Порівняння результатів роботи цього комбінованого алгоритму з жадібним алгоритмом здійснювалось також для 50 варіантів. Результати такого порівняння представлено на рис. 3.

Згідно з розрахунками комбінований алгоритм у середньому дає на 12,8 % кращий результат, ніж жадібний. При цьому час виконання програми становить всього 0,11 с. Моделювання виконувалося мовою C++ Builder. Вигляд моделі показано на рис. 4.

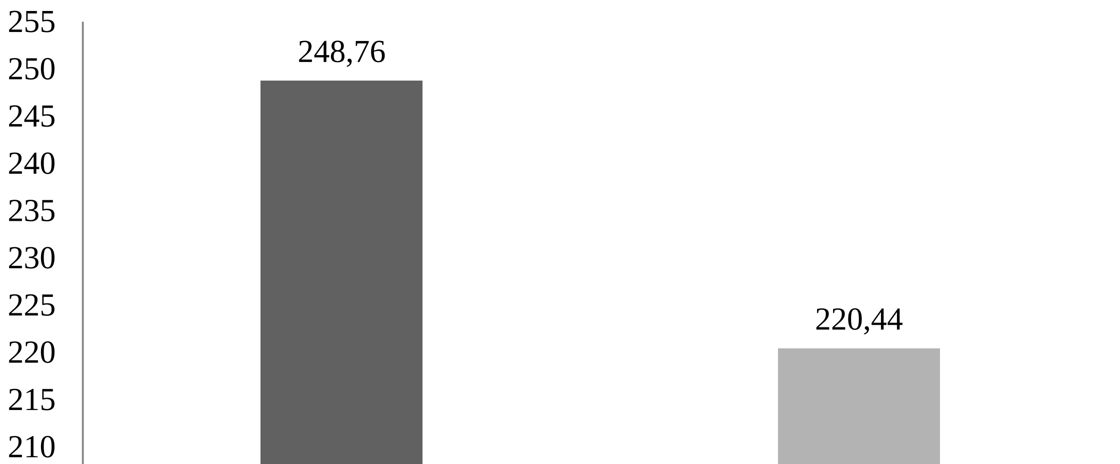

Рис. 3. Середні значення довжин маршрутів для 50 варіантів TSP

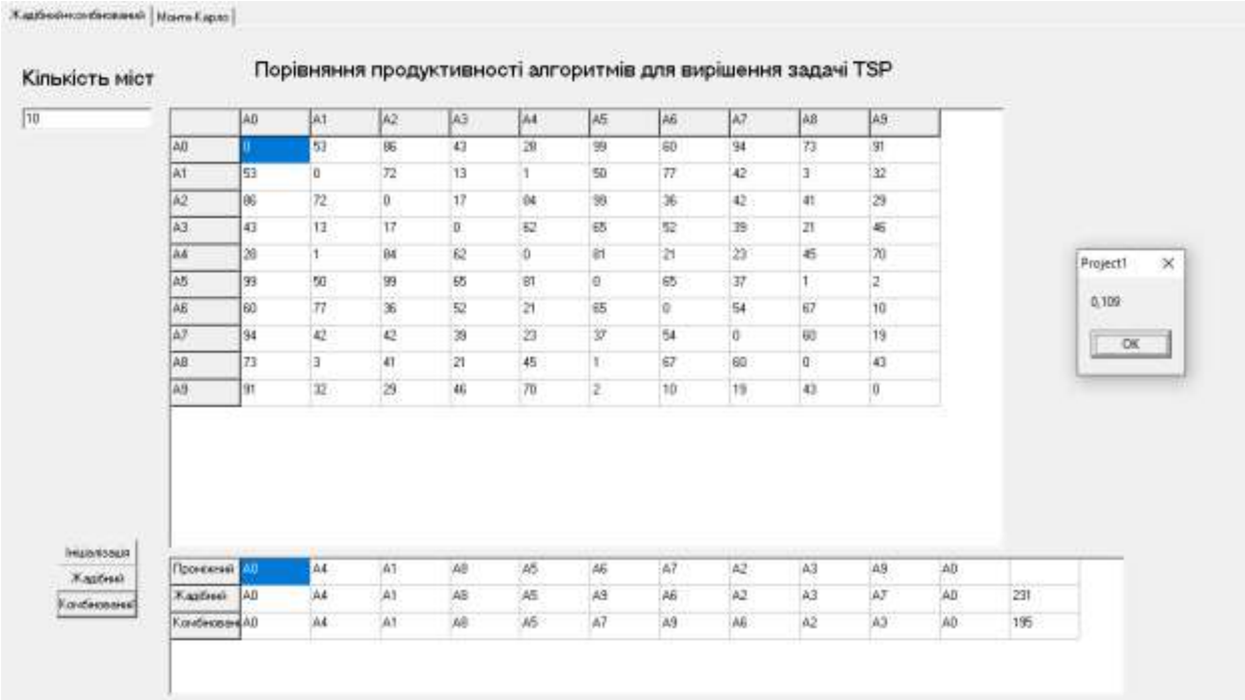

Рис. 4. Вигляд моделі

Висновки. Експериментальним шляхом доведено, що для виконання практичних логістичних завдань представлений комбінований алгоритм має переваги над жадібним алгоритмом стосовно прийнятності знайденого маршруту в задачі TSP. Отриманий результат дозволяє припустити, що алгоритми, які ґрунтуються на принципі комбінування декількох підходів, можуть бути продуктивнішими за метаевристичні алгоритми, оскільки вони не використовують додаткових обчислювальних процедур.

У подальшому при проведенні досліджень варто звернути увагу на питання, пов’язані з вибором способу комбінування жадібного алгоритму та алгоритму за методом Монте-Карло. Необхідно більш точно визначити, на якому етапі обчислення маршруту доцільно переходити до алгоритму з методом Монте-Карло, а також яким чином використовувати такий спосіб для TSP різної розмірності.

Окремим напрямом дослідження є розв'язання задачі TSP без депо із застосуванням комбінованого алгоритму.

Література:

1. Dantzig G. B., R. Fulkerson, S. M. Johnson. Solution of a large–scale traveling salesman problem, Operations Research 2. 1954. P. 393–410.
2. Сергиенко И. В., Гуляницкий Л. Ф., Сиренко С. И. Классификация прикладных методов комбинаторной оптимизации. *Кибернетика и системный анализ.* № 2. 2009. С. 71-83.
3. Гуляницький Л. Ф., Мулеса О. Ю. До класифікації мета евристик. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики* : XXI Всеукраїнська наукова конференція. Львів. 2015. С.139-142.
4. Базилевич Р., Кутельмах Р. Дослідження ефективності існуючих алгоритмів для розв’язання задачі комівояжера. Н*аціональний університет “Львівська політехніка”.* 2009. С. 235-244. URL: http://vlp.com.ua/files/special/34_0.pdf.
5. Ліщинський В. О., Месюра В. І. Обґрунтування вибору метаевристики для визначення оптимального маршруту. *Вінницький національний технічний університет*. 2020. URL – https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/29456/9892.pdf.
6. Dorigo Marco, Thomas Stützle. Ant colony optimization. A Bradford Book. 2005. 305 p. URL : https://www.researchgate.net/publication/36146886_Ant_Colony_Optimization.
7. Edmund K. Burke, Graham Kendall Editors Search Methodologies Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques Second Edition. *Springer New York Heidelberg Dordrecht London.* 2014. p. 265-287. URL : https://antivirus.uclv.edu.cu/update/libros/Business%20

and%20Economics/Search%20Methodologies%20-%20Edmund%20K.%20Burke%2C%20Graham%20Kendall%2C%202nd%20ed.%202014%20-%20978-1-4614-6940-7.pdf.

References:

1. Dantzig, G. B. and Fulkerson, R. Johnson S. M. (1954), *Solution of a large–scale traveling salesman problem*, Operations Research 2, pp. 393–410.
2. Serhyenko, Y. V. Hulianytskyi, L. F. and Syrenko, S. Y. (2009), “Classification of applied methods of combinatorial optimization”, Kibernetika i sistemnyiy analiz, № 2, pp. 71-83.
3. Hulianytskyi, L. F. and Mulesa, O. Yu. (2015), *Do klasyfikatsii metaevrystyk* [To the classification of metaheuristics], Suchasni problemy prykladnoi matematyky ta informatyky [Modern problems of applied mathematics and computer science], XXI Vseukrainska naukova konferentsiia [XXI All-Ukrainian Scientific Conference], Lviv, Ukraine, p. 139-142.
4. Bazylevych, R. and Kutelmakh, R. (2009), “Research the effectiveness of existing algorithms for solving the problem of a salesman”, *Natsionalnyi universytet “Lvivska politekhnika”,* pp. 235-244, retrieved from : http://vlp.com.ua/files/special/34_0.pdf.
5. Lishchynskyi, V. O. and Mesiura, V. I. (2020), “Rationale for the choice of metaheuristics to determine the optimal route”, *Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet*, retrieved from : https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/29456/9892.pdf.
6. Dorigo Marco, Thomas Stützle (2005), *Ant colony optimization*, A Bradford Book, 305 p., retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/36146886_Ant_Colony_Optimization
7. Edmund, K. Burke, Graham Kendall (2014), “Editors Search Methodologies Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques Second Edition”, *Springer New York Heidelberg Dordrecht London*, pp. 265-287, retrieved from : https://antivirus.uclv.edu.cu/update/libros/Business%20and%20Economics/Search%20Methodologies%20-%20Edmund%20K.%20Burke%2C%20Graham%20Kendall%2C%202nd%20ed.%202014%20-%20978-1-4614-6940-7.pdf

Стаття надійшла до редакції 16.05.2021 р.