

ЗАСТОСУВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ ДОСТАВОК В УМОВАХ ВІЙНИ

©2024 СКИЦЬКО В. І., ВОЙНИКОВ М. Ю.

УДК 519.85:004.89:658.5

JEL: C61; D81; R41

Скицько В. І., Войников М. Ю. Застосування еволюційних алгоритмів для оптимізації маршрутів доставок в умовах війни

Повномасштабне російське вторгнення в Україну у 2022 році спричинило серйозні перебої в ланцюгах поставок. Руйнування інфраструктури, блокування важливих торгових маршрутів, а також обмеження доступу до морських портів значно вплинули на стабільність постачання товарів, а внаслідок цього призвели до погіршення економічної та продовольчої безпеки. Оптимізація маршрутів транспортування є одним із вагомих елементів мінімізації наслідків вторгнення, оскільки маршрути значною мірою впливають на ефективність усього ланцюга поставок. Зменшення відстаней, вибір альтернативних шляхів та врахування ризиків не тільки дозволяють знизити витрати на транспортування, але й сприяють збереженню стабільності постачань товарів навіть у складних умовах. У дослідженні проаналізовано сучасні методи оптимізації маршрутів у надзвичайних ситуаціях, таких як пандемії чи стихійні лиха, та визначено можливості їх адаптації до умов війни. Запропоновано модифіковану задачу комівояжера з урахуванням ризиків. Використано методи нормалізації та агрегації ризиків, що дозволяють включити їх до цільової функції задачі. Обрано генетичний алгоритм для розв'язання задачі, оскільки він дозволяє швидко знаходити ефективні рішення й адаптуватися до змін у реальному часі, що є критично важливим у мінливому середовищі. Описано кроки розв'язання задачі комівояжера з використанням генетичного алгоритму, деталізовано окремі аспекти алгоритму, які притаманні специфіці задачі, зокрема процедура формування початкової популяції, розрахунок функції пристосованості. Унікальність статті полягає в адаптації класичної задачі комівояжера до умов війни та застосуванні генетичного алгоритму для її вирішення з урахуванням ризикових факторів. Зокрема, запропоновано підхід до формування початкової популяції хромосом і деталізовано спосіб обчислення функції пристосованості за кодування дійсними числами. У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на вдосконаленні алгоритму шляхом налаштування методів схрещування, мутації, селекції, зміни розміру популяції, а також розробки більш ефективних процедур повернення хромосом до області допустимих рішень для підвищення ефективності алгоритму в умовах війни.

Ключові слова: оптимізація маршрутів транспортування, економічна безпека, продовольча безпека, генетичний алгоритм, задача комівояжера, війна в Україні.

Формул: 13. **Бібл.:** 21.

Скицько Володимир Іванович – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри математичного моделювання та статистики, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: skitsko@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6290-9194>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/H-9776-2018>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56658717200>

Войников Микола Юрійович – аспірант кафедри математичного моделювання та статистики, Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана (просп. Берестейський, 54/1, Київ, 03057, Україна)

E-mail: mykola.voinikov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7961-5312>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217361066>

UDC 519.85:004.89:658.5

JEL: C61; D81; R41

Skitsko V. I., Voinikov M. Yu. Application of Evolutionary Algorithms for Delivery Route Optimization under Wartime Conditions

The full-scale Russian invasion of Ukraine in 2022 caused severe disruptions in supply chains. The destruction of infrastructure, the blocking of important trade routes, as well as the restriction of access to seaports have significantly affected the stability of the supply of goods, and as a result, led to a deterioration in economic and food security. Optimization of transportation routes is one of the important elements of minimizing the consequences of the ongoing military invasion, as routes significantly affect the efficiency of the entire supply chain. Reducing distances, choosing alternative routes and taking into account risks not only reduce transportation costs, but also contribute to maintaining the stability of the supply of goods even in difficult conditions. The study analyzes modern methods of optimizing transportation routes in emergency situations, such as pandemics or natural disasters, and identifies the possibilities of their adaptation to wartime conditions. A modified objective of a traveling salesman is proposed, taking into account risks. Methods of normalization and aggregation of risks are used, which allow them to be included in the target function of the objective. A genetic algorithm was chosen to solve the objective, as it allows you to quickly find effective solutions and adapt to changes in real time, which is critically important in a changing environment. The steps for solving the traveling salesman objective using the genetic algorithm are described, certain aspects of the algorithm that are inherent in the specifics of the objective are detailed, in particular, the procedure for forming the initial population of chromosomes is proposed and a method for calculating the fitness function for encoding by real numbers is detailed. In further research, it is advisable to focus on improving the algorithm by adjusting the methods of crossing, mutation, selection, population size change, as well as developing more efficient procedures for returning chromosomes to the area of acceptable solutions to increase the efficiency of the algorithm in wartime.

Keywords: optimization of transportation routes, economic security, food security, genetic algorithm, traveling salesman objective, war in Ukraine.

Formulae: 13. **Bibl.:** 21.

Skitsko Volodymyr I. – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling and Statistics, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: skitsko@kneu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6290-9194>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/H-9776-2018>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56658717200>

Voinikov Mykola Yu. – Postgraduate Student of the Department of Mathematical Modeling and Statistics, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman (54/1 Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: mykola.voinikov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7961-5312>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217361066>

У 2022 році російське повномасштабне вторгнення в Україну спричинило відчутні проблеми у сфері економічної та продовольчої безпеки. Деякі наслідки поширилися не лише на територію України, а й за її межі; зокрема, порушення у транспортуванні агропромислової продукції значною мірою вплинули на країни з низьким рівнем доходу [1; 2].

Війна суттєво порушила економічну безпеку України, зокрема через руйнування інфраструктури, втрату виробничих потужностей і зниження доступу до ринків. Блокування морських портів, обстріли та захоплення територій призвели до скорочення експорту та зростання цін на ключові товари. Окрім цього, транспортування сільськогосподарської продукції спричинили зниження рівня продовольчої безпеки [3–5].

Мінімізувати негативні наслідки можна, зокрема, шляхом оптимізації маршрутів транспортування, оскільки ефективність маршрутів значною мірою впливає на ефективність всього ланцюга поставок. Скорочення відстаней і часу транспортування дозволяє знизити витрати на паливо, зменшити експлуатаційні витрати на транспорт і скоротити час доставки, що в результаті знижує кінцеву вартість товарів для споживача. У кризових умовах, таких як воєнні конфлікти або природні катастрофи, врахування ризиків при оптимізації маршрутів дозволяє забезпечити безперервність постачання навіть за обмежених ресурсів або у важкодоступних зонах, а в певних ситуаціях взагалі уможливає таке транспортування.

Для оптимізації маршрутів транспортування можуть використовуватися різні економіко-математичні методи та моделі, які дозволяють мінімізувати ризики та витрати, зменшити час доставки, а також ефективніше використовувати наявні ресурси. У роботі розглядається застосування економіко-математичних методів для планування маршрутів, використовуючи задачу комівояжера з урахуванням ризику. Оскільки середовище прийняття рішень характеризується високою мінливістю, а реальні задачі використовують великі масиви да-

них, у роботі застосовується генетичний алгоритм, що дозволяє отримувати рішення у прийнятний час та оновлювати параметри в режимі реального часу.

Значну увагу в сучасній літературі приділено методам і моделям оптимізації маршрутів як складової управління ланцюгами поставок у надзвичайних ситуаціях, зокрема під час пандемії COVID, стихійних лих, частина з яких може бути адаптована і використана в умовах війни, у тому числі шляхом використання запропонованих методів урахування ризику, методів пріоритетизації ресурсів/маршрутів, використання актуальної інформації в режимі реального часу тощо.

Урахування попиту, пріоритетизація поставок і ресурсів здійснено у [6; 7]. Такі напрацювання можуть використовуватися в умовах війни у випадках, коли від порядку транспортування можуть залежати життя людей, безпека, можливість проїзду тощо. У дослідженні [6] розроблено модель для оптимізації розподілу екстрених матеріалів у контексті епідемічних викликів з використанням коефіцієнта коригування дефіциту матеріалів, який базується на методології ваги ентропії. Ця модель інтегрує ключові параметри, такі як важливість і терміновість задоволення потреб, забезпечуючи ефективний розподіл ресурсів у різних сценаріях. У статті [7] розроблено математичну модель, яка адаптується до динамічних змін у запитах під час раптової епідемії. Модель зосереджується на мінімізації витрат і дистанції транспортування, дозволяє ефективно реагувати на змінні умови та забезпечує розподіл екстрених поставок.

Більш ґрунтовний аналіз у контексті пріоритетизації типів ресурсів проведено у статті [8], де розроблено моделі для пріоритетизації типів військового матеріалу, визначення необхідних запасів, вибору логістичної структури й оптимізації процесу запасів, урахування воєнних ризиків та обмеження постачальників.

У роботах [9] і [10] пропонуються алгоритми транспортування, обмежені часом, зокрема для транспортування продукції, що швидко псується.

Такі підходи можуть активно використовуватися для транспортування певних видів продовольства у прифронтових територіях. У статті [9] розроблено оптимізаційну модель для керування дистрибуцією швидкопсувних товарів у ланцюзі поставок, яка мінімізує економічні витрати та вплив на викиди вуглецю. У роботі [10] наведено модель маршрутизації транспортних засобів для логістики під час великих епідемій, що використовує вдосконалений алгоритм рою частинок; модель визначає мінімальні витрати на рух, час, штрафи за ранню або пізню доставку та фіксовані витрати на транспорт, враховуючи обмеження, наприклад вантажопідйомність.

Окрім пріоритезації, важливим є врахування оновлення даних у режимі реального часу. У контексті воєнного конфлікту, що характеризується динамічними та непередбачуваними змінами, рішення, яке донедавна вважалося оптимальним, може швидко втратити свою оптимальність або актуальність. Це питання розглянуто в дослідженнях [11; 12]. Зокрема, стаття [11] пропонує метод оптимізації евакуації вразливих людей під час спекотних хвиль, використовуючи динамічне планування евакуації, де запити на допомогу від екстреного центру надходять вже після початку збору людей з їхніх домівок; у запропонованому методі стратегія регулярно оновлюється для швидкого переміщення вразливих осіб до призначених притулків з метою мінімізації на них негативного впливу спекотних хвиль. У статті [12] запропоновано математичну модель та алгоритм для оцінки надійності водного транспорту під воєнними загрозами, що аналізує параметри впливу та визначає ефективні способи нейтралізації загроз.

Також у контексті транспортування в умовах війни важливу роль відіграє врахування ризиків. У роботі [13] проаналізовано, як ризики впливають на планування маршрутів, демонструючи, що відомі ризики домінують у процесі прийняття рішень при виборі маршрутів.

У літературі представлено значну кількість досліджень, що концентруються на аспектах терміновості, ризиковості, розподілу за пріоритетами у сфері оптимізації маршрутів та ланцюгів поставок загалом. Такі роботи можуть служити підґрунтям для досліджень, які зосереджені безпосередньо на задачах в умовах війни, де особливо важливі планування в режимі реального часу та врахування ризиків.

Метою роботи є адаптація інструментарію для оптимізації маршрутів транспортування в умовах війни в Україні, використовуючи задачу комівояжера, модифіковану шляхом врахування факторів ризику, що дозволяє враховувати специфіку кризо-

вих умов. Для вирішення задачі пропонується використання генетичного алгоритму, який забезпечує ефективний і швидкий пошук оптимальних рішень з можливістю динамічного оновлення даних у режимі реального часу. Результати дослідження дозволять перейняти методіку оптимізації маршрутів транспортування, даючи змогу підвищити ефективність ланцюгів поставок, а в результаті – економічну та продовольчу безпеку країни.

За сучасних умов може виникати потреба у плануванні маршрутів для транспортування, зокрема до/з прифронтових територій. Перевезення медичних засобів, амуніції, сировини, евакуація постраждалих, транспортування товарів, необхідних для функціонування критично важливих бізнесів – кожен з видів транспортування є важливим для ефективного функціонування економічної системи та має вагоме соціальне значення. Під час розробки плану в зазначених умовах, окрім скорочення часу перебування на маршруті та транспортних витрат, вкрай важливим є врахування рівня ризику.

Серед можливих ризиків можна відзначити такі [12]: загроза життю працівників; можливість пошкодження або втрати транспортних засобів; ризик ушкодження чи втрати товарів; можливість затримок у процесі транспортування; можливість зростання транспортних витрат тощо. Зазначений перелік не є вичерпним, оскільки залежно від специфіки та контексту конкретної задачі можуть додаватися нові, притаманні саме цій ситуації, ризики, тому для кожної задачі доцільно визначати індивідуальний набір потенційних ризиків.

Важливість ризикових факторів визначається особами, що приймають рішення, та контекстом конкретної задачі. Наприклад, безпека водіїв завжди є абсолютним пріоритетом, тоді як терміновість може відрізнятися залежно від ситуації: від критичної (під час перевезення медикаментів чи поранених) до помірної (транспортування продовольства, яке не потребує особливих умов зберігання). Прикладом врахування важливості подібних факторів можуть бути роботи [6; 8], в яких беруться до уваги важливість матеріалів у конкретній поставці.

Зазначену проблему можна формалізувати як задачу комівояжера [14; 15] з певними модифікаціями цільової функції, що дозволять врахувати фактор ризику. Основна концепція задачі комівояжера полягає в тому, що він має відвідати певну кількість міст. Для зменшення витрат йому потрібно розробити такий маршрут, який дозволить відвідати кожне місто лише один раз і повернутися до місця відправлення.

Таким чином, у класичній задачі комівояжера є n міст. Відома відстань між будь-якими двома містами i та j , яку можна позначити як c_{ij} (вимірюється в кілометрах, милях чи будь-яких інших одиницях, обраних дослідником). Якщо між містом i та містом j відсутнє пряме сполучення, то $c_{ij} = \infty$ або не визначено.

Цільова функція класичної задачі комівояжера має вигляд [14; 15]:

$$L(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де X – це маршрут, розв'язок задачі комівояжера;
 $L(X)$ – загальна довжина шляху для розв'язку X ;
 x_{ij} – наявність перевезень за маршрутом з міста i до міста j (1 чи 0).

За обмежень:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Цільова функція (1) передбачає знаходження маршруту, який гарантує мінімальну сумарну довжину шляху. Обмеження (2) та (3) вказують на умову відвідування кожного міста тільки один раз.

Урахування ризиків у процесі прийняття рішень можливе, зокрема, шляхом урахування величини ризику в цільовій функції задачі. Модифікована цільова функція має вигляд:

$$L(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $L(X)$ – значення цільової функції маршруту, що характеризується довжиною шляху та ризиковістю;
 r_{ij} – зважена оцінка ризиків за маршрутом від міста i до міста j , вимірюється в умовних одиницях; при цьому шкали оцінювання та вагові коефіцієнти ризику встановлюються дослідником, детальний розгляд чого надано нижче.

У формулі (4) величина ризику додається до витрат, але, залежно від обраних методів урахування ризику та його критичності, можуть бути введені ваги, які збільшать або зменшать вплив на результат цільової функції. Модель використовує агрегований показник усіх ризиків: шкали приводяться до однієї (нормалізація показників) та вираховується середнє значення по всіх ризиках [16].

Для умовного прикладу розглянемо задачу, що може відобразити реальні логістичні сценарії. В умовному прикладі використовуємо спрощений варіант, де розглянемо транспортування продовольства у прифронтових районах, запровадивши кілька типів ризиків для демонстрації їх інтеграції в модель. У реальних умовах кількість ризиків, методи їх оцінювання та обмеження задачі можуть варіюватися.

Візьмемо такі фактори ризику: тип території з точки зору її безпечності, інтенсивність артилерійських обстрілів та наявність мостів чи інших об'єктів критичної інфраструктури. Позначимо ризику через r_k , де k – фактор ризику; p – загальна кількість факторів ризику.

Розглянемо можливі шкали вимірювання для наведених факторів ризику:

1. *Тип території.* Введемо змінну, що оцінює тип території за бальною шкалою. Ця змінна може приймати значення від 1 до 3 балів: 3 бали – щойно декуповані території; 2 бали – тривалий час декуповані території, де вже споруджено надійну оборону; 1 бал – території, які ніколи не перебували під окупацією. Чим вищий бал, тим вищим є ризик.

2. *Інтенсивність артилерійських обстрілів по дорозі.* Введемо бальну змінну із можливим значенням від 0 до 10, яка є експертною оцінкою масивності ворожих артилерійських обстрілів, де 0 балів – обстріли абсолютно відсутні, 10 балів – надвисока інтенсивність обстрілів. У разі наявності релевантних статистичних показників чи аналітичних моделей експертні оцінки можуть бути повністю або частково замінені більш об'єктивними кількісними індикаторами.

3. *Наявність мостів, транспортних вузлів, розв'язок, об'єктів критичної інфраструктури по дорозі.* Введемо бінарну змінну, яка відображає наявність (1) або відсутність (0) таких об'єктів на території. Ця змінна може бути розширена до більш детальної шкали, яка відображає важливість об'єктів, якщо ця інформація є доступною.

Фактори ризику в умовному прикладі вимірюються за різними шкалами, тому всі фактори слід привести до єдиної шкали, наприклад у межах від 0 до 1 ($[0, 1]$), щоб у подальшому мати змогу об'єднати всі фактори в одну змінну, яка характеризує загальний рівень ризику.

Для нормалізації показників використаємо формулу [17]:

$$r'_k = \frac{r_k - \min(r_k)}{\max(r_k) - \min(r_k)}, \quad (5)$$

де r'_k – значення ризику в проміжку $[0, 1]$ для k -го фактора ризику; чим більше значення – тим більший ступінь ризику;

$\min(r_k)$ – мінімальне значення ризику за початковою шкалою вимірювання;

$\max(r_k)$ – максимальне значення ризику за початковою шкалою вимірювання.

Якщо за початковою шкалою більші значення відповідають нижчому ступеню ризику, то використовуємо інвертоване представлення показника, щоб забезпечити виконання умови, за якою більші значення відповідають вищому ступеню ризику:

$$r'_k = 1 - \frac{r_k - \min(r_k)}{\max(r_k) - \min(r_k)}. \quad (6)$$

Щоб провести розрахунки для умовного прикладу, наведемо можливі дані по маршруту для кожного з факторів: тип території – 3 (щойно визволена територія); інтенсивність артилерійських обстрілів – 8 (висока інтенсивність); наявність стратегічних об'єктів – 1 (наявні стратегічні об'єкти).

1. *Тип території.* Для нормалізації значення ризику для типу території використаємо формулу (5), оскільки за цим показником вищим балам відповідає вищий рівень ризику:

$$r'_1 = \frac{3-1}{3-1} = 1. \quad (7)$$

2. *Інтенсивність артилерійських обстрілів.* Величину ризику для цього фактора розраховуємо за формулою (6), оскільки для наведеного ризику нижчі значення показника відповідають нижчому ступеню ризику:

$$r'_2 = 1 - \frac{8-0}{10-0} = 0,8. \quad (8)$$

3. *Наявність стратегічних об'єктів.* Цей показник не вимагає нормалізації, оскільки доступні всього два значення: 0 (відсутній ризик щодо цього фактора) або 1 (присутній ризик), тобто задовольняє умову допустимих значень ризику. У нашому прикладі стратегічні об'єкти присутні, тому значення цього параметра дорівнює 1.

Як зазначалося раніше, для розрахунку зваженої оцінки ризиків можуть вводитися ваги для пріоритезації ризиків. Для умовного прикладу вважаємо, що важливість кожного з ризиків є однаковою. Отже, загальний рівень ризику (r_{ij}) можна розрахувати як середнє арифметичне всіх ризиків:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p r'_k}{p}. \quad (9)$$

Тоді для умовного прикладу:

$$r_{ij} = \frac{1 + 0,8 + 1}{3} = 0,933. \quad (10)$$

Таким чином, розрахункове значення ризику дорівнює 0.933. Однак у реальних умовах кількість змінних може суттєво відрізнятись: десятки, сотні, а іноді навіть тисячі факторів, на основі яких розраховують ризик. Крім того, у мінливих і ризикових середовищах надзвичайно важливим для ефективного прийняття рішень є врахування актуальної інформації [11], тому вхідні дані для задачі мають оновлюватися в режимі реального часу. Враховуючи все вищесказане, інструментарій для розв'язання цих задач повинен забезпечувати швидке отримання рішень та гнучкість.

Через підвищену складність задачі класичні методи її вирішення можуть виявитися менш ефективними, не дозволяючи отримати рішення за прийнятний час, тому важливо обрати інструменти та підходи для розв'язання задачі, які дозволяють отримувати рішення за прийнятний час та є гнучкими.

У сучасній літературі для вирішення задачі комівояжера здебільшого використовують мурашиний алгоритм завдяки його здатності ефективно знаходити наближені рішення для комбінаторних задач. Однак цей алгоритм має низку обмежень, які роблять його менш придатним для вирішення задач у швидкозмінних умовах. Зокрема, ефективність мурашиного алгоритму залежить від попередньо налаштованих параметрів та побудованих феромонових слідів [18], що ускладнює його адаптацію до швидкозмінних даних (у режимі реального часу). Крім того, накопичення й оновлення феромонових слідів потребує значної кількості ітерацій [18], що може суттєво впливати на швидкість отримання рішень в умовах кризових ситуацій, таких як війна.

Зважаючи на ці недоліки, як інструмент для розв'язання задачі було обрано генетичний алгоритм [18]. Генетичний алгоритм працює з декількома варіантами розв'язків задачі одночасно на кожному етапі свого виконання, що може допомогти знайти прийнятні або навіть оптимальні рішення за припустимий час. Далі розглянемо генетичний алгоритм та особливості розв'язання задачі комівояжера з його використанням.

Постановка класичної задачі комівояжера з використанням генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм – це метод оптимізації та моделювання, який базується на ідеях біологічної еволюції. Він використовує послідовний процес підбору, комбінування та зміни параметрів для розв'язання задач оптимізації та пошуку найкращих рішень [18].

У сучасній літературі вже наявні приклади розв'язання задачі комівояжера з використанням генетичного алгоритму, зокрема фундамент закладено в роботі [19], досліджено різні види схрещування у [20], наведено кроки вирішення задачі комівояжера з використанням генетичного алгоритму [21] тощо. Однак питання створення початкової популяції, оцінки функції пристосованості з урахуванням обраного кодування рішення потребують додаткової уваги.

Генетичний алгоритм працює з рішеннями в закодованому вигляді [18], що дозволяє йому абстрагуватися від специфіки конкретної задачі. Завдяки цьому алгоритм стає універсальним і може

бути легко адаптований для розв'язання задач з різних предметних областей. Для задачі комівояжера використовується кодування дійсними числами, де кожне число відповідає індексу міста, яке необхідно відвідати. Хромосома має фіксовану довжину, що відповідає кількості міст у задачі.

Далі приведемо терміни задачі комівояжера у відповідність до термінів генетичного алгоритму:

- ✦ хромосома – закодований розв'язок задачі комівояжера, тобто впорядкована послідовність міст, яка формує маршрут;
- ✦ популяція – сукупність хромосом (потенційних розв'язків задачі) на певному етапі функціонування генетичного алгоритму;
- ✦ ген – комірka у хромосомі, яка відповідає певній позиції в маршруті та має значення;
- ✦ алель – значення гена, яке представляє конкретне місто, закодоване у відповідній позиції хромосоми;
- ✦ локус – визначає позицію гена в хромосомі;
- ✦ функція пристосованості – функція для оцінки ефективності розв'язку задачі, яка для задачі комівояжера відповідає значенню цільової функції.

Класичний генетичний алгоритм передбачає послідовне виконання таких кроків [18]:

1. Створення початкової популяції хромосом.
2. Обчислення функції пристосованості.
3. Перевірка критерію зупинки генетичного алгоритму.
4. Селекція.
5. Застосування генетичних операторів, зокрема схрещування та мутації.
6. Формування популяції нового покоління.
7. Вибір найкращої хромосоми останнього покоління.

Кроки з 3 по 6 повторюються циклічно до виконання критерію зупинки генетичного алгоритму (крок 3). У разі виконання критерію зупинки генетичного алгоритму процес переходить до кроку 7, де обирається найкращий розв'язок, і робота алгоритму завершується.

Розглянемо детальніше кроки генетичного алгоритму для розв'язання задачі комівояжера з урахуванням ризиків.

Крок 1. Створення початкової популяції хромосом. Важливою умовою генерації початкової популяції є забезпечення різноманітності хромосом та їх входження до області допустимих рішень. Для досягнення цих умов потрібно використовувати підхід, що враховує випадкову складову та має механізм, який гарантує входження створеної хромосоми до області допустимих рішень.

На етапі генерації хромосоми міста ще не можна вважати генами, оскільки в контексті задачі

комівояжера ген визначається як алель (місто) та локус (позиція міста в маршруті).

Нехай:

1. Хромосома H – маршрут, який починається з початкового міста.

2. Список міст L – набір усіх міст, окрім початкового.

3. Проміжний список T – тимчасовий список, який використовується для зберігання кандидатів на вибір у проміжних етапах алгоритму.

Алгоритм побудови хромосоми:

1. Вхідні дані: $H = [\text{місто } A]$, $L = [\text{місто } B, \text{ місто } C]$, $T = []$.

2. Міста зі списку L , які мають сполучення з останнім містом у H , додаються до списку T .

3. Зі списку T випадковим чином обирається місто, яке додається до хромосоми H як наступний ген.

4. Обране місто видаляється зі списку L , після чого список T очищується.

Кроки 2–4 повторюються доти, доки список L не стане порожнім.

Такий алгоритм дозволяє створювати хромосоми, які входять до області допустимих рішень і відрізняються генетичним матеріалом завдяки випадковій складовій. Водночас важливо враховувати можливість генерації хромосоми заново, якщо на певному етапі не залишиться жодного міста зі списку T , яке можна було б додати до H відповідно до заданих умов сполучення.

Крок 2. Обчислення функції пристосованості. Функція пристосованості відповідає цільовій функції задачі (2). Через обмеження, пов'язані з використанням дійсно-числового кодування, формулу в її початковому вигляді не можна застосувати безпосередньо. Для коректного відображення специфіки задачі було виконано її адаптацію:

$$L(H) = \sum_{i=1}^{n-1} (\text{dist}(h_i, h_{i+1}) + \text{risk}(h_i, h_{i+1})) + \text{dist}(h_n, h_1) + \text{risk}(h_n, h_1), \quad (11)$$

де H – хромосома;

$L(H)$ – значення функції пристосованості хромосоми H ;

h_i – ген, що позначає місто, де i – локус гена;

$\text{dist}(h_i, h_{i+1})$ – функція, що визначає відстань між містами, представленими генами h_i та h_{i+1} ;

$\text{risk}(h_i, h_{i+1})$ – функція, що визначає величину ризику між містами, представленими генами h_i та h_{i+1} .

Формула (11) враховує всі пари міст у хромосомі, додаючи значення функцій $\text{dist}(h_i, h_{i+1})$ та $\text{risk}(h_i, h_{i+1})$. Завершальний крок маршруту, який повертає до початкового гена h_1 , враховується, забезпечуючи замкненість шляху.

У класичному формулюванні задачі комівояжера використовується статична матриця відстаней c_{ij} та матриця ризиків r_{ij} , де i та j – індекси міст. Для узгодженості з класичною постановкою задачі функції $dist(h_p, h_{i+1})$ та $risk(h_p, h_{i+1})$ повертають значення з таких матриць:

$$dist(h_p, h_{i+1}) = c_{ij}, \text{ де } i = h_p, j = h_{i+1}, \quad (12)$$

$$risk(h_p, h_{i+1}) = r_{ij}, \text{ де } i = h_p, j = h_{i+1}. \quad (13)$$

Таким чином, функції $dist$ і $risk$ є інтерфейсом, що дозволяє генетичному алгоритму працювати з дійсно-числовим кодуванням, витягуючи необхідну інформацію з класичних матриць. Функціональне представлення відстаней і ризиків забезпечує гнучкість, дозволяючи враховувати динамічні зміни в параметрах, якщо такі передбачені моделлю. Це підвищує адаптивність і забезпечує збереження концептуальної основи класичної моделі, розширюючи її для роботи з еволюційними алгоритмами.

Крок 3. Перевірка критерію зупинки генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм потребує чіткої умови для завершення його роботи. Цей критерій може бути обраний з наявних варіантів, описаних у сучасній літературі [18]:

- ✦ *кількість поколінь:* цей критерій встановлює фіксовану кількість створених поколінь;
- ✦ *час роботи:* алгоритм працює протягом певного часового інтервалу;
- ✦ *досягнення цільового значення:* критерій передбачає встановлення конкретного значення функції пристосованості;
- ✦ *досягнення локального екстремуму:* цей критерій встановлює кількість поколінь, протягом яких значення функції пристосованості залишається незмінним.

У роботі критерієм зупинки генетичного алгоритму є кількість поколінь, що становить 1000: при досягненні цієї кількості поколінь робота алгоритму завершується. Такий вибір обґрунтований необхідністю забезпечення достатнього часу для еволюції популяції та пошуку оптимального рішення. Проте слід зазначити, що вибір критерію зупинки генетичного алгоритму в реальних дослідженнях часто залежить від ряду факторів, включно зі специфікою задачі, обмеженням часу та доступними ресурсами, а також вимогою до точності результату.

В умовах, коли швидкість відповіді є критичною, доцільним може бути вибір меншої кількості поколінь для прискорення процесу знаходження рішення, навіть якщо це може вплинути на його оптимальність. З іншого боку, в задачах, де максимальна точність є пріоритетом, виправдано збільшувати кількість поколінь для забезпечення детальнішого пошуку можливих рішень.

Дослідники також можуть використовувати інші критерії зупинки, згадані раніше, такі як досягнення певного рівня функції пристосованості або відсутність значних змін у популяції протягом визначеного числа поколінь. Такі підходи дозволяють адаптувати генетичний алгоритм до конкретних умов і вимог дослідження, забезпечуючи більш гнучке та ефективне вирішення задачі.

Крок 4. Селекція. У процесі розв'язання задачі комівояжера одним із ключових етапів є вибір методу селекції, який впливає на ефективність генетичного алгоритму. Існують різні підходи до селекції, зокрема метод рулетки та турнірний метод, які відрізняються механізмами вибору хромосом для наступного покоління [18].

У цій роботі для селекції обрано метод рулетки через його ефективність у розподілі ймовірностей і відносну простоту. Суть методу полягає у створенні візуальної моделі «рулетки», де кожен сегмент представляє окрему хромосому з популяції. Розмір кожного сегмента визначається відповідно до значення функції пристосованості хромосоми: хромосоми з нижчими значеннями отримують більші сегменти, оскільки в задачі ставиться ціль мінімізації.

Цей підхід дозволяє ефективно відбирати хромосоми, які забезпечують кращі рішення. У вирішуваній задачі хромосоми з нижчими значеннями функції пристосованості отримують перевагу, адже мінімізація є основною ціллю. Після розділення рулетки на сегменти випадковим чином вибирається число, яке вказує на конкретний сегмент. Хромосома, розташована на цьому сегменті, потрапляє до батьківського пулу для утворення нового покоління.

Крок 5. Застосування генетичних операторів, зокрема схрещування та мутації. У сучасній літературі вже є дослідження методів схрещування, зокрема у [20] розглядаються різні види класичного схрещування, а також пропонується авторський підхід.

Для розв'язання поставленої задачі комівояжера в роботі застосовується метод багатоточкового схрещування, в якому гени хромосом обмінюються відповідно до їх позиції в хромосомі. Іншими словами, перший ген обмінюється тільки з першим геном, а другий – тільки з другим.

Оператор мутації для генетичного алгоритму задачі комівояжера може бути реалізований за допомогою різних методів, зокрема [18]:

- ✦ *перемішування (swap mutation):* вибираються два випадкові локуси хромосоми, алелі яких обмінюються місцями;
- ✦ *обернення (inversion mutation):* вибираються два випадкові локуси хромосоми, і порядок

алелей між цими локусами обертається. Наприклад, якщо обрані локуси 2 та 5, то алелі, що відповідають локусам 2, 3 і 4, будуть розташовані у зворотному порядку.

У цій роботі для генетичного алгоритму задачі комівояжера використовується метод мутації «перемішування».

Крок 6. Формування популяції нового покоління. У сучасних дослідженнях часто застосовуються оператори схрещування та мутації, які забезпечують збереження хромосом у межах області допустимих рішень, як зазначено, зокрема, в [16].

Альтернативним підходом до вирішення цієї задачі є розробка процедури, яка дозволяє повернути хромосоми до області допустимих рішень. Ця процедура рівномірно розподіляє значення генів, таким чином гарантуючи, що хромосома відповідає обмеженням задачі.

Після перевірки кожної хромосоми на відповідність області допустимих рішень здійснюється формування нового покоління популяції.

Крок 7. Вибір найкращої хромосоми останнього покоління. Вибір найкращої хромосоми є завершальним етапом у роботі генетичного алгоритму. Після завершення всіх ітерацій алгоритму з останнього покоління хромосом проводиться відбір найкращої хромосоми. Вибір ґрунтується на функції пристосованості, де перевага віддається хромосомі з найменшим значенням. Цей підхід дозволяє ідентифікувати найефективніше рішення з точки зору заданих критеріїв оптимізації задачі.

Варто зазначити, що хоча вибір найкращої хромосоми з останнього покоління є загальноприйнятою практикою, збереження історії найкращих хромосом із попередніх поколінь може бути корисним, особливо в ситуаціях, коли алгоритм може застрягти в локальному мінімумі.

Наведені кроки та методи, які використовувалися в цій роботі, можна адаптувати та модифікувати залежно від конкретних вимог і умов задачі. Можливість гнучкого налаштування параметрів генетичного алгоритму, включно з розміром популяції, методами селекції, мутації та критерієм зупинки, дозволяє оптимізувати алгоритм для конкретних задач і сценаріїв.

У роботі представлена одна з можливих реалізацій генетичного алгоритму, яка може слугувати основою для подальших досліджень та розробок в оптимізації маршрутів. Застосування такого підходу в реальних умовах може включати додаткові виклики, такі як потреба в більшій швидкості обчислень, вищій точності чи адаптації до змінних умов, що підкреслює важливість продовження досліджень та розвитку в цій сфері.

ВИСНОВКИ

Повномасштабне російське вторгнення спричинило серйозні проблеми в економічній та продовольчій безпеці, мінімізувати вплив яких можна шляхом оптимізації логістичних процесів, зокрема оптимізації маршрутів транспортування. Використання економіко-математичних методів та моделей може дозволити мінімізувати витрати, ризики, уможливити транспортування за певними маршрутами.

Проаналізовано сучасну літературу, що фокусується на аспектах терміновості, ризиковості та пріоритетного розподілу у сфері логістики; дослідження показують, що урахування рівня ризику в надзвичайних умовах є важливим аспектом прийняття рішень, оскільки нехтування цим може призвести до додаткових витрат, зривів та людських жертв.

Запропонована проблема формалізована у вигляді задачі комівояжера з урахуванням ризику. Описано методи вимірювання та врахування ризику, можливості введення ваг для пріоритезації окремих ризиків чи фактора ризику (на протигагу витратам) загалом.

Оскільки в умовах війни прийняття рішень відбувається в умовах мінливості та терміновості, було обрано генетичний алгоритм як інструмент, що дозволяє швидко отримати рішення навіть з великими обсягами даних (які представлені у вигляді ризикових факторів). Описано кроки вирішення задачі комівояжера з урахуванням ризику за допомогою генетичного алгоритму.

Запропонований підхід формування початкової популяції хромосом дозволяє отримати хромосоми з різним генетичним матеріалом, які входять до області допустимих рішень. Функція пристосованості адаптована під кодування дійсними числами.

Поставлена задача має потенційне практичне застосування, проте конкретні умови, обмеження та методи врахування ризиків можуть варіюватися залежно від специфіки завдання та доступних даних. У подальших дослідженнях доцільно проаналізувати вплив параметрів конфігурування задачі на її ефективність. Зокрема, варто звернути увагу на налаштування методів схрещування, мутації, селекції, зміни розміру популяції, а також застосування процедури повернення хромосом до області допустимих рішень. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Chepeliev M., Maliszewska M., Pereira, M. F. S. E. The War in Ukraine, Food Security and the Role for Europe. *EuroChoices*. 2023. Vol. 22. Iss. 1. P. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12389>
2. Yazbeck N., Mansour R., Salame H. et al. The Ukraine-Russia War Is Deepening Food Insecurity, Unhealthy

- Dietary Patterns and the Lack of Dietary Diversity in Lebanon: Prevalence, Correlates and Findings from a National Cross-Sectional Study. *Nutrients*. 2022. Vol. 14. Iss. 17. Art. 3504. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14173504>
3. Halmai P. COVID-19 Crisis and Supply Side Bottlenecks in the EU. Shorter and Longer Term Prospects. *Montenegrin Journal of Economics*. 2022. Vol. 18. No. 4. P. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2022.18-4.2>
 4. Krykavskyy Y., Chornopyska N., Dovhun O. et al. Defining Supply Chain Resilience During Wartime. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1. No. 13. P. 32–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272877>
 5. Sohag K., Islam M. M., Zikovic I. T., Mansour H. Food Inflation and Geopolitical Risks: Analyzing European Regions amid the Russia-Ukraine War. *British Food Journal*. 2022. Vol. 125. Iss. 7. P. 2368–2391. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2022-0793>
 6. Zhang J., Huang J., Wang T., Zhao J. Dynamic Optimization of Emergency Logistics for Major Epidemic Considering Demand Urgency. *Systems*. 2023. Vol. 11. Iss. 6. Art. 303. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11060303>
 7. Ren X., Chen S., Ren L. Optimization of Regional Emergency Supplies Distribution Vehicle Route with Dynamic Real-Time Demand. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2023. Vol. 4. Iss. 4. P. 7487–7518. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2023324>
 8. Fedorovich O., Lukhanin M., Prokhorov O. et al. Modeling of Logistics of War Reserve Stockpiling for Successful Combat Operations. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 183–196. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.15>
 9. Wei Y., Su K., Zhao B., Shang T. Nonlinear Robust Distribution Planning Model for Perishable Products Based on Sustainable Development. *Optimization*. 2023. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/02331934.2023.2269954>
 10. Tan K., Liu W., Xu F., Li C. Optimization Model and Algorithm of Logistics Vehicle Routing Problem under Major Emergency. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, Iss. 5. Art. 1274. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11051274>
 11. Yazdani M., Haghani M. A Dynamic Emergency Planning System for Relocating Vulnerable People to Safe Shelters in Response to Heat Waves. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 228. Art. 120224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120224>
 12. Kotenko S. V., Kasianova V. A. Reliability of Cargo Transportation as the Main Objective Function of Cargo Transportation by Water Transport under the Conditions of Military Risks. *Economic Innovations*. 2022. Vol. 24. Iss. 4. P. 70–77. DOI: [https://doi.org/10.31520/ei.2022.24.4\(85\).70-77](https://doi.org/10.31520/ei.2022.24.4(85).70-77)
 13. Frame M. E., Schwing M., Johnston S., Curtis E. Route Planning Decisions: Evaluating Reliance on Spatial Heuristics under Risk. *Spatial Cognition and Computation*. 2023. Vol. 23. Iss. 1. P. 57–82. DOI: <https://doi.org/10.1080/13875868.2022.2095278>
 14. Reinelt G. The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. Springer-Verlag. 1994.
 15. Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G., Shmoys D. B. The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization. Wiley, 1991. 476 p.
 16. Cai M., Bao C., Meng Q. Overview of risk aggregation approach in different risk scenarios. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 214. P. 1353–1360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.316>
 17. Han J., Kamber M., Pei J. Data Transformation and Data Discretization. In *Data Mining: Concepts and Techniques*. 3rd ed. 2012. P. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61819-5>
 18. Luke S. Essentials of Metaheuristics. 2nd ed. Lulu, 2013. 230 p.
 19. Potvin J. Y. Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research*. 1996. Vol. 63. P. 337–370. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02125403>
 20. Hussain A., Muhammad Y. S., Nauman Sajid M. et al. Genetic Algorithm for Traveling Salesman Problem with Modified Cycle Crossover Operator. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2017. Art. 7430125. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/7430125>
 21. Skitsko V., Voinikov M. Evolutionary Algorithms in Crisis Management of Supply Chains to Enhance Global Food Security During War in Ukraine. *Electronic Governance with Emerging Technologies (EGETC 2023)*. Second International Conference. Poznan, Poland, September 11–12. 2023. Vol. 1888. P. 47–59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43940-7_5

REFERENCES

- Cai, M., Bao, C., and Meng, Q. "Overview of risk aggregation approach in different risk scenarios". *Procedia Computer Science*, vol. 214 (2022): 1353-1360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.316>
- Chepeliev, M., Maliszewska, M., and Pereira, M. F. S. E. "The War in Ukraine, Food Security and the Role for Europe". *EuroChoices*, vol. 22, no. 1 (2023): 4-13. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12389>
- Fedorovich, O. et al. "Modeling of Logistics of War Reserve Stockpiling for Successful Combat Operations". *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 1 (2023): 183-196. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.15>
- Frame, M. E. et al. "Route Planning Decisions: Evaluating Reliance on Spatial Heuristics under Risk". *Spatial Cognition and Computation*, vol. 23, no. 1 (2023): 57-82. DOI: <https://doi.org/10.1080/13875868.2022.2095278>

- Halmi, P. "COVID-19 Crisis and Supply Side Bottlenecks in the EU. Shorter and Longer Term Prospects". *Montenegrin Journal of Economics*, vol. 18, no. 4 (2022): 19-30.
DOI: <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2022.18-4.2>
- Han, J., Kamber, M., and Pei, J. "Data Transformation and Data Discretization". In *Data Mining: Concepts and Techniques*, 111-119. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61819-5>
- Hussain, A. et al. "Genetic Algorithm for Traveling Salesman Problem with Modified Cycle Crossover Operator". *Computational Intelligence and Neuroscience*, art. 7430125 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/7430125>
- Kotenko, S. V., and Kasianova, V. A. "Reliability of Cargo Transportation as the Main Objective Function of Cargo Transportation by Water Transport under the Conditions of Military Risks". *Economic Innovations*, vol. 24, no. 4 (2022): 70-77.
DOI: [https://doi.org/10.31520/ei.2022.24.4\(85\).70-77](https://doi.org/10.31520/ei.2022.24.4(85).70-77)
- Krykavskyy, Y. et al. "Defining Supply Chain Resilience During Wartime". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 13 (2023): 32-46.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272877>
- Lawler, E. L. et al. *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley, 1991.
- Luke, S. *Essentials of Metaheuristics*. Lulu, 2013.
- Potvin, J. Y. "Genetic algorithms for the traveling salesman problem". *Annals of Operations Research*, vol. 63 (1996): 337-370.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02125403>
- Reinelt, G. *The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications*. Springer-Verlag, 1994.
- Ren, X., Chen, S., and Ren, L. "Optimization of Regional Emergency Supplies Distribution Vehicle Route with Dynamic Real-Time Demand". *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 4, no. 4 (2023): 7487-7518.
DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2023324>
- Skitsko, V., and Voinikov, M. "Evolutionary Algorithms in Crisis Management of Supply Chains to Enhance Global Food Security During War in Ukraine". *Electronic Governance with Emerging Technologies (EGETC 2023)*. Second International Conference, vol. 1888. Poznan, Poland, 2023. 47-59.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43940-7_5
- Sohag, K. et al. "Food Inflation and Geopolitical Risks: Analyzing European Regions amid the Russia-Ukraine War". *British Food Journal*, vol. 125, no. 7 (2022): 2368-2391.
DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2022-0793>
- Tan, K. et al. "Optimization Model and Algorithm of Logistics Vehicle Routing Problem under Major Emergency". *Mathematics*, art. 1274, vol. 11, no. 5 (2023).
DOI: <https://doi.org/10.3390/math11051274>
- Wei, Y. et al. "Nonlinear Robust Distribution Planning Model for Perishable Products Based on Sustainable Development". *Optimization* (2023): 1-27.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02331934.2023.2269954>
- Yazbeck, N. et al. "The Ukraine-Russia War Is Deepening Food Insecurity, Unhealthy Dietary Patterns and the Lack of Dietary Diversity in Lebanon: Prevalence, Correlates and Findings from a National Cross-Sectional Study". *Nutrients*, art. 3504, vol. 14, no. 17 (2022).
DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14173504>
- Yazdani, M., and Haghani, M. "A Dynamic Emergency Planning System for Relocating Vulnerable People to Safe Shelters in Response to Heat Waves". *Expert Systems with Applications*, art. 120224, vol. 228 (2023).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120224>
- Zhang, J. et al. "Dynamic Optimization of Emergency Logistics for Major Epidemic Considering Demand Urgency". *Systems*, art. 303, vol. 11, no. 6 (2023).
DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11060303>