

Г. С. Іващенко, А. С. Склярів, О. Ю. Барковська

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ГІБРИДНИЙ МЕТОД РІШЕННЯ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ДОДАТКОВИХ ОБМЕЖЕНЬ

Анотація. **Актуальність.** У сучасному світі є потреба у застосуванні автоматизованих систем в області транспортної логістики, з метою заощадження ресурсів. При побудові шляху переміщення транспорту виникають проблеми знаходження оптимального маршруту з урахуванням додаткових обмежень, таких як вантажопідйомність транспортних засобів або часові вікна клієнтів. У зв'язку з цим є необхідність вдосконалення існуючих засобів вирішення задачі маршрутизації транспорту. **Метою даної роботи** є створення гібридного методу рішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень. **Об'єктом дослідження** є процес пошуку оптимальних маршрутів в умовах обмеження вантажопідйомності та урахування часових вікон. **Предметом дослідження** є алгоритми для рішення задач маршрутизації транспорту з урахуванням заданих обмежень. **Результати.** У даній роботі розглядаються особливості застосування гібридного підходу, заснованого на використанні генетичного та класичних алгоритмів, для вирішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень. Представлені результати експериментальних досліджень, що демонструють переваги та недоліки кожного з розглянутих алгоритмів для рішення поставленої задачі. **Висновок.** Найбільшу точність та швидкодюю забезпечує запропонований гібридний підхід на основі генетичного алгоритму та модифікованого жадібного алгоритму.

Ключові слова: граф, маршрут, задача маршрутизації транспорту, часові вікна, вантажопідйомність, жадібний алгоритм, метод гілок та меж, алгоритм збережень, генетичний алгоритм, кросовер, мутація.

Вступ

Процес економічного росту супроводжується підвищенням попиту на транспортно-логістичні послуги. Внаслідок цього, проблема вирішення задач маршрутизації транспорту (ЗМТ) стає все більш актуальною та затребуваною [1, 2].

Головною метою різновидів ЗМТ є побудова маршрутів для транспортних засобів, що обслуговують певну кількість клієнтів. ЗМТ є модифікацією та розширенням задачі комівояжера [1]. Відмінністю задачі маршрутизації від задачі комівояжера є наявність спеціальної вершини (депо), в яку можна під час проходження побудованого шляху повертатися без урахування обмеження на виконання умови одноразового відвідування вершини (точки маршруту). При використанні ЗМТ на практиці часто виникають додаткові обмеження для побудованих маршрутів, що вимагає вдосконалення існуючих математичних моделей та алгоритмів рішення [2].

ЗМТ відноситься до NP-повних задач, тому для графів з великою кількістю вершин використовують алгоритми, що ґрунтуються на різних евристичних та їх комбінаціях [3]. Евристичні алгоритми рішення ЗМТ зазвичай дозволяють знайти варіанти, що є лише наближенням до оптимального рішення, тож доцільним є вдосконалення цих алгоритмів.

Відомі класичні алгоритми по вирішенню ЗМТ. Алгоритм Кларка-Райта [4] заснований на процесі злиття дрібних маршрутів, доки є можливість зменшити сумарну вартість об'їзду. Метод гілок та меж [5] полягає в розбитті задачі на спрощені підзадачі, шляхом фіксування значення змінної розгалуження.

Для вирішення ЗМТ доцільним є використання підходів на основі засобів обчислювального інтелекту [6], зокрема, генетичних алгоритмів (ГА). В [7] показано, що ГА можуть бути застосовані для ЗМТ із складними обмеженнями або їх комбінаціями.

ГА можуть бути вдосконалені шляхом гібридизації з іншими підходами. Наприклад, використання спеціального оператора локального спуску, що заснований на чотирьох різних типах зміни порядку виконуваних кроків, дозволяє прискорити збіжність алгоритму [8], при умові використання цього оператора тільки для найкращих рішень у поточній популяції.

Реалізація ГА, запропонована в [9], використовує оператор схрещування ОХ та оператор мутації заснований на обміні місцями двох випадково обраних вершин. В [10] досліджуються способи кодування особин (варіантів маршрутів), запропонована схема кодування, заснована на випадкових ключах.

На основі аналізу сучасних наукових досліджень можна зробити висновок, що незважаючи на численні переваги, розглянуті методи вирішення задач маршрутизації транспорту мають недостатню точність у випадку великої розмірності [11] та мають ряд недоліків, які специфічні для окремих методів (можливість попадання у локальні мінімуми, передчасна збіжність та інші).

Метою цієї роботи є розробка гібридного методу рішення ЗМТ з обмеженням на вантажопідйомність та часовими вікнами, заснованого на поєднанні ГА та варіантів класичних алгоритмів, а також програмна реалізація розробленого методу та проведення експериментальних досліджень.

Постановка задачі

ЗМТ визначена у вигляді повного направленного графа $G = (V, H, c, t)$, де $V = \{0, 1, \dots, n\}$ – множина вершин. Кожна вершина з індексом $i \in V \setminus \{0\}$ відповідає клієнту, що має невід'ємний попит $d_i \leq Q$ та часове вікно $[a_i, b_i]$, а вершина 0 являє собою депо для p транспортних засобів з вантажопідйомністю Q . Матриця $H = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ описує множину дуг, що відповідає транспортній мережі між вузла-

ми. З кожною дугою пов'язана вартість переміщення c_{ij} та час переїзду t_{ij} , де $(i, j) \in H$. ЗМТ потребує визначення набору маршрутів m , сумарна вартість яких зводиться до мінімуму і така, що:

- кожен клієнт відвідується тільки один раз в одному маршруті;
- маршрути починаються та закінчуються в депо;
- загальна потреба клієнтів, що обслуговуються в одному маршруті, не перевищує пропускну здатність Q ;
- кількість маршрутів m не перевищує кількість транспортних засобів p ;
- обслуговування клієнта повинно здійснюватися в рамках його часового вікна.

Нехай бінарна змінна x_{rij} визначає переміщення транспортного засобу $r \in \{1, 2, \dots, p\}$ по дузі (i, j) в рішенні задачі, а τ_i – час початку обслуговування вершини i .

Математична модель ЗМТ з урахування додаткових обмежень може бути описана наступним чином. Мінімізація цільової функції:

$$\sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n c_{ij} x_{rij} \rightarrow \min. \quad (1)$$

З урахуванням умов:

$$\sum_{r=1}^p \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{rij} = 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{r0j} = 1, \forall r \in \{1, \dots, p\}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n d_j x_{rij} \leq Q, \forall r \in \{1, \dots, n\}, \quad (4)$$

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \forall i \in n, \quad (5)$$

$$x_{rij} \in \{0, 1\}, \forall r \in \{1, \dots, p\}, i, j \in \{0, \dots, n\}, i \neq j. \quad (6)$$

Цільова функція (1) мінімізує загальну вартість перевезень. Обмеження моделі (2) забезпечує, щоб кожного клієнта відвідав тільки один транспортний засіб. Обмеження (3) гарантує, що кожен транспортний засіб може покинути депо тільки один раз. В (4) задається обмеження вантажопідйомності транспорту, тобто сума потреб клієнтів, що належать маршруту, повинна бути менше або дорівнювати вантажопідйомності транспортного засобу. Умова відвідування клієнту в межах відповідного часового вікна формалізована за допомогою обмеження (5). Вирази (6) визначають області значень змінних.

Гібридний метод на основі ГА для рішення ЗМТ з урахуванням обмежень

Для вирішення ЗМТ за допомогою ГА необхідно обрати спосіб кодування особин (рішень). Рішенням ЗМТ є сукупність маршрутів транспортних засобів для обслуговування усіх клієнтів, тож традиційно використовуване у ГА бітове представлення

особин пропонується замінити поданням у вигляді набору маршрутів, які описуються як ланцюги чисел, де кожне число позначає деяку вершину. Положення кожного числа в рядку відповідає порядку вершини в маршруті. Кожен маршрут окремого транспортного засобу починається та закінчується вершиною депо. Необхідно модифікувати генетичні оператори кросинговеру та мутації, для їх сумісності з обраним способом кодування варіантів рішень.

До основних проблем, що виникають при використанні ГА для рішення ЗМТ [12], можна віднести вибір способів кодування особин, початкових параметрів алгоритму (поточного та максимального розміру популяції, критеріїв зупинки), параметрів фітнес-функції, алгоритму для створення початкової популяції, типів мутації та схрещування особин.

Порядок роботи ГА для вирішення ЗМТ з урахуванням вантажопідйомності транспортних засобів та часових вікон наступний:

1. Створення початкової популяції з використанням обраного класичного алгоритму (гібридизація ГА з іншими алгоритмами).

2. Відбір особин з популяції для використання при генерації нового покоління.

3. Схрещування (виконання оператора кросовера), доки не буде отримана необхідна кількість нащадків відібраних особин.

4. До усіх особин у популяції з деякою ймовірністю застосовується кожна з обраних мутацій.

5. Збереження особини, що має найнижче значення фітнес-функції (є найкращим рішенням ЗМТ на поточній ітерації алгоритму). Формування нового покоління (множини варіантів рішень ЗМТ).

6. Якщо не досягнуто критерій зупинки, необхідно повернутися до пункту 2.

Для генерації початкової популяції використовуються такі класичні алгоритми, як жадібний алгоритм, метод гілок та меж та алгоритм Кларка-Райта. Також у дослідженні запропонований модифікований жадібний алгоритм, заснований на максимізації завантаження транспортних засобів, а не мінімізації вартості проїзду.

Використання жадібного алгоритму при створенні особин початкової популяції є доцільним з урахуванням подальшого його покращення у процесі роботи ГА. Для забезпечення різноманіття початкової популяції, серед заданої кількості переїздів з найкращою вартістю обирається один випадковим чином. Для врахування умови часових вікон на кожному етапі потрібно спочатку розглядати вершини для переміщення, для яких час обслуговування буде в межах часового вікна.

Метод гілок та меж – один з комбінаторних методів, який полягає в переборі та розгляді тільки тих варіантів, які є за певними ознаками корисними для знаходження оптимального рішення. При оцінці множин враховується вантажопідйомність транспорту та часові вікна клієнтів.

Алгоритм Кларка-Райта один з найвідоміших алгоритмів вирішення ЗМТ, основну роль в якому грає поняття «збереження» – зниження загальної вартості рішення, отримане при об'єднанні двох ма-

ршрутів (7). Дрібні маршрути зливаються у більші, спираючись на величину збереження, доки є можливість покращувати рішення.

$$saving_{ij} = c_{i0} + c_{0j} + c_{ij}. \quad (7)$$

Для злиття спочатку обираються маршрути, час обслуговування яких буде в межах часового вікна, а потім обираються в залежності від величини збереження. Алгоритм дозволяє знайти рішення наближене до оптимального за прийнятний час.

Модифікація жадібного алгоритму, заснована на максимізації завантаження транспортних засобів, працює наступним чином:

1. Оцінка мінімальної кількості транспортних засобів p_{min} , необхідної щоб вмістити вантаж, що потрібно доставити клієнтам.

2. Формування p_{min} маршрутів з вершин з найбільшими потребами, при цьому враховуються часові вікна.

3. Для кожної вершини, що залишилася, здійснюється спроба помістити її в один із сформованих маршрутів, шляхом виконання в них перестановки вершин, яка дозволить звільнити місце для вантажу, що потребує цей клієнт.

4. Якщо вершин не залишилося, алгоритм закінчує свою роботу та повертає сформоване рішення, інакше – повертається до пункту 1, але працює з множиною вершин, що не потрапили до жодного з сформованих маршрутів.

Вершини для перестановки у пункті 3 обираються за допомогою перебору. Це не створює значного додаткового обчислювального навантаження, так як більшість маршрутів не приймають участі у розгляді, бо не містять вершину, яка потенційно здатна звільнити місце для вантажу.

Для схрещування особин обрано оператор РМХ [13] та адаптовано його під нові умови. На кожній ітерації роботи алгоритму, оператор застосовується доки не буде отримано задану кількість особин. Вибір батьківських особин для схрещування відбувається за допомогою турнірного відбору.

Для внесення різноманіття у популяцію, а також для дослідження більшого діапазону можливих рішень, пропонується використовувати три види мутацій, що адаптовані під обраний спосіб кодування. Інверсна мутація та мутація випадкової перестановки вершин у межах одного маршруту дозволяють проводити пошук кращого локального рішення, що дозволяє зменшити витрати на переміщення між вузлами та досягти виконання умови часових вікон. Мутація обміну підмножин вершин (фрагментів маршрутів) між різними маршрутами у рамках однієї особини дозволяє розглядати рішення, що мають різну кількість маршрутів, покращувати наповнення транспортних засобів вантажем та шукати краще глобальне рішення з меншими витратами на переїзди. Кожна із мутацій застосовується до кожної особини в популяції з деякою заданою ймовірністю.

Для оцінки отриманих рішень використовується фітнес-функція, що враховує вартість переміщень у всіх маршрутах рішення, наповненість вантажем

транспортних засобів, виконання умови часових вікон та кількість маршрутів. Нехай $c_{заг}$ – загальна вартість переміщень у рішенні, $d_{віл}$ – загальний обсяг вільного місця у всьому транспорті, що використовуються, m – кількість маршрутів у рішенні, k – кількість вершин для яких обслуговування відбувається за межами часового вікна. Тоді фітнес-функція визначається як

$$f = c_{заг} \cdot C_{коеф.} + d_{віл} \cdot D_{коеф.} + mM_{коеф.} + kK_{коеф.}, \quad (8)$$

де $C_{коеф.}$, $D_{коеф.}$, $M_{коеф.}$, $K_{коеф.}$ – коефіцієнти, що впливають на значимість характеристик отриманого рішення при розрахунку фітнес-функції. Підбір коефіцієнтів фітнес-функції є важливим для правильної роботи алгоритму, необхідно враховувати початкові параметри та цілі, для яких вирішується задача (відносну важливість критеріїв оптимального рішення).

Для уникнення рішень, у яких кількість маршрутів більше заданого значення, використовується модифікований варіант фітнес-функції (8). Якщо кількість маршрутів не задовольняє заданим умовам, то фітнес-функція не проводить оцінку рішення, що дозволяє прискорити роботу ГА.

Для підвищення продуктивності роботи ГА реалізовані наступні оптимізації:

- на етапі створення початкової популяції варіантів рішень додана можливість створити перше рішення за допомогою обраного класичного алгоритму, а інші – клонувати з отриманого. Це значно підвищує швидкість при гібридизації з алгоритмами, що генерують одне й те ж саме рішення на однаковому наборі даних;

- алгоритм зберігає інформацію тільки про свої параметри, найкраще рішення за весь час та поточну популяцію. Це дозволяє використовувати менше пам'яті при роботі алгоритму.

Налаштування параметрів ГА для конкретних задач відбувається шляхом обчислювального експерименту.

Результати експериментальних досліджень

Для проведення експериментів були використані повнозв'язні графи, що складаються з 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 та 1000 вершин.

Для ЗМТ були обрані наступні параметри:

- вантажопідйомність кожного транспортного засобу дорівнює 2000;

- вартість переміщення між двома вузлами лежить в діапазоні від 10 до 1000, матриця – асиметрична;

- потреби клієнтів у вантажі лежать в діапазоні від 250 до 1000;

- час переміщення між двома вузлами знаходиться в межах від 1 до 100;

- кожен клієнт має часові вікна, яке генерується у діапазоні від 10 до 200.

Для оцінки особин застосовується фітнес-функція з такими коефіцієнтами: $C_{коеф.} = 0.1$, $D_{коеф.} = 10$, $M_{коеф.} = 100$, $K_{коеф.} = 1$. Така комбінація коефіцієнтів забезпечує достатньо збалансовану оцінку рішень для ЗМТ з обраними параметрами.

ГА був налаштований наступним чином:

- для генерації початкової популяції використано жадібний алгоритм, метод гілок та меж, алгоритм Кларка-Райта та модифікований варіант жадібного алгоритму. Кількість початкових особин дорівнює 10;
- для схрещування застосовується кросовер PMX. Підмножина вершин кожен раз генерується випадково в межах діапазону від 2 до 5;
- вибір батьківських особин відбувається шляхом турнірного відбору з 3 учасників турніру;
- використовуються три типи мутації: інверсна, випадкова перестановка вершин в одному маршруті та обмін підмножин вершин між різними маршрутами. З ймовірністю 0.1, 0.1 та 0.4 відповідно.

В ході експериментальних досліджень застосування гібридного підходу на основі ГА в комбінації з різними алгоритмами, як показано на рис. 1, виявлено, що поєднання ГА з методом гілок та меж знаходить найгірші рішення у порівнянні з іншими. Це пов'язано з тим, що даний метод генерує початкову популяцію без достатнього різноманіття та пропонує рішення з великою кількістю маршрутів.

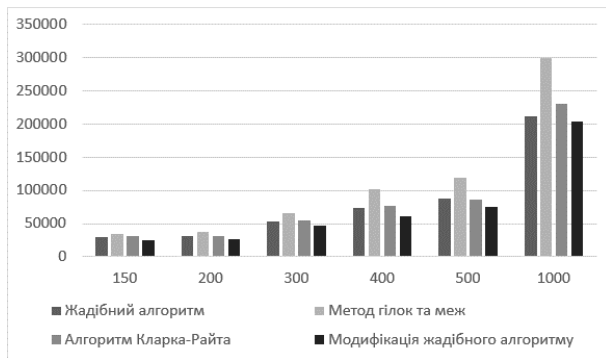


Рис. 1. Діаграма значень фітнес-функції для знайдених рішень на графах з різною кількістю вершин

Отриманий результат гібридизації ГА з алгоритмом Кларка-Райта пояснюється тим, що класичний алгоритм пристосований до симетричних матриць вартостей переміщення.

Результати комбінації ГА з жадібним алгоритмом забезпечуються різноманітністю початкової популяції, яка призводить до обстеження більшої області пошуку.

Найкращі рішення отримані за допомогою ГА на основі модифікації жадібного алгоритму, заснованої на максимізації завантаження транспортних засобів. Це пов'язано з тим, що початкова популяція складається з рішень, у яких кількість маршрутів наближена до мінімальної, при цьому вартість переміщення по ним може бути відносно вищою, ніж у інших розглянутих підходів. Це обумовлено тим, що для мінімізації кількості маршрутів при схрещуванні або мутації необхідно здійснити велику кількість таких перестановок вершин, що приведуть до зменшення кількості маршрутів. Для того, щоб зменшити вартість переміщень достатньо однієї або декількох змін з вершинами, тому ГА вирішує проблему з вартістю переїздів, як показано на рис. 2, після достатньої кількості ітерацій та знаходить рішення, що є наближеним до оптимального.

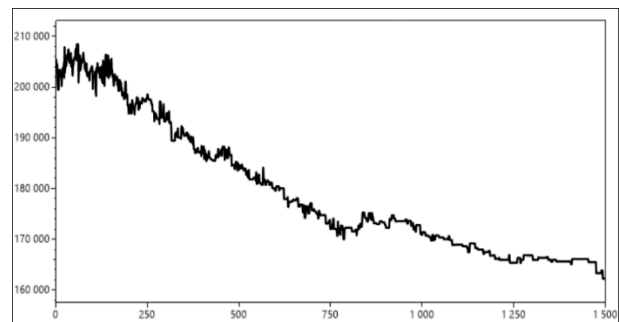


Рис. 2. Графік зміни середньої вартості переміщень при використанні гібридного методу на графі з 300 вершинами

В табл. 1 представлені результати порівняння застосування гібридного підходу на основі ГА з описаними класичними алгоритмами. Критеріями ефективності є час роботи алгоритму та значення фітнес-функції, яке враховує всі характеристики отриманого рішення. Результати фіксувалися при досягненні одного із критеріїв зупинки:

- алгоритм виконав 1500 ітерацій;
- алгоритм виконав 150 ітерацій без удосконалення поточного найкращого рішення.

Щоб уникнути викривлення результатів через випадкові значення, що використовуються в логіці алгоритмів, кожен алгоритм на кожному наборі даних запускався 5 разів, результуюче значення бралося як середнє арифметичне.

Таблиця 1 – Порівняння результатів застосування ГА з розглянутими класичними алгоритмами

Застосовані алгоритми для створення початкової популяції	Критерій ефективності	Кількість вершин									
		25	50	75	100	150	200	300	400	500	1000
Жадібний алгоритм	Час, с	3.64	4.99	6.36	7.97	11.41	14.39	21.79	30.65	38.75	86.72
	Оцінка	5243	9749	14789	16830	30112	31431	53723	73876	87635	211026
Метод гілок та меж	Час, с	3.71	5.07	6.64	8.7	11.75	15.85	24.36	34.69	44.94	129.62
	Оцінка	6962	9989	19725	18799	33723	37867	65392	101089	119636	299124
Алгоритм Кларка-Райта	Час, с	3.7	5.02	6.74	8.08	11.72	14.7	23.02	31.26	39.01	91.01
	Оцінка	7395	8880	17358	16596	30790	31350	55231	76029	86171	229837
Модифікація жадібного алгоритму	Час, с	3.65	4.89	6.35	7.7	11.2	14.38	21.22	29.49	38.2	83.73
	Оцінка	5251	7499	14089	12698	25270	26926	47321	60569	74777	203121

З наведеної таблиці випливає, що застосування гібридного підходу на основі ГА і модифікованого жадібного алгоритму дозволяє отримати кращі рішення за менший час, ніж в результаті інших розглянутих алгоритмів.

Висновки

В роботі запропонований гібридний підхід для рішення задачі маршрутизації транспорту, заснований на поєднанні генетичного та класичних алгоритмів. Найбільшу точність та швидкодню забезпечує гібридизація генетичного алгоритму та

модифікації жадібного алгоритму, заснованого на максимізації завантаження транспорту, у порівнянні з комбінаціями генетичних алгоритмів та інших алгоритмів.

В майбутньому доцільними є такі напрями розвитку розглянутого підходу:

- застосування декількох класичних алгоритмів одночасно для формування початкової популяції та забезпечення різноманіття;
- аналіз застосування різних видів кросовера, мутацій та інших стратегій відбору батьківських особин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aksen D., Zyurt Z., Aras N. (2006), "Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58(9), pp. 106-114, doi: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602249>
2. Braekers K., Ramaekers K., Nieuwenhuise I. (2016), "The vehicle routing problem: State of the art classification and review", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 99, pp. 300-313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
3. Caramia M., Guerriero F. (2010), "A heuristic approach for the truck and trailer routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 61(7), pp. 1168-1180, doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.59>
4. Clarke G., Wright J.W. (1964), "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 568-581, doi: <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
5. Theurich F., Fischer A., Scheithauer G. (2021), "A branch-and-bound approach for a Vehicle Routing Problem with Customer Costs", *EURO Journal on Computational Optimization*, Vol. 9, pp. 29-40, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejco.2020.100003>
6. Кораблев Н.М., Иващенко Г.С., Кушнарев М.В. (2012) "Агентно-ориентированный подход на основе искусственных иммунных систем для решения задачи коммивояжера", *Біоніка інтелекту*, №2(79), С. 33-37, available at: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/572>
7. Alvarez A., Munari P. (2017), "An exact hybrid method for the vehicle routing problem with time windows and multiple deliverymen", *Computers & Operations Research*, Vol. 83, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.001>
8. Vidal T., Crainic T.G., Gendreau M., Prins C. (2013), "A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time windows", *Computers & Operations Research*, Vol. 40(1), pp. 475-489, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>
9. Mohammed M.A., Ghani M.K., Hamed R.I., Mostafa S.A., Ahmad M.S., Ibrahim D.A. (2017), "Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution", *Journal of Computational Science*, Vol. 21, pp. 255-262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.04.003>
10. Bean J. C. (1994), "Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization", *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 154-160, doi: <https://doi.org/10.1287/ijoc.6.2.154>
11. Caceres-Cruz J., Arias P., Guimarans D., Riera D., Juin A. (2015), "Rich vehicle routing problem: Survey", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 47(2), No. 32, pp. 1-28, doi: <https://doi.org/10.1145/2666003>
12. Alba E., Dorronsoro B. (2004), "Solving the vehicle routing problem by using cellular genetic algorithms", *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Vol. 3004, pp. 11-20, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24652-7_2
13. Cheng C., Wang K. (2009), "Solving a vehicle routing problem with time windows by a decomposition technique and a genetic algorithm", *Expert Systems Applications*, Vol. 36(4), pp. 7758-7763, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.09.001>

Received (Надійшла) 17.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.03.2023

A hybrid approach for solving the vehicle routing problem with additional constraints

Heorhii Ivashchenko, Artem Skliarov, Olesia Barkovska

Abstract. Topicality. In the modern world, there is a need to use automated systems in the transport logistics, in order to saving resources. When constructing a vehicle route, there are problems of searching the optimal route, taking into account additional constraints, such as the carrying capacity of vehicles or time windows of customers. In this regard, there is a need to improve the existing means of solving the vehicle routing problem. **The goal of this work** is to create a hybrid method of solving the vehicle routing problem with additional constraints. **The object of research** is the process of searching optimal routes with load capacity limitation and taking into account time windows. **The subject of research** is algorithms of solving vehicle routing problems with additional constraints. **Results.** In this paper, the features of the application of a hybrid approach based on the use of genetic and classical algorithms to solve the vehicle routing problem with additional constraints, are considered. The results of experimental studies demonstrating the advantages and disadvantages of each of the considered algorithms for solving the given problem are presented. **Conclusions.** The proposed hybrid approach based on the genetic algorithm and the modified greedy algorithm provides the highest accuracy and speed.

Keywords: graph, route, vehicle routing problem, time windows, carrying capacity, greedy algorithm, branch-and-bound algorithm, conservation algorithm, genetic algorithm, crossover, mutation.