

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 519.1:656.012.34

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.1>

Пасічник А. М., доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри прикладної та вищої математики
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0000-0002-8561-1374

Худа Ж. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної та вищої математики
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0000-0002-3451-5825

Циба В. В., аспірант кафедри прикладної та вищої математики
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0009-0003-8042-6748

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПОРТОВОЇ ПЕРЕРОБКИ ВАНТАЖОПОТОКУ

Стаття присвячена розробці методу структурної оптимізації функціонування транспортної системи роботизованих транспортних засобів переробки контейнерів та вантажів в порту на основі модифікації методу гілок і границь.

Актуальність даної статті обумовлена тим, що близько половини обсягів всіх міжнародних перевезень здійснюються морським транспортом, а продуктивність їх переробки в портах з урахуванням митного оформлення і контролю напряму залежить від ефективності функціонування портів транспортних систем. Однією із найбільш ефективних технологій побудови таких транспортних систем є застосування роботизованих транспортних засобів, які забезпечують перевезення контейнерів і вантажів за технологічними маршрутами в неперервному режимі з можливістю динамічного сканування та виявлення товарів заборонених до перевезення. Тому розробка і удосконалення методів оптимізації роботизованих транспортних систем портової переробки вантажів є достатньо актуальною прикладною проблемою.

Метою даної статті є розробка алгоритму структурної оптимізації роботизованої транспортної системи забезпечення перевезень вантажів і контейнерів технологічними маршрутами при їх портової переробці на основі модифікації методу гілок та границь.

У відповідності із запропонованим підходом в якості критерія оптимізації використовується функція мінімізації витрат на формування структури та функціонування елементів транспортної системи. В процесі пошуку оптимального варіанту структури транспортної системи застосовується метод гілок і границь в якому для розбиття поточної множини розв'язків задачі на підмножини розгалуження використовується принцип можливих варіантів. Для підмножин розгалуження обчислюються нижні оцінки значень цільової функції вибору оптимальної моделі. В якості умови виключення неефективних варіантів і припинення розгалуження для задачі структурної оптимізації визначено умову забезпечення максимально можливої продуктивності перевезень обраними робокарами, що мають меншу вартість.

За результатами проведених досліджень встановлено, що розроблений алгоритм дозволяє визначити оптимальну структуру роботизованої транспортної системи, яка за умови її мінімальної вартості забезпечує максимально можливу продуктивність переробки вантажів і контейнерів в порту. При цьому запропонований підхід допускає узагальнення для випадку побудови оптимальної структури транспортної системи з максимальною продуктивністю та мінімально можливою вартістю.

Ключові слова: мінімізація вартості транспортної системи, метод гілок і границь.

Pasichnyk A. M., Khuda Zh. V., Tsyba V. V. The method of optimizing the robotic transport system of port cargo processing

The article is devoted to the development of a method of structural optimization of the functioning of the transport system of robotic vehicles for the processing of containers and cargo in the port based on the modification of the method of branches and boundaries.

The relevance of this article is explained by the fact that about half of the volume of all international transportation is carried out by sea transport, and the efficiency of the operation of port transport systems depends on the productivity of their processing in ports, considering and customs clearance and direct control. One of the most effective technologies for building such transport systems is the use of robotic vehicles, which ensure the transportation of containers and cargo along technological routes in a continuous mode with the possibility of dynamic scanning and detection of prohibited cargo. Therefore, the development and improvement of optimization methods of robotic transport systems for port cargo handling is an urgent applied problem.

The purpose of this article is to develop an algorithm for the structural optimization of the robotic transport system for ensuring the transportation of goods and containers along the technological routes of their port processing based on the modification of the method of branches and boundaries.

In accordance with the proposed approach, the cost minimization function for the formation of the structure and functioning of the elements of the transport system is used as an optimization criterion. In the process of searching for the optimal version of the structure of the transport system, the method of branches and boundaries is used, in which the principle of possible options is used to divide the current set of solutions of the problem into branching subsets. For subsets of branching, lower estimates of the values of the objective function of choosing the optimal model are calculated. As a condition for the exclusion of inefficient options and termination of branching for the structural optimization problem, the condition for ensuring the maximum possible productivity of transportation by selected robocars with a lower cost is defined.

According to the results of the conducted research, it was found that the developed algorithm allows to determine the optimal structure of the robotic transport system, which, under the condition of its minimum cost, ensures the maximum possible productivity of cargo and container processing in the port. At the same time, the proposed approach allows generalization for the case of building the optimal structure of the transport system with maximum productivity and minimum possible cost.

Key words: branches and borders method, the problem of choosing optimal regressive model.

Постановка проблеми. В сучасних реаліях однією із умов ефективного відновлення економіки є модернізація та подальший розвиток транспортної системи і підвищення рівня використання транзитного потенціалу України [1]. При цьому важливе значення для підвищення ефективності функціонування української транспортної системи має її інтеграція в європейську мережу міжнародних транспортних коридорів [2] та оптимізація транспортно-логістичної інфраструктури забезпечення міжнародних вантажних перевезень [3, 4]. За експертними оцінками підвищення ефективності використання транзитного потенціалу дозволить Україні отримувати щорічно близько \$ 2,5 млрд. надходжень [5]. Особливе значення для успішного вирішення вказаної проблеми відіграє підвищення транзитних товаропотоків через сухі та морські порти [6]. Зазначимо, що близько половини обсягів всіх міжнародних перевезень переробляються в портах і здійснюються морським транспортом [7, 8]. Тому важливе значення має удосконалення та оптимізація функціонування мультимодальних транспортних систем, що забезпечують перевезення контейнерів та вантажів [9], а також технологій їх переробки та митного оформлення і контролю у відповідних пунктах пропуску [10]. Однією із найбільш ефективних технологій побудови таких транспортних систем є застосування роботизованих транспортних засобів, які забезпечують перевезення контейнерів і вантажів за технологічними маршрутами в програмованому автоматичному режимі з можливістю динамічного сканування товарів заборонених до перевезення. У зв'язку з цим розробка методів структурної оптимізації транспортних систем із використанням роботизованих транспортних засобів (робокарів) є достатньо актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час для побудови розв'язку задач дискретного математичного програмування досить широкого застосування набув оптимізаційний алгоритм на основі методу гілок і границь. Вперше алгоритм застосування даного методу був запропонований в роботі [11] для загальної задачі цілочислового лінійного програмування.

Застосування методу гілок і границь для розв'язання задачі вибору оптимальної регресійної моделі як задачі дискретної оптимізації наведено в роботі [12]. Особливості застосування методу гілок і границь для розв'язання задачі вибору оптимальної регресійної моделі розглянуті в роботі [13].

Можливості застосування методу гілок і границь при розв'язанні задач лінійного цілочислового програмування наведені в роботі [14]. На основі методу гілок і границь розроблено ефективні оптимізаційні алгоритми побудови розв'язків прикладних задач. Результати побудови розв'язків задачі формування команди та пошуку інвесторів для стартап-проектів із застосуванням оптимізаційного алгоритму гілок та границь наведено в публікації [15].

Мета статті: розробка алгоритму структурної оптимізації транспортної системи роботизованих транспортних засобів переробки контейнерів і вантажів в порту на основі методу гілок та границь. В якості критерія оптимізації обирається мінімізація витрат на формування структури та функціонування елементів транспортної системи за умови їх максимально можливої продуктивності.

Виклад основного матеріалу. При побудові транспортної системи переробки потоку контейнерів і вантажів в порту необхідно визначити оптимальну кількість роботизованих транспортних засобів, їх тип та розподілити чисельну кількість завдань транспортування контейнерів заданими маршрутами. Як критерій оптимізації обираємо мінімізацію витрат на закупівлю та експлуатацію транспортних засобів та їх максимально можливу продуктивність. Під час вирішення завдання необхідно врахувати, що кожен робочар повинен забезпечувати транспортування контейнерів у певному часовому інтервалі.

На першому етапі дослідження проводиться системний аналіз портової транспортної системи переробки потоку вантажів і контейнерів та визначаються її характеристики, необхідні для формулювання математичної моделі задачі оптимізації. В даному випадку транспортна система переробки потоку контейнерів в порту визначається такими параметрами:

1. Множина технологічних маршрутів переміщення вантажів або контейнерів у транспортній системі – $I = \{i, i=1, \dots, I\}$;
2. Верхній гранично допустимий час переміщення вантажу або контейнера технологічним маршрутом $\langle x_i \rangle, i=1, \dots, I$;
3. Кількість перевезень контейнерів або вантажів технологічним маршрутом у транспортній системі – $J = \{j, j=1, \dots, J\}$;
4. Кількість видів робочарів, які можуть використовуватися в транспортній системі для перевезення контейнерів або вантажів технологічними маршрутами. – $R = \{r, r=1, \dots, R\}$;
5. Продуктивність різних видів роботизованих транспортних засобів під час перевезення контейнерів технологічними маршрутами – $P_r = \{p_r, r=1, \dots, R\}$;
6. Максимально допустима кількість робочарів, які можуть використовуватися в транспортній системі при перевезенні вантажів або контейнерів технологічними маршрутами – S ;
7. Матриця середньої кількості транспортних перевезень контейнерів $\|l_{ij}\|, (i=1, \dots, I, j=1, \dots, J)$ за кожним технологічним маршрутом, що визначається параметрами $I = \{i, i=1, \dots, I\}, J = \{j, j=1, \dots, J\}$.
8. Матриця середньої інтенсивності транспортних перевезень $\|\lambda_{ij}\|, (i=1, \dots, I, j=1, \dots, J)$ за кожним технологічним маршрутом, що визначається параметрами $I = \{i, i=1, \dots, I\}, J = \{j, j=1, \dots, J\}$.

Для формалізації алгоритму побудови цільової функції приймаються такі припущення:

1. Для підвищення надійності системи та уніфікації процесу експлуатації та технічного обслуговування всі робочари, що використовуються у транспортній системі, мають бути однотипними незалежно від їх кількості.
2. Всі функції перевезення вантажу або контейнера виконуються одним і тим же робочаром незалежно від способу їх розподілу.

На підставі вихідних даних та з урахуванням прийнятих припущень цільова функція задачі структурної оптимізації функціонування портової транспортної системи робочарів з переробки потоку вантажів і контейнерів, що моделює мінімізацію витрат на закупівлю та експлуатацію транспортних засобів із забезпечення перевезень на всіх технологічних маршрутах, запишеться так:

$$W = \min \sum_{n_s \in N_s} \left[\sum_{r=1}^R \left(\sum_{s=1}^S W_{n_{sr}} \right) e_{n_s} \right] e_{n_s}, \quad (1)$$

де $W_{n_{sr}}$ – приведені річні витрати на транспортний засіб s ($s = 1, \dots, S$) r -го типу, що забезпечує підмножину перевезень ($J_{n_s} \in J$);

n_s – варіант розподілу технологічних маршрутів між робочарами, $n_s \in N_s$, N_s – множина варіантів розподілу технологічних маршрутів між робочарами;

I_{n_s} – підмножина технологічних маршрутів, що обслуговуються s -им робочаром при n_s розподілі технологічних маршрутів, $I_{n_s} \in I$.

e_{n_s} – коефіцієнт розподілу варіанту обслуговування технологічних маршрутів робочарами, $e_{n_s} = 1$, у випадку вибору варіанту розподілу маршрутів n_s , у протилежному випадку $e_{n_s} = 0$;

$e_{n_{sr}}$ – коефіцієнт розподілу робочарів за технологічними маршрутами, $e_{n_{sr}} = 1$, у випадку вибору транспортного засобу r -ого виду при n_s варіанті розподілу технологічних маршрутів, у протилежному випадку $e_{n_{sr}} = 0$;

$t_{n_{sr}i}$ – час обслуговування i -го технологічного маршруту s -им транспортним засобом при варіанті розподілу технологічних маршрутів між робочарами n_s .

Додаткові умови для задачі структурної оптимізації (1) формулюються так:

1. Може бути вибраний тільки один варіант розподілу технологічних маршрутів для всіх робочарів транспортної системи:

$$\sum_{n_s \in N_s} e_{n_s} = 1, S=1, \dots, I. \quad (2)$$

2. Може бути вибраний тільки один вид транспортних засобів для кожного варіанту розподілу технологічних маршрутів:

$$\sum_{r=1}^R e_{n_s} = 1, n_s \in N_s. \quad (3)$$

3. Час обслуговування кожного технологічного маршруту не може перевищувати допустимого значення для всіх варіантів розподілу технологічних маршрутів між робочими:

$$\sum_{n_s \in N_s} \sum_{r=1}^R t_{n_s r} e_{n_s} e_r \leq x_i, i \in I_{n_s}, s=1, \dots, S. \quad (4)$$

В результаті розв'язання задачі (1) – (4) необхідно визначити оптимальну структуру роботизованої транспортної системи, тобто знайти такі значення змінних $S, e_{n_s}, e_{n_s r}$ підмножини технологічних маршрутів $I_{n_s}, (s=1, \dots, S)$, при яких цільова функція (1) досягла б свого мінімального значення та були виконані умови обмеження (2) – (4).

Алгоритм побудови розв'язку задачі структурної оптимізації транспортної системи. Оптимізаційна задача (1) – (4) належить до класу нелінійних комбінаторних задач дискретного математичного програмування і для побудови її розв'язку запропоновано застосувати оптимізаційний алгоритм на основі методу гілок і границь. Вперше алгоритм застосування методу гілок і границь був запропонований в роботі [10] для загальної задачі цілочислового лінійного програмування. Відповідно до алгоритму цього методу здійснюється розгалуження та системний аналіз варіантів з виключенням неефективних гілок, які не задовольняють заданим обмеженням. При цьому цей процес продовжується до моменту визначення оптимального розв'язку у відповідності зі сформульованим алгоритмом розгалуження варіантів і критерієм їх оцінки, а також умовами припинення подальшого розгалуження.

Розглянемо спочатку загальну схему розгалуження варіантів при оптимізації структури транспортної системи, представлену на рис. 1.

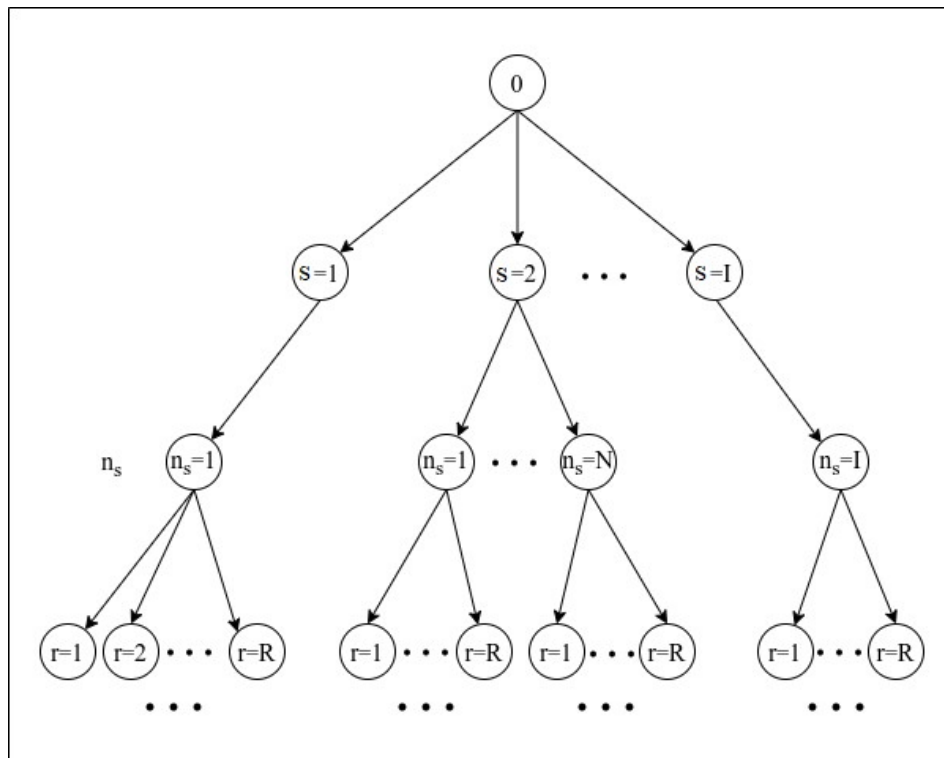


Рис. 1. Загальна схема алгоритму розгалуження варіантів при оптимізації структури транспортної системи

Джерело: розроблено авторами

Для реалізації алгоритмічної схеми методу, на першому етапі, представленому першим рівнем графа, вся множина можливих варіантів розбивається на підмножини розгалуження S . Потім на другому етапі розгалуження кожна з отриманих підмножин розбивається на N_s підмножин. Для $S=1$ і $S=S$ кількість підмножин

дорівнює 1, оскільки при $S=1$ всі технологічні маршрути обслуговуються одним робочим, а при $S=I$ кожний роботизований транспортний засіб обслуговує тільки один технологічний маршрут.

На третьому етапі розгалуження кожна з підмножин варіантів попереднього етапу знову розбивається на R підмножин. Тепер за кількості робочих більше 1 і менше I у відповідності з алгоритмом подальшого розгалуження необхідно із множини можливих варіантів розподілу технологічних маршрутів – $N_s = \{n_s; n_s = I, \dots, N_s\}$ визначити найбільш оптимальні за критеріями (1) – (4). Схема застосування такого алгоритму розгалуження для випадку трьох робочих та п'яти технологічних маршрутів, що включає всю множини можливих варіантів наведена у вигляді графа, рис. 2.

Для підвищення ефективності алгоритму і визначення умови припинення розгалуження необхідно відсортувати всі типи робочих в порядку зменшення продуктивності та вартості. Потім виключити з переліку робочі, які мають меншу продуктивність за більшої або рівної вартості. Після проведеного виключення робимо порівняння загальної вартості системи для варіантів r і $r-1$ і обираємо варіант з меншою вартістю. При цьому подальший перебір інших видів робочих припиняється і переходимо до зміни варіанта розподілу технологічних маршрутів n_s .

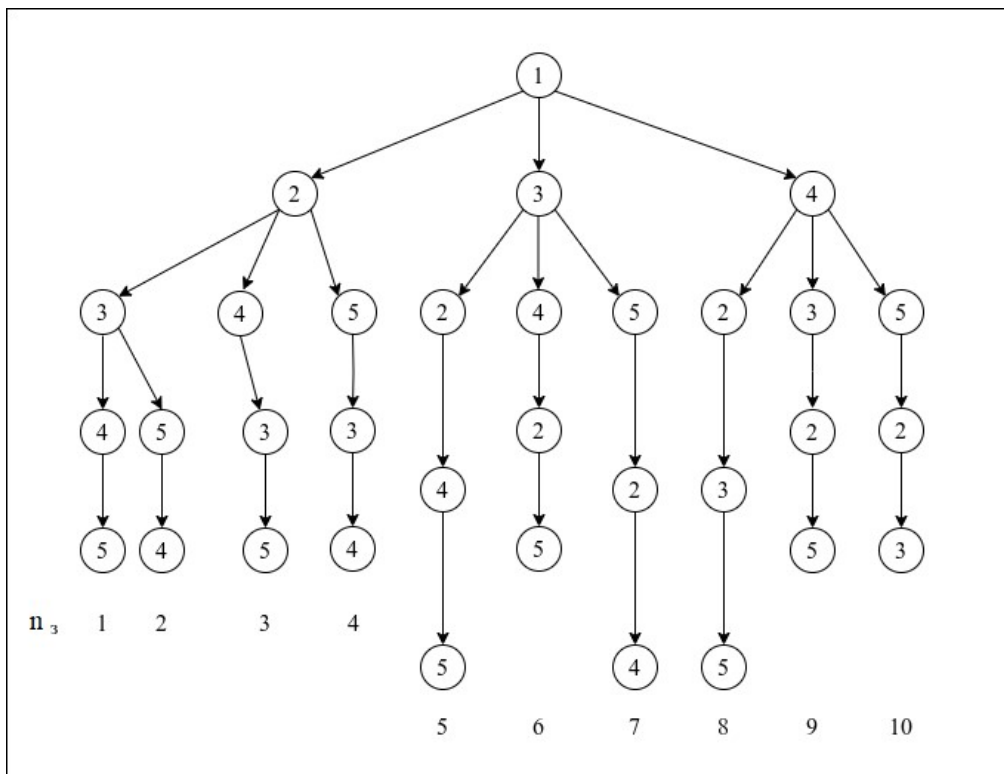


Рис. 2. Граф алгоритмічної схеми розгалуження з урахуванням можливих варіантів розподілу технологічних маршрутів

Джерело: розроблено авторами

Критерієм виключення неефективних варіантів і припинення розгалуження для задачі структурної оптимізації є умова забезпечення обраними робочими меншої вартості максимально можливої продуктивності перевезення вантажів або контейнерів у технологічному процесі їх переробки в порту. За базовий варіант побудови оптимального розв'язку задачі приймається варіант, що забезпечує достатньо рівномірне завантаження наявних робочих та дозволяє використовувати мінімальну кількість додаткових регулюючих пристроїв. У цьому випадку для всіх робочих r -го виду рівномірність розподілу навантаження між ними можна визначити відповідним коефіцієнтом рівня розподілу навантаження:

$$g_r = \lambda t_r / m_r \quad (5)$$

У співвідношенні (5) позначено: m_r – мінімальна чисельність робочих r -го виду, t_r – середній час перевезення за технологічним маршрутом робочим r -ого виду, λ – сумарна інтенсивність перевезень:

$$\lambda = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \lambda_{ij} \quad (6)$$

λ_{ij} – інтенсивність транспортувань i -м технологічним маршрутом.

Середній час перевезення за технологічним маршрутом робокаром r -ого виду буде визначатися так:

$$t_r = \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \lambda_{ij} l_{ij} q_j \right) / (\lambda p_r). \quad (7)$$

Тут l_{ij} – обсяги перевезень, q_j – витрати на перевезення одного контейнера, p_r – продуктивність робокара r -ого виду;

Задаючи значення коефіцієнту рівномірності розподілу завантаження між робокарами близькі до одиниці, наприклад $g_r = 0,85$, із співвідношення (5) визначаються нижні значення кількості робокарів кожного виду m_r , які потім приймаються в якості початкового значення чисельності робокарів. При цьому розгалуження варіантів із меншою кількістю робокарів розглядати не потрібно. Також умовою виключення неефективних варіантів є перевищення часу виконання функціональних завдань кожним робокаром певного виду, тобто не відповідність його продуктивності і не виконання умови обмеження визначеної співвідношенням (4) та відповідно припинення подальшого розгалуження варіантів цієї гілки для робокарів даного r -го виду. Після цього вибирається черговий варіант розподілу технологічних маршрутів n_s , що забезпечуються даним видом робокарів, або вибирається робокар іншого виду.

Пошук нових варіантів припиняється повністю, коли для всіх початкових значень чисельності робокарів кожного виду при всіх можливих варіантах розподілу технологічних маршрутів визначається такий вид роботизованого транспортного засобу, для якого виконується умова припинення розгалуження, тобто цільова функція отримує мінімальне значення і вартість транспортної системи буде мінімальною, а продуктивність системи з перевезення контейнерів буде максимально можливою. Для побудови розв'язку в якості початкового оптимального варіанту системи приймається вартість і продуктивність першого знайденого варіанту, що задовольняє умовам (4), які в процесі подальших обчислень замінюються на значення варіанта з меншою вартістю. В результаті отримуємо оптимальний варіант структури транспортної системи з мінімальною вартістю та максимально можливою продуктивністю.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Результати проведеного дослідження показують, що запропонований підхід дозволяє визначити оптимальну структуру роботизованої транспортної системи яка забезпечує максимально можливу продуктивність переробки контейнерів в порту за умови її мінімальної вартості. Процес пошуку оптимального варіанту структури транспортної системи реалізується на основі методу гілок і границь. Для розбиття поточної множини розв'язків задачі на підмножини розгалуження використовується принцип можливих варіантів. Для підмножин розгалуження обчислюються нижні оцінки значень цільової функції вибору оптимальної моделі. Зазначимо, що запропонований підхід допускає узагальнення для випадку побудови оптимальної структури транспортної системи з максимальною продуктивністю та мінімально можливою вартістю.

В подальших дослідженнях доцільно розглянути узагальнення запропонованого підходу для оптимізації структури транспортних систем інших видів транспорту.

Список використаних джерел:

1. Прейгер Д. К., Собкевич О. В., Смельянова О. Ю. Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку: аналітична доповідь. Київ: НІСД, 2011. 37 с. URL: http://www.niss.gov.ua/public/File/2011_nauk_an_rozrobku/transport.pdf.
2. Кузьменко К. М. Основні аспекти розвитку транспортного комплексу України за критеріями інтеграції. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2021. № 1 (74). С. 52-64.
3. Репіч Т. А., Великий Д. Ю. Оптимізація логістичної інфраструктури міжнародних вантажних перевезень. *Ефективна економіка*. ДДАЕУ. 2017. № 1. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5377>.
4. Пасічник А. М. Методологія формування логістичної транспортно-митної інфраструктури в Україні: монографія / за ред. А. М. Пасічника. Дніпропетровськ, УМСФ. 2016. 168 с.
5. Кузьменко А. В. Досвід та закономірності формування світової транспортно-логістичної інфраструктури. *Науковий огляд*, 2015. № 7(17). С. 5-18.
6. Рудь І. Транзитний морський потенціал України: сучасні реалії та перспективи. *Україна: події, факти, коментарі*. 2016. № 5. С. 65-71. URL: <http://nbuviar.gov.ua/images/ukraine/2016/ukr5.pdf>.
7. MacNeil A. and Ghosh S. Gender imbalance in the maritime industry: Impediments, initiatives, and recommendations. *Australian Journal of Maritime and Ocean Affairs*. 2016. 9(1). P. 42-55.
8. Review of Maritime Transport. Report by the UNCTAD. New York and Geneva: UN. 2019. 116 p.
9. Самановская К. А. Перспективы развития транзитных мультимодальных контейнерных перевозок вантажів. URL: <http://tsi.lv/sites/editor/science/art1.pdf>.
10. Pasichnyk A. Analysis of the condition of transport-customs infrastructure and efficiency of the transit potential of Ukraine. Promoting the European integration processes in the Eastern Partnership countries: national

and regional policy instruments: monograph / NAS of Ukraine. SI "Institute of Regional Research"/ ed. by Kh. Prytula and I. Horga. Lviv, 2022. P. 191-214.

11. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrics*. 1960. V. 28. P. 497-520.

12. Мельник І.М., Піднебесна Г.А. Особливості застосування методу гілок і границь для розв'язання задачі вибору оптимальної регресійної моделі. *Індуктивне моделювання складних систем*. МННЦ ІТС НАН України. Київ, 2012. В. 4. С. 128-135.

13. Мельник І.М. Метод гілок і границь для розв'язання задачі вибору оптимальної регресійної моделі як задачі дискретної оптимізації. *Індуктивне моделювання складних систем*. МННЦ ІТС НАН України. Київ, 2009. С. 131-139.

14. Крижанівський Б. Використання методу гілок і меж при розв'язанні задач лінійного цілочислового програмування: матеріали науково-технічної конференції «Наука. Освіта. Молодь». УДПУ, 2016. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2016_1/85.pdf

15. Кравченко Є. І. Алгоритм гілок та меж для задачі формування команди та пошуку інвесторів для стартап-проектів. *Науковий огляд*. НТУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2018. № 6(49). С. 64-72.

References:

1. Preyger D. K., Sobkevich O. V., Yemel'yanova O. Yu. (2011). Realizatsiia potentsialu transportnoi infrastruktury Ukrainy v stratehii postkryzovoho ekonomichnoho rozvytku [Realization of the potential of Ukraine's transport infrastructure in the strategy of post-crisis economic development]: analitychna dopovid. Kyiv: NISI. 37 s. URL: http://www.niss.gov.ua/public/File/2011_nauk_an_rozrobku/transport.pdf. [in Ukrainian].

2. Kuz'menko K. M. (2021). Osnovny aspekty rozvitku transportnogo kompleksu Ukrainy za kriteriyamy integratsii [Ukraine transport complex development main aspects according to the integration criteria]. Rozvitok metodiv upravlinnya i hospodaryuvannya na transporti. № 1(74), P. 52-64. [in Ukrainian].

3. Repich T. A., Bol'shoy D. Yu. (2017). Optymizatsiya lohistychnoyi infrastruktury mizhnarodnykh vantazhnykh perevezen' [Optimization of the logistics infrastructure of international freight transportation.]. *Efektivna ekonomika*, DGAEU. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5377>. [in Ukrainian].

4. Pasichnyk A. M. (2016). Metodolohiia formuvannia lohistychnoi transportno-mytnoi infrastruktury v Ukraini [Methodology of formation of logistic transport and customs infrastructure in Ukraine], : monografiya / pod red. A. M. Pasechnika. Dnepropetrovsk, UMSF. 168 p. [in Ukrainian].

5. Kuz'menko A.V. (2015). Opyt i zakonomernosti formirovaniya mirovoy transportno-logisticheskoy infrastruktury. [Transit sea potential of Ukraine: modern realities and prospects.] *Naukhoviy oglyad*. № 7(17). P. 5-18. [in Ukrainian].

6. Rud' I. (2016). Tranzitnyy morskoy potentsial Ukrainy: sovremennyye realii i perspektivy. [Transit sea potential of Ukraine: modern realities and prospects.] *Ukraina: sobytiya, fakty, kommentarii*. № 5. S. 65-71. URL: <http://nbuviap.gov.ua/images/ukraine/2016/rus5.pdf>. [in Ukrainian].

7. MacNeil A. and Ghosh S. (2016). Gender imbalance in the maritime industry: Impediments, initiatives, and recommendations. *Australian Journal of Maritime and Ocean Affairs*. 9(1). P. 42-55.

8. (2019). Review of Maritime Transport. Report by the UNCTAD. New York and Geneva: UN. 116 p.

9. Samanovskaya K. A. Perspektivi rozvitku tranzitnykh multimodalnykh konteynernykh perevezen vantazhiv [Prospects for transit multimodal container goods transportation development]. Retrieved from: <http://tsi.lv/sites/editor/science/art1.pdf> [in Ukrainian].

10. Pasichnyk A. (2022). Analysis of condition of transport-customs infrastructure and efficiency of transit potential of Ukraine. Promoting European integration process in Eastern Partnership countries: natsional'nyye i regional'nyye politicheskiye instrumenty: monograph / NAS of Ukraine. SI "Institute of Regional Research"/ ed. by Kh. Prytula i I. Horga. Lviv. P. 191-214. [in Ukrainian].

11. Land A.H., and Doig A.G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrics*. V. 28. P. 497-520.

12. Mel'nik I.M., Podnebesnaya G.A. (2012). Osobennosti primeneniya metoda vetvey i granits dlya resheniya zadachi vybora optimal'noy regressionnoy modeli. [Peculiarities of using the method of branches and boundaries for solving the problem of choosing the optimal regression model]. *Induktivne modeluvannya skladnykh sistem*. MNNTS ITS NAN Ukrainy. Kyiv. V. 4. P. 128-135. [in Ukrainian].

13. Mel'nik I.M. (2009). Metod vetvey i granits dlya resheniya zadachi vybora optimal'noy regressionnoy modeli kak zadachi diskretnoy optimizatsii [The method of branches and bounds for solving the problem of choosing the optimal regression model as a discrete optimization problem]. *Induktivne modeluvannya skladnykh sistem*. MNNTS ITS NAN Ukrainy. Kyiv. P. 131-139. [in Ukrainian].

14. Kryzhanovskiy B. (2016). Ispol'zovaniye metoda vetvey i granits pri reshenii zadach lineynogo tselochislennogo programmirovaniya [Using the method of branches and bounds in solving problems of linear integer programming]. Materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Наука. Obrazovaniye. Molodezh'» [Science.

Education. Young]. UGPU. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2016_1/85.pdf [in Ukrainian].

15. Kravchenko, E. I. (2018). Alhoritm gilok ta mezh dlya zadachi formuvannya komandy ta poshuku investoriv dlya startap-proektiv [Algorithm of branches and boundaries for the task of forming a team and finding investors for startup projects]. *Naukoviy oglyad* [Scientific review]. NTU “KPI im. I. Sikorskogo”, no. 6 (49). P. 64-72. [in Ukrainian].