УДК 656.6:616-036
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/39

Онищенко С. П.
Одеський національний морський університет

Берестенко В. В.
Асоціація міжнародних експедиторів України

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ ТА СКЛАДУ ПЕРЕВІЗНИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Статтю призначено вирішенню завдання оптимізації схеми мультимодального перевезення та складу перевізників. Охарактеризовано, що мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора – організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення». Запропоновано прийняти за базу модель транспортної задачі у мережевій постановці з певною трансформацією обмежень та цільової функції з урахуванням особливостей мультимодального перевезення. Розроблено модель формування оптимальної схеми та складу перевізників мультимодального перевезення для локального його розгляду, тобто без врахуванням інших мультимодальних перевезень. Модель враховує альтернативність схем – проміжних портів перевалювання, видів транспорту та перевізників на кожній ділянці схеми (маршруту). Цільова функція моделі відповідає загальним витратам мультимодального оператора з урахуванням ризиків (штрафів та додаткових витрат). Обмеження враховують збереженість вантажу під часу перевезення; час перевезення з урахуванням більш ймовірного збільшення часу виконання перевезення за окремими ланками всього мультимодального перевезення. Надана модель є розвитком існуючих результатів шляхом врахування ризиків мультимодального оператора, збереженості вантажу, можливого збільшення часу та розгляду множини перевізників для автомобільного та водного транспорту, що у більш повному обсязі враховує сутність мультимодального перевезення та відповідальність мультимодального оператора. Виконано експериментальні дослідження, які обґрунтували можливість використання моделі для конкретних практичних ситуацій та достовірність отриманих результатів завдяки адекватному реагуванні результатів оптимізації на зміни вихідних даних.

Ключові слова: *контейнерні перевезення, мультимодальні перевезення, ефективність, оптимізація, перевізники, маршрут, схема перевезення, ризики, мультимодальний оператор, лінійні перевізники, моделювання транспортного процесу, система доставки, час доставки, вартість доставки.*

Постановка проблеми. Мультимодальні перевезення – це перевезення різними видами транспорту з використанням єдиного перевізного документу та єдиного організатора – мультимодального оператора. Закон України у 2021 р. надав мультимодальним перевезенням в Україні офіційного статусу. Мультимодальні перевезення мають численні переваги: вони дозволяють оптимізувати маршрути, знижувати витрати, підвищувати надійність та гнучкість логістичних операцій, сприяють ефективному використанню екологічно чистих видів транспорту та енергозберігаючих технологій, що призводить до зменшення впливу на довкілля. В якості недоліків мультимодальних перевезень можуть бути визначені: складність планування та координації, в окремих випадках високі початкові витрати, можливі юридичні та регуляторні проблеми, ризики пошкодження вантажів та високі операційні витрати [1, 2]. Мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора – організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення». Це, з одного боку, визначає додаткові ризики комерційного характеру, які пов'язані із залученням множини учасників процесу транспортування, з іншого боку, надає оператору широкі можливості інтегральної організації множини мультимодальних перевезень у межах єдиної системи, забезпечуючи синергетичний ефект [3].

Основна специфіка мультимодального перевезення, що впливає на її оптимізацію, полягає в тому, що всі ризики, що виникають у процесі її реалізації, належать мультимодальну оператору. Тому, з одного боку, мають бути виконані всі вимоги, з урахуванням області компромісу [4], вантажовласника. З іншого боку, відповідна сис-

тема транспортування має враховувати можливі ризики оператора [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Доставка вантажів є об'єктом багатьох досліджень, пов'язаними, як правило, або з оптимізацією фізичного переміщення вантажу (наприклад, [6]), або з оптимізацією складу постачальників, тобто тих компаній, які реалізовують конкретний варіант фізичного переміщення вантажу ([7–9]). Структурі і характеристикам різного виду доставок присвячені ряд сучасних публікацій, і тільки деякі з них слідують шляху інтегрального розгляду всіх аспектів доставки.

Дослідження [10–13] розглядають конкретні приклади мультимодальної доставки з точки зору фізичного переміщення вантажу і демонструють їх багатоваріантність, яка природним чином відбивається на основних характеристиках.

Цифровізація транспортної сфери призвела до зближення процесів організації транспортування та роботи з вантажовласниками з організацією роботи в інших сферах. Нова ідеологія транспортної сфери передбачає впровадження та використання як нових технологій фізичного переміщення вантажів, так й нових технологій організації транспортного обслуговування. Зокрема, у роботах [7, 8] були розглянуто питання щодо agile трансформації транспортно-експедиторських компаній, у тому числі, agile підхід до багатокритеріального вибору варіанта доставки партії вантажу та розроблена модель формування складу постачальників у роботі. В [3] надана схема циклів на базі agile, яка може сформувати ідеологічну основу для вирішення задачі організації системи доставок мультимодального оператора на базі agile.

Центральною задачею мультимодального оператора в процесах організації мультимодальних перевезень є формування схем (маршруту). Оптимізація схем і маршрутів перевезень є класичними завданнями для транспортної науки, розв'язання яких пов'язані з так званими моделями «транспортних задач» (одно- та багатоетапними), а також з моделями транспортних задач у мережній постановці. Зазначимо, що результатом оптимізації є схеми/маршрути перевезення та обсяги перевезень між пунктами.

За багаторічну історію використання даних моделей їх розвиток полягав насамперед у деталізації параметрів управління (змінних), врахуванні додаткових умов як обмежень, а також у використанні нових критеріїв оптимізації. Так, класичним критерієм для транспортних завдань є «сумарні витрати», проте, у деяких ситуаціях кращим критерієм є «час» [9]. Розвиток принципів логістики зумовив введення в подібні моделі в якості критеріїв або обмежень такі показники як «якість», «надійність», «ризик» [1–3]. Остання характеристика пов'язана з імовірнісною природою транспортних процесів [2, 14, 15], що проявляється, перш за все, у можливих відхиленнях часу доставки.

Слід зазначити існуючи результати досліджень [14, 15], які призначені для формування схем мультимодальних перевезень для залізничного транспорту. Центральним результатом даних робіт є економіко-математична модель багатоетапної та багатокритеріальної задачі, яка враховує у цільовій функції ймовірнісну природу перевезень. Даний підхід повністю відповідає специфіці мультимодальних залізничних перевезень. Проте слід зазначити відсутність аналогічних результатів для мультимодальних перевезень, які враховують специфіку наявності морської складової водночас із врахуванням організаційної специфіки для мультимодального оператора. Тому дане дослідження присвячено саме цієї проблемі.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу організації мультимодального перевезення шляхом розробки моделі з оптимізації схеми та складу перевізників мультимодального перевезення. Основні завдання дослідження: 1) розробка моделі з оптимізації схеми та складу перевізників мультимодального перевезення; 2) експериментальна перевірка розробленої моделі.

Виклад основного матеріалу. Модель задачі визначення оптимальних схеми та складу перевізників мультимодального перевезення. При розгляді окремого мультимодального перевезення пропонується використовувати модель транспортної задачі у мережевій постановці, трансформуючи обмеження та цільову функцію з урахуванням «мультимодальної» специфіки. Отже, нехай розглядається транспортна мережа, що складається з n вузлів $A_i, i=\overline{1,n}$ та відповідних транспортних «комунікацій» $A_{ij}^k, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}$, k = 1, 2, 3, які відображають наявність певних транспортних зв'язків між вузлами мережі A_i, A_j, k – відповідає виду транспорту: k = 1 – автомобільний транспорт, $k = 2$ – залізничний транспорт, k = 3 – водний транспорт (морський, річковий). Зазначимо, що в рамках даної задачі не розглядається авіаційний транспорт, з урахуванням того, що мова йде про мультимодальні перевезення з морською складовою та про перевезення вантажів у морських контейнерах, тому авіаційний вид

транспорту не використовується як альтернатива в даному випадку.

Дана транспортна мережа характеризується відповідною матрицею A^k, k = 1, 2, 3 для кожного виду транспорту, елементи даної матриці $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3$ або 0 або 1 з урахуванням наявності чи відсутності транспортного зв'язку. Кожна транспортна комунікація певного виду транспорту також характеризується альтернативністю чи її відсутністю. Якщо для k = 2 (залізничного перевезення) немає альтернативності з точки зору перевізника, з урахуванням наявності тільки одного вітчизняного перевізника – Укрзалізниці, то для інших видів транспорту альтернативність існує. Наприклад, морське перевезення між певною парою портів може здійснюватися різними лінійними перевізниками з різними відповідними характеристиками – транзитним часом, вартістю, надійністю розкладу, кількістю відправлень, інтервалом часу між відправленнями. Що стосується автомобільного транспорту – альтернативність ще вище, крім того, багато мультимодальних операторів мають власний автопарк. Тому $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = 1, 2, 3 слід доповнити з урахуванням альтернативності перевізників:

$$A_{ij}^{kl_k} = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3, l^k \in \Omega_{ij}^k, \quad (1)$$

де Ω_{ij}^k – множина перевізників виду транспорту k на комунікації A_{ij}^k, l^k – порядковий номер перевізника для певного виду транспорту на даній комунікації. Отже, якщо $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, $k = 1$, 2, 3 – це транспортні комунікації з точки зору виду транспорту, то $A_{ij}^{kl^k} = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = 1, 2, 3, $l^k \in \Omega_{ij}^k$ – це транспортні комунікації з точки зору перевізників певного виду транспорту (рис. 1).

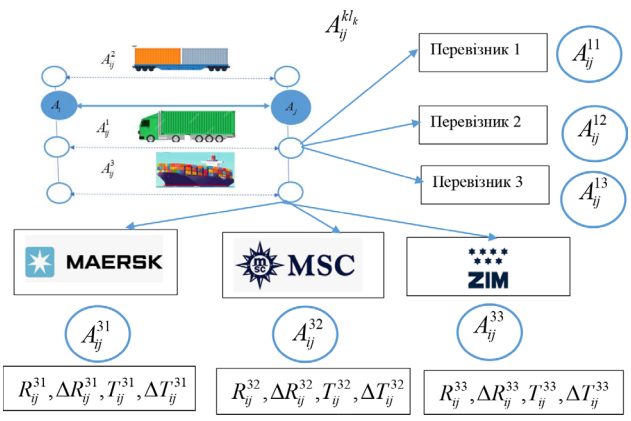


Рис. 1. Альтернативність варіантів перевезення

Кожний перевізник $l^k \in \Omega_{ij}^k, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = = 1, 2, 3 характеризується наступним набором параметрів:

$$\left\langle R_{ij}^{kl^k}, \Delta R_{ij}^{kl^k}, T_{ij}^{kl^k}, \Delta T_{ij}^{kl^k} \right\rangle l^k \in \Omega_{ij}^k, \quad i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3, \quad (2)$$

де $R_{ij}^{kl^k}, \Delta R_{ij}^{kl^k}, T_{ij}^{kl^k}, \Delta T_{ij}^{kl^k}$, відповідно, вартість, можливий ризик збільшення вартості (витрат), у тому числі, штрафні санкції за порушення умов мультимодального перевезення (часу, збереження, тощо); час перевезення, можливе збільшення часу перевезення.

Введемо позначення:

$x_{ij}^{kl^k} = \{0;1\}$ – параметр управління, сутність якого – вибір певного перевізника l^k певного виду транспорту k для здійснення перевезення по комунікації ij, вибору певного перевізника відповідає значення $x_{ij}^{kl^k} = 1$. Слід зазначити, що вибір перевізників для морської складової здійснюється не з множини усіх перевізників, які діють на даному напрямку перевезень (комунікації), а з множини $\Omega'^k_{ij} \subset \Omega_{ij}^k$ тих, чий розклад відповідає вимогам щодо часу відправлення.

Цільова функція відповідає критерію оптимальності – загальні витрати мультимодального оператора з урахуванням можливих ризиків:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} (R_{ij}^{kl^k} + \Delta R_{ij}^{kl^k}) \cdot x_{ij}^{kl^k} \to \min. \quad (3)$$

Даний вираз враховує весь шлях проходження вантажу з урахуванням усіх видів транспорту та перевізників. З урахуванням необхідності дотримання термінів перевезення, наступне обмеження враховує загальний час мультимодального перевезення:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} (T_{ij}^{kl^k} + \Delta T_{ij}^{kl^k}) \cdot x_{ij}^{kl^k} \le T^*, \quad (4)$$

де T^* – максимальний термін мультимодального перевезення, який визначено вантажовідправником. Далі розглядаються дві групи обмежень, які забезпечують формування схеми, в якій, як це необхідно, ділянки йдуть послідовно. Перша група обмежень моделі враховує необхідність «виходу» вантажу з кожного проміжного пункту – вузлів транспортної мережі:

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} x_{ij}^{kl^k} = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} x_{ji}^{kl^k}, i = \overline{2,n-1}. \quad (5)$$

Слід зазначити, що дана модель орієнтована на мережу будь-якого вигляду з точки зору транспортних зв'язків, тому вирази обмежень враховують будь-який «обхід» транспортних вузлів з першого по останній.

Друга група обмежень відображає специфіку першого та останнього пунктів, тобто вантаж обов'язково має вийти з першого пункту та війти у останній:

$$\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}} x_{1j}^{kl^k}=1, \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}} x_{jn}^{kl}=1. \qquad (7)$$

Модель може бути доповнена також врахуванням збереження вантажу I, як ще одного показника надійності:

$$\min\{I_{ij}^{kl^k}\cdot x_{ij}^{kl^k}>0\,|\,i=\overline{1,n-1},\ j=\overline{2,n},\ k=1,2,3,l^k\in\Omega'^k_{ij}\}\geq I^*, \qquad (8)$$

де $0\leq I_{ij}^{kl^k}\leq 1, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}, k=1,2,3, l^k\in\Omega'^k_{ij}$ – ймовірність збереженні вантажу при перевезенні певною компанією певного виду транспорту на конкретній комунікації.

Множина можливих значень змінних (параметрів управління)

$$x_{ij}^{kl^k}=\{0;1\}, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}, k=1,2,3, l^k\in\Omega'^k_{ij} \qquad (9)$$

завершує формування моделі.

Слід зазначити, що пропонована модель є розвитком існуючої моделі [6], розвиток якої формується шляхом врахування ризиків мультимодального оператора, збереженості вантажу, можливого збільшення часу та розгляду множини перевізників для автомобільного та водного транспорту, що у більш повному обсязі враховує сутність мультимодального перевезення, наближаючи теоретичний результат до практичної корисності.

Експериментальна перевірка моделі. Експериментальні розрахунки проведено для наступного прикладу (рис. 2). Розглядається мережа комунікацій від першого пункту (відправлення вантажу) до п'ятого пункту (призначення). Отже, і відповідності до пропонованої моделі у загальному вигляді, для даного прикладу маємо наступний вигляд моделі (перевезення здійснюється з пункту 1 до пункту 5).

Вихідні дані (умовні) щодо характеристик перевезення альтернативних перевізників за різними видами транспорту наведено у табл. 1. В якості базового варіанту обмеження за часом було прийнято 28 діб. Для базового варіанту обмеження за часом $T^*=28$ діб оптимальна схема та перевізники на рис. 3, 4, для варіанту $T^*=25$ діб на рис. 5.

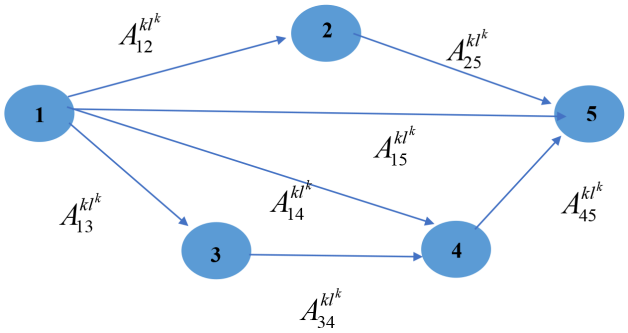


Рис. 2. Схема транспортних комунікацій для розрахункового прикладу

Зміна критерію оптимальності. Слід зазначити, що дану модель можна використовувати із зміною критерію оптимальності, а саме, як критерій розглядати «час перевезення» з урахуванням можливого збільшення, якщо цей критерій є більш переважним (наприклад, мова йде про термінове перевезення).У такому випадку критерій оптимальності (цільова функція моделі):

$$\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=2}^{5}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l\in\Omega'^k_{ij}}(T_{ij}^{kl}+\Delta T_{ij}^{kl})\cdot x_{ij}^{kl}\to\min, \qquad (10)$$

витрати на мультимодальне перевезення слід обмежувати R^*, якщо це необхідно:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}}(R_{ij}^{kl^k}+\Delta R_{ij}^{kl^k})\cdot x_{ij}^{kl^k}\geq R^*. \qquad (11)$$

Для прикладу, що розглядається, введемо обмеження для вартості перевезення $R^*=5000$ г.о./TEU та використовуємо в якості критерію оптимальності час транспортування (рис. 6).

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень пропонованої моделі встановлено, що зміна вихідних даних логічно та адекватно впливає на результат оптимізації, що обґрунтовує достовірність пропонованої моделі. Крім того, можливість зміни критерію оптимальності надає більш широкі можливості для пошуку кращих з точки зору вимог вантажовідправника варіантів.

Висновки. Запропоновано модель формування оптимальної схеми та складу перевізників мультимодального перевезення для локального його розгляду, тобто без врахуванням інших мультимодальних перевезень. Модель враховує альтернативність схем (проміжних портів перевалювання), видів транспорту та перевізників на кожній ділянці схеми (маршруту). Цільова функція моделі відповідає загальним витратам мультимодального опе-

Таблиця 1

Характеристики перевезення для альтернативних перевізників за різними видами транспорту

Комунікація	Вид транспорту	Компанії-перевізники	$R_{ij}^{kl^k}$, г.о.	$\Delta R_{ij}^{kl^k}$, г.о.	$T_{ij}^{kl^k}$, діб	$\Delta T_{ij}^{kl^k}$, діб
A_{12}	$k=1$	$l^1=1$	1000	100	5	1
		$l^1=2$	1200	100	5	1
	$k=2$	$l^2=1$	950	80	8	1
A_{13}	$k=1$	$l^1=1$	1400	100	5	1
		$l^1=2$	1500	150	5	1
	$k=2$	$l^2=1$	1200	100	8	1
A_{14}	$k=3$	$l^3=1$	5400	200	20	1
		$l^3=2$	5200	120	22	1
		$l^3=3$	5600	100	24	1
		$l^3=4$	6100	80	20	1
A_{15}	$k=3$	$l^3=1$	3500	30	18	1
		$l^3=2$	3400	50	17	1
		$l^3=3$	4000	30	16	1
		$l^3=4$	3700	50	17	1
A_{25}	$k=3$	$l^3=1$	2300	30	18	1
		$l^3=2$	2500	40	16	1
		$l^3=3$	2400	30	16	1
A_{45}	$k=3$	$l^3=1$	2400	50	17	1
		$l^3=2$	2500	180	20	1
A_{34}	$k=3$	$l^3=1$	1800	100	10	1
		$l^3=2$	2000	80	11	1
		$l^3=3$	1900	40	8	1
		$l^3=4$	1750	100	9	1

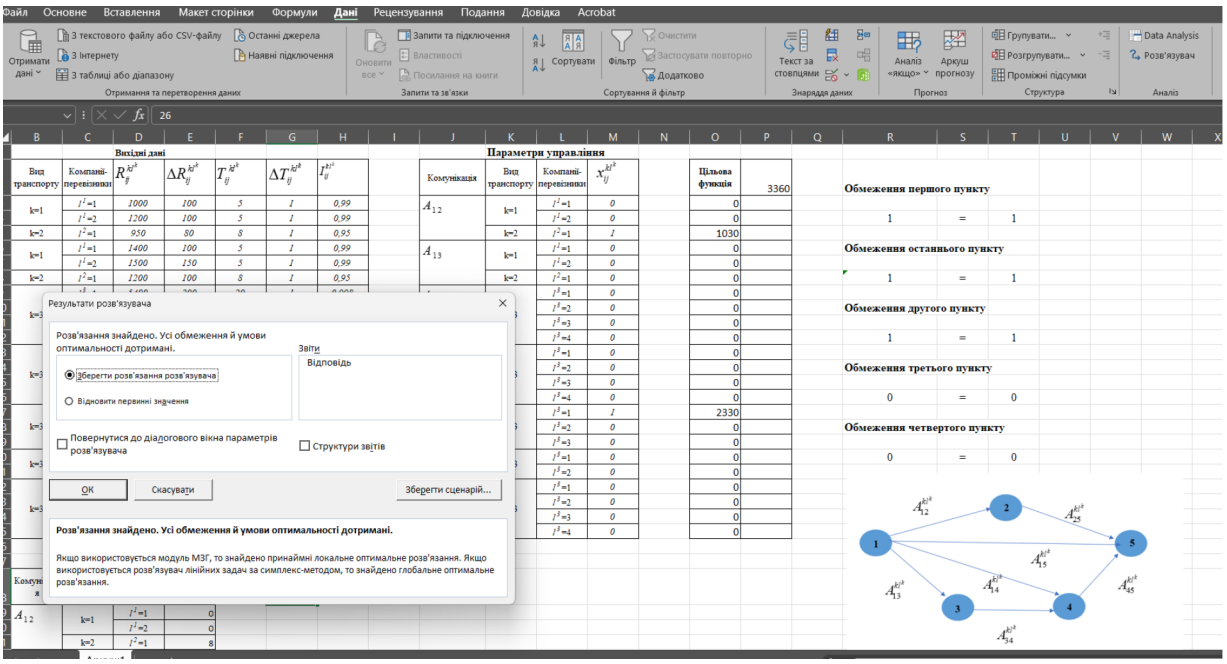
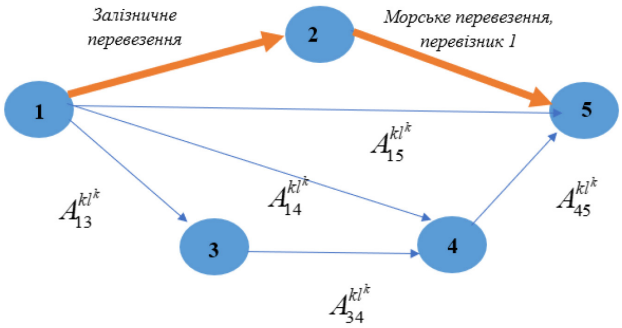


Рис. 3. Результати оптимізації для базового варіанту обмеження за часом

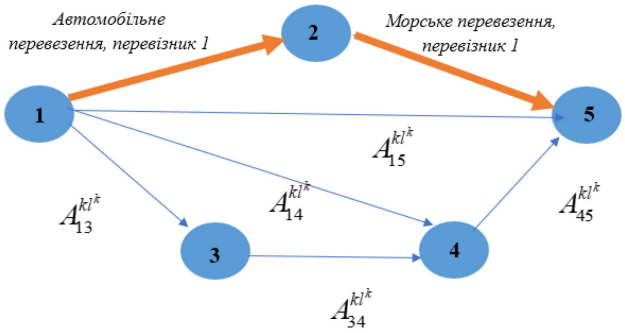
ратора з урахуванням ризиків (штрафів та додаткових витрат), обмеження враховують збереженість, час перевезення з урахуванням більш ймовірного можливого збільшення часу виконання перевезення за окремими ланками всього мультимодального перевезення. Експериментальні дослідження обґрунтували можливість використання моделі для конкретних практичних ситуацій та достовірність отриманих результатів завдяки адекватної «відповіді» результатів оптимізації зміні вихідних даних.



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 3360 г.о./TEU

Час перевезення – 26 діб

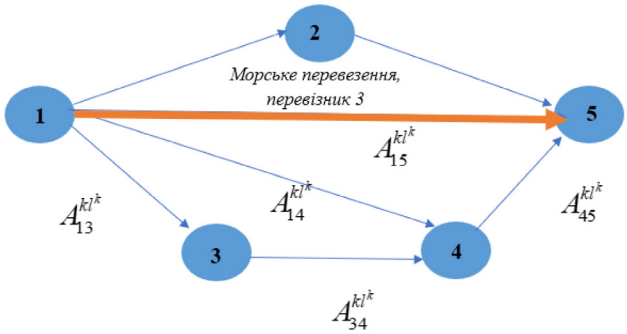
Рис. 4. Оптимальна схема та склад перевізників для базового варіанту обмеження за часом $T^* = 28$ діб



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 3430 г.о. /TEU

Час перевезення – 23 діб

Рис. 5. Оптимальна схема та склад перевізників для базового варіанту обмеження за часом $T^* = 25$ діб



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 4030 г.о. /TEU

Час перевезення – 16 діб

Рис. 6. Оптимальна схема та склад перевізників для варіанту обмеження за часом $T^* = 17$ діб при зміні критерію на час перевезення

Список літератури:

1. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. 4(11). С. 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08

2. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35(74). № 1. С. 139–146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23

3. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12). P. 118–128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10

4. Berestenko V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(3(127). С. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846

5. Машканцева С. О. Методичні аспекти оптимізації витрат в системі мультимодальних перевезень. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Економічні науки*. 2019. Вип. 206. С. 305–318.

6. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. Т. 1. (2(51)). P.24–29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373

7. Pavlova N., Onyshchenko, S. Development and Research of a Model for Optimizing the Composition of a Project–Oriented Forwarding Company'Suppliers. *Technology audit and production reserves*. 2021. 1(2). С. 57–64. DOI: 10.15587/2706–5448.2021.225521

8. Pavlova N., Onyshchenko S., Obronova A., Chebanova T., Andriievska V. Creating the Agile Model to Manage the Activities of Project Oriented Transport Companies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(3(109). P. 51–59. 109. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225529

9. Онищенко С. П., Коскіна Ю. О. Сутність, специфіка і формування систем доставки вантажів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. (3), С. 86–95. DOI: 10.31649/1997-9266-2019-144-3-86-95

10. Chen Dandan, Yong Zhang, Liangpeng Gao, Russell G. Thompson Optimizing Multimodal Transportation Routes Considering Container Use. *Sustainability. 2019*. 11, 19: 5320. DOI: 10.3390/su11195320

11. Rong Cheng, Yu Jiang, Otto, Anker Nielsen. Integrated people-and-goods transportation systems: from a literature review to a general framework for future research. *Transport Reviews*. 2023. 43:5. P. 997–1020. DOI: 10.1080/01441647.2023.2189322

12. Ruina Yang, Mingzhu Yu, Chung-Yee Lee, Yuquan D. Contracting in ocean transportation with empty container repositioning under asymmetric information. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Volume 145. Article 102173. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102173

13. Farahani A., Genga L., Dijkman. Online Multimodal Transportation Planning using Deep Reinforcement Learning. *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Melbourne, Australia, 2021. P. 1691–1698. DOI: 10.1109/SMC52423.2021.9658943

14. Ломотько Д. В., Примаченко Г. О. Формалізація технології роботи мультимодальних транспортних систем. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика.* 2023. С. 456–458. URL: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/17955/1/Ломотько.pdf (дата звернення 25.03.2025)

15. Ломотько Д. В., Примаченко, Г. О. Формалізація вантажних мультимодальних залізничних перевезень як багатоетапної та багатоцільової транспортної задачі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. (203). С. 105–116. DOI: 10.18664/1994-7852.203.2023.277920

Onyshchenko S. P., Berestenko V. V. OPTIMIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORTATION SCHEME AND CARRIERS COMPOSITION

The article is intended to solve the problem of optimizing the multimodal transportation scheme and the composition of carriers. It is characterized that multimodal transportation is a separate segment of container transportation, having certain specifics from the point of view of organization and responsibility of the multimodal operator – the organizer and provider of the «multimodal transportation» service. It is proposed to take as a basis a model of the transport problem in a network formulation with a certain transformation of the constraints and the objective function taking into account the features of multimodal transportation. A model of forming the optimal scheme and composition of carriers of multimodal transportation for its local consideration, that is, without taking into account other multimodal transportation, has been developed. The model takes into account the alternativity of schemes – intermediate ports of transfer, modes of transport and carriers on each section of the scheme (route). The objective function of the model corresponds to the total costs of the multimodal operator taking into account risks (fines and additional costs). The constraints take into account the safety of the cargo during transportation; transportation time taking into account the more likely increase in transportation time for individual links of the entire multimodal transportation. The provided model is a development of existing results by taking into account the risks of the multimodal operator, cargo safety, possible increase in time and consideration of a plurality of carriers for road and water transport, which more fully takes into account the essence of multimodal transportation and the responsibility of the multimodal operator. Experimental studies have been carried out, which substantiated the possibility of using the model for specific practical situations and the reliability of the results obtained due to the adequate response of the optimization results to changes in the initial data.

Key words: *container transportation, multimodal transportation, efficiency, optimization, carriers, route, transportation scheme, risks, multimodal operator, line carriers, transportation process modeling, delivery system, delivery time, delivery cost.*