

Ю. В. КУРУДЖИ

Одеський національний морський університет

ORCID: 0000-0002-0939-593X

В. Л. РОМАХ

Одеський національний морський університет

ORCID: 0000-0003-3958-0041

МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАВОК ПОРТОВИМ ОПЕРАТОРОМ В УМОВАХ МУЛЬТИМОДАЛЬНОСТІ

У даній роботі побудована та проаналізована статична економіко-математична модель ланцюга постачань вантажу від пунктів відправлення до пунктів споживання. Модель враховує множини та потужність перевалочних пунктів (наприклад, вантажні термінали портів операторів), в яких відбувається процес транспортної взаємодії, а також можливість використання різних транспортних засобів на ділянках сполучення між пунктами відправлення/призначення та перевалки. В якості основи для моделювання розглядається класична транспортна задача та її модифікація з однією множиною пунктів перевалки. Побудована модель описує координацію основних учасників ланцюга поставок з метою досягнення мінімальних повних витрат на доставку вантажу. Сформульовані необхідні умови допустимості описаної оптимізаційної моделі. Запропонована модель відображає певні реалії управління логістичними процесами та може бути використана в практичній діяльності підприємств, в тому числі і в діяльності стивідорних компаній. Враховані можливості адаптації побудованої моделі для конкретного ланцюга поставок з урахуванням пропускних здатностей елементів транспортної мережі, що розглядається (наприклад, завантаженості автомобільних та/або залізничних транспортних ланцюгів, ємність та конфігурація складських майданчиків вантажного терміналу), неможливості використання певного виду транспорту на кожній ділянці маршруту (наприклад, необхідність використання морського транспорту, якщо пунктами відправлення/призначення або перевантаження є термінали морських портів). Також у статті представлена чисельна ілюстрація побудованої моделі оптимізації для окремого випадку, де рішення щодо планування приймає портів оператор. Показано, що запропонований підхід може бути використаний і для інших конфігурацій моделювання та оптимізації ланцюгів поставок, наприклад, для випадку, коли весь вантаж проходить поступово через декілька множин перевалочних пунктів. Вказано на можливість подальшого узагальнення досліджуваної моделі на випадок випадкового попиту в пунктах призначення. Обґрунтовано актуалізацію подальшого інтегрування процесів та функцій, що відбуваються в ланцюгах поставок.

Ключові слова: ланцюг поставок, портів оператор, мультимодальність, багатоступеня транспортна задача, оптимізація.

Yu. V. KURUDZHY

Odesa National Maritime University

ORCID: 0000-0002-0939-593X

V. L. ROMAKH

Odesa National Maritime University

ORCID: 0000-0003-3958-0041

MODELING OF SUPPLY CHAINS BY THE PORT OPERATOR UNDER THE CONDITIONS OF MULTIMODALITY

In this work, a static economic-mathematical model of the cargo supply chain from the points of departure to the points of consumption is built and analyzed. The model takes into account the number and capacity of transshipment points (for example, cargo terminals of port operators) in which the process of transport interaction takes place, as well as the possibility of using different vehicles on the sections of the connection between the departure/destination and transshipment points. The classical transport problem and its modification with one set of transshipment points are considered as a basis for modeling. The built model describes the coordination of the main participants of the supply chain in order to achieve the minimum total costs for the delivery of goods. The necessary conditions of admissibility of the described optimization model are formulated. The proposed model reflects certain realities of managing logistics processes and can be used in the practical activities of enterprises, including the activities of stevedoring companies. The possibilities of adapting the built model for a specific supply chain are taken into account, taking into account the capacity of the elements of the transport network under consideration (for example, the loads of road and/or railway transport chains, the capacity and configuration of the storage areas of the cargo terminal), the impossibility of using a certain type of transport on each section of the route (for example, the need to use sea transport if the departure/destination or transshipment points are seaport terminals). The

article also presents a numerical illustration of the constructed optimization model for a specific case where the port operator makes the planning decision. It is shown that the proposed approach can be used for other configurations of modeling and optimization of supply chains, for example, for the case when all cargo passes gradually through several multiple transfer points. The possibility of further generalization of the studied model to the case of random demand at destinations is indicated. The actualization of further integration of processes and functions occurring in supply chains is substantiated.

Key words: supply chain, port operator, multimodality, multi-stage transport task, optimization.

Постановка проблеми

На різних етапах управління ланцюгами постачань постають питання, пов'язані з необхідністю вирішення проблем, пов'язаних з мультимодальністю складових транспортної підсистеми, яка безпосередньо забезпечує процеси доставки вантажу. Мультимодальні перевезення все більше набувають поширення в світі. При такому підході переміщення (перевезення, перевалка) вантажу відбувається, як правило, не одним, а декількома видами транспорту з організацією перевезень в змішаних сполученнях (від словосполучення multimodal: multi – багато, modal – спосіб, вид, на відміну від перевезень, які проводяться одним видом транспорту, – unimodal). В залежності від обсягів партій та/або встановлених часових термінів поставки вантажів забезпечується завдяки залучення різних транспортних засобів та їх комбінацій: морських, залізничних, автомобільних, тощо на різних етапах та складових ланцюгів постачань, що потрібно враховувати при моделюванні самого процесу. Такий підхід організації доставки вантажу відіграє важливу роль не тільки у створенні єдиної міжнародної транспортно-логістичної системи, у розвитку мережі міжнародних транспортних коридорів але й у подоланні викликів сьогодення.

Портовий оператор, як один з учасників процесу, забезпечуючи стивідорні послуги, одночасно, за певних умов, може відігравати й роль організатора всього ланцюга постачань, приймаючи рішення щодо змін, наприклад, транспортної складової, як у внутрішній системі транспортного забезпечення ланцюга постачання, так і на зовнішньому контурі. При визначеному рівні оптимізації, рішення щодо зміни мультимодальної складової на зовнішньому контурі може прийматися на рівні стратегічного планування. Отже, через значну кількість учасників процесу постачання на етапі планування значною мірою постає питання визначення, структурування та групування елементів ланцюга та їх функцій, побудова та аналіз вибудованої структури та визначення методу рішення створеної економіко-математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Рішення окремих задач, що притаманна процесу управління ланцюгами постачань, реалізується як індивідуально, на окремих підсистемах, так і комплексно. Цілі оптимізації ланцюгів постачань при моделюванні процесу є різними, а методам їх досягнення присвячено безліч робіт. Так, в роботах [1–13] висвітлюється проблеми співзвучні з проблематикою статті. Так в роботах [1–3] вирішуються проблеми координації різних видів транспорту при організації мультимодальних перевезень. Статті [4–5] присвячені моделюванню роботи терміналу та взаємодії морського та залізничного транспорту. Робота [6] надає комплексний підхід до планування руху поїздів у інтермодальному морському порту, де перевага надається максимізації прямого варіанту вантажних робіт. В [7] вирішує задача мінімізації загальних затримок і часу очікування, а в [8] – витрат і часу доставки. Проблема параметричного уявлення інфраструктури мережевих потужностей незалежно від фактору часу присвячено роботу [9]. Вже [10] включає декілька видів транспорту при багатоцільовій оптимізації з'єднань в інтермодальних перевезеннях. Спираючись на [11], де наведено ряд економіко-математичних моделей змішаних перевезень, проаналізовано класичні моделі багатоетапних задач лінійного та нелінійного програмування транспортного типу зробимо припущення, що сусідні етапи перевезень можуть відбуватися різними видами транспорту і не враховується можливість використання різних видів транспорту на одній ділянці перевезень, крім того враховується вплив термінальної складової. Як основу для побудови нових моделей ланцюгів поставок можна використовувати класичну транспортну задачу та її модифікації, наприклад, багатоетапні транспортні задачі, описані в [11–13]. Отже, проектування та експлуатація ланцюгів поставок вантажів потребує залучення методів математичного моделювання для обґрунтування оптимальних та узгоджених між собою планів поставок.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є побудова та аналіз статичної економіко-математичної моделі ланцюга поставок вантажу від пунктів відправлення до пунктів споживання, яка враховувала б множини та потужності перевалочних пунктів (наприклад, морських портів), в яких вантаж перевантажується з одного виду транспорту на інший, а також можливість використання різних транспортних засобів на одній ділянці перевезення.

Викладення основного матеріалу дослідження

В [11] зазначено, що класичні моделі задач оптимізації транспортного типу засновані на припущенні, що на кожній ділянці перевезення відбуваються за допомогою тільки одного виду транспортних засобів. Це припущення не завжди можна вважати виправданим, тому що часто при плануванні переміщення розглядається можливість використання різних видів транспортних засобів на одній ділянці перевезення (наприклад, автомобільний транспорт або залізниця).

Розглянемо спочатку класичну транспортну задачу [12] та модифікуємо її, припускаючи, що при перевезенні вантажу можливе використання L видів транспортних засобів. Припустимо, що в пунктах $A_1, \dots, A_n, \dots, A_N$ в кількостях $a_1, \dots, a_n, \dots, a_N$ знаходиться вантаж, який потрібно доставити в пункти $B_1, \dots, B_m, \dots, B_M$, і потреби у вантажі в пункті B_m становлять b_m . Введемо у розгляд параметри управління x_{nml} – кількість вантажу, яка перевозиться з пункту A_n в пункт B_m з використанням транспортного засобу виду $l, l=1, 2, \dots, L$. Для описаної задачі матимемо наступні обмеження та проілюструємо її на рис.1.

Обмеження по вивезенню вантажу з пунктів A_n :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L x_{nml} = a_n, n = 1, 2, \dots, N. \tag{1}$$

Обмеження по ввезенню вантажу в пункти B_m :

$$\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L x_{nml} = b_m, m = 1, 2, \dots, M. \tag{2}$$

Умови невід’ємності параметрів управління:

$$x_{nml} \geq 0, n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M, l = 1, 2, \dots, L. \tag{3}$$

Сумарні транспортні витрати, пов'язані з перевезенням вантажу з пунктів A_n в пункти B_m , складуть:

$$S = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{nml} x_{nml}, \tag{4}$$

де c_{nml} – вартість перевезення 1 т вантажу з пунктів A_n в пункти B_m .

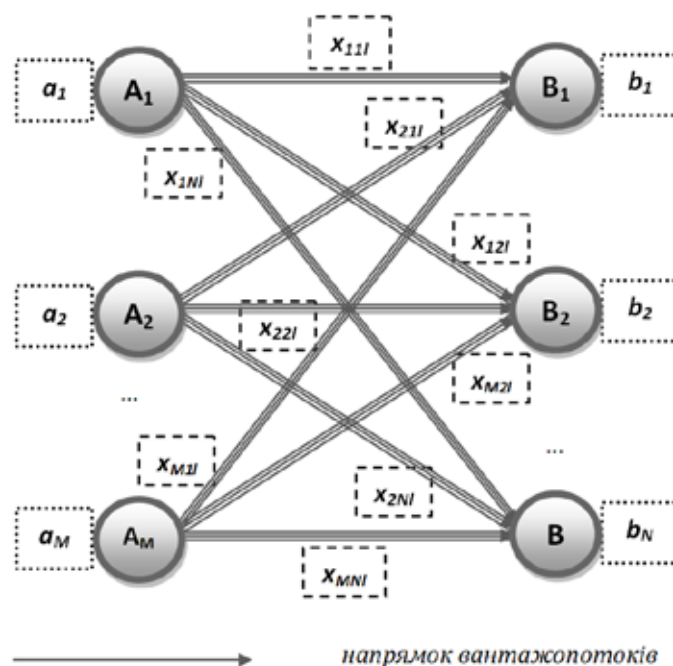


Рис. 1. Схема системи з перевезеннями різними видами транспорту

Джерело: побудовано авторами

Таким чином, припущення про можливість перевезення вантажу різними видами транспорту дозволяє отримати наступну задачу лінійного програмування транспортного типу: знайти такий план перевезень вантажу різними видами транспорту $\{x_{nml}\}$, який мінімізує функцію (4) при умовах (1)–(3). Для такої задачі залишаються справедливими і умова допустимості, характерна для класичної транспортної задачі (умова балансу):

$$\sum_{n=1}^N a_n = \sum_{m=1}^M b_m.$$

Узагальнимо описану задачу на випадок, коли весь вантаж з пунктів A_n до пунктів B_m проходить через перевалочні пункти $D_1, \dots, D_k, \dots, D_K$, причому загальна місткість складів в пункті D_k дорівнює d_k . Будемо вважати, що в пунктах перевалки відбувається взаємодія різних видів транспорту.

Вартість перевезення 1 т вантажу з пунктів вивезення в пункти перевалки позначимо через $c^{(1)}_{nkl}$, а з пунктів перевалки в пункти призначення – через $c^{(2)}_{kml}$, $n=1,2,\dots, N, k=1,2,\dots, K, m=1,2,\dots, M, L$.

Розглянемо параметри управління задачі:

x_{nkl} – кількість вантажу, яка перевозиться з пункту A_n в пункт перевалки D_k ,

y_{kml} – кількість вантажу, яка перевозиться з пункту перевалки D_k в пункт B_m .

Сумарні транспортні витрати, пов'язані з перевезенням вантажу, дорівнюватимуть:

$$S = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c^{(1)}_{nkl} x_{nkl} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L c^{(2)}_{kml} y_{kml}. \tag{5}$$

Сформулюємо обмеження для задачі.

Обмеження по вивезенню вантажу з пунктів A_n (весь вантаж повинний бути вивезений):

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{nkl} = a_n, n = 1, 2, \dots, N. \tag{6}$$

Обмеження по ввезенню вантажу в кінцеві пункти B_m :

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L y_{kml} = b_m, m = 1, 2, \dots, M. \tag{7}$$

Умова нерозривності потоків вантажів, які є вхідними та вихідними з пунктів D_k :

$$\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L x_{nkl} = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L y_{kml}, k = 1, 2, \dots, K. \tag{8}$$

Обмеження на місткість складів в пунктах перевалки:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L x_{nkl} \leq d_k, k = 1, 2, \dots, K. \tag{9}$$

Умови невід'ємності параметрів управління:

$$x_{nkl} \geq 0, y_{kml} \geq 0, n = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M, l = 1, 2, \dots, L. \tag{10}$$

Описаний вище випадок наведемо на рис. 2.

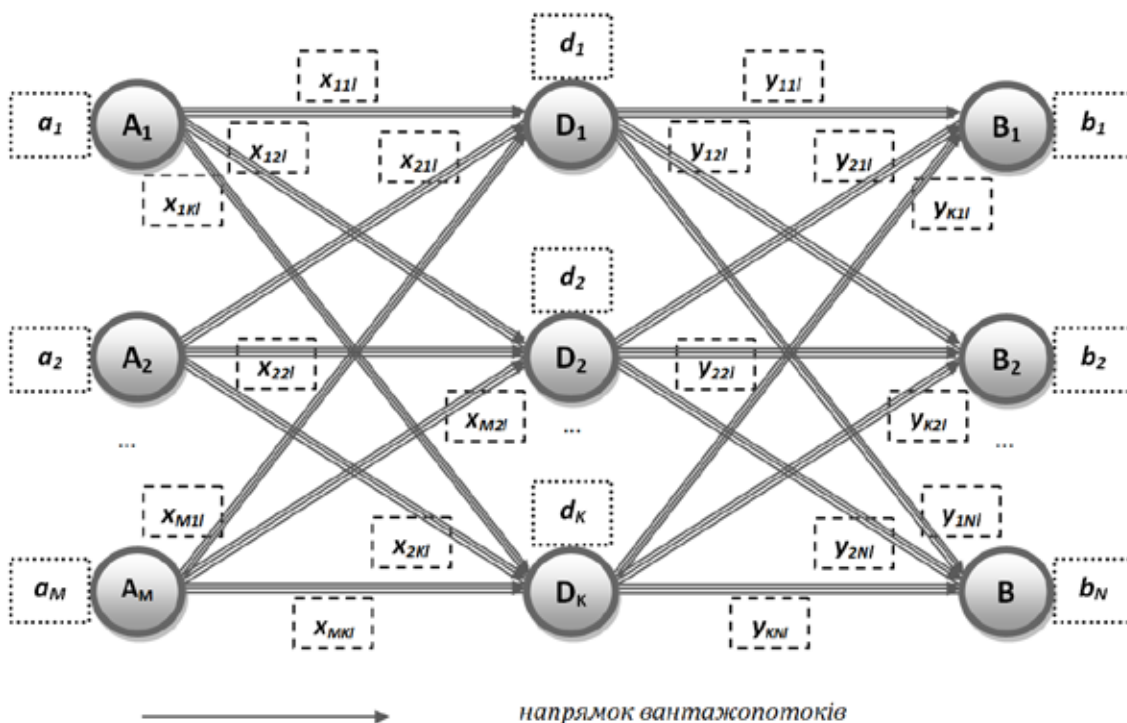


Рис. 2. Схема мультимодальної системи з перевалкою вантажу та використанням різних видів транспорту

Джерело: побудовано авторами

Таким чином, ми отримали наступну задачу лінійного програмування транспортного типу: знайти такий план перевезень вантажу різними видами транспорту $\{x_{nkl}, y_{kml}\}$, який мінімізує функцію (5) при умовах (6)–(10).

Сформулюємо умови допустимості задачі. Зазначимо, що сумування обмежень (6)–(8) призводить до наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{nkl} &= \sum_{n=1}^N a_n, \\ \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L y_{kml} &= \sum_{m=1}^M b_m, \\ \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{nkl} &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L y_{kml}. \end{aligned} \tag{11}$$

Звідси випливає наступна характерна для класичної транспортної задачі умова балансу:

$$\sum_{n=1}^N a_n = \sum_{m=1}^M b_m.$$

Сумування обмежень (9) дає наступні нерівності:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{nkl} \leq \sum_{k=1}^K d_k. \tag{12}$$

Порівняння відношень (11) з нерівностями (12) показує, що для допустимості задачі (5)–(10) необхідно виконання умови:

$$\sum_{n=1}^N a_n \leq \sum_{k=1}^K d_k.$$

В правій частині нерівності знаходиться сумарна пропускна здатність перевалочних пунктів, а в лівій частині, відповідно, сумарні запаси вантажів в пунктах A_n .

При цьому для адаптації моделі для конкретного ланцюга поставок можна використовувати додаткові обмеження. Наприклад, якщо на ділянці $A_n \rightarrow D_k$ ($D_k \rightarrow B_m$) використання певного транспорту виду l не представляється можливим (наприклад, коли пунктами відправлення/призначення є морські порти), то до моделі потрібно додати обмеження-рівність $x_{nkl} = 0$ ($y_{kml} = 0$). Також можливо додавати обмеження, які стосуються пропускної здатності на кожній ділянці:

$$x_{nkl} \geq e_{nkl}^{(1)} \quad (y_{kml} \geq e_{kml}^{(2)}),$$

де $e_{nkl}^{(1)}$ ($e_{kml}^{(2)}$) – максимально можливі обсяги перевезення на певній ділянці $A_n \rightarrow D_k$ ($D_k \rightarrow B_m$).

Проілюструємо можливість використання побудованої моделі та проведемо розрахунки для конкретного випадку. Припустимо, що є три пункти відправлення вантажу ($N = 3$), два перевалочні пункти – інтермодальні термінали морських портів ($D = 2$) та два пункти призначення ($M = 2$), які також є терміналами морських портів.

В якості можливих видів транспорту розглянемо автомобільний транспорт ($l = 1$), залізницю ($l = 2$) та морський транспорт ($l = 3$). На ділянках $D \rightarrow B$ (на другому етапі) будемо розглядати перевезення тільки морським транспортом. Це означає, що $y_{kml} = y_{km2} = 0$, $k = 1, 2$, $m = 1, 2$.

Крім того, припустимо, що використання залізниці на ділянці $A_1 \rightarrow D_2$ неможливо ($x_{122} = 0$). На ділянці $A_2 \rightarrow D_1$, навпаки, недоступне перевезення автомобільним транспортом ($x_{211} = 0$). Також перевезення автомобільним транспортом на ділянці $A_3 \rightarrow D_3$ обмежене величиною $e_{331}^{(1)} : x_{331} \leq e_{331}^{(1)}$.

В такому випадку матимемо 14 параметрів управління: $x_{111}, x_{112}, x_{121}, x_{212}, x_{221}, x_{222}, x_{311}, x_{312}, x_{321}, x_{322}, y_{113}, y_{123}, y_{213}, y_{223}$. Тоді економіко-математична модель поставленої задачі матиме вигляд:

Цільова функція – сумарні витрати, пов'язані з перевезенням вантажу:

$$\begin{aligned} S &= c_{111}^{(1)}x_{111} + c_{112}^{(1)}x_{112} + c_{121}^{(1)}x_{121} + c_{212}^{(1)}x_{212} + c_{221}^{(1)}x_{221} + \\ &+ c_{222}^{(1)}x_{222} + c_{311}^{(1)}x_{311} + c_{312}^{(1)}x_{312} + c_{321}^{(1)}x_{321} + c_{322}^{(1)}x_{322} + \\ &c_{113}^{(2)}y_{113} + c_{123}^{(2)}y_{123} + c_{213}^{(2)}y_{213} + c_{223}^{(2)}y_{223} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Весь вантаж з пунктів A_1, A_2, A_3 потрібно вивезти залізницею або автомобільним транспортом в перевалочні пункти D_1, D_2 :

$$\begin{aligned} x_{111} + x_{112} + x_{211} &= a_1, \\ x_{212} + x_{221} + x_{222} &= a_2, \\ x_{311} + x_{312} + x_{321} + x_{322} &= a_3. \end{aligned}$$

Перевезення морським транспортом з пунктів перевалки D_1, D_2 до пунктів призначення B_1, B_2 повинні бути організовані так, щоб задовольнити попит на вантаж:

$$y_{113} + y_{213} = b_1,$$

$$y_{123} + y_{223} = b_2.$$

Умова балансу в перевалочних пунктах:

$$x_{111} + x_{112} + x_{212} + x_{311} + x_{312} = y_{113} + y_{123},$$

$$x_{121} + x_{221} + x_{222} + x_{321} + x_{322} = y_{213} + y_{223}.$$

Пропускні здатності пунктів перевалки не повинні бути перевищені:

$$x_{111} + x_{112} + x_{212} + x_{311} + x_{312} \leq d_1,$$

$$x_{121} + x_{221} + x_{222} + x_{321} + x_{322} \leq d_2.$$

Додаткова умова, яка стосується того факту, що обсяг перевезення автомобільним транспортом на ділянці $A_3 \rightarrow D_1$ обмежений величиною $e^{(1)}_{311}$

$$x_{311} \leq e^{(1)}_{311}.$$

Умови невід'ємності параметрів управління:

$$x_{111}, x_{112}, x_{121}, x_{212}, x_{221}, x_{222}, x_{311}, x_{312}, x_{321}, x_{322}, y_{113}, y_{123}, y_{213}, y_{223} \geq 0.$$

Схема розглянутого ланцюга поставок наведена на рис. 3.

Необхідні для розрахунків дані наведені в табл. 1.

В сучасних умовах вихідні дані [14–17] для рішення задачі є нестабільними та мають тенденцію до зростання. Для розрахунків взяті усереднені значення вартісних показників на момент формування інформаційної бази даної статті. Проводити чисельні розрахунки на запропонованій модулі зручно з використанням за запропонованою моделлю можна за допомогою програми Excel, опція «Пошук рішення».

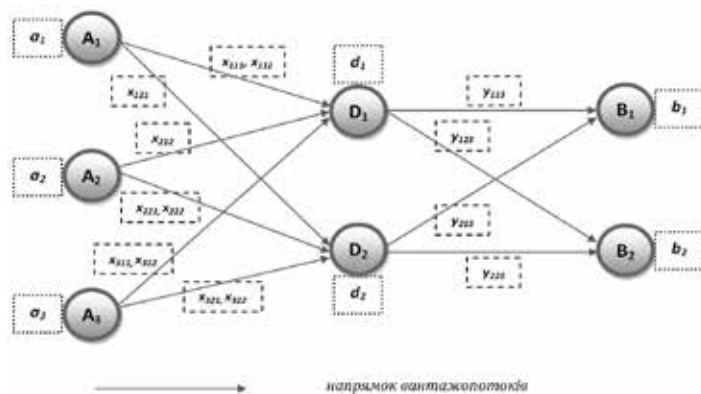


Рис. 3. Схема ланцюга поставок для прикладу

Джерело: побудовано авторами

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунків

Умове позначення	Значення параметру	Умове позначення	Значення параметру	Умове позначення	Значення параметру
a_1	130	$c^{(1)}_{111}$	1000	$c^{(1)}_{312}$	650
a_2	150	$c^{(1)}_{112}$	600	$c^{(1)}_{321}$	800
a_3	120	$c^{(1)}_{121}$	850	$c^{(1)}_{322}$	600
d_1	180	$c^{(1)}_{212}$	500	$c^{(2)}_{113}$	2500
d_2	230	$c^{(1)}_{221}$	800	$c^{(2)}_{123}$	4000
b_1	210	$c^{(1)}_{222}$	500	$c^{(2)}_{213}$	3000
b_2	190	$c^{(1)}_{311}$	850	$c^{(2)}_{223}$	4200
$e^{(1)}_{311}$	100	-	-	-	-

Джерело: побудовано авторами

В результат отримане рішення поставленої задачі дозволяє спланувати ланцюги поставки вантажів наступним чином. Відвантаження об'ємів вантажопотоків відбуватиметься на всіх трьох пунктах відправлення A_1, A_2, A_3 . З пункту A_1 потрібно вивезти запаси в повному об'ємі у 130 тис. т, використовуючи тільки автомобільний вид транспорту, в пункт перевантаження D_1 . З пункту A_2 вантажопотік повністю вивозиться до вантажних портових терміналів D_1 та D_2 залізницею у співвідношенні 1:3 відповідно. Тобто третина запасу у 50 тис. т доставляється до D_1 , а дві третини, у обсязі 100 тис. с., відповідно до п. D_2 . Залізничний транспорт також застосовується при вивезення всього об'єму вантажу у 120 тис.т з пункту відправлення A_3 , але, як і у випадку A_2 доставляється в тільки до проміжного пункту D_2 . Завантаження пунктів перевалки відповідає умові використання їх потужностей.

Задоволення потреб пунктів призначення відбувається за допомогою використання транспортних засобів морського виду транспорту. Сумарні сформовані запаси у пункти D_1 у повному об'ємі розміром у 180 тис. т вивозяться до пункту призначення B_1 , Потреби B_2 задовольняють обидва пункти перевантаження D_1 та D_2 у співвідношенні 30 тис. т на 190 тис. т відповідно.

При такому плановому розподіленні вантажопотоків за видами транспорту загальні витрати складуть майже 1,6 млн. долл США на забезпечення всіх етапів та складових ланцюга доставки. При цьому потужності пункту перевантаження D_1 буде повністю вичерпане. Щодо пункту перевантаження D_2 то невикористаним залишаться незначний показник потужності терміналу – 10 тис. т.

Отримані результати рішення згруповано в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків

Умове позначення	Значення параметру	Умове позначення	Значення параметру	Умове позначення	Значення параметру
$x_{111}^{(1)}$	-	$x_{222}^{(1)}$	100	$y_{113}^{(2)}$	180
$x_{112}^{(1)}$	130	$x_{311}^{(1)}$	-	$y_{123}^{(2)}$	-
$x_{121}^{(1)}$	-	$x_{312}^{(1)}$	-	$y_{213}^{(2)}$	30
$x_{212}^{(1)}$	50	$x_{321}^{(1)}$	-	$y_{223}^{(2)}$	190
$x_{221}^{(1)}$	-	$x_{322}^{(1)}$	120	-	-

Джерело: побудовано авторами за розрахунками

Для ілюстрації отриманого рішення на рисунку 4 наведено представлені обсяги перевезень між елементами та види транспорту, що було визначено.

Світлим кольором позначено ті ланки, використання яких погіршує значення цільової функції задачі при заданих обмеженнях.

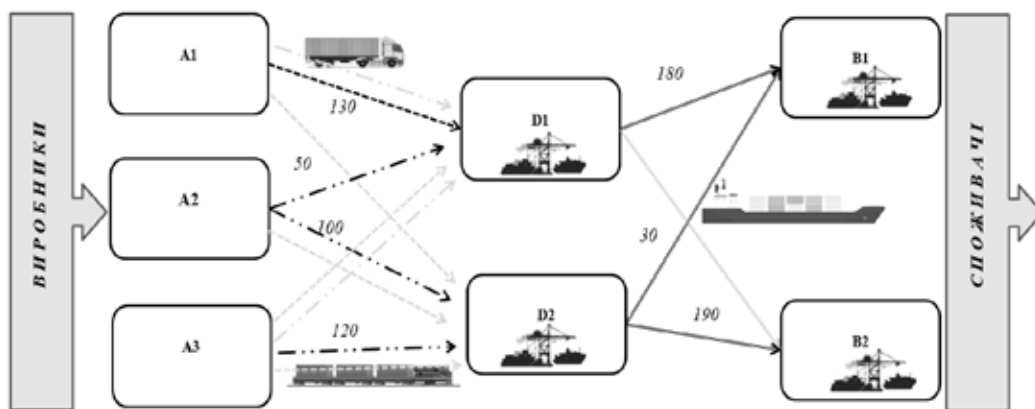


Рис. 4. Схема ланцюга поставок з визначенням видів транспорту та обсягом вантажопотоку

Висновки

В роботі на основі класичної транспортної задачі та її модифікації з однією множиною пунктів перевалки побудована статична економіко-математична модель ланцюга поставок вантажу від пунктів відправлення до

пунктів споживання. Попередньо визначено, структуроване та згруповано основні елементи, що беруть участь у реалізації плану поставки. В залежності до визначених функцій, значень та цілей вирішено задачу на мінімізацію витрат з встановленими обмеженнями.

Модель враховує можливість використання різних транспортних засобів на обраних ділянках доставки, обмеження продуктивності однієї з ділянок та обмеження в потужностях портового терміналу – пункту перевантаження. Проведені розрахунки для конкретного випадку показали обґрунтування вибору виду транспорту (автомобільний та/або залізничний) для доставки вантажу до перевалочних пунктів, якими в даному випадку виступають інтермодальні термінали морських портів, пріоритетність вибору самого терміналу та завантаженість ділянок морського транспорту до пунктів призначення. При цьому портовий оператор, одночасно є як організатором, так і учасником процесу та може приймати рішення на різних етапах від планування до виробництва. В результаті в даному ланцюгу, вважаючи на поставлені умови, не приймають участь три автомобільні, дві залізничні та одна морська ланка ланцюга. Досягається екстремум та економиться потужність одного з пунктів перевантаження. При цьому зміна конфігурації ланцюга поставки: функцій, цілей, учасників, технології, улаштування тощо може призвести її до зміни рішення.

Дана модель може бути адаптована для різних конфігурацій ланцюгів поставок У подальших дослідженнях за цією тематикою можливо розглядати інші конфігурації ланцюгів поставок, наприклад, коли весь вантаж проходить поступово через декілька множин перевалочних пунктів. Можливе подальше узагальнення досліджуваної моделі на випадок, коли попит на вантаж в пунктах призначення є випадковою величиною з відомими законами розподілу, тощо. Тож тема подальшого інтегрування процесів та функцій ланцюга поставок набуває актуальності та потребує додаткових досліджень, розвитку та інтеграції існуючих технік та методик.

Список використаної літератури

1. SteadieSeifi M. et al. Multimodal freight transportation planning: A literature review //European journal of operational research. – 2014. – Т. 233. – №. 1. – С. 1-15. doi: 10.1016/j.ejor.2013.06.055
2. Ursavas E., Zhu S. X. Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature //European Journal of Operational Research. – 2016. – Т. 255. – №. 2. – С. 380-387. doi: 10.1016/j.ejor.2016.04.029
3. Li G., Hu D., Su L. The model of location for single allocation multimodal hub under capacity constraints // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Т. 96. – С. 351-359. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.042
4. Postan M. Y., Kurudzhi Y. V. Modeling the influence of transport units movements irregularity on storage level of cargo at warehouse //Acta Systemica. – 2012. – Т. 12. – №. 1. – С. 31-36. ISSN 1813-4769
5. Крук Ю. Ю., Постан М. Я. Разработка и анализ динамической модели оптимизации взаимодействия транспортных потоков на портовом терминале //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1. – №. 3 (79). – С. 19-23. doi: 10.15587/1729-4061.2016.61154
6. Yan B. et al. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals // Computers & Industrial Engineering. – 2020. – Т. 141. – С. 106296. doi.org/10.1016/j.cie.2020.106296
7. Jaehn F., Rieder J., Wiehl A. Minimizing delays in a shunting yard //OR Spectrum. – 2015. – Т. 37. – №. 2. – С. 407-429. doi.org/10.1007/s00291-015-0391-1
8. Valentyna Romakh, Victoria Vasylieva. The impotence of port management in ensuring the sustainable development of the transport system. //Science and Education for Sustainable Development: Monograph / edited Aleksander Ostenda, Valentyna Smachylo. - Katowice: Publishing House of University of Technology, 2022. P. 157-168. ISBN 987-83-963977-2-0, DOI:10.54264/M005
9. Ромах В. Л. Формирований ефективного множества альтернатив в решении задач кластерной оптимизации //Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2019. – №. 3. – С. 151-155. ICV 2017: 48.35, ISSN 1998-7927
10. Zhang Q., Yang H., Zhang L. Multi-objective Model on Connection Time Optimization in Sea-rail Intermodal Transport //GSTF Journal of Engineering Technology (JET). – 2014. – Т. 3. – №. 1. P. 12–118. DOI: 10.5176/2251-3701_3.1.118
11. Постан, М. Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок /М. Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.
12. Кузько Н. С. Моделювання логістичного ланцюга поставок //Вісник Національного університету" Львівська політехніка. – 2005. – №. 526-С. – С. 94-98.
13. Куруджи Ю.В. Оптимизация планов закупки и доставки товара в логистической сети при случайном спросе // Глобальні та національні проблеми економіки: електронне наукове фахове видання. – 2017. – № 18. – С. 603-607.
14. Incoterms rules – URL: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-2020/>. (дата звернення 20 листопада 2022).
15. Tariff Calculator. – URL: <https://www.zim.com/tools/tariff-calculator>. (дата звернення 20 листопада 2022).

16. Міжнародний залізничний транзитний тариф (МТТ). – URL: https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/mignarodni_taryfy/mtt/. (дата звернення 20 листопада 2022).

17. Український експорт – як отримати вихід до моря. Онлайн-конференція. Railexpo. Newport. URL: <https://railexpoua.com/konferentsiia/>. (дата звернення 23 листопада 2022).

References

1. SteadieSeifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European journal of operational research*, 2014, no. 233(1), pp. 1-15. doi: 10.1016/j.ejor.2013.06.055.
2. Ursavas, E., & Zhu, S. X. Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature. *European Journal of Operational Research*, 2016, no. 255(2), pp. 380-387. doi: 10.1016/j.ejor.2016.04.029.
3. Li, G., Hu, D., & Su, L. The model of location for single allocation multimodal hub under capacity constraints. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, no. 96, pp. 351-359. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.042.
4. Postan, M. Y., & Kurudzhi, Y. V. Modeling the influence of transport units movements irregularity on storage level of cargo at warehouse. *Acta Systemica*, 2012, no. 12(1), pp. 31-36. ISSN 1813-4769.
5. Kruk, Yu. Yu., & Postan, M. Ya. Development and analysis of a dynamic model for optimizing the interaction of traffic flows at the port terminal. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2016, no. 1(3(79)), pp. 19-23. doi: 10.15587/1729-4061.2016.61154.
6. Yan, B., Zhu, X., Lee, D. H., Jin, J. G., & Wang, L. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. no. 141, pp. 106-296. doi.org/10.1016/j.cie.2020.106296.
7. Jaehn, F., Rieder, J., & Wiehl, A. Minimizing delays in a shunting yard. *OR Spectrum*. 2015. no. 37(2), pp. 407-429. doi.org/10.1007/s00291-015-0391-1.
8. Romakh V, Vasyliieva V. The impotence of port management in ensuring the sustainable development of the transport system. [Science and Education for Sustainable Development]. Katowice: Publishing House of University of Technology, 2022. pp. 157-168. ISBN 987-83-963977-2-0, doi:10.54264/M005.
9. Romakh V. L. Formation of an effective set of alternatives in solving problems of cluster optimization. Bulletin of Volodymyr Dahl Khidnoukrainian National University. 2019. no. 3, pp. 151-155. ICV 2017: 48.35, ISSN 1998-7927.
10. Zhang, Q., Yang, H., & Zhang, L. Multi-objective Model on Connection Time Optimization in Sea-rail Intermodal Transport. *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*. 2014, no. 3(1). doi: 10.5176/2251-3701_3.1.118.
11. Postan, M. Ya. Ekonomiko-matematicheskiye modeli smeshannykh perevozok [Economic and mathematical models of mixed transportation]. Odessa: Astroprint, 2006. 376 p.
12. Kuzko N. Y. Modeling of the logistic supply chain. *Bulletin of the National University Lviv Polytechnic*. 2005. no. 526-C, pp. 94-98.
13. Kuruji, Y. V. Optimization of plans for the purchase and delivery of goods in the logistics network with random demand. Global and national problems of the economy. 2017. no. 18, pp. 603-607.
14. Incoterms rules – URL: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-2020/>. (accessed 20 November 2022).
15. Tariff Calculator. – URL: <https://www.zim.com/tools/tariff-calculator>. (accessed 20 November 2022).
16. International Railroad Transit Tariff (МТТ). – URL: https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/mignarodni_taryfy/mtt/ (accessed 20 November 2022).
17. Ukrainian export - how to take a trip to the sea. Online conference. Railexpo. Newport. – URL: <https://railexpoua.com/konferentsiia/>. (accessed 23 November 2022).