

Voichenko T.O., Trofymenko I.V., Shevchenko A.P., Riashchenko O.I.

ANALYSIS OF RESEARCH DIRECTIONS ON VEHICLE ROUTING IN THE OPERATION OF CONTAINER TERMINALS OF SEAPORTS

The aim of the article is to analyze the directions of research on vehicle routing in the operation of container terminals of seaports. This goal is achieved by analyzing the sources of information on the general tasks of vehicle routing and the problems associated with them, as well as the processes related to routing and planning at container terminals. It is established that the set of processes related to routing and planning at container terminals includes the process of planning (allocation) of the berth, the process of planning (allocation) of the berth crane and the process of stacking planning (placement of vehicles under cranes and transportation of cranes). It is proved that various problems related to operations at container terminals can arise as vehicle routing problems. In this regard, the article reviews a significant amount of theoretical and practical research on the importance of optimizing logistics operations at container terminals of seaports. It is determined that due to the specific characteristics of container terminals, standard theoretical models often require adjustments in practice. It is also noted that investment and operating costs for ships and port equipment are very high, and competition between container terminals is growing, forcing operators to reduce unproductive downtime in the port. The most significant result is a critical analysis of the disadvantages and advantages of possible approaches to vehicle routing in the operation of container terminals in seaports. A further direction of work is to conduct research on the use of intelligent vehicle routing and scheduling mechanisms that will allow for the economical use of expensive equipment and space. The analysis of existing research areas has shown that the competitiveness of the terminal also includes issues of coastal operations and internal logistics, as well as land operations, transport links and routing in general.

Key words: seaport, ship, container terminal, routing, crane, berth, vehicle

УДК 656.025.4:519.87:519.17

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.11

Войченко Т.О., Трофименко І.В., Шевченко А.П., Федунів В.М.

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ЛАНЦЮЖКА ПРИ ЗМІШАНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Метою статті є постановка та розв'язання задачі оптимізації доставки вантажу із застосуванням різних видів транспорту. Поставлена мета досягається шляхом аналізу джерел інформації щодо можливих підходів до теоретичного обґрунтування окремих питань міжнародних змішаних перевезень, а також реалізації технічних аспектів організації руху товарів від виробника до споживача з урахуванням певних критеріальних ознак. У результаті проведеного аналізу встановлені організатори техніко-економічного обґрунтування доставки вантажів. Але при плануванні та організації перевезень вантажовідправник та оператор мультимодальних перевезень, як організатори, не можуть повністю використовувати традиційні методи оптимізації схем доставки вантажів. Причиною цього є неможливість застосовувати географічну ротацію маршрутів перевезень або здійснювати заміну або зміну видів транспорту чи використовуваних способів перевезення і т. д. З метою подолання вказаних труднощів запропонована зміна парадигми розв'язання задач оптимізації. Розглянуті обмеження, які накладаються на вантажовідправника й оператора змішаних перевезень та які необхідно враховувати при оптимізації схеми організації транспортування вантажу. За неможливості

змінити вже визначену схеми доставки вантажу організатор може оптимізувати її якісний стан, для чого розглянуті дві різні схеми доставки – визначення максимального або мінімального значення шуканого показника або використання багатокритеріального підходу. Розглянуто приклад розрахунку часу поставки вантажу у порівнянні з показником вартості доставки. Найбільш суттєвим результатом є розробка методу розв'язання задачі оптимізації системи організації змішаної доставки вантажу, заснованого на застосуванні елементів теорії графів і теорії гарантованої оцінки. Подальшим напрямом роботи є проведення досліджень щодо обґрунтування питомої ваги показників, що визначають якість послуг, для підвищення рівня “довіри” до варіантів рішення. Для виключення помилок рекомендується отримати широкий статистичний матеріал або мати достатньо велику групу кваліфікованих експертів, які можуть стати джерелом інформації для проведення розрахунків.

Ключові слова: вантажовідправник, оператор змішаного перевезення, транспортний ланцюг, оптимізація, показник.

Постановка проблеми. Україна створила необхідне законодавче поле для ведення широкомасштабної ефективної торгівлі на базі існуючих міжнародних документів [1-5].

При виконанні міжнародних торговельних операцій важлива роль належить транспортним послугам, за допомогою яких забезпечується рух товару від виробника до кінцевого споживача. Очевидно, що ефективність такого руху досягається шляхом оптимізації маршруту доставки товару. Для цього необхідно визначити критерії, які потрібно врахувати при транспортних перевезеннях, і умови доставки товарів, які надає перевізник.

Від якості організації транспортного ланцюжка від виробника продукції до кінцевого споживача залежить конкурентоспроможність учасників цього процесу. Головним завданням у процесі організації міжнародних змішаних перевезень є рух продукції від виробників до споживачів із найменшими витратами. Досягнення зазначених критеріїв забезпечується лише шляхом побудови оптимального механізму реалізації змішаних перевезень з урахуванням динаміки розвитку ринків транспортних послуг та їх стрімкої реакції на зміни в організації міжнародної торгівлі.

Розвиток міжнародних транспортних сполучень вимагають участі декількох видів транспорту у виконанні перевезень. У теперішній час більше 80% зовнішньоторговельних операцій виконуються змішаними перевезеннями. Такий спосіб перевезень забезпечує узгоджене функціонування різних видів транспорту та є найбільш вигідним з економічної точки зору. Отже, поглиблення міжнародної торгівлі зумовлюють необхідність теоретичних обґрунтувань методів оптимізації транспортного ланцюжка при змішаних перевезеннях. Тому дане дослідження є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток міжнародної торгівлі викликав до життя висвітлення у науковій літературі питань, присвячених теоретичному обґрунтуванню окремих елементів, пов'язаних з терміном «міжнародні змішані перевезення», а також реалізації технічних аспектів організації руху товарів від виробника до споживача з урахуванням певних критеріальних ознак.

Значний науковий внесок до питань організації змішаних перевезень зробили закордонні вчені Д. Бенсон, Д. Буерсокс, Д. Дрю, У. Уотерс, К. Хаксевер [5-12] та ін. Вони досліджували ефективність функціонування транспортного комплексу у процесі змішаних перевезень та особливості транспортування певних видів продукції.

Важливу роль у розвиток теоретичних та прикладних основ розвитку змішаних перевезень внесли вітчизняні науковці: О. Бойко, М. Данько, О. Карпенко, Т. Конрад, С. Ширяєва та ін. [13-17].

У роботі [12] проаналізовано поняття «міжнародні змішані перевезення» та визначено головні критерії прийняття рішення щодо доцільності вибору виду транспорту для перевезення вантажів на окремих етапах транспортного ланцюжка. Обґрунтовано, якість здійснення міжнародних змішаних перевезень суттєво підвищується при використанні декількох видів транспорту для оптимізації процесу доставки вантажу від виробника до кінцевого споживача. Для

цього рекомендовано використовувати багатокритеріальний аналіз для схеми типу «вартість-швидкість-надійність» та отримано результати для водного, залізничного, автомобільного та авіаційного транспорту. Але оптимізаційні задачі для формування оптимальних різнотипних ланцюжків не вирішені.

Але значна кількість теоретичних та практичних робіт у цьому напрямку ще залишає місце для розробників практичних рекомендацій щодо технічного забезпечення міжнародних змішаних перевезень та методів оптимізації руху товарів із пункту призначення до пункту доставки різними видами транспортних засобів.

Мета статті. Поставити та розв'язати задачу оптимізації доставки вантажу із застосуванням різних видів транспорту.

Виклад основного матеріалу. Високий рівень конкурентоспроможності товару у регіоні його доставки досягається, серед іншого, вдосконаленням схем організації транспортування вантажів. З цією метою розробляються теоретичні основи різноманітних схем транспортно-експедиторських послуг та на цій базі надаються практичні рекомендації замовникам.

Але досягнення поставленої мети ставить перед розробниками та організаторами техніко-економічних схем певні труднощі:

1. Вантажовідправник при організації техніко-економічного обґрунтування доставки вантажу власними силами обмежений рядом обставин. Головним обмеженням є недостатність інформації про компанії, що є власниками контейнерів. Як наслідок, для перевезення вантажу вантажовідправник змушений використовувати контейнери залізниці або вітчизняного морського перевізника. При цьому власники контейнерів висувають умови, які вантажовідправники мають бездоганно виконувати. При цьому, зазвичай, виникають нові обставини, що ускладнюють дану ситуацію. Так, доставивши вантаж до місця призначення, вантажовідправник не має повної свободи дій, поки не поверне порожній контейнер його власнику в Україну або на термінал вітчизняного судновласника у певному порту світу

2. Оператор мультимодальних (змішаних) перевезень (ОМП) (ОЗП) є професійним організатором доставки вантажу, має, як правило, значні можливості у виборі підрядників і співвиконавців, у визначенні та розробці варіантів і способів доставки вантажу і т. д. Але і він також може бути обмежений у своїх діях. Наприклад, при жорстко «заданому» маршруті перевезення, при виборі видів транспорту, коли їх зміна неможлива через відсутність альтернатив.

Отже, організаторами техніко-економічного обґрунтування доставки вантажів виступають «вантажовідправник» та «оператор мультимодальних перевезень». Але при плануванні та організації перевезень вони не можуть в повній мірі використовувати традиційні методи оптимізації схем доставки вантажів. Насамперед, це пов'язано з неможливістю застосовувати географічну ротацію маршрутів перевезень або здійснювати заміну або зміну видів транспорту чи використовуваних способів перевезення і т. д. Тут потрібна зміна парадигми розв'язання задач оптимізації.

Зрозуміло, що кожна схема доставки певного вантажу має свою специфіку. Але всі ці особливості схем доставки за великим рахунком зберігають за організаторами можливість того чи іншого вибору. Цей вибір для організатора перевезень у можливості вибрати за підрядника одного з декількох експедиторів порту або морського / морського оператора з ряду судноплавних компаній, що займаються перевезеннями по даній лінії і т. д. Вибираючи одного з числа декількох передбачуваних виконавців, організатор перевезення має розв'язати задачу оптимізації у класичному вигляді. При цьому він спирається на власний досвід (більш притаманний для «організатора»-вантажовідправника) або на досвід і відому (транспортно-експедиторську) практику організації доставки вантажів, яка більш прийнятна по відношенню до ОЗП. В обох випадках вантажовідправник і ОЗП, оптимізуючи схему організації транспортування, діють у рамках строго визначених умов і параметрів процесу доставки вантажу і керуються певними критеріями – перевагами (преференціями). За неможливості змінити основний «зміст» транспортно-технологічного аспекту вже визначеної схеми доставки вантажу, організатор може оптимізувати її якісний стан.

У цьому зв'язку розглянемо дві різні схеми доставки.

1. Самим простим завданням для визначення максимального або мінімального значення заданого (шуканого) показника є оптимізація процесу, яка ґрунтується на перевагах одного показника, виключаючи з «набору» критеріїв інші, що оцінюють якість послуг, що надаються. Так, перевага може віддаватися швидкості доставки, без урахування неминучого збільшення транспортних витрат. Навпаки, якщо термін доставки не грає важливої ролі, то це також позначиться на рівні транспортних витрат.

2. Більш складне завдання полягає, якщо організатор перевезення або його замовник віддає перевагу кільком показникам (критеріям) оцінки якості послуги, наприклад, вартості і часу доставки, і «наділяє» їх різною «питомою вагою» в «подвійному (багатокритеріальному) наборі» показників. Постановка подібних оптимізаційних задач у реальній практиці вимагає однозначно визначити пріоритетність і «питому вагу» тих чи інших показників (критеріїв) у багатокритеріальному «наборі».

На початковому етапі розв'язання такої задачі оптимізації необхідно побудувати алгоритми, що відображають суть і зміст «вантажовідправного» («консигнаційного») й «операторського» варіантів організації техніко-економічного обґрунтування доставки вантажу. Метою побудови є визначення тих ділянок – «ланок» транспортного ланцюга, де організатор може вибрати конкретного з декількох експедитора, судновласника, контейнеровласника і т. д.

Пояснення до алгоритму:

1. Підготовчий цикл (ПЦ) – підготовка відправником документації, необхідної для перевезення вантажу залізничним (автомобільним) транспортом і для перевалки в порту;

2. До інформаційних блоків (ІБ) відносяться операції щодо взаємного обміну інформацією між учасниками доставки товарів, інструкції щодо заповнення і відправки документації та аналогічні операції:

- а) на початковому етапі транспортування (наземна ділянка) – ІБ-1;
- б) у порту відправлення вантажу – ІБ-2;
- в) на морських фідерних перевезеннях і перевалці в проміжному порту – ІБ-3;
- г) на завершальному етапі перевізного процесу – ІБ-4.

«Операторська» версія В-2 базується на алгоритмі, що відображає процес транспортно-експедиторської підтримки доставки вантажів, організований ОЗП.

Пояснення до алгоритму:

1. На етапі «Тендер» здійснюється вибір вантажовідправника ОЗП;

2. Операційні блоки (ОБ):

- а) операції ОЗП з порожніми контейнерами – ОБ1;
- б) операції з навантаження контейнерів на залізничні платформи – ОБ2;
- в) реєстрація та відправка контейнерів залізничним транспортом – ОБ3;
- г) операції з передачі контейнерів залізничним транспортом та їх прийому портом відправлення – ОБ4;

д) операції з відправки контейнерів на судні з першого порту – ОБ5;

е) операції з вантажем в порту перевалки і відправки контейнерів в порт призначення – ОБ6;

3. Інформаційні блоки (ІБ):

а) інформація та інструкції щодо порту відправлення – ІБ1;

б) відомості та інструкції про порт перевалки та про завершення процесу перевезення – ІБ2.

Отже, розглянемо задачу оптимізації системи організації змішаної доставки вантажу, що заснована на математичних методах, побудованих із застосуванням елементів теорії графів і теорії гарантованої оцінки.

Замовники ОЗП для оцінки їх послуг користуються такими основними показниками: надійність, вартість, кваліфікація персоналу, інформаційне забезпечення, час, гнучкість. Саме пріоритетність показників впливає на вибір організатором перевезень тієї або іншої форми організації доставки вантажу.

1. Відмітимо на маршруті руху всі точки, в яких обов'язково змінюється один або декілька показників якості обслуговування (рис. 1).

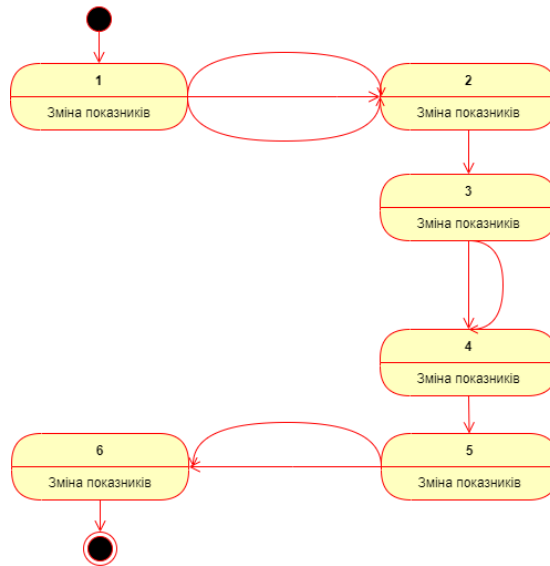


Рисунок 1 – Вихідний граф маршруту перевезення

2. Тимчасово виключимо з розгляду ті точки (а відповідно, і сегменти), де відсутні альтернативні способи переміщення вантажу з однієї точки в іншу. Здійснимо нову нумерацію вершин. Результатом є редукований граф, що відображає маршрут перевезення вантажу. У кожній точці графа, де обов'язково змінюється один або декілька показників якості обслуговування, можна вибрати варіант переміщення вантажу в іншу точку (рис. 2).

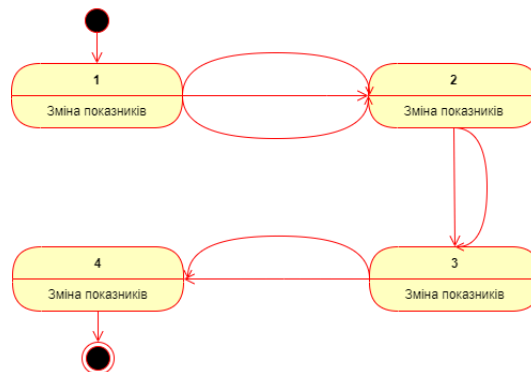


Рисунок 2 – Редукований граф маршруту перевезення вантажу

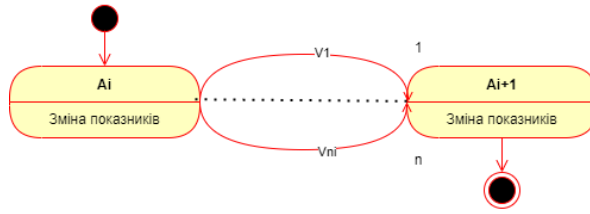
Для побудови оптимальної схеми доставки вантажу з обраними (обраними) показниками оцінки якості послуги необхідно послідовно вирішити два завдання:

1. Обрати найкращу (оптимальну) ланку, що з'єднує дві фіксовані точки шляху.
2. Обрати оптимальний ланцюг ланок (тобто оптимальний шлях), що з'єднує початкову і кінцеву точки маршруту.

З наведеної постановки очевидно, що кількість розв'язань першої задачі дорівнює кількості пар точок, з'єднаних ланками, в яких при переході з однієї точки в іншу змінюється значення хоча б одного показника оцінки якості обслуговування.

Далі необхідно спочатку повернути тимчасово виключені точки шляху на маршрут, тобто фактично повернутися до рис. 1, і один раз розв'язати задачу, маючи повний комплект початкових даних для другої задачі.

Постановка задачі. Нехай є k показників оцінки якості послуги. Розглянемо точки A_i і A_{i+1} ($i = \overline{1, m}$), що утворюють ланку m . Для кожної з ланок існує n_i варіантів переміщення вантажу з A_i в A_{i+1} (рис. 3).

Рисунок 3 – Варіанти переміщення вантажу з точки A_i у точку A_{i+1} ланкою m

Кожний варіант перевезень вантажу з однієї точки в іншу можна розрахувати, знаючи питомі «ваги» показників d_k оцінки якості обслуговування, які утворюють вектор питомих «ваг» показників $d_k = (d_1, d_2, \dots, d_k)^T$.

Тоді витрати $v_j, j = \overline{1, n_i}$, на кожній ланці за будь-яким варіантом n дорівнюють

$$v_j = d_1 x_{j1} + d_2 x_{j2} + \dots + d_k x_{jk} = \sum_{l=1}^k d_l x_{jl}, \quad (1)$$

де x_{jl} – рядки інформаційної матриці $X = \{x_{jl}\}_{j=1, n_i}^{l=1, k}$ однієї ланки, що містять відносні значення показників якості для кожного варіанту, тобто сума елементів будь-якого стовпця дорівнює "1".

У матричній формі вираз (1) може бути записано як

$$\bar{v}^{(i)} = X^{(i)} \bar{d}, i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad X^{(i)} = X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n_i1} & x_{n_i2} & \dots & x_{n_ik} \end{pmatrix}, i = \overline{1, m} \quad (3)$$

– власна інформаційна матриця, вказана апіорі для всіх ланок ланцюга. Також задається вектор d , але, виходячи з умов задачі, для d має сенс встановити єдині значення для всіх ланок.

Складові виразу (2) $\bar{v}^{(i)} = (v_1, v_2, \dots, v_{n_i})^T$ є модифікацією k -вимірному простору показників якості в одновимірний простір. Значення кожного компонента є сумою певної «ваги» кожного показника оцінки якості. Залежно від мети дослідження виконується подальший вибір екстремуму.

Якщо метою дослідження є визначення найбільш витратного варіанту переміщення вантажу з однієї точки в іншу з усіх можливих маршрутів, то

$$v^{*(i)} = \max_{j=1, n_i} \{v_1, v_2, \dots, v_{n_i}\}, i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Якщо необхідно визначити самий дешевий варіант перевезення вантажу для заданого набору значень вектора d , то використовують вираз:

$$v^{**(i)} = \min_{j=1, n_i} \{v_1, v_2, \dots, v_{n_i}\}, i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Розв'язок виразів (4) і (5) m разів завершує розв'язання першої частини задачі.

Перед розв'язанням другої частини задачі побудови оптимальної схеми доставки вантажу відновимо ті ділянки на графі m_1 , що не мали альтернативи та були виключені для першої частини задачі ($m + m_1 = M$ – загальна кількість ділянок на маршруті руху).

Далі, аналогічно формулі (1), розраховується значення $v^{(i)}$ для ділянок m_1 :

$$v^{(i)} = d_1 x_1^{(i)} + d_2 x_2^{(i)} + \dots + d_k x_k^{(i)} = \sum_{l=1}^k d_l x_l^{(i)}, i = \overline{m+1, M}. \quad (6)$$

Друга частина розв'язання загальної задачі полягає у такому.

При об'єднанні виразів (4) і (6) або (5) і (6) отримуємо

$$\bar{V}^* = \{v^{*(1)}, v^{*(2)}, \dots, v^{*(m)}, v^{(m+1)}, \dots, v^{(M)}\} \quad (7)$$

або

$$\bar{V}^{**} = \{v^{**(1)}, v^{**(2)}, \dots, v^{**(m)}, v^{(m+1)}, \dots, v^{(M)}\}. \quad (8)$$

Об'єднуючи множини (7) або (8) з множиною точок $\{A_0, A_1, \dots, A_n\}$, отримуємо орієнтований зв'язаний граф.

Постановка і розв'язання задачі побудови оптимальної схеми доставки вантажу збігається з постановкою і розв'язанням задачі знаходження найкоротшого шляху між двома вершинами графа, а аналогом довжини дуги є значення елемента множини V^* або V^{**} [2].

Якщо при розв'язання задачі використовується набір (7), то маємо класичну мінімаксну задачу, рішення якої дозволяє гарантувати оптимальний рівень витрат за найкоротшим «шляхом». При використанні набору (8) отримаємо найбільш оптимістичним з усіх можливих варіантів спосіб доставки вантажу з пункту A_0 в точку A_n .

Початкові дані. Необхідно змоделювати оптимальний маршрут перевезення вантажу зі складу в Україні, використовуючи певні фіксовані населені пункти та визначені види транспорту. Комплектуючі для авіакосмічної промисловості, що виробляються в Києві, Дніпрі та Харкові, концентруються на складі у Дніпрі. Звідки їх необхідно направити до порту Миколаїв або порту Південний, далі порт Барселона (Іспанія) – порт Ріо-де-Жанейро (Бразилія). Замовник послуг встановлює оператору мультимодальних перевезень (ОЗП) показники, які він вважає пріоритетними для оцінки якості послуги з доставки вантажу. Такими показниками він визначив час і вартість перевезення, тобто $k = 2$. Крім того, замовник встановив більш високий пріоритет показника часу перевезення перед вартістю, визначивши питому вагу кожного показника $d_1 = 2, d_2 = 1$.

Побудуємо схему доставки вантажу (рис. 4), ввівши такі умовні позначення:

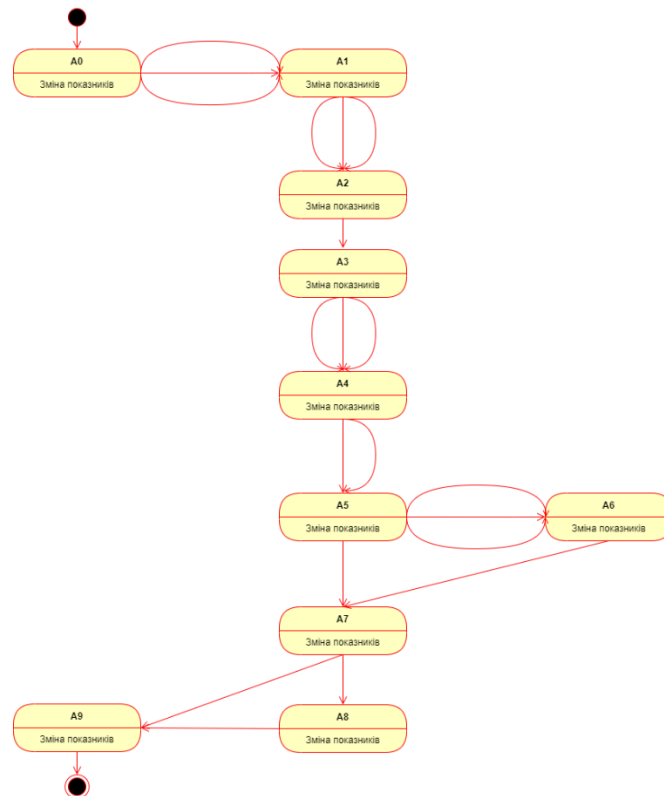


Рисунок 4 – Можливі варіанти доставки вантажу

A_0 – склад відправника у Дніпрі. Дуги означають варіант вибору порожніх контейнерів відповідно до їх форм власності;

ділянка $A_1 - A_2$ – транспортування навантажених контейнерів зі складу відправника на залізничний вокзал Дніпра може здійснюватися автомобільним або залізничним транспортом; причому можна вибрати місцевого експедитора для доставки вантажу на станцію;

ділянка $A_2 - A_3$ – може виконуватися залізничним транспортом або автомобільним транспортом за двома варіантами: В1 (консигнаційний) – Дніпро – порт Миколаїв; В2 (операторський) – Дніпро – порт Південний);

ділянка $A_3 - A_4$ – є можливість вибрати конкретного експедитора з числа декількох портових експедиторів;

ділянка $A_4 - A_5$ – є можливість вибрати серед фідерних морських перевізників, які доставляють вантаж з порту відправлення в порт перевалки Барселона;

ділянка $A_5 - A_6$ – ОЗП може вибрати експедитора у порту Барселона;

ділянка $A_6 - A_7$ – ОЗП може вибрати контейнер іноземної форми власності, при перевалці вантажу з вітчизняного контейнера в іноземний, що не вимагає повернення порожнього контейнера з пункту призначення вантажу в порт Барселона;

ділянка $A_6 - A_7$ – ОЗП може вибрати перевізника з числа операторів океанської лінії, для доставки вантажу в порт призначення Ріо-де-Жанейро;

ділянки $A_7 - A_8 - A_9$ – вантажовідправник зобов'язаний доставити вантаж до Ріо-де-Жанейро і повернути порожній контейнер українського володіння (право власності залізничного перевізника або іншого оператора) на термінал в порту Барселона.

Схема 4 фактично являє собою суму (комбінацію) двох варіантів доставки вантажу з Дніпра до Ріо-де-Жанейро.

При організації доставки відправник обмежений у виборі експедиторів та перевізників. Так, він може зробити вибір лише з числа місцевих посередників-експедиторів (ділянка $A_0 - A_1$) або з числа портових експедиторів і морських (фідерних) перевізників / ліній (ділянка $A_3 - A_4$).

ОЗП також обмежений у виборі виду наземного транспорту (ділянка $A_2 - A_3$). Крім того, у вантажовідправника немає можливості щодо вибору експедитора, який організовує доставку вантажів безпосередньо через територію країни призначення. Інші ділянки маршруту надають вантажовідправнику можливість вибирати вид транспорту, експедиторів або перевізників.

Рис. 5 і 6 ілюструють маршрути доставки товару за консигнаційним (B1) і операторським (B2) варіантами відповідно.

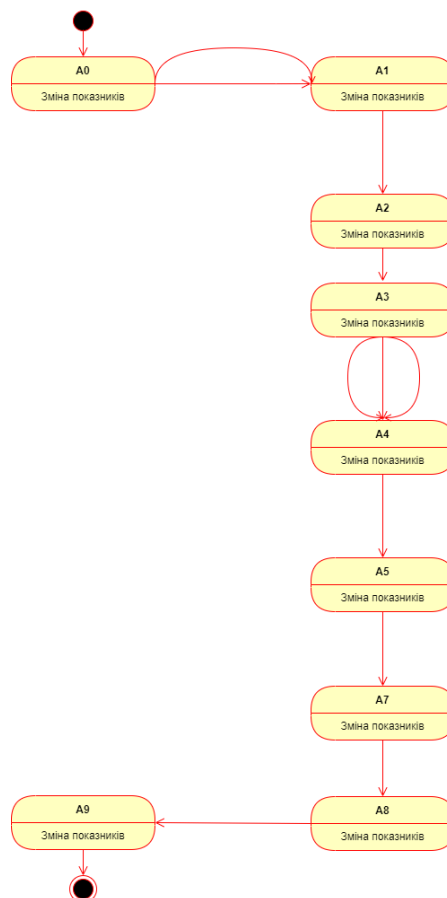


Рисунок 5 – Консигнаційний варіант B1 доставки вантажу

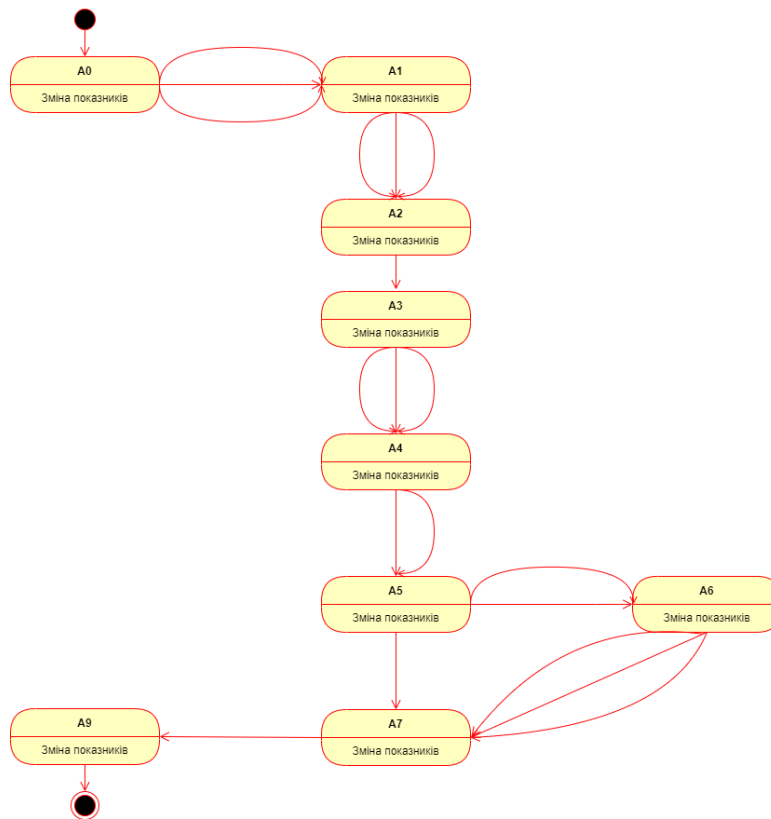


Рисунок 6 – Операторський варіант В2 доставки вантажу

Розв'язання першої складової задачі оптимізації у наведеній постановці можна шукати як для загального випадку (рис. 4), так і для будь-якого з часткових (рис. 5 і 6). А ось для другої частини загальної задачі необхідно розв'язати окрему підзадачу, наведену на рис. 4, або розв'язати підзадачі, наведені на рис. 5 і 6.

Для варіанту доставки, представленого схемою на рис. 5, виключаємо ділянки, де відсутні альтернативи. Тоді рисунок 5 трансформується до вигляду, наведеного на рис. 7.

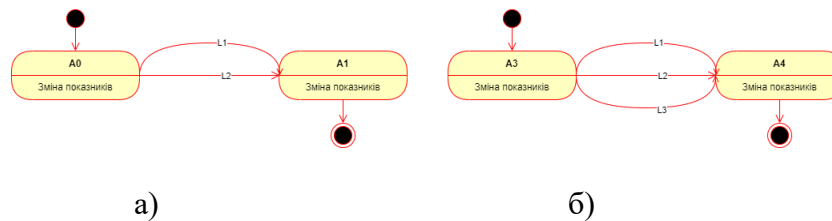


Рисунок 7 – Ділянки консигнаційного варіанту доставки вантажу, що не мають вибору

Тоді $m = 2$, $m_1 = 6$, $M = m + m_1 = 2 + 6 = 8$, $i = 1, 2$; n_i : n_1 і n_2 ; $n_1 = 2$ (дві дуги), $n_2 = 3$ (три дуги).

Встановимо значення $X_{2 \times 2}^{(1)}$ і $X_{3 \times 2}^{(2)}$:

$$X^{(1)} = \begin{pmatrix} a_{1t} & a_{1b} \\ a_{2t} & a_{2b} \end{pmatrix}; \quad X^{(2)} = \begin{pmatrix} b_{1t} & b_{1b} \\ b_{2t} & b_{2b} \\ b_{3t} & b_{3b} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

У матриці $X^{(1)}$ перший рядок означає, що доставка товару може бути здійснена за a_{1t} днів при витратах у розмірі a_{1b} , на другому рядку – за a_{2t} днів, витративши a_{2b} .

Визначимо відносні значення матриць:

$$X^{(1)} = \begin{pmatrix} \frac{a_{1t}}{a_{1t} + a_{2t}} & \frac{a_{1b}}{a_{1b} + a_{2b}} \\ \frac{a_{2t}}{a_{1t} + a_{2t}} & \frac{a_{2b}}{a_{1b} + a_{2b}} \end{pmatrix};$$

$$X^{(2)} = \begin{pmatrix} \frac{b_{1t}}{b_{1t} + b_{2t} + b_{3t}} & \frac{b_{1b}}{b_{1b} + b_{2b} + b_{3b}} \\ \frac{b_{2t}}{b_{1t} + b_{2t} + b_{3t}} & \frac{b_{2b}}{b_{1b} + b_{2b} + b_{3b}} \\ \frac{b_{3t}}{b_{1t} + b_{2t} + b_{3t}} & \frac{b_{3b}}{b_{1b} + b_{2b} + b_{3b}} \end{pmatrix}.$$

(10)

Легко переконатися, що сума елементів стовпця дорівнює «1» і компоненти матриці стали безрозмірними величинами.

Для $i = 1$ визначимо елементи $\bar{v}^{(1)}$ за формулою (1):

$$v_1 = \frac{a_{1t}}{a_{1t} + a_{2t}} \cdot 2 + \frac{a_{1b}}{a_{1b} + a_{2b}} \cdot 1;$$

$$v_2 = \frac{a_{2t}}{a_{1t} + a_{2t}} \cdot 2 + \frac{a_{2b}}{a_{1b} + a_{2b}} \cdot 1.$$

Далі визначаємо $v^{*(1)}$ і $v^{**(1)}$ за виразами (4) і (5) відповідно. Припустимо, що для $v^{*(1)}$ вибрана дуга l_2 (рис. 7 а), а для $v^{**(1)}$ – дуга l_1 (рис. 7 а).

Аналогічно для $i = 2$ визначимо елементи $\bar{v}^{(2)}$ за формулою (1). Після визначення $v^{*(2)}$ і $v^{**(2)}$ припустимо, що для $v^{*(2)}$ вибрана дуга l_3 (рис. 7 б), а для $v^{**(2)}$ – дуга l_2 (рис. 7 б).

Отже, найбільш витратний у запропонованій комбінації «час-вартість» («вага» 2:1) маршрут доставки вантажу за варіантом В1 (рис. 5) прийме форму, наведену на рис. 8 (суцільна лінія). Оптимістичний маршрут зображений пунктирною лінією.

Для розв'язання другої частини задачі необхідно поступити аналогічно, виконавши ті ж самі дії, що й виконувалися у першій частині задачі, але використовуючи схему, зображену на рис 6.

При цьому $m_1 = 6$. Тому необхідно розглянути ланцюжок з 6 інформаційних матриць $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(6)}$. Процедура розрахунку ні чим не відрізняється.

Далі знаходяться елементи $\bar{v}^{(i)}$ для різних i від 1 до 6, що завершується визначенням визначаємо $v^{*(i)}$ і $v^{**(i)}$.

Припустимо, що для $i = 1$ на ділянці $A_0 - A_1$ для $v^{*(1)}$ вибрана дуга l_2 , а для $v^{**(1)}$ – дуга l_3 .

Аналогічно, для $i = 2$ на ділянці $A_1 - A_2$ для $v^{*(2)}$ вибрана дуга l_3 , а для $v^{**(2)}$ – дуга l_2 .

Для $i = 3$ на ділянці $A_3 - A_4$ для $v^{*(3)}$ вибрана дуга l_3 , а для $v^{**(3)}$ – дуга l_2 .

Припустимо, що для $i = 4$ на ділянці $A_4 - A_5$ для $v^{*(4)} = v^{**(4)}$. У цьому випадку вибір дуги l_1 або дуги l_2 є довільним.

Для $i = 5$ на ділянці $A_5 - A_6$ для $v^{*(5)}$ маршрут проходить по дузі l_2 , а для $v^{**(5)}$ – по дузі l_1 .

Для $i = 6$ на ділянці $A_6 - A_7$ для $v^{*(6)}$ вибрана дуга l_3 , а для $v^{**(6)}$ – дуга l_1 .

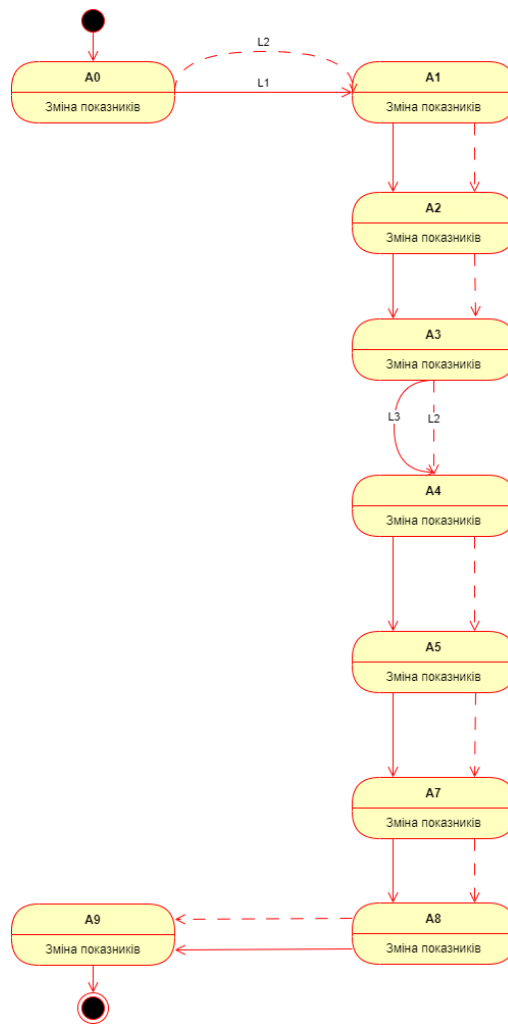


Рисунок 8 – Найбільш затратний (—) й оптимістичний (---) маршрути доставки вантажу за варіантом В1

Таким чином, найбільш витратний маршрут від A_0 до A_9 з операторським варіантом організації доставки вантажів наведений суцільною лінією на рис. 9, а самий оптимістичний операторський маршрут – пунктирною лінією.

При відсутності альтернативу вибору питома вага дуги v дорівнює $\sum_{i=1}^k d_i$.

Вага ланцюга (схеми доставки) являє собою суму ваг всіх ланок її складових, отриманих шляхом суміщення схем, зображених на рис. 8 і 9, відповідно для самого затратного і самого оптимістичного варіантів доставки за різними варіантами.

Загальна вартість тут складе $V = \sum_{i=1}^m v^{*(i)} + \sum_{i=m+1}^m v^{(i)}$.

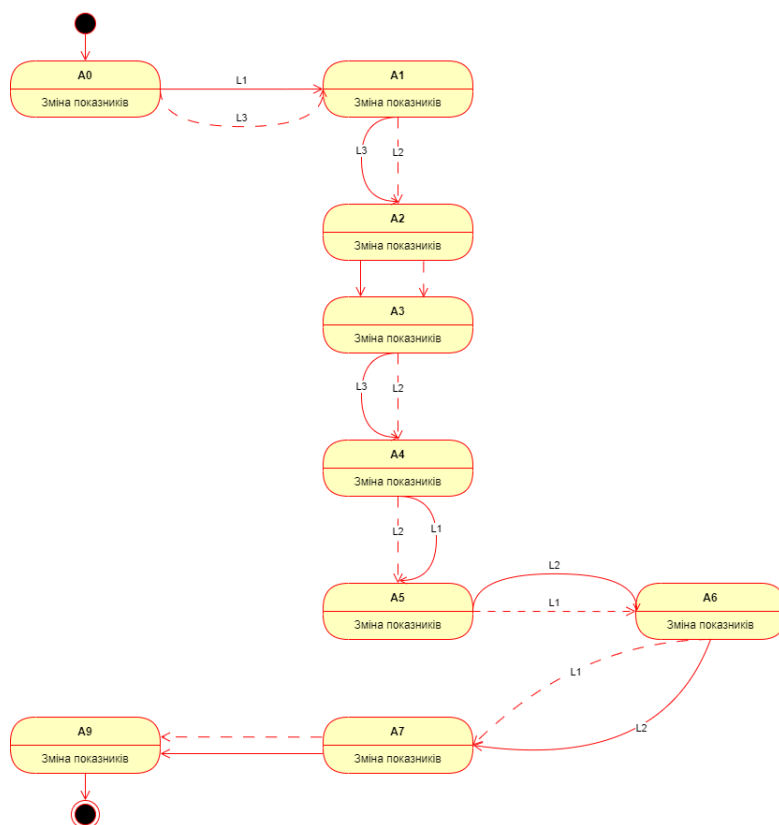


Рисунок 9 – Найбільш затратний (—) й оптимістичний (- - -) маршрути доставки вантажу за операторським варіантом

Таким чином можна обчислити різницю між найгіршим та сприятливим варіантами.

Висновки. Наведено загальну методику розрахунку найкращого варіанту доставки вантажів при застосуванні мультимодальних перевезень. За приклад обрано показники час поставки вантажу у порівнянні з показником вартість доставки. Підстановка конкретних чисел та визначення пріоритетів дозволяє отримати точні цифри виграшу (програшу). Але використання запропонованої методики підкреслює, що найскладнішим у процесів розрахунків є обґрунтування питомої ваги показників, що визначають якість послуг. Для виключення помилок, які безумовно матимуть місце при неправильно визначених вагах показників, необхідно мати широкий статистичний матеріал або достатньо велику групу кваліфікованих експертів, які можуть стати джерелом об'єктивної або довірчої інформації для проведення розрахунків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Конвенція Організації Об'єднаних Націй про міжнародні змішані перевезення вантажів : Конвенція Орг. Об'єдн. Націй від 24.05.1980 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_189#Text (дата звернення: 07.10.2024).
2. Конвенція про транзитну торгівлю внутрішньоконтинентальних держав : Конвенція Орг. Об'єдн. Націй від 08.06.1965 р. : станом на 8 лип. 1965 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_166#Text (дата звернення: 07.10.2024).
3. Про режим спільного транзиту та запровадження національної електронної транзитної системи : Закон України від 12.09.2019 р. № 78-IX : станом на 1 жовт. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/78-20#Text> (дата звернення: 07.10.2024).
4. Про транзит вантажів : Закон України від 20.10.1999 р. № 1172-XIV : станом на 1 січ. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1172-14#Text> (дата звернення: 11.10.2024).

5. Benson D., Whitehead J. Transport and delivery of goods: Transport. 1990. 279 p.
6. Bowersox D.J., Class D.J. Logistics. Integrated supply chain. Olimp-2001.
7. Modern Logistics, 7th edition / D. Johnson et al. Publishing house «Williams», 2002.
8. Schmidt M., Thoroe L., Schumann M. RFID and Barcode in Manufacturing Logistics: Interface Concept for Concurrent Operation. *Information Systems Management*. 2013. No. 30(2). P. 100–115. URL: [dx.doi.org/10.1080/10580530.2013.773801](https://doi.org/10.1080/10580530.2013.773801) (дата звернення: 07.10.2024)
9. Michael R.L., Harold E. F. Supply management and inventory management. *Logistics. Victoria Plus*. 2002.
10. Stock R., Lambert M. Strategic Logistics Management McGraw-Hill. Irwin, 2001.
11. Long Q., Zhang W. An integrated framework for agent based inventory–production–transportation modeling and distributed simulation of supply chains. *Information Sciences*. 2014. No. 277. P. 567–581. URL: doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.147 (дата звернення: 07.10.2024).
12. Чень Ю. Міжнародні змішані перевезення: теоретична сутність та практичне значення. *Вісник Запорізького національного університету*. 2018. Вип. 4 (40). С. 91–97.
13. Bazhin I.I. Logistics: CD tutorial. Kharkiv: Kon-sum, 2003.
14. Бойко О.В. Структура транспортного ринку: основні та забезпечуючі складов. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: «Економічні науки»*. 2010. Вип. 44. С. 71–78.
15. Ширяєва С. В. Аналіз сучасного стану організації автомобільно-залізничних перевезень вантажів в Україні. 2012. Вип. 26. Ч. 2. С. 363–369 URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_2_2013/363-369.pdf (дата звернення: 07.10.2024).
16. Terminology on combined transport. United Nations. New York and Geneva, 2001. 69 p.
17. Hakan G. An empirical modelling framework for forecasting freight transportation. *Transport*. 2014. No. 29. P. 185–194. URL: doi.org/10.3846/16484142.2014.930927 (дата звернення: 07.10.2024).

Voichenko T.O., Trofymenko I.V., Shevchenko A.P., Fedunov V.M.

A METHOD FOR OPTIMIZING THE TRANSPORT CHAIN IN MIXED TRANSPORTATION

The purpose of the article is to formulate and solve the problem of optimisation of cargo delivery using different modes of transport. This goal is achieved by analysing the sources of information on possible approaches to the theoretical substantiation of certain issues of international multimodal transport, as well as the implementation of technical aspects of organising the movement of goods from producer to consumer, considering certain criteria. As a result of the analysis, the organisers of the feasibility study of cargo delivery were identified. However, when planning and organising transportation, the shipper and the multimodal transport operator, as organisers, cannot fully use traditional methods of optimising cargo delivery schemes. The reason for this is the inability to apply geographical rotation of transportation routes or to replace or change the types of transport or the methods of transportation used, etc. To overcome these difficulties, a change in the paradigm of solving optimisation problems is proposed. The article considers the restrictions imposed on the shipper and the intermodal transport operator, which must be considered when optimising the scheme of organising the transport of goods. If it is impossible to change the already defined scheme of cargo delivery, the organiser can optimise its quality state, for which purpose two different delivery schemes are considered - determining the maximum or minimum value of the desired indicator or using a multi-criteria approach. An example of calculating the time of delivery of cargo in comparison with the indicator of delivery cost is considered. The most significant result is the development of a method for solving the problem of optimising the system of organising mixed cargo delivery, based on the application of elements of graph theory and guaranteed evaluation theory. A further area of work is to conduct research to substantiate the proportion of indicators that determine the quality of services to increase the level of «trust» in the solution options. To avoid errors, it is recommended to obtain extensive statistical material or have a sufficiently large group of qualified experts who can become a source of information for the calculations.

Key words: shipper, multimodal transportation operator, transport chain, optimization, indicator.