

Розвиток інтермодальних перевезень в умовах України та у міжнародному сполученні

Ольга Шапатіна

*Український державний університет залізничного транспорту
м. Харків, Україна*

I. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПРИ ДОСТАВЦІ ВАНТАЖІВ РІЗНИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ

Транспорт відіграє важливу роль у світовій економіці, сприяє розвитку країни в цілому та їх виходу на світовий ринок. Протягом останніх років залізничний транспорт України залишається провідною галуззю, яка забезпечує майже 82% вантажних і 36% пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту [1]. В сучасних умовах залізницям все складніше забезпечувати перевізний процес, головним чином внаслідок зношення інфраструктури і повільного оновлення локомотивного та вагонного парку.

Активний процес входження України до європейського економічного простору та світової транспортної мережі вимагає від залізниці нових підходів до організації доставки вантажів від відправників до одержувачів при взаємодії з іншими видами транспорту. За 2020 рік вантажообіг залізничного транспорту становив 56 %, а автомобільного – 33 % вантажообігу всіх видів транспорту [2].

За таких умов особливої актуальності набувають інтермодальні перевезення як перспективний напрямок розвитку транспортної галузі за участю залізниці. Так масове переміщення вантажів на великі відстані виконується за допомогою залізничного транспорту, тоді як автомобільний транспорт здійснює оперативну доставку вантажів в значно меншому обсязі. Переваги інтермодального транспорту визначаються його мобільністю та дальністю транспортування [3].

Поєднання переваг усіх видів транспорту в єдиному процесі управління рухом дозволяє досягти значної ефективності за рахунок вибору маршруту на основі маневрування типом транспортного

засобу. У зв'язку з тим, що транспортні засоби відносяться до технічних систем довготривалої дії постає завдання щодо забезпечення високої ефективності їх функціонування [4]. Враховуючи конкуренцію на ринку транспортних послуг рішення цієї задачі є актуальним.

Транспортні системи відносяться до багатофункціональних систем, тому що можуть виконувати завдання з перевезень різними способами, які характеризуються показниками ефективності. Так необхідно обирати той спосіб перевезень, який для даного стану системи буде оптимальним. Транспортна система включає в себе комплекс технічних засобів, які забезпечують транспортні операції, управління і контролю рухом, і загалом складаються з багатьох конкретних для даної системи елементів [5].

Так, задача з перевезення різноманітної номенклатури і обсягу продукції може виконуватись різними способами. Будемо вважати, що при перевезенні j -м способом умовний показник технічної ефективності системи дорівнює F_j . Нехай для визначеності $F_1 > F_2 > \dots > F_n$. Тоді транспортну систему в залежності від типу транспорту, обсягу і номенклатури продукції, що перевозиться, можна розділити на n підсистем G_1, G_2, \dots, G_n за умови, що в кожному таку підсистему входять складові, які забезпечують перевезення j -м способом.

Припустимо наступні варіанти оцінки ефективності функціонування транспортних систем:

-кожний елемент системи може входити в склад тільки однієї підсистеми;

-підсистеми можуть виконувати задачі з перевезень за умови працездатності як всіх елементів системи, так і лише частини, тобто $G_1 \supset G_2 \supset \dots \supset G_n$ [5].

Отже, відповідно до другого варіанта транспортна система буде підтримуватись j -м способом за умови, що всі елементи підсистеми G_j працездатні, а в підсистемі G_{j-1}^* є хоча б один елемент, що

відмовив (G_{j-1}^* – множина елементів системи, які належать підсистемі G_{j-1} і одночасно не належать підсистемі G_j).

Тоді ефективність функціонування транспортної системи можна визначити [5] таким чином:

$$E = \sum_{i=1}^n F_j (P_j - P_{j-1}), \quad (1)$$

де відповідно P_j , P_{j-1} – імовірності безвідмовної роботи j -ої та $j-1$ транспортної підсистеми.

Відповідно до цього розглянемо процедуру оцінки ефективності системи управління транспортною процесу згідно з рисунком 1.

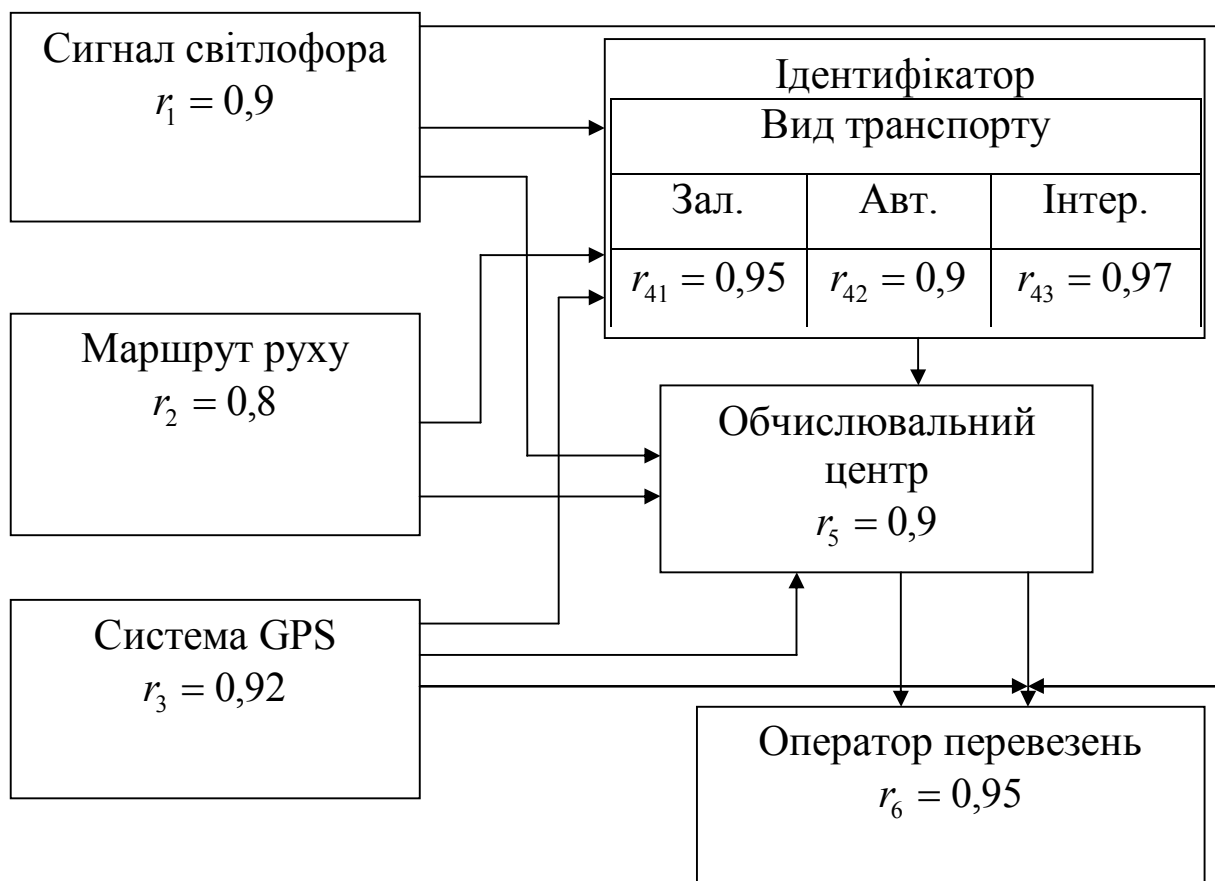


Рисунок 1 – Структурна схема системи транспортних перевезень

Процес управління транспортною системою включає контроль руху, вибір транспортного засобу за допомогою служби диспетчерського управління транспортним парком, служби диспетчерського управління рухом та обчислювального центру [5].

Тоді існують комбінації способів виконання кожного окремого етапу, що забезпечуються транспортною системою процесу перевезень, відповідні цим комбінаціям показники технічної ефективності зведені до таблиці 1.

Таблиця 1 – Показники технічної ефективності при різних системах обслуговування

Спосіб виконання	Етапи			Показник технічної ефективності
	Вибір транспортного супроводження	Визначення місця знаходження	Супровід виконання задачі з перевезення	
1	GPS	Ідентифікатор	Система GPS	1,0
2	Маршрут руху	Ідентифікатор	Система GPS	0,7
3	Маршрут руху	Ідентифікатор	Сигнали світлофора, обчислювальний центр	0,4
4	Сигнали світлофора	Сигнали світлофора	Сигнали світлофора, обчислювальний центр	0,2
5	Сигнали світлофора	Сигнали світлофора	Сигнали світлофора, обчислювальний центр	0,1

Відмітимо, що для виконання транспортного процесу будь-яким способом необхідно, щоб диспетчерська служба, що забезпечує управління рухом, завжди була працездатною [5].

Спочатку оцінимо повну імовірність виконання транспортною системою задачі з перевезення деякої продукції. Виконання задачі з перевезення першим способом оцінюється наступним чином

$$h_1 = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_{4i} \cdot r_5 \cdot r_6 \quad (2)$$

Виконання задачі другим способом може бути проведене тільки тоді, коли не визначено маршрут руху, тобто з імовірністю

$$h_2 = g_1 \cdot r_3 \cdot r_{4i} \cdot r_5 \cdot r_6 \quad (3)$$

Виконання задачі третім способом проводиться тільки тоді, коли виникла відмова системи GPS, тобто з імовірністю

$$h_3 = r_1 \cdot g_3 \cdot r_{4i} \cdot r_5 \cdot r_6 \quad (4)$$

Виконання задачі четвертим способом буде проводитися в тому випадку, коли виникла відмова або:

- служби диспетчерського управління парком;
- служби диспетчерського управління парком і системи маршруту руху;
- служби диспетчерського управління парком і системи GPS;
- системи GPS і маршруту руху.

При цьому система сигналізації світлофорів і обчислювального центру функціонують справно, тоді імовірність цієї ситуації визначається [5]

$$h_4 = r_2 \cdot r_5 \cdot r_6 \cdot (g_{4i} \cdot r_1 \cdot r_2 + g_{4i} \cdot g_1 \cdot r_3 + g_{4i} \cdot g_1 \cdot g_3 + r_{4i} \cdot g_1 \cdot g_2) \quad (5)$$

Виконання задачі п'ятим способом проводиться тільки у випадку, коли додатково ще відмовив обчислювальний центр, тобто з імовірністю [5]

$$h_5 = r_2 \cdot g_5 \cdot r_6 \cdot (g_{4i} + g_1 \cdot g_3 \cdot r_{4i}) \quad (6)$$

Тоді ефективність функціонування транспортної системи визначимо за формулою (1), для залізничного транспорту отримаємо $E_1 = 0,6136$, для автомобільного транспорту – $E_2 = 0,5860$, для інтермодального транспорту – $E = 0,6230$.

Таким чином, визначено, що забезпечення ефективності роботи транспортних систем доцільно оцінювати на основі приведеного критерію ефективності з врахуванням комплексу станів при виконанні завдань і етапами їх виконання.

На основі критерію ефективності формалізовано процедуру вибору оптимального варіанту транспортного забезпечення шляхом комбінування способів перевезень на кожному етапі виконання транспортних завдань [5]. Згідно наведених розрахунків доказано, що запровадження інтермодальних перевезень має найбільшу ефективність у порівнянні з іншими видами вантажних перевезень.

Наведена процедура визначення ефективності роботи транспортних систем може бути покладена в основу створення єдиного критерію оцінки комплексної взаємодії різних видів транспорту при перевезенні вантажів [5].

II. ВИБІР КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ МЕТОДАМИ КВАЛІМЕТРІЇ

Згідно Проекту Закону України № 4258 від 22.10.2020 «Про мультимодальні перевезення», Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р), «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», введена в дію наказом Міністерства транспорту та зв'язку

України від 14 жовтня 2008 р. № 1259, Стратегією розвитку ПАТ «Укрзалізниця» 2017–2021 роки, а також згідно Директив Європейського парламенту та ради залізничного транспорту (the Directives of European Parliament and Council the railway transportations) поставлені задачі щодо вдосконалення вантажних перевезень і поновлення рухомого складу. В цих умовах необхідно обґрунтувати взаємодію залізничного та автомобільного видів транспорту, визначити критерій оцінки ефективності перевезень. Реалізація проведених досліджень дозволить забезпечити вибір оптимального варіанту перевезення при різних обсягах перевезень вантажів та на різну дальність перевезень [6].

При організації вантажних перевезень основними критеріями вибору транспортного засобу є: вартість перевезення, швидкість, надійність, безпека та якість доставки вантажів [7].

Вартість перевезення та швидкість доставки вантажів багато в чому залежать від вибору маршруту перевезень. Разом з цим вибір транспортних засобів для перевезення є одним із головних інструментів з покращення якості доставки вантажів. Так при здійсненні інтермодальних (мультимодальних) перевезень вантаж на всьому шляху прямування знаходиться в тій самій транспортній одиниці, що сприяє якості та схоронності доставлених вантажів у зв'язку із зменшенням вантажних операцій. Як показують дослідження для об'єктивної оцінки якості доставки вантажів доцільно використовувати методи теоретичної кваліметрії [8].

Однією з складових цього методу є вирішення задачі вибору оптимального маршруту, для чого використовується багато методів, зокрема, таких як: алгоритм Дейкстри, методи штучного інтелекту, мурашиний алгоритм, нейронні мережі, методи генетичних алгоритмів [9].

Разом з цим різноманіття транспортних засобів не дозволяє комплексно оцінювати їх властивості. У різних видів транспорту діапазон використання технічних характеристик відрізняється. Тому виникає необхідність у використанні комплексного показника якості транспортних засобів.

З іншого боку, це визначає необхідність обґрунтувати критерій ефективності різних видів транспортних технологій. Відповідно до досягнутого досвіду і його розвитку таким критерієм може бути приведений «тран» [10].

Рівняння кваліметрії для оцінки показника технічного рівня транспортного засобу за допомогою «трану» у загальному вигляді буде дорівнювати

$$Z = f(Q, h, V, g, v, L, V_{max}), \quad (7)$$

де Q – вантажопідйомність транспортного засобу, т; h – характеристика складності шляху, м; V – технічна швидкість транспортного засобу, км/год.; g – повна маса транспортного засобу у завантаженому стані, т; v – об’єм транспортного засобу, м³; L – дальність перевезення вантажу, км; V_{max} – максимальна швидкість транспортного засобу, км/год.

За допомогою методу аналізу розмірностей визначимо робочий вигляд даного рівняння [11]. Будь-яка функція від незалежних змінних аргументів може бути відображена через добуток цих аргументів, що взяті з різними показниками ступені, тобто

$$Z = C^l Q^\alpha h^\beta V^\chi g^\delta v^\varepsilon L^\kappa V_{max}^\lambda \quad (8)$$

Після проведення процедур пошуку показників ступеней у загальному вигляді формула розмірностей обох частин рівняння при основних одиницях виміру M, L_x, L_y, L_z, T , при цьому приймаємо $Q=M, L=L_x, L_y, L_z, T=T$. Тоді рівняння буде мати вигляд

$$\frac{M(L_x^{1/2}L_z^{1/2})^3}{T^2} = M^\alpha \cdot L_y^\beta \cdot \left(\frac{L_x^{1/2}L_z^{1/2}}{T}\right)^\chi \cdot M^\delta \cdot (L_xL_yL_z)^\varepsilon \cdot (L_x^{1/2}L_z^{1/2})^\kappa \cdot \left(\frac{L_x^{1/2}L_z^{1/2}}{T}\right)^\lambda \quad (9)$$

Тоді виконуючи порівняння коефіцієнтів при відповідних параметрах якості, знаходимо: $\alpha=1-\delta, \beta=-\varepsilon=-1/2+\kappa/2, \chi=2-\lambda, \delta=\delta,$

$\varepsilon=1/2-\kappa/2$, $\kappa=\kappa$, $\lambda=\lambda$. Таким чином, попередній вираз приймає наступний вигляд

$$Z = C' \cdot QV^2 \cdot \left(\frac{v}{h}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{g}{Q}\right)^\delta \cdot \left(\frac{V_{max}}{V}\right)^2 \cdot \left(L \frac{h^{1/2}}{v^{1/2}}\right)^\kappa. \quad (10)$$

Згідно інженерного аналізу можна прийняти, що $\delta=-1$, тобто якість транспортного засобу буде пропорційна величині коефіцієнта комерційної віддачі $\frac{g}{Q}$ що не суперечить практиці. А показник приймає значення $\kappa=2$ з метою спрощення параметрів у складі рівняння, приймаємо значення $\lambda=2$ як показник запасу кінетичної енергії.

Отже, остаточно прийнявши $\delta=1$, $\kappa=2$, $\lambda=2$, отримаємо

$$Z = C' \cdot QV^2L \cdot \frac{Q}{g} \cdot \left(\frac{V_{max}}{V}\right)^2 \cdot L \left(\sqrt{\frac{h}{v}}\right) = C' \cdot QV^2L \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3. \quad (11)$$

Звичайно приймають значення постійної $C'=1$, що спрощує розрахунки, не завдаючи шкоди кваліметрії транспортних засобів. Аналізуючи отриманий результат можна констатувати, що множник у вигляді $A=Q \cdot V^2 \cdot L$ є кількісною величиною корисного ефекту транспортної операції, $k_1 = \frac{P}{G}$ характеризує вагову досконалість даного транспортного засобу, тобто вантажну віддачу до ваги транспортного засобу, $k_2 = \left(\frac{V_x}{V}\right)^2$ враховує запас кінетичної енергії, $k_3 = L \left(\sqrt{\frac{h}{v}}\right)$ характеризує дорожні переваги транспортного засобу.

Отже, у наведеному вигляді цього показника не враховані такі важливі показники як: питомі витрати на утримання конкретного транспортного засобу, витрати часу на виконання технологічних операцій, значення рівня конкурентоспроможності [8]. З урахуванням цих показників кваліметричний критерій узагальненого рівня транспортного засобу приймає вигляд

$$Z = A' \cdot \prod_{i=1}^m k_i = \frac{Q \cdot V^2 \cdot L}{\varphi \cdot \Delta\tau} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \rightarrow \max, \quad (12)$$

де $A' = \frac{A}{\varphi \cdot \Delta\tau}$; A – величина корисного ефекту транспортної операції, $A = Q \cdot V^2 \cdot L$; φ – коефіцієнт, що враховує відношення витрат на утримання транспортного засобу за життєвий цикл до вартості транспортного засобу, $\varphi = \frac{C_{жци_i}}{c_i}$; $C_{жци_i}$ – витрати на утримання транспортного засобу за життєвий цикл, грн.; c_i – вартість транспортного засобу, грн.; $\Delta\tau = 1 - \tau$; τ – коефіцієнт скорочення часу під технологічними операціями, $\tau = \frac{\Delta T}{T}$; ΔT – приріст значення часу під технологічними операціями за різними технологіями, год.; T – значення часу під технологічними операціями за базовою технологією, год.; k'_i – коефіцієнти окремих властивостей, $k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$; k_1 – коефіцієнт комерційної віддачі; k_2 – коефіцієнт запасу динамічних властивостей транспортного засобу; k_3 – коефіцієнт дорожніх переваг транспортного засобу; k_4 – коефіцієнт конкурентоспроможності транспортного засобу; k_5 – коефіцієнт надійності транспортного засобу.

За таких обмежень:

$$\begin{cases} C_{жци_i} > 0, c_i > 0, Q > 0, \\ \Delta T > 0, T > 0, L > 0, \\ 0 < V \leq V_{max}, \tau < 1. \end{cases} \quad (13)$$

Відмітимо, що окремими задачами щодо визначення критерію якості є обґрунтування оптимальних обсягів при відповідній вантажопідйомності транспортного засобу і дальності перевезень. Визначимо в рамках зміни тарифних нормативів і цін для кожного

виду транспорту оптимальні витрати на перевезення. На рисунку 2 приведені графічні залежності зміни $P=f(Q,L)$ у вигляді тримірної моделі

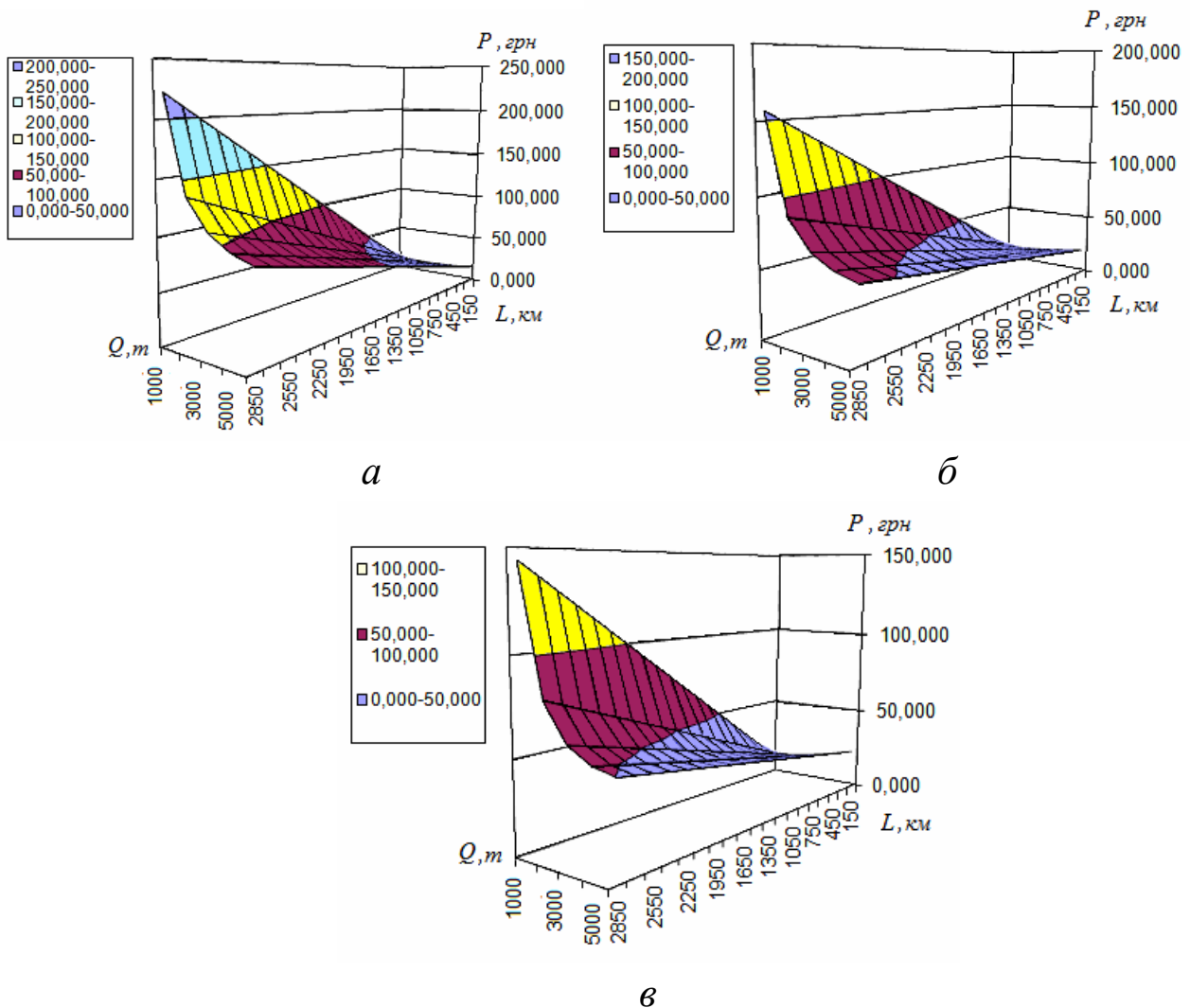


Рисунок 2 – Сумарні витрати на перевезення вантажів транспортними засобами: *a* – автомобільним; *б* – залізничним; *в* – інтермодальним

Згідно наведених залежностей можна зробити висновок, що автомобільний транспорт може конкурувати з інтермодальним на невеликій відстані перевезення і при незначних обсягах. А залізничні перевезення навпаки на коротких відстанях неефективні і поступаються інтермодальним перевезенням в середньому діапазоні дальностей, і майже однакові при дальніх перевезеннях.

Отже, комплексний кваліметричний критерій узагальненого рівня транспортного засобу Z (12) – це нелінійна функція, яка є мультиплікативною. У такому випадку рішення можливо знайти шляхом логарифмування обох частин рівняння, тоді отримаємо

$$\ln Z = \ln Q + 2\ln V + \ln L - \ln \phi - \ln(1-\tau) + \ln k_1 + \ln k_2 + \ln k_3 + \ln k_4 + \ln k_5. \quad (14)$$

У зв'язку з тим, що функція є монотонно-зростаючою, то справедливе таке рівняння

$$\max \ln Z = \max Z. \quad (15)$$

В загальному вигляді рішення зводиться до задачі лінійного програмування, якщо обмеження мають лінійну залежність, або задачі динамічного програмування, якщо обмеження мають нелінійну залежність. Тоді запишемо

$$Z = e^{Q+2V+L-\phi-(1-\tau)+k_1+k_2+k_3+k_4+k_5}. \quad (16)$$

Комплексний кваліметричний критерій узагальненого рівня транспортного засобу \bar{z} може бути визначений для комбінації видів транспорту як

$$\bar{z} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{N} \right\}, N = \overline{1, N}, \quad (17)$$

де N – кількість видів транспорту.

Згідно наведеного при виборі технології перевезень вантажів треба враховувати важливість кожної складової кваліметричного критерію у будь-який період часу при прийнятті рішень, реалізація вибору виду транспорту наведена на рисунку 3.

Тобто, виходячи з характеристики транспортного засобу, оцінюється оптимальна їх кількість, зона дії та вантажопідйомність, і з урахуванням рівня скорочення непродуктивних витрат часу і витрат на утримання транспортного засобу за життєвий цикл та рівня конкурентоспроможності визначається комплексний кваліметричний рівень цього транспортного засобу.



Рисунок 3 – Реалізація вибору виду транспорту за допомогою комплексного кваліметричного критерію узагальненого рівня транспортного засобу

Таким чином, на підставі проведеного аналізу показано, що на ефективність перевезень впливає вибір транспортного засобу з урахуванням діапазону оптимальних значень вантажопідйомності цього транспортного засобу та зони дальності перевезень на основі визначення оптимального значення комплексного кваліметричного критерію.

Запропонований кваліметричний критерій може бути використаний як для підвищення ефективності взаємодії автомобільного та залізничного транспорту, так і для інших видів транспорту через його комплексний характер [8].

На підставі оцінки рівня транспортного засобу показано, що вплив транспортного засобу на ефективність перевезення має комплексний характер, залежить від багатьох показників, що дозволило встановити наступне:

1. Складові комплексного кваліметричного критерію для визначення узагальненого рівня транспортного засобу є суперечливими, тому при виборі технології перевезень вантажів треба враховувати важливість тієї чи іншої складової критерію у кожний конкретний момент часу при прийнятті рішень.

2. Для уточнення кваліметричного показника необхідно визначити зону дії транспортних засобів при різних обсягах перевезень вантажів та на різну дальність перевезень.

3. За результатами розрахунків отримано: для залізничного транспорту $Z=1215 \cdot 10^{12}$ тран, для інтермодального $Z=6075 \cdot 10^{12}$ тран, а для автомобільного $Z=506,25 \cdot 10^{12}$ тран, що показує перспективність перевезень вантажів інтермодальним транспортом.

III. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Організація інтермодальних перевезень вантажів є одним із головних напрямів розвитку експортного та транзитного потенціалу України. Планування інтермодальних перевезень сприяє підвищенню конкурентоспроможності системи вантажних залізничних перевезень в державі.

В теперішній час найбільше застосування із всіх видів інтермодальних перевезень на залізницях України знайшли контейнерні, які дозволяють залучати до перевезень автомобільний, залізничний, морський, річковий та повітряний транспорт, а також забезпечують безпеку доставки вантажів.

Так за 2020 рік територією України перевезено понад 425 тис. контейнерів в умовних одиницях (ДФЕ), що на 10,7 % перевищує показник 2019 року. Ріст перевезень є результатом системної, злагодженої роботи, яка була направлена на організацію більшої кількості контейнерних поїздів, залучення нових міжнародних маршрутів, вдосконалення технології перевезення [12].

Також здійснюються прямі контейнерні перевезення з Китайської Народної Республіки до України. Поїзди привозять до України добрива, обладнання, вироби з кольорових металів, медичне та фармацевтичне обладнання, взуття та інші товари народного вжитку. Загалом, за підсумком 2020 року кількість прийнятих контейнерних поїздів із Китаю сягнула 22. Також значно зросла кількість контейнерних поїздів за маршрутом Китай–країни Західної Європи, який пролягає територією України [13].

Отже, особливої актуальності набуває ефективне використання транзитного потенціалу України за умови здійснення інтермодальних перевезень. Для того, щоб інтермодальні оператори та разом із ними і вантажовідправники змогли скористатись всіма перевагами залізничного транспорту, є необхідним впровадження сучасної технології планування інтермодальних перевезень.

Так однією з важливих задач є задача оперативного планування перевезень, в результаті вирішення якої буде визначатись маршрут всіма видами транспорту, що задіяні. При цьому буде враховуватись не лише довжина шляху, а й затримки при переході видів транспорту. В сучасних умовах значна кількість вантажовласників вимагає від перевізника, в першу чергу, прискорення доставки і не обов'язково з мінімізацією експлуатаційних витрат [14].

За таких умов вантажовідправник не повинен укладати окремих договорів із транспортними підприємствами та особисто

контролювати всі ланки перевезення. Така зручність є важливим фактором, який забезпечує даному виду перевезень постійний притік нових клієнтів, особливо зважаючи на те, що оператори також здійснюють контроль митних операцій при перетині міждержавних кордонів [15].

Інтермодальні перевезення є рятівним колом для залізничної галузі України, адже її територією проходять декілька міжнародних транспортних коридорів. Однак для підвищення конкурентоспроможності і привабливості інтермодальних перевезень необхідно зробити їх максимально зручними для клієнтів за рахунок максимального наближення останніх до процесу планування [15]. Однією з першочергових задач є задача оперативного планування перевезення, в результаті вирішення якої буде визначатись маршрут із урахуванням не лише довжини сегментів, що відповідають різним видам транспорту, а й фактору часу. Мета застосування даного підходу полягає у забезпеченні підвищення точності урахування часів затримок під час передачі вантажу від одного транспортного підприємства до іншого, та забезпеченні можливості одночасного урахування вимог клієнта щодо вартості перевезення та терміну доставки [9].

Так, одним із критеріїв при плануванні інтермодальних перевезень є його вартість. Цільову функцію наведено у вигляді витрат, які припадають на один контейнер:

$$C(X, t_0) = \left(e_{\text{док}} + n \sum_{i=1}^{\#X} \left(L_{x_i} e_{x_i} + (e_{x_i}^{\partial_1} + e_{x_i}^{\partial_2}) + \theta \left(|m_{x_i} - m_{x_{i+1}}| \right) \left(e_{S_{x_i}^{\text{кінець}}, S_{x_{i+1}}^{\text{поч}}} + \left(e_{S_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{скл}} + \chi e_{S_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{ох}}} \right) \tau_{S_{x_i}^{\text{кінець}}, S_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{пер}}(t_0) \right) \right) / n \rightarrow \min, \quad (18)$$

де X – впорядкований змінний вектор (множина) номерів дуг, що відповідає маршруту переміщення вантажу на графі; $e_{\text{док}}$ – витрати на оформлення перевізних документів; n – обсяг партії вантажу, приведений до 20-ти футових контейнерів (TEU); $\#X$ – потужність

множини елементів змінного вектора X ; L_{x_i} – довжина ділянки маршруту, що відповідає i -му елементу множини x ; e_{x_i} – питомі витрати на переміщення контейнера на ділянку, що відповідає дузі x_i ; $e_{x_i}^{\partial_1}$ – додаткові витрати на дузі x_i , що пов'язані з вантажем (плата за додаткове кріплення, плата за перевантаження тощо); $e_{x_i}^{\partial_2}$ – додаткові витрати на дузі x_i , що пов'язані зі специфікою просування транспортного засобу (судовий збір, плата за льодову проводку судна, сезонна надбавка до тарифу); $e_{s_{x_i}^{кінц}}, e_{s_{x_{i+1}}^{поч}}$ – питомі витрати, що пов'язані з вивантаженням контейнера на кінцевому терміналі дуги x_i , переміщенням та навантаженням на терміналі дуги x_{i+1} ; $e_{s_{x_{i+1}}^{СКЛ}}^{поч}$ – вартість зберігання на складі терміналу, який розташований на початковій вершині дуги x_{i+1} під час очікування навантаження; $e_{s_{x_{i+1}}^{ох}}^{поч}$ – питома вартість охорони контейнера на складі терміналу, який розташований на початковій вершині дуги x_{i+1} під час очікування; χ – булева змінна, що приймає значення 1, якщо охорона необхідна, та 0 – в іншому випадку; m_{x_i} – вид транспортного сполучення на дузі x_i ; $\tau_{s_{x_i}^2, s_{x_{i+1}}^1}^{nep}(t_0)$ – часовий інтервал затримки при переході між дугами x_i та x_{i+1} (при зміні одного виду транспорту на інший або при виконанні операцій із поїздами на залізничних станціях, митних операцій тощо), який залежить від моменту початку реалізації маршруту t_0 ; $\theta(x)$ – функція Гевісайда, яка визначена наступним чином [15]:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (19)$$

Другим критерієм є час доставки вантажу, який можна представити у вигляді наступної цільової функції:

$$T(X, t_0) = \sum_{i=1}^{\#X} \left(\frac{L_{x_i}}{V_{x_i}} k_{x_i}^{zam}(t_0) + \tau_{s_{x_i}^{kinz}, s_{x_{i+1}}^{poch}}^{nep}(t_0) \right) \rightarrow \min, \quad (20)$$

де V_{x_i} – середня швидкість переміщення по дузі x_i ; $k_{x_i}^{zam}(t_0)$ – коефіцієнт затримки при переміщенні по дузі x_i , який залежить від моменту початку реалізації маршруту t_0 .

Для отримання адекватного рішення на керуючі змінні моделі накладаються певні обмеження:

$$\begin{cases} t^{lm} \leq t_0 \leq t^{nm} \\ s_{x_i}^{kinz} = s_{x_{i+1}}^{poch}, i = 1, 2 \dots \#X \\ s_{x_1}^{poch} = s^{poch} \\ s_{x_{\#X}}^{kinz} = s^{kinz} \\ n \leq w_{x_i}(t_0), i = 1, 2 \dots \#X \end{cases}, \quad (21)$$

де t^{lm} та t^{nm} – ліва та права межа інтервалу можливого початку реалізації маршруту, визначені вантажовідправником; s^{poch} та s^{kinz} – номери вершин графа транспортної мережі, які відповідають початковому і кінцевому пунктам маршруту відповідно; $s_{x_i}^{kinz}$ та $s_{x_{i+1}}^{poch}$ – номер кінцевої вершини дуги x_i та номер початкової вершини дуги x_{i+1} відповідно; $s_{x_1}^{poch}$ та $s_{x_{\#X}}^{kinz}$ – номер початкової вершини першої дуги маршруту та номер кінцевої вершини останньої дуги маршруту відповідно; $w_{x_i}(t_0)$ – кількість вільних контейнеро-місць на момент

початку переміщення вантажу по дузі x_i в залежності від моменту початку реалізації маршруту t_0 .

Так перше обмеження забезпечує пошук рішення, момент початку реалізації маршруту якого знаходиться в межах певного часового інтервалу, який відповідає умовам вантажовідправника. Друге обмеження забезпечує цілісність маршруту, контролюючи співпадіння кінцевої вершини попередньої дуги та початкової вершини наступної дуги. Третє та четверте обмеження забезпечують відбір тільки тих варіантів маршрутів, які сполучають вершини транспортної мережі, які визначені вантажовідправником у якості початкового і кінцевого пунктів переміщення вантажу. П'яте обмеження забезпечує вибір лише тих маршрутів, які забезпечують наявність достатньої кількості вільних контейнеромісць для забезпечення можливості переміщення партії вантажу в повному обсязі по всіх ділянках маршруту [15].

Таким чином, у такій постановці задача вибору оптимального плану інтермодального перевезення є задачею багатоцільової або векторної оптимізації [9].

Вирішення задач векторної оптимізації є не лише концептуально але й технічно більш складним процесом у порівнянні із задачами, які використовують тільки один критерій. Концептуальна складність полягає в тому, що в загальному випадку не існує єдиного рішення, яке б одночасно відповідало мінімумам по всіх критеріях. Таким чином, рішення задачі може бути лише компромісним, тобто таким, яке задовольняє певним вимогам або співвідношенням між критеріями, або прагне до певного рівня балансу [15].

Отже, існує ціла множина «кращих» рішень, яка називається множина Парето (Парето-фронт). По-перше, розв'язання такої задачі зводиться до відшукування по всій області можливих варіантів рішень із множини рішень, що відповідають Парето-фронті. Отже пошук множини точок Парето-фронті представляє значну обчислювальну складність, яка може зростати із більш ніж експоненційною швидкістю в порівнянні із лінійною швидкістю збільшення

розмірності задачі. Тоді з метою подолання цих труднощів запропоновано використання спеціального евристичного оптимізаційного алгоритму NSGA-III. Цей алгоритм відноситься до класу генетичних алгоритмів, які базуються на принципах збереження та покращення генофонду у живій природі [15]. Даний алгоритм був спеціально розроблений для вирішення задач багатоцільової оптимізації, який був створений у результаті подальшого розвитку алгоритму NSGA-II. Його основна відмінність – це новий механізм контролю локальної скупченості множини Парето-фронту, а саме оцінка відстані скупченості була замінена оцінкою щільності, яка визначається за допомогою опорних точок.

Отже, на першому кроці роботи алгоритму відбувається ініціалізація початкової популяції рішень $P = \{x_i\}_{i=1}^N$, а також множини опорних точок $R = \{r_i\}_{i=1}^N$. Кожна особина популяції представляє собою вектор змінних «хромосом», а елемент вектора - це «ген». Кожен ген містить номер дуги графа, яка була обрана для побудови маршруту. Останній ген хромосоми містить момент часу початку здійснення перевезення. На другому кроці алгоритму на основі поточної «батьківської» популяції генерується наступна популяція «нащадків» за допомогою генетичних операцій, таких як схрещування і мутація. На третьому кроці застосовується недоміноване сортування сукупної множини рішень $P \cup Q$ із виділенням із неї g недомінованих фронтів рішень $F_1, F_2 \dots F_g$. На четвертому кроці починаючи з фронту F_1 рішення копіюються до тимчасового архіву \bar{P} до тих пір, поки його розмір не зрівняється або не перевищить значення N таким чином, що $\bar{P} = \bigcup_{i=1}^{k-1} F_i$. Якщо розмір популяції \bar{P} дорівнює N , тоді місткість архіву використовується в якості нової популяції $P = \bar{P}$ і якщо умови зупинення роботи алгоритму не досягнуті (крок 7), тоді виконується наступний крок алгоритму. На п'ятому кроці виконується визначення величини скупченості по опорних точках множини R , шляхом визначення прив'язки точок рішень до найближчої до них опорної точки. Під близькістю до опорної точки розуміється не безпосередня відстань до неї, а довжина перпендикуляру, опущеного на пряму, яка

проходить через точку початку координат і відповідну опорну точку (рис. 4). Таким чином, число точок рішень, які асоціюються з даною опорною точкою називається її величиною щільності (рис. 4). Після обробки точок останнього фронту F_g і додавання їх до множини нової популяції P поточна величина щільності опорних точок перераховується. На шостому кроці відбувається випадковий відбір точки рішення із підмножини рішень, які знаходяться в області опорної точки із найменшою величиною щільності до тих пір, поки чисельність популяції P не зрівняється з N . На сьомому кроці алгоритм виконує перевірку критеріїв зупинки і якщо хоч один із них досягнуто, відбувається зупинка алгоритму і видача результату його роботи у вигляді Парето-фронту, який представлений фронтом F_1 . Всі інші фронти відкидаються у наслідок того, що вони були допоміжними і використовувались лише для підтримання різноманіття популяції для запобігання потрапляння до локальних мінімумів. У випадку, якщо поточний стан алгоритму не відповідає жодному з критеріїв зупинки, алгоритм повторно продовжує виконання, починаючи з другого кроку [15].

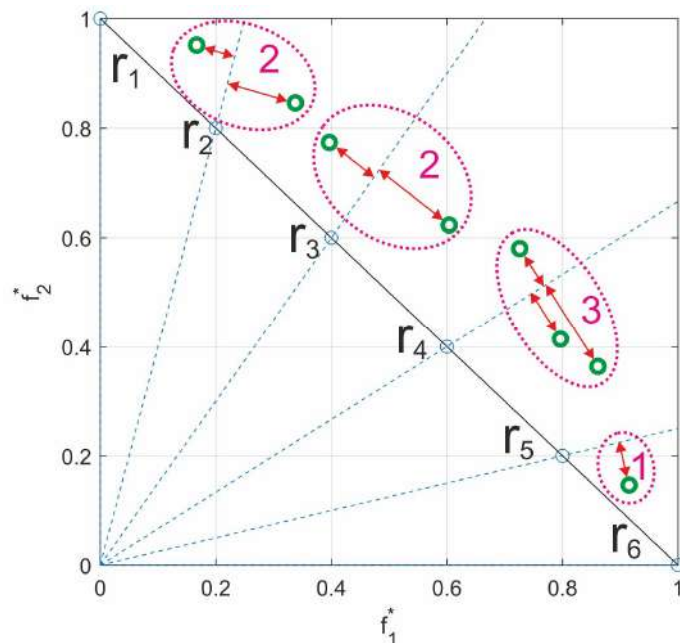


Рисунок 4 – Визначення величини щільності опорних точок

Так, на основі сформованої моделі створене програмне забезпечення у середовищі Matlab. У якості вихідних даних була використана абстрактна транспортна мережа, яка містить ділянки шляху, що відповідають чотирьом типам сполучення: автомобільному, залізничному, морському та авіаційному. Дана мережа представлена орієнтованим графом, який наведено на рисунку 5.

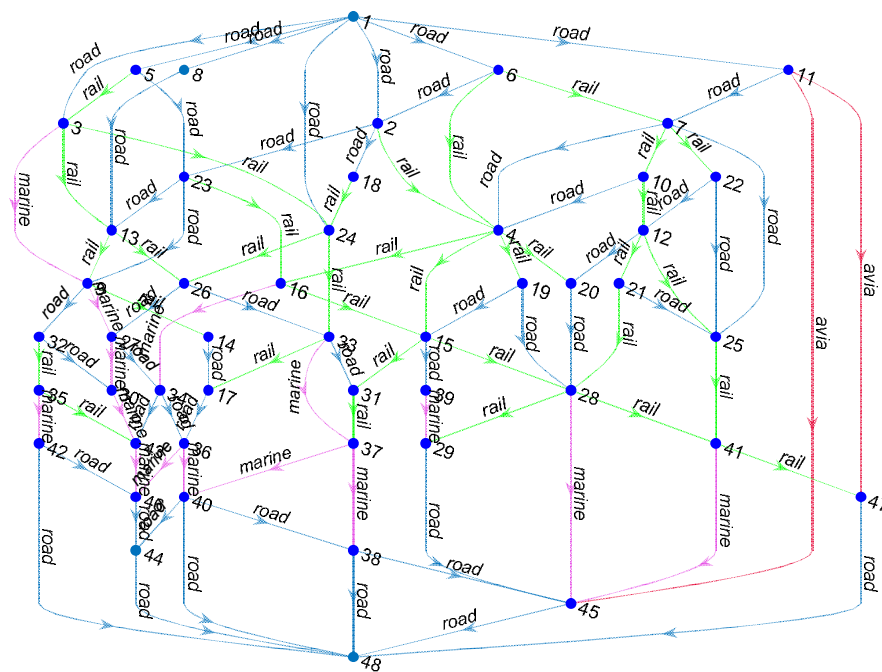


Рисунок 5 – Орграф транспортної мережі у задачі планування інтермодальних контейнерних перевезень

Параметрами дуги графа є вид сполучення, відстань, швидкість переміщення і вартість перевезення одного контейнера типу TEU на 1 км. У кожній вершині графу також визначені вартості перевантаження із одного виду транспорту на інший, що відповідають парам дуг, одна з яких представляє ділянку маршруту, по якій вантаж прибуває до даного пункту, друга дуга представляє ділянку, по якій вантаж відбуває від даної точки маршруту. Початкова точка кожної дуги також асоціюється із розкладом затримок початку переміщення по даній дузі, який відповідає

моменту часу потрапляння вантажу в ході реалізації перевезення до даного пункту [15].

Із застосуванням генетичного алгоритму типу NSGA-III було отримано множину Парето-оптимальних рішень, яка представлена на рисунку 7. На рисунку 6 наведений результат ранжіювання популяції рішень у ході виконання алгоритму NSGA-III.

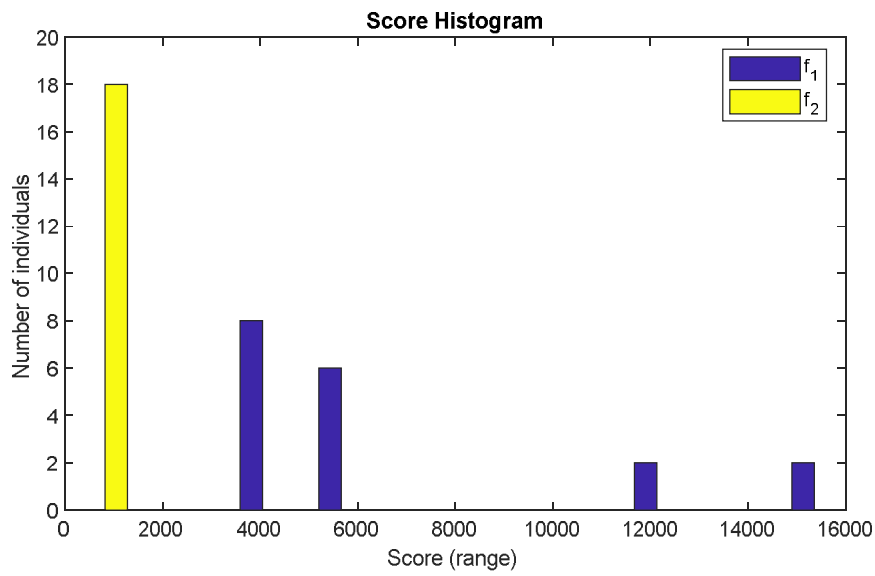


Рисунок 6 – Результат ранжіювання популяції рішень за значеннями компонентів цільових векторів у ході виконання алгоритму NSGA-III

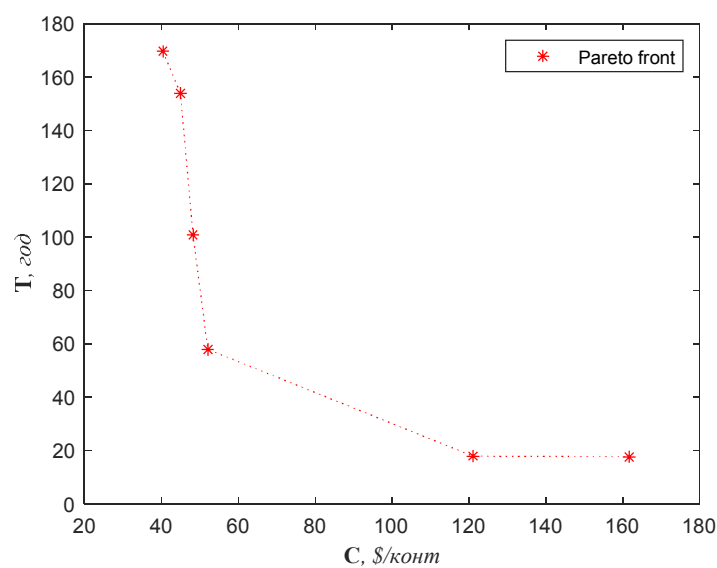


Рисунок 7 – Множина рішень Парето-фронт, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

Таким чином, множина Парето-оптимальних рішень включає шість цільових векторів (рис. 7). На рисунку 8 наведено множину маршрутів, які відповідають даним цільовим векторам.

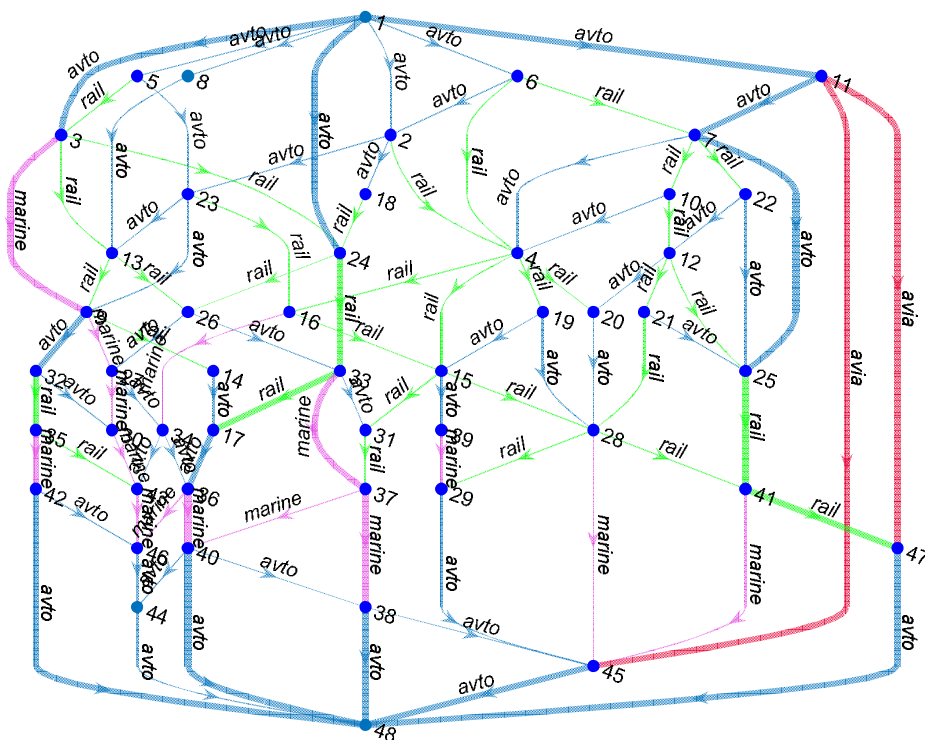


Рисунок 8 – Множина рішень Парето-фронту, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

Отже, Парето-фронт представляє собою множину недомінованих цільових векторів, кожен з яких є кращим за інші за значенням хоча б однієї цільової функції. Таким чином, кожен із представлених маршрутів є кращим за хоча б один інший маршрут, що відповідає цільовому вектору отриманої множини Парето, або за критерієм вартості перевезення або за критерієм терміну доставки [15].

Так, виділення із цієї множини єдиного рішення, яке максимально задовольняє всім технічним вимогам представляє окрему задачу, яка іноді також може представляти значну складність. Ключовим моментом для вирішення цієї задачі є вибір методу, який найкращим чином враховує всі чинники, які є важливими при прийнятті даного рішення.

Існують методи, які не потребують додаткової інформації, як, наприклад, метод граничної корисності (англ. marginal utility method). Однак при виборі маршруту необхідно враховувати вимоги вантажовідправника щодо терміну доставки та вартості перевезення. У зв'язку з цим значний інтерес представляє так званий метод зважених стрес-функцій (англ. Weighted Stress Function Method, WSFM). Його основними перевагами є: орієнтованість на багатокритеріальний вибір із можливістю врахування ступеня важливості кожного критерію, а також врахування значення ідеального вектора при здійсненні вибору [15].

Даний метод був інспірований поведінкою пластичних матеріалів певного класу, таких як термопластичні вулканізати. Ці матеріали є особливою групою термопластичних еластомерів, які мають цікаві механічні властивості. Стрес і напруження – це два різні, але тісно пов'язані між собою поняття. Стрес визначається як сила, що припадає на одиницю площі, яка може викликати зміну предмету або фізичного тіла. Напруження визначається як величина деформації, яку може зазнати матеріал внаслідок застосування стресу. Зв'язок між стресом і напруженням, яку демонструє конкретний матеріал, відображається кривою напруження та деформації [15].

Даний метод побудований на аналогії із стресово-деформаційною поведінкою матеріалу. Таким чином, стрес визначається як різниця між ідеальною точкою і цільовим вектором (рис. 9). Величина стресу також залежить від ваги критерію.

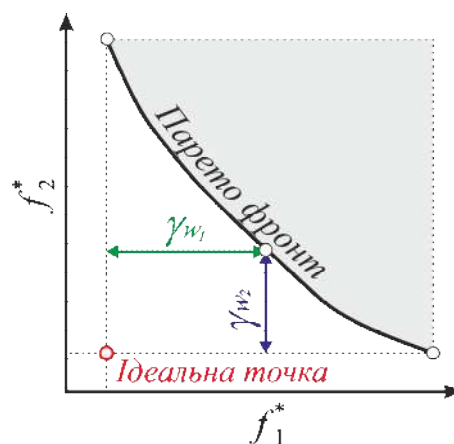


Рисунок 9 – Визначення стрес функції

Отже, величина стресу залежить від ваг, які асоціюються із кожним критерієм, тобто компонентом цільового вектора. Таким чином, вага, що відповідає певному критерію є аналогом параметра еластичності матеріалу за певним напрямком дії зусилля (стресу). Оптимальному рішенню відповідає цільовий вектор, який провокує мінімальний рівень стресу. Обчислення величин стрес-функцій базується на значеннях цільових векторів, але для цього значення цільових функцій потребують нормалізації таким чином, щоб вони належали числовому інтервалу $[0,1]$. Нормалізоване значення цільової функції можна отримати за наступною формулою [9]:

$$f_{ij}^* = \frac{f_{ij} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad (22)$$

де f_{ij} – значення i -ї цільової функції j -ї цільового вектора Парето-фронту; f_i^{\min} , f_i^{\max} – мінімальне і максимальне значення i -ї цільової функції по всій множині точок Парето-фронту.

Відповідне значення стрес-функції можна обчислити за наступною формулою:

$$\gamma_{ij}(f_{ij}^*, w_i) = 1 + \alpha_{ij}(f_{ij}^*, w_i) \beta_i(w_i), \quad (23)$$

де $\alpha_{ij}(f_{ij}^*, w_i)$ і $\beta_i(w_i)$ – коефіцієнти еластичності, що відповідають компонентам цільових векторів та обраним вагам.

Другий коефіцієнт розраховується за формулою [16]:

$$\beta_i(w_i) = 1 - \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(2w_i - 1)}{2(1 + \delta_2)}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2(1 + \delta_2)}\right)}, \quad (24)$$

де δ_2 – параметр, значення якого приймаємо на рівні $\delta_2 = 0,008$, як найкраще значення, яке було встановлене досвідним шляхом [17].

Перший коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$\alpha_{ij}(f_{ij}^*, w_i) = \begin{cases} S \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(f_{ij}^* - w_i)}{\psi_i(w_i)}\right) \psi_i(w_i)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi w_i}{\phi_i(w_i)} - \delta_1\right) \phi_i(w_i)}, & f_{ij}^* \geq w_i \\ \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(f_{ij}^* - w_i)}{\phi_i(w_i)}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi w_i}{\phi_i(w_i)}\right)}, & f_i < w_i \end{cases}, \quad (25)$$

де додаткові коефіцієнти визначаються як $\psi(w_i) = \frac{3}{4} w_i^2 + 2(1 - w_i) + \delta_1$ та $\phi(w_i) = \frac{3}{4} w_i^2 + w_i + \delta_1$; δ_1 – додатковий параметр, який використовується для відлаштування від зони, що наближена до асимптоти; S – корегуючий коефіцієнт, який застосовано для забезпечення плавності при сполученні двох частин кривої [15].

Слід зазначити, що у [16] наведено формулу без корегуючого коефіцієнту, що робить її непридатною для практичного застосування, у [17] наведено значення $\delta_1 = 0,002$, як найкраще значення, встановлене досвідним шляхом. Однак, при даному значенні мають місце значні викривлення форм кривих, що призводить до втрати сенсу застосування даного методу [15]. Досвідним шляхом було встановлено, що значення параметру δ_1 , при яких дані викривлення відсутні, знаходиться у межах $0,33 < \delta_1 < 0,88$. При здійсненні розрахунків значення параметру було прийняте на рівні $\delta_1 = 0,5$. Також слід зазначити, що значення корегуючого коефіцієнту S залежить від значень параметрів δ_1 та w_i . При

здійсненні розрахунків застосовувався наступний вигляд залежності

$$s(w_i, \delta_i) = 0,4 \left(\frac{w_i}{\delta_i} \right)^{0,1w_i\delta_i}.$$

Отже, цільовий вектор множини Парето і відповідні йому значення керуючої змінної t_0 та керуючого змінного вектору X , що відповідають оптимальному рішенню, повинні також відповідати мінімуму наступної цільової функції [15]:

$$Q(X_j, t_{0j}) = \left| \gamma_{1j} \left(f_{1j}^*(X_j, t_{0j}), w_1 \right) - \gamma_{2j} \left(f_{2j}^*(X_j, t_{0j}), w_2 \right) \right| \rightarrow \min. \quad (26)$$

За методом зваженої стрес-функції були проведені розрахунки. Величини вагових коефіцієнтів, що відображають рівень значущості критеріїв були прийняті наступні: $w_1 = 0,6$, $w_2 = 0,4$. Результати яких були зведені в таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків щодо визначення оптимального маршруту інтермодального контейнерного перевезення

№	Маршрут	Загальна відстань	$C(x)$, $\{f_1(x)\}$, \$/конт	$T(x)$, $\{f_2(x)\}$, год	$f_1^*(x)$	$f_2^*(x)$	$Q(x)$
1	1,24,33,37,38,48	4604	4036,36	169,57	0	1	0,981615
2	1,3,9,32,35,42,48	4116	4492,69	153,88	0,0376	0,8967	0,430953
3	1,24,33,17,36,40,48	2964	4818,74	100,81	0,0645	0,5476	0,395761
4	1,11,7,25,41,47,48	2407	5203,52	57,86	0,0962	0,265	6,906039
5	1,11,47,48	4147	12099,70	17,84	0,6648	0,0018	1,534167
6	1,11,45,48	4458	16166,13	17,57	1	0	17,35612

За результатами розрахунку оптимальний маршрут відповідає цільовому вектору №3, так як він має мінімальне значення функції Q . На рисунку 10 наведена Парето-фронт та показана відстань між точкою рішення та ідеальною точкою. На рисунку 11 оптимальний показаний маршрут на графі транспортної мережі.

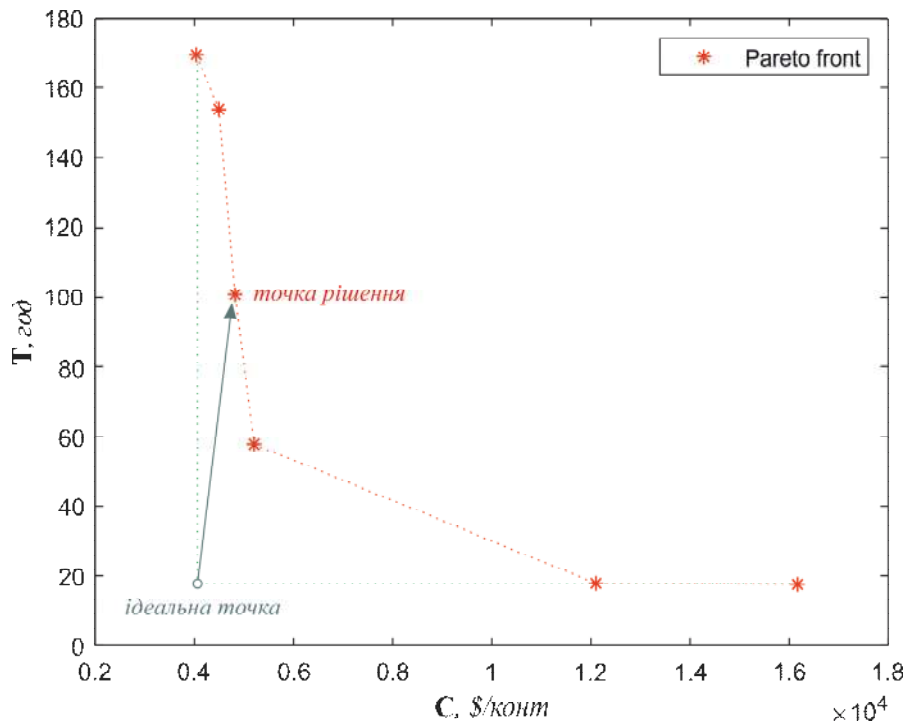


Рисунок 10 – Відстань між точкою рішення та ідеальною точкою

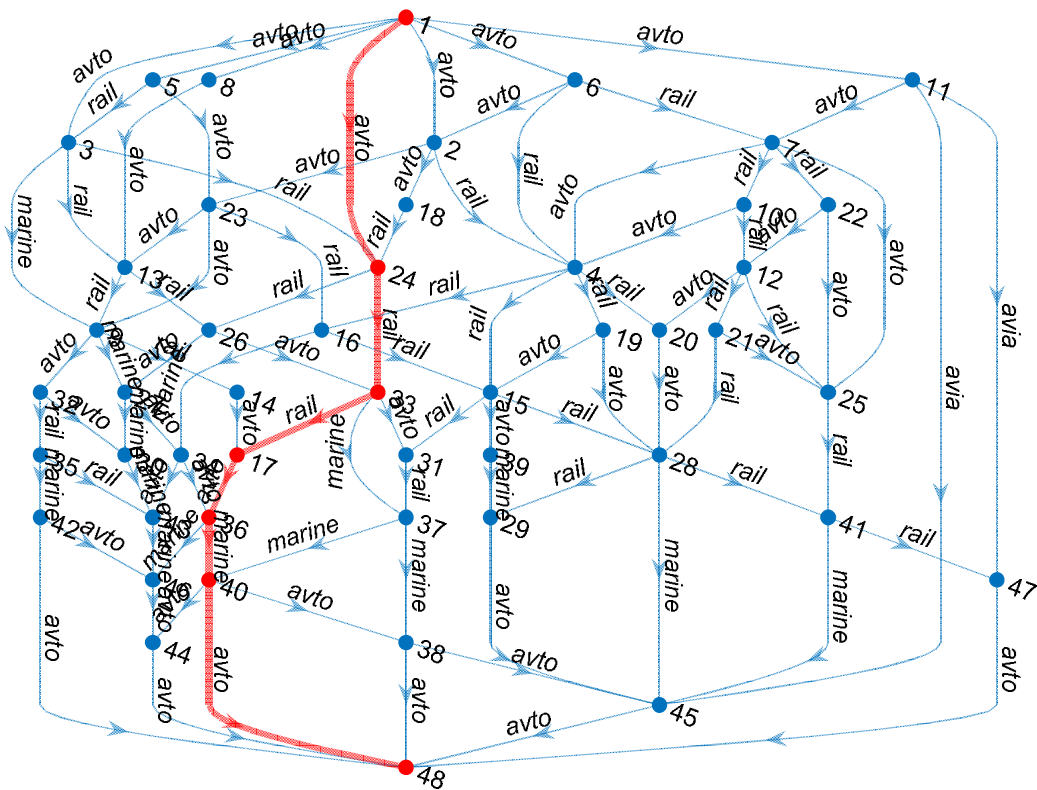


Рисунок 11 – Оптимальний маршрут інтермодального контейнерного перевезення на графі транспортної мережі

За результатами розрахунку довжина маршруту склала 2964 км, тривалість маршруту – 100,81 годин, а вартість перевезення одного контейнера склала 4818,74 доларів США.

Дана технологія забезпечить скорочення витрат інтермодальних операторів в середньому на 8% за умови її застосування на складних транспортних мережах та до 50% скорочення тривалості перевезення у порівнянні із традиційною технологією планування [15].

У результаті дослідження було встановлено, що розроблена математична модель, яка складається із двох цільових функцій та системи обмежень, дозволяє адекватно відтворювати процес планування інтермодальних перевезень, використовуючи у якості вихідних даних графові структури великої розмірності та всю необхідну додаткову інформацію [15].

Результати моделювання підтверджують, що математична модель та розроблений метод її оптимізації, який полягає у послідовному використанні спеціалізованих засобів математичного апарату, дозволяють досягати поставленої мети і є раціональним вибором у якості основи автоматизованої технології планування інтермодальних перевезень [15].

Так, формується критерій вибору транспортної системи на основі кваліметричної оцінки, яка враховує обсяги перевезень вантажів, швидкість доставки вантажів та дальність маршруту. На основі методів генетичних алгоритмів моделюється оптимальний маршрут доставки вантажів, обирається вид транспорту та визначається взаємодія видів транспорту.

Розвиток інтермодальних перевезень набуває актуальності ще й у зв'язку із розширенням Укрзалізницею географії міжнародних контейнерних перевезень, так Укрзалізниця та DHL Global Forwarding домовились розвивати контейнерні залізничні перевезення у напрямку Китай–Європа та планують запроваджувати нові міжнародні маршрути.

Таким чином, реалізація покращення якості управління перевезень передбачає визначення оптимального маршруту доставки вантажів, пошук оптимальної взаємодії видів транспорту при

здійсненні, зокрема, інтермодальних перевезень. Отримана процедура оцінки якості управління перевезень може доповнювати традиційні підходи до формування транспортних технологій, в тому числі, з появою нових транспортних засобів. Розроблена процедура оцінки транспортних технологій може бути використана для недискримінаційного доступу до інфраструктури.

Злагоджена та узгоджена робота всіх задіяних видів транспорту дозволить підвищити якість транспортних послуг, зменшити термін доставки та збільшити рівень довіри до всього транспортного комплексу України в цілому.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Інформація про Українські залізниці. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zalznici.html>.
- [2] Публікація документів Державної Служби Статистики України, Держстат України, 1998-2020. URL: <http://ukrstat.org/>.
- [3] А. М. Котенко, О. С. Крашенінін, О. О. Шапатіна, "Вибір кількості типів технічних залізничних засобів для інтермодальних перевезень", *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 2014, Вип. 24, с. 202–207.
- [4] A. Krashenin, O. Shapatina, V. Ponomarenko, "Estimation of vehicle operating time taking into account the influence of a number of factors", *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*, 2021, Вип. 37, с. 76–85, doi:10.32703/2617-9040-2021-37-9.
- [5] О. С. Крашенінін, О. О. Шапатіна, "Визначення ефективності перевезень різними транспортними засобами", *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2021, Вип. 2, с. 3–8, doi: 10.18664/ikszt.v26i2.235237.
- [6] О. О. Шапатіна, "Формування автоматизованої технології управління інтермодальними перевезеннями": автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2020. 21 с.
- [7] О. С. Крашенінін, О. О. Шапатіна, "Вибір виду транспортного забезпечення на основі положень теорії нечітких множин", *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. Збірник наукових праць*, 2016, Вип. 2(55), с. 101–113.
- [8] S. Panchenko, O. Lavrukhin, O. Shapatina, "Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle", *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2017, Vol. 1, № 3(85), pp. 39–45, doi: 10.15587/1729-4061.2017.92203.
- [9] Т. В. Бутько, О. М. Костенніков, В. М. Прохоров, О. О. Шапатіна, "Розробка автоматизованої технології планування інтермодальних

перевезень на основі векторної оптимізації", *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2019, Вип. 188, с. 71-85.

- [10] Ю. М. Андрианов, М. В. Лопатин, Квалиметрические аспекты управления качеством новой техники, ЛГУ, 1983, 288 с.
- [11] А. Дешковский, Ю. Койфман, "Метод размерностей в решении задач", *ФПВ*, 2002, Вип. 2, с. 71–81.
- [12] Перевезення контейнерів територією України у 2020 році зросли майже на 11%. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/532811/.
- [13] Укрзалізниця з початку 2021 року прийняла 4 контейнерні поїзди з Китаю до України. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-10/536547/.
- [14] О. М. Костенніков, О. О. Шапатіна, А. Л. Кравець, К. В. Кім, "Пропозиції щодо підвищення якості транспортних послуг за рахунок удосконалення технології інтермодальних перевезень", *Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей I Міжнар. наук.-техн. конф.*, Трускавець-Харків, 24-30 січня 2020 р., УкрДУЗТ, 2020, с. 62-63.
- [15] О. О. Шапатіна, "Формування автоматизованої технології управління інтермодальними перевезеннями": дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2020. 203 с.
- [16] R. Denysiuk, A. Gaspar-Cunha, "Weighted Stress Function Method for Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition", *Proceedings of 9th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2017)*, Münster, Germany, March 19-22, 2017, pp. 176–190.
- [17] J. C. Ferreira, C. M. Fonseca, A. Gaspar-Cunha, "Methodology to select solutions from the pareto-optimal set: a comparative study". *Proceedings of 9th Annual Conference on Genetic on Evolutionary Computation (GECCO 2007)*, ACM, New York, pp. 789–796.