

УДК 656.2

**РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАНУВАННЯ
ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ОСНОВІ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Д-р техн. наук Т. В. Бутько, кандидати техн. наук О. М. Костєнніков, В. М. Прохоров,
асист. О. О. Шапатіна

**DEVELOPMENT OF AUTOMATED TECHNOLOGY FOR PLANNING OF
INTERMODAL TRANSPORTATIONS ON THE BASIS OF MULTI-OBJECTIVE
OPTIMIZATION**

**D. Sc. (Tech.) T. Butko, PhD (Tech.) O. Kostienikov, PhD (Tech.) V. Prokhorov,
O. Shapatina**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206202>

Підвищення якості планування інтермодальних перевезень – одне з основних завдань не лише на шляху розвитку експортного і транзитного потенціалу України, але також є не менш важливим для підвищення конкурентоспроможності системи вантажних залізничних перевезень в державі. Але щоб інтермодальні оператори та разом із ними і вантажовідправники змогли скористатися всіма перевагами залізничного транспорту, необхідне впровадження сучасної технології планування інтермодальних перевезень. Дана технологія має забезпечувати урахування можливих затримок у пунктах зміни виду транспорту та на лініях в динаміці, залежно від моменту часу прибуття вантажу до даного пункту маршруту, а також визначати оптимальний маршрут не лише за критерієм витрат, але й за критерієм тривалості перевезення. Для вирішення цього завдання було розроблено багатоцільову математичну модель і запропоновано оригінальний метод її оптимізації.

Ключові слова: інтермодальні контейнерні перевезення, генетичний алгоритм, метод зваженої стрес-функції.

Improving the quality of intermodal transportation planning is one of the main tasks not only in the way of development of export and transit potential of Ukraine, but it is also equally important for improving the competitiveness of the freight rail transportation system in the country. This fact is due to the fact that Ukraine has a large area and at the same time developed railway infrastructure, and therefore the rail transport is one of the most likely candidates for the choice of

a container for land transportation, and also the railway tariffs are much lower than the automobile ones. A significant drawback of rail transport compared to road transport is the possibility of long delays in trains and container overloading points. Therefore, in order for intermodal operators and, together with them, consignors to be able to take full advantage of rail transport, it is necessary to introduce modern intermodal transportation planning technology. One of the important tasks that must be solved with the introduction of this technology is the ability to route the route based on the time domain. This operational scheduling technology should allow for possible delays at the points of change of transport and on lines in the dynamics, depending on the time of arrival of the cargo to this point of the route. In addition, this technology should allow to determine the optimal not only on the criterion of cost, but also the criterion of the duration of transportation. This condition is important to ensure a modern level of customer service. To solve this problem, a multipurpose mathematical model was developed and an original method of its optimization was proposed, which involves the use of a special genetic algorithm to find the set of Pareto-optimal solutions and the weighted stress function method to identify a single final solution. According to the results of modeling, which was carried out using specially developed software, this model and method was proposed as a basis for the formation of automated technology for planning intermodal transportation.

Keywords: *intermodal container transportation, genetic algorithm, weighted stress function method.*

Вступ. Контейнерні перевезення є основним компонентом інтермодальних перевезень та міжнародної торгівлі. Інтермодальні перевезення здійснюються з залученням двох або більше видів транспорту. Їх специфіка полягає також і в тому, що вантаж протягом всього шляху знаходиться у складі однієї і тієї самої транспортної одиниці, наприклад, контейнера, а перевезення здійснюється за єдиним транспортним документом та під контролем єдиного оператора. За таких умов вантажовідправник не повинен укладати окремих договорів із транспортними підприємствами та особисто контролювати всі ланки перевезення, наприклад, складні процеси перевантаження контейнерів, узгодження розкладів тощо. Така зручність є важливим фактором, який забезпечує даному виду перевезень постійний приплив нових клієнтів, особливо зважаючи на те, що оператори також здійснюють контроль митних операцій при перетині міждержавних кордонів. Інтермодальні перевезення є також «рятувальним кругом» і 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. Одним з першочергових завдань є завдання оперативного планування перевезення, в результаті вирішення якого буде визначатись маршрут з урахуванням не лише довжини сегментів, що відповідають різним видам транспорту, а й фактора часу. Мета застосування даного підходу полягає у забезпеченні підвищення точності урахування часів затримок під час передачі вантажу від одного транспортного підприємства до іншого, а також забезпеченні можливості одночасного урахування вимог клієнта щодо вартості перевезення та терміну доставки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття [1] присвячена вирішенню завдання визначення маршруту інтермодальних перевезень вантажів. Автор справедливо наголошує на необхідності врахування при його вирішенні декількох критеріїв. Далі, зазначаючи, що у такій

постановці дане завдання з точки зору обчислювальної складності є NP-важким, ним застосовуються методи декомпозиції для розбиття цього завдання на декілька підзавдань. Однак такий підхід нівелює сенс багатоцільової оптимізації. У роботі [2] вирішується завдання визначення маршруту контейнерних перевезень на основі одночасної оптимізації витрат вузлових і лінійних інтермодальних операторів, однак критерій тривалості перевезення не враховано. У статті [3] досліджується вплив тарифів залізничних компаній на конкурентоспроможність маршрутів інтермодальних перевезень, але жодної математичної моделі не запропоновано. У роботі [4] визначаються методи оцінювання і стратегічного вибору маршрутів інтермодальних перевезень із залученням залізничного транспорту в напрямку Китай–Європа за критерієм впливу на навколишнє середовище з огляду на обсяг викидів вуглекислого газу, але критерію часу доставки вантажів не приділено уваги. У статті [5] запропоновано модель для підвищення комерційної ефективності використання маршрутів інтермодальних контейнерних

перевезень із застосуванням залізничного і морського транспорту за рахунок введення тристадійної схеми продажу вільних слотів, однак модель не враховує імовірнісну природу попиту на перевезення. У роботі [6] запропоновано однокритеріальну модель вибору маршруту інтермодальних перевезень із залученням залізничних і морських перевізників на основі критерію витрати палива, однак інші важливі критерії таких перевезень залишилися поза увагою.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення моделі планування інтермодальних контейнерних перевезень, яка спрямована на максимальне задоволення вимог вантажовідправників за рахунок одночасного врахування при визначенні маршруту таких параметрів перевезення, як вартість транспортування і термін доставки вантажу.

Основна частина дослідження. Одним із критеріїв при плануванні інтермодального перевезення є його вартість. Цільову функцію доцільно сформулювати у вигляді витрат, які припадають на один контейнер:

$$C(X, t_0) = \left(e_{\text{док}} + n \sum_{i=1}^{\#X} \left(L_{x_i} e_{x_i} + (e_{x_i}^{\delta_1} + e_{x_i}^{\delta_2}) + \theta \left(|m_{x_i} - m_{x_{i+1}}| \right) \left(e_{s_{x_i}^{\text{кінц}}, s_{x_{i+1}}^{\text{поч}}} + \left(e_{s_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{скл}} + \chi e_{s_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{ох}}} \right) \tau_{s_{x_i}^{\text{кінц}}, s_{x_{i+1}}^{\text{поч}}}^{\text{пер}}(t_0) \right) \right) \right) / n \rightarrow \min, \quad (1)$$

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-футових контейнерів (TEU); $\#X$ – потужність множини елементів змінного вектора X ; L_{x_i} – довжина дільниці маршруту, що відповідає

i -му елементу множини x ; e_{x_i} – питомі витрати на переміщення контейнера на дільниці, що відповідає дузі x_i ; $e_{x_i}^{\delta_1}$ – додаткові витрати на дузі x_i , що пов'язані з вантажем (плата за додаткове кріплення, плата за перевантаження тощо); $e_{x_i}^{\delta_2}$ –

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; $e_{s_{x_{i+1}}^{поч}}^{ох}$ – питома вартість охорони контейнера на складі терміналу, який розташований на початковій вершині дуги X_{i+1} , під час очікування; \mathcal{X} – 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 таким чином:

$$\theta(x) = \begin{cases} -1, & \text{якщо } x < 0 \\ 0, & \text{якщо } x \leq 0 \\ 1, & \text{якщо } x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Ще одним важливим критерієм є час доставки вантажу. Його можна подати у вигляді цільової функції

$$T(X, t_0) = \sum_{i=1}^{\#X} \left(\frac{L_{x_i}}{V_{x_i}} k_{x_i}^{zam}(t_0) + \tau_{s_{x_i}^{кінц}, s_{x_{i+1}}^{поч}}^{nep}(t_0) \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

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 .

До того ж для отримання адекватного рішення на керуючі змінні моделі накладаються певні обмеження:

$$\begin{cases} t^{лм} \leq t_0 \leq t^{нм} \\ s_{x_i}^{кінц} = s_{x_{i+1}}^{поч}, & i = 1, 2, \dots, \#X \\ s_{x_1}^{поч} = s^{поч} \\ s_{x_{\#X}}^{кінц} = s^{кінц} \\ n \leq w_{x_i}(t_0), & i = 1, 2, \dots, \#X \end{cases}, \quad (4)$$

де $t^{лм}$ та $t^{нм}$ – ліва та права межі інтервалу можливого початку реалізації маршруту, визначені вантажовідправником; $s^{поч}$ та $s^{кінц}$ – номери вершин графа транспортної мережі, які відповідають

початковому і кінцевому пунктам маршруту відповідно; $S_{x_i}^{кінц}$ та $S_{x_{i+1}}^{поч}$ – номер кінцевої вершини дуги x_i та номер початкової вершини дуги x_{i+1} відповідно; $S_{x_1}^{поч}$ та $S_{x_{\#X}}^{кінц}$ – номер початкової вершини першої дуги маршруту та номер кінцевої вершини останньої дуги маршруту відповідно; $w_{x_i}(t_0)$ – кількість вільних контейнеро-місць (слотів на борту контейнеровоза або фітінгових платформ для навантаження контейнерів) на момент початку переміщення вантажу по дузі x_i залежно від моменту початку реалізації маршруту t_0 .

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 як початковий і кінцевий пункти переміщення вантажу. П'яте обмеження забезпечує вибір лише тих маршрутів, які забезпечують наявність достатньої кількості вільних контейнеро-місць для забезпечення можливості переміщення партії вантажу в повному обсязі по всіх ділянках маршруту.

Таким чином, у такій постановці завдання вибору оптимального плану мультимодального перевезення є завданням багатоцільової або векторної оптимізації.

Вирішення завдань векторної оптимізації є не лише концептуально, але й технічно більш складним процесом у порівнянні із завданнями, 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, вирішення завдання може бути лише компромісним, тобто таким, яке задовольняє певні вимоги або співвідношення між критеріями, або прагне до певного рівня балансу.

Отже, існує ціла множина «кращих» рішень, яка має назву множини Парето або Парето-фронт. Першим кроком вирішення такого завдання є відшукання по всій області можливих рішень множини рішень, що відповідають Парето-фронт. В цьому полягає технічна складність вирішення даного завдання, адже пошук множини точок Парето-фронт може в свою чергу являти собою значну обчислювальну складність, яка може зростати із більш ніж експоненційною швидкістю в порівнянні з лінійною швидкістю збільшення розмірності завдання.

З метою подолання цих труднощів запропоновано використання спеціального евристичного оптимізаційного алгоритму NSGA-III. Цей алгоритм відноситься до класу генетичних алгоритмів, тобто алгоритмів, які базуються на принципах збереження та покращення генофонду у живій природі. Даний алгоритм був спеціально розроблений для вирішення завдань багатоцільової оптимізації. Він створений у результаті подальшого розвитку алгоритму NSGA-II, і його основною відмінністю є новий механізм контролю локальної скупченості множини Парето-фронт, а саме оцінювання відстані скупченості було замінено оцінюванням щільності, яка визначається за допомогою опорних точок.

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 являє собою

вектор змінних, який в термінології генетичних алгоритмів має назву «хромосома», а елемент вектора - «геном». 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 з 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 як нова популяція $P = \bar{P}$, і якщо умови зупинення роботи алгоритму не досягнуті (крок 7), то 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 перпендикуляра, опущеного на пряму, яка проходить через точку початку координат і відповідну опорну точку (рис. 1).

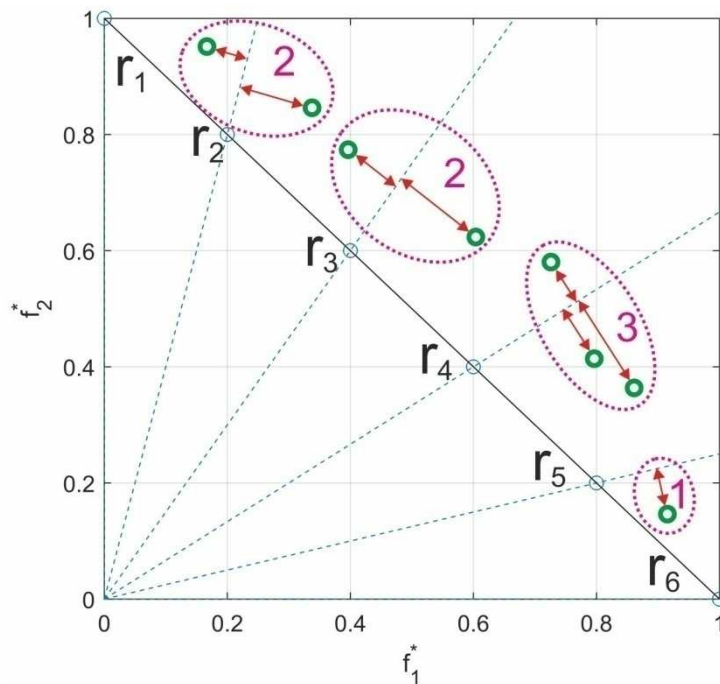


Рис. 1. Визначення величини щільності опорних точок

Таким чином, кількість точок рішень, які асоціюються з даною опорною точкою, називається її величиною щільності (рис. 1). 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 з найменшою величиною щільності до тих пір, поки чисельність популяції P не зрівняється з N . На цьому кроці алгоритм виконує перевірку критеріїв зупинки, і якщо хоч один із них досягнуто, відбувається зупинка алгоритму і видача результату його роботи у вигляді Парето-фронт, який представлений фронтом F_1 . Всі інші фронти відкидаються через те, 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.

На основі сформованої моделі було створено програмне забезпечення у середовищі Matlab. Як вихідні дані була використана абстрактна транспортна мережа, яка містить ділянки шляху, що відповідають чотирьом типам сполучення: автомобільному, залізничному, морському й авіаційному. Дана мережа подана орієнтованим графом, який наведено на рис. 2.

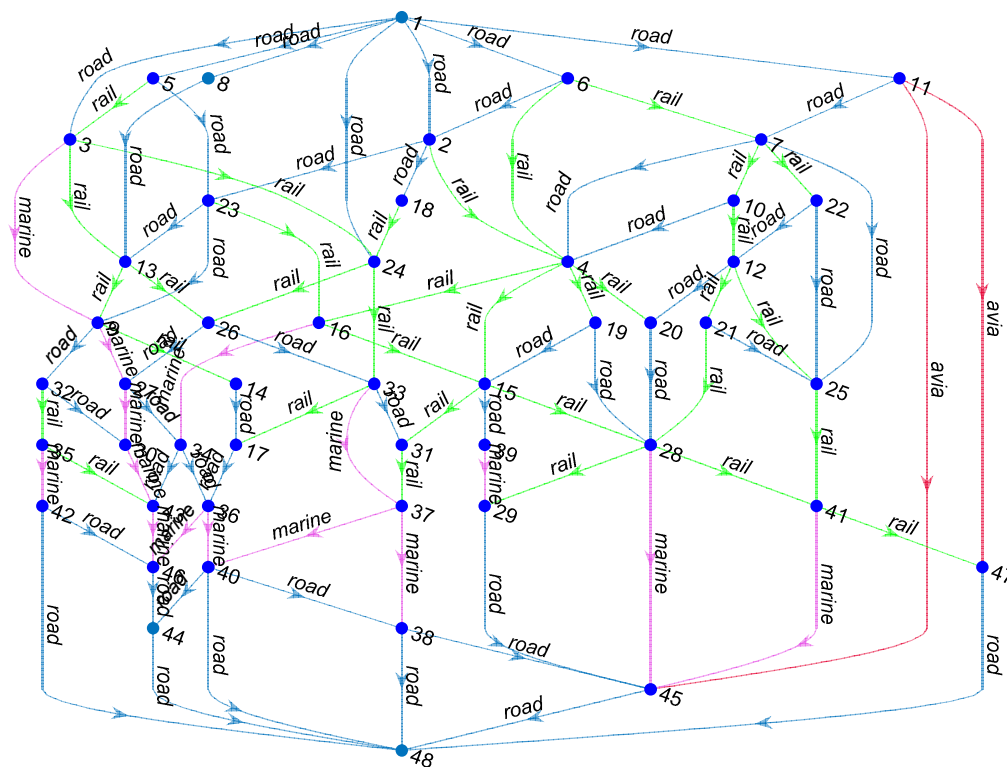


Рис. 2. Орграф транспортної мережі у завданні планування інтермодальних контейнерних перевезень

Параметрами дуги графа є вид сполучення, відстань, швидкість переміщення і вартість перевезення одного контейнера типу TEU на 1 км. У кожній вершині графа також визначені вартості перевантаження з одного виду транспорту

на інший, що відповідають парам дуг, одна з яких представляє ділянку маршруту, по якій вантаж прибуває до даного пункту, друга дуга – 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.

Із застосуванням генетичного алгоритму типу NSGA-III було отримано

множину Парето-оптимальних рішень, яка подана на рис. 3. На рис. 4 наведено результат ранжування популяції рішень у ході виконання алгоритму NSGA-III.

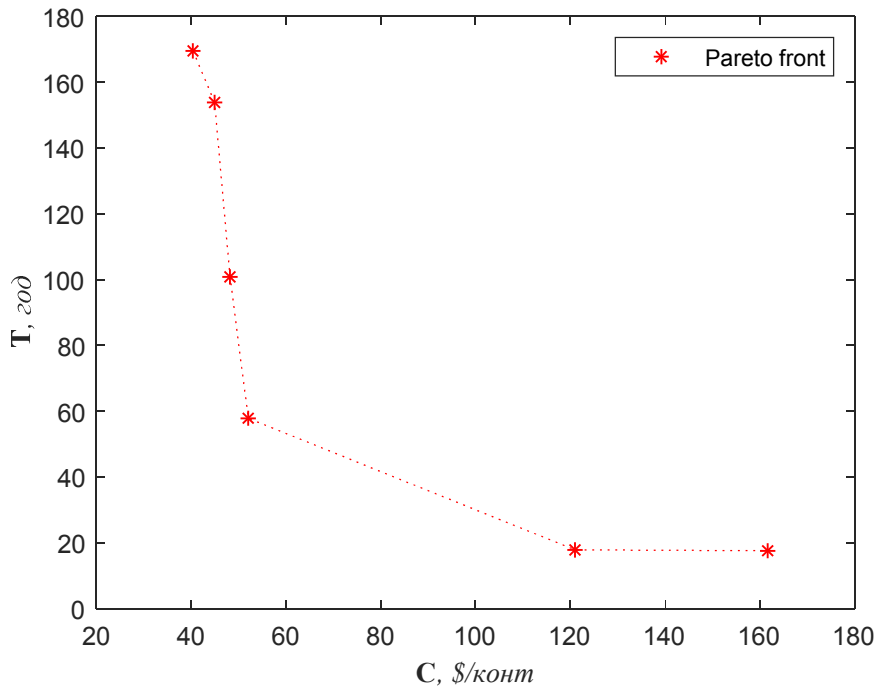


Рис. 3. Множина рішень Парето-фронту, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

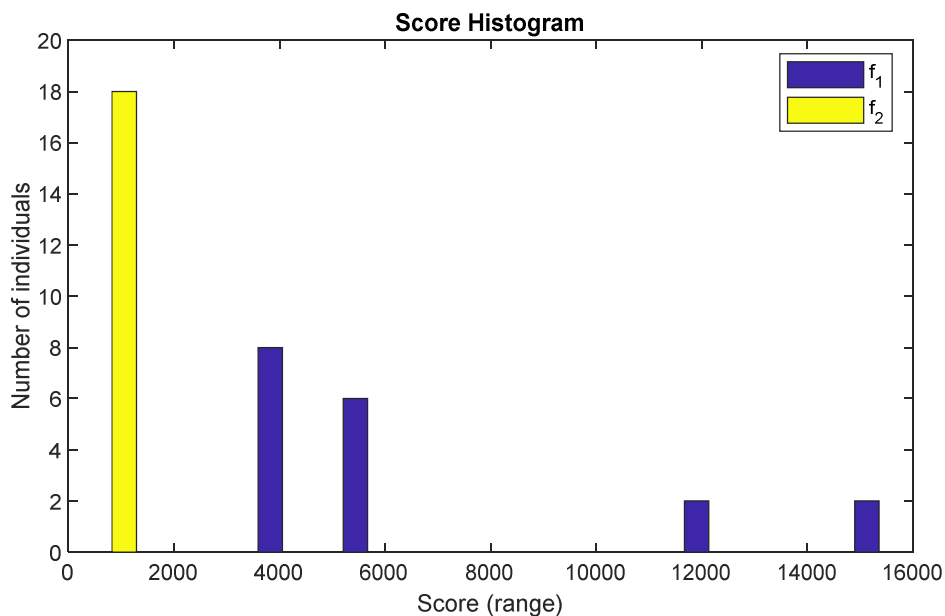


Рис. 4. Результат ранжування популяції рішень за значеннями компонентів цільових векторів у ході виконання алгоритму NSGA-III

Таким чином, множина Парето-оптимальних рішень включає шість цільових векторів (рис. 3). На рис. 5

наведено множину маршрутів, які відповідають даним цільовим векторам.

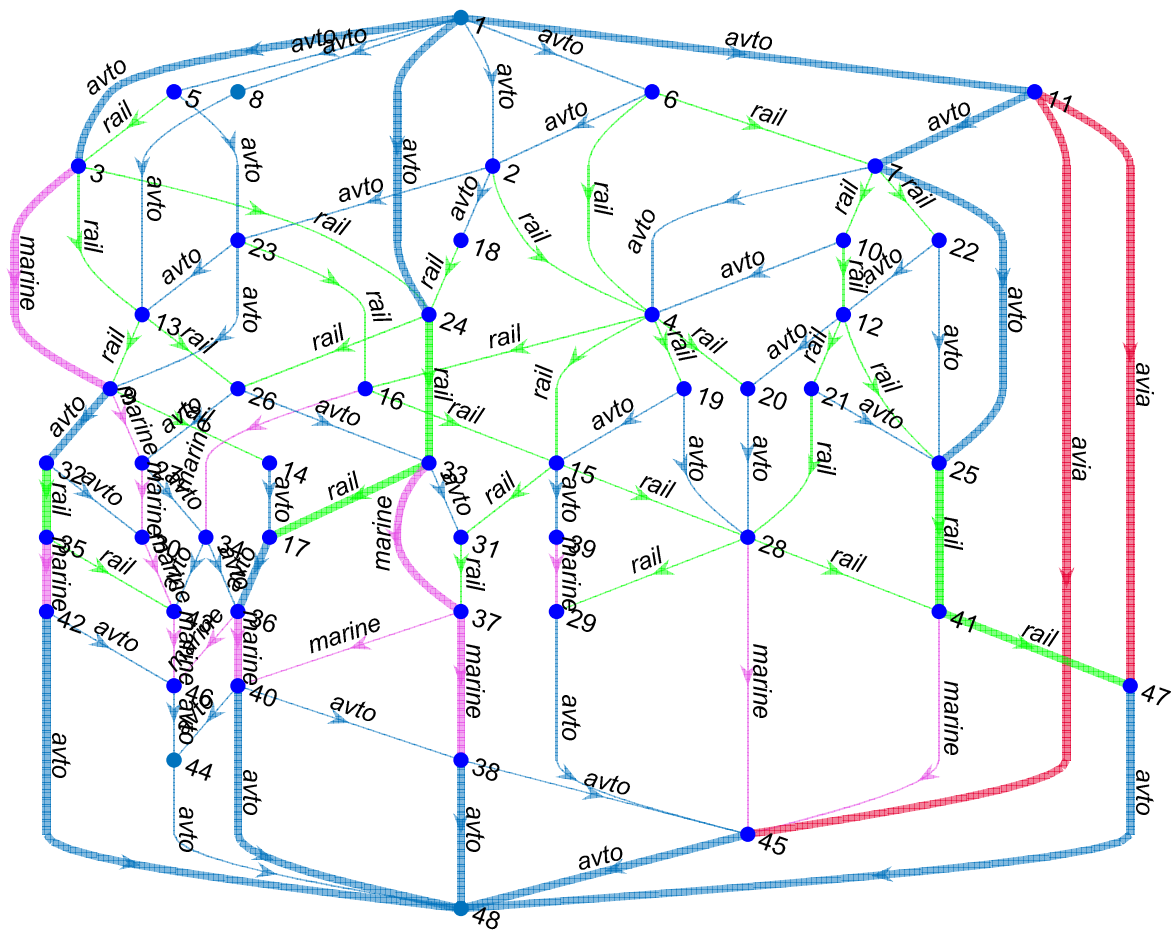


Рис. 5. Множина рішень Парето-фронту, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

Парето-фронт являє собою множину недомінованих цільових векторів, кожен з яких є кращим за інші за значенням хоча б однієї цільової функції. Таким чином, кожен із поданих 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.

Отже, виділення з цієї множини єдиного рішення, яке максимально задовольняє всі технічні вимоги, є окремим завданням, що іноді також може мати

значну складність. Ключовим моментом для вирішення даного завдання є вибір методу, що найкращим чином враховує всі фактори, 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 має 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.

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 предмета або фізичного тіла. Напруження визначається як величина деформації, якої може зазнати матеріал внаслідок застосування стресу. Зв'язок між стресом і напруженням, який демонструє конкретний матеріал, відображується кривою напруження та деформації.

Цей метод побудовано на аналогії із стресово-деформаційною поведінкою матеріалу. Таким чином, стрес визначається як різниця між ідеальною точкою і цільовим вектором (рис. 6). Величина стресу також залежить від ваги критерію.

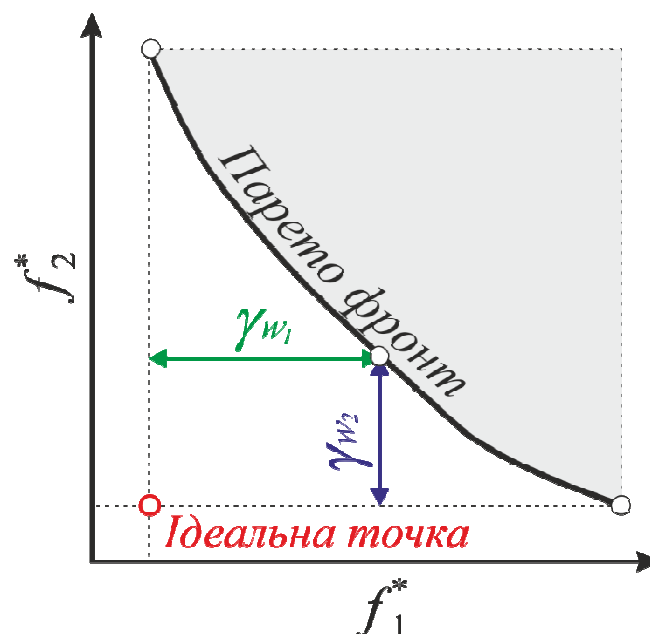


Рис. 6. Визначення стрес-функції

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 формулою

$$f_{ij}^* = \frac{f_{ij} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad (5)$$

де f_{ij} – значення i -ї цільової функції j -го 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 так:

$$\gamma_{ij}(f_{ij}^*, w_i) = 1 + \alpha_{ij}(f_{ij}^*, w_i) \beta_i(w_i), \quad (6)$$

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 [7]

$$\beta_i(w_i) = 1 - \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(2w_i - 1)}{2(1 + \delta_2)}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2(1 + \delta_2)}\right)}, \quad (7)$$

де δ_2 – параметр, значення якого приймаємо на рівні $\delta_2 = 0,008$, як найкраще значення, що було встановлене досвідним шляхом [8].

Перший коефіцієнт знаходимо за такою формулою:

$$\alpha_{ij}(f_{ij}^*, w_i) = \begin{cases} s \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(f_{ij}^* - w_i)}{\psi_i(w_i)}\right) \psi_i(w_i)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi w_i}{\phi_i(w_i)} - \delta_1\right) \phi_i(w_i)}, & f_{ij}^* \geq w_i \\ \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi(f_{ij}^* - w_i)}{\phi_i(w_i)}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi w_i}{\phi_i(w_i)}\right)}, & f_{ij}^* < w_i \end{cases}, \quad (8)$$

де додаткові коефіцієнти визначаються як

$$\psi(w_i) = \frac{3}{4} w_i^2 + 2(1 - w_i) + \delta_1 \quad \text{та}$$

$$\phi(w_i) = \frac{3}{4} w_i^2 + w_i + \delta_1;$$

δ_1 – додатковий параметр, який використовується для відлаштування від зони, що наближена до асимптоти;

S – коригуючий коефіцієнт, який застосовано для забезпечення плавності при сполученні двох частин кривої.

Слід зазначити, що у роботі [7] подано формулу без коригуючого коефіцієнта, що робить її непридатною для практичного застосування, у статті [8] 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. Досвідним шляхом було встановлено, що значення параметра δ_1 , при яких дані викривлення відсутні,

знаходиться у межах $0,33 < \delta_1 < 0,88$. При здійсненні розрахунків значення параметра було прийнято на рівні $\delta_1 = 0,5$.

Також потрібно виділити, що значення коригуючого коефіцієнта S залежить від значень параметрів δ_1 та w_i . При здійсненні розрахунків застосовувався

такий вигляд залежності:

$$s(w_i, \delta_1) = 0,4 \left(\frac{w_i}{\delta_1} \right)^{0,1w_i\delta_1}$$
 Номограма залежностей, яка розрахована із використанням вищенаведених формул, наведена на рис. 7.

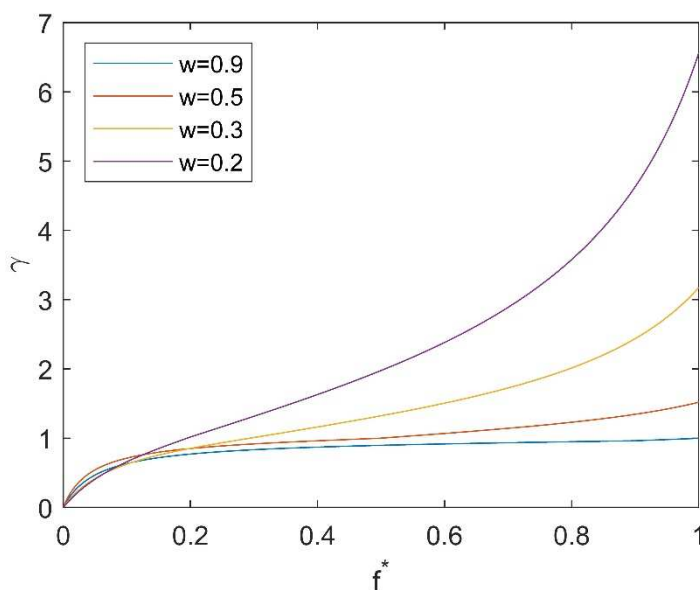


Рис. 7. Номограма взаємозалежності стрес-функції та значення нормалізованої цільової функції при різних значеннях вагового коефіцієнта

Дана номограма (рис. 7) є аналогом кривих напруження та деформації, де середня частина кривих представляє найбільш пластичну фазу деформації матеріалу.

Отже, цільовий вектор множини Парето і відповідні йому значення

керуючої змінної t_0 та керуючого змінного вектора X , що відповідають оптимальному рішенню, повинні також відповідати мінімуму такої цільової функції:

$$Q(X_j, t_{0j}) = \left| \gamma_{1j}(f_{1j}^*(X_j, t_{0j}), w_1) - \gamma_{2j}(f_{2j}^*(X_j, t_{0j}), w_2) \right| \rightarrow \min. \quad (9)$$

За методом зваженої стрес-функції були проведені розрахунки. Величини вагових коефіцієнтів, що відображують рівень значущості критеріїв, були прийняті

такі: $w_1 = 0,6$, $w_2 = 0,4$. Результати було зведено в таблицю.

Результати розрахунків щодо визначення оптимального маршруту інтермодального контейнерного перевезення

Номер	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, оскільки він має мінімальне значення функції Q . На рис. 8 наведено

Парето-фронт та показано відстань між точкою рішення та ідеальною точкою.

На рис. 9 показано оптимальний маршрут на графі транспортної мережі.

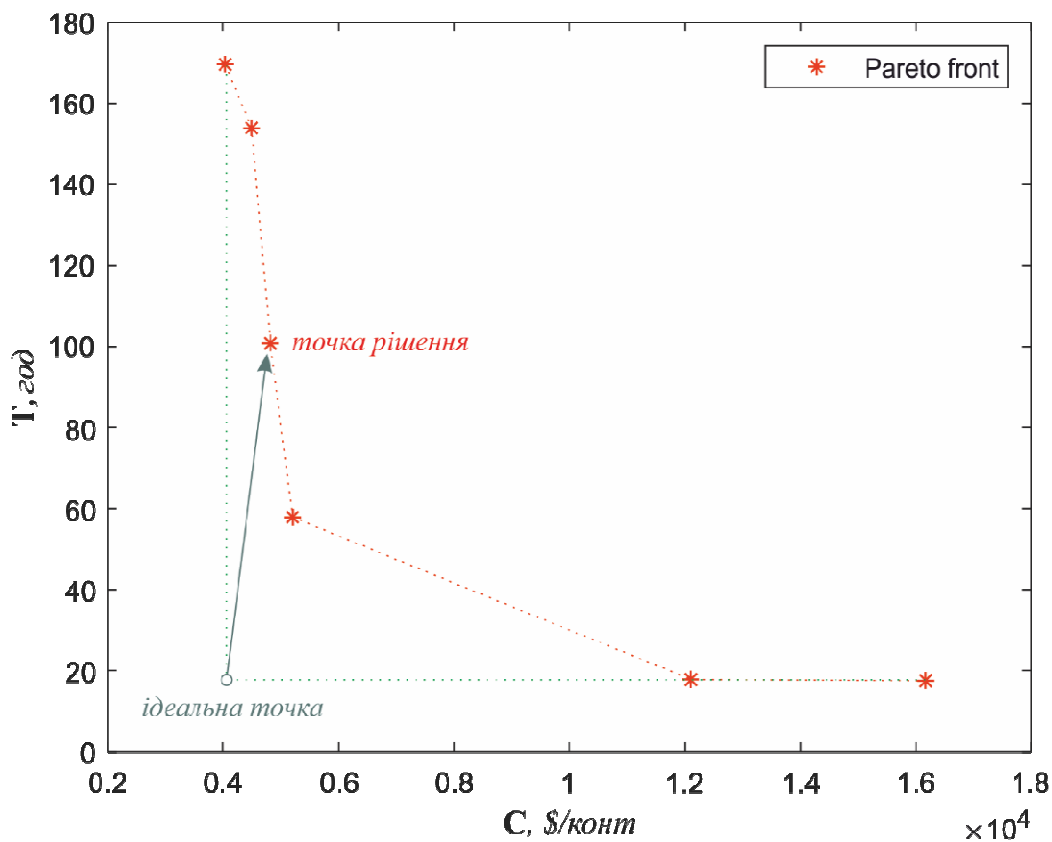


Рис. 8. Відстань між точкою рішення та ідеальною точкою

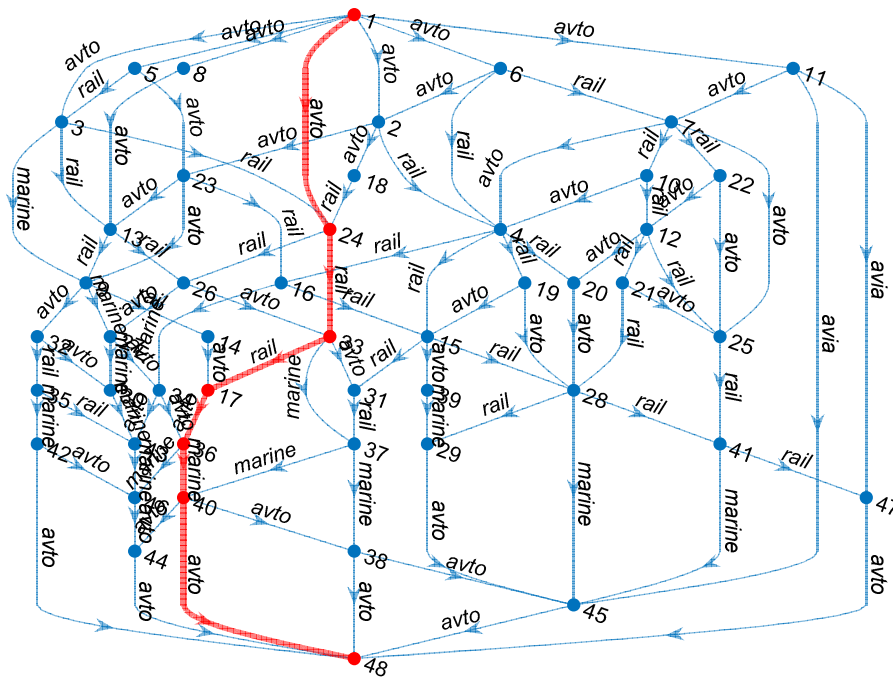


Рис. 9. Оптимальний маршрут інтермодального контейнерного перевезення на графі транспортної мережі

За результатами розрахунку, довжина маршруту склала 2964 км, тривалість маршруту – 100,81 год, а вартість перевезення одного контейнера – 4818,74 доларів США. За оцінками експертів та проведеними розрахунками, дана технологія забезпечить скорочення витрат інтермодальних операторів в середньому на 8 % за умови її застосування на складних транспортних мережах і до 50 % скорочення тривалості перевезення у порівнянні з традиційною технологією планування.

Висновки. У результаті дослідження було встановлено, що розроблена математична модель, яка складається з двох цільових функцій та системи обмежень, дозволяє адекватно відтворювати процес планування інтермодальних перевезень,

використовуючи як вихідні дані графові структури великої розмірності та всю необхідну додаткову інформацію. Результати моделювання підтверджують, що математична модель і розроблений метод її оптимізації, який полягає у послідовному використанні спеціалізованих засобів математичного апарату, дозволяють досягати поставленої мети і є раціональним вибором як основа автоматизованої технології планування інтермодальних перевезень. Дана технологія забезпечить скорочення витрат інтермодальних операторів в середньому на 8 % за умови її застосування на складних транспортних мережах і до 50 % скорочення тривалості перевезення у порівнянні з традиційною технологією планування.

Список використаних джерел

1. Chang T. S. Best routes selection in international intermodal networks. *Computers & Operations Research*. 2008. № 35(9). P. 2877–2891.

2. Wang X., Meng Q. Discrete intermodal freight transportation network design with route choice behavior of intermodal operators. *Transportation Research Part B Methodological*. 2017. № 95. P. 76–104.
 3. Gremm C. The effect of intermodal competition on the pricing behaviour of a railway company: Evidence from the German case. *Research in Transportation Economics*. 2018. № 72. P. 49–64.
 4. Lin N. CO2 emissions mitigation potential of buyer consolidation and rail-based intermodal transport in the China-Europe container supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 240. P. 118–121.
 5. Liu D., Yang H. L. Optimal slot control model of container sea-rail intermodal transport based on revenue management. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. № 966. P. 1250–1259.
 6. Fan Q., Jin Y., Wang W., Yan X. A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019. № 44. P. 1–17.
 7. Denysiuk R., Gaspar-Cunha A. 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, 2017, March 19-22. P. 176–190.
 8. Ferreira J. C., Fonseca C. M., Gaspar-Cunha A. 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. P. 789–796.
-

Бутько Тетяна Василівна, д-р техн. наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-89. E-mail: uermp@ukr.net.

Костенніков Олексій Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-85. E-mail: aleksejkostennikov3@gmail.com.

Прохоров Віктор Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-88. E-mail: vicmmx@gmail.com.

Шапатіна Ольга Олександрівна, асистент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-85. E-mail: shapatina@ukr.net.

Butko Tetiana, D.Sc. (Tech.), Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-89. E-mail: uermp@ukr.net.

Kostiennikov Oleksii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-85. E-mail: aleksejkostennikov3@gmail.com.

Prokhorov Victor, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-89. E-mail: vicmmx@gmail.com.

Shapatina Olga, Assistant, Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-85. E-mail: shapatina@ukr.net.

Статтю прийнято 29.11.2019 р.