УДК 656.2 DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341

БУТЬКО Т. В., д.т.н., професор,
ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н., доцент,
ТАРАСОВ К. О., аспірант,
ГАЙДУК Д. А., магістрант
(Український державний університет залізничного транспорту)

Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту

Незважаючи на значний вплив зовнішніх факторів на діяльність залізничного транспорту під час воєнного стану в Україні, він продовжує достатньо надійно функціонувати. Особливого значення набули пасажирські перевезення, адже в умовах бойових дій, що призводять до руйнування транспортної інфраструктури, залізниця прийняла на себе значне навантаження при організації евакуаційних маршрутів. Звідси і значна відповідальність усіх учасників перевізного процесу. Тому для підвищення надійності функціонування системи швидкісних залізничних пасажирських перевезень в умовах воєнного стану в Україні запропоновано процедуру надання альтернативного маршруту на напрямку перевезень швидкісним поїздам. Формалізацію цього процесу проведено з використанням технології ризик-менеджменту шляхом формування оптимізаційної математичної моделі за критерієм мінімального перевищення експлуатаційних витрат при перевезенні альтернативним маршрутом порівняно зі штатним графіковим перевезенням. Система обмежень у моделі відображує обмеження на технічні та технологічні параметри швидкісних поїздів і залізничної інфраструктури. Для формування множини альтернативних маршрутів на напрямку перевезень використано положення теорії графів. Топологію напрямку подано як зважений граф, де вершинами є залізничні станції, а ребрами – залізничні дільниці з вагою у вигляді кортежу (довжина дільниці, наявність електрифікації, пропускна спроможність). Множина альтернативних маршрутів формується на основі зваженої матриці суміжності графа. Сформовану процедуру знаходження оптимального альтернативного маршруту швидкісних пасажирських поїздів у вигляді програмного продукту запропоновано інтегрувати до системи АСК ПП УЗ на автоматизовані робочі місця (АРМ) оперативного персоналу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Ключові слова: *швидкісний рух, пасажирські перевезення, воєнний стан, ризик-менеджмент, альтернативні маршрути.*

Вступ

Процес організації пасажирського залізничного сполучення, зокрема швидкісного, є надзвичайно важливим не лише для досягнення максимальної ефективності та економічного результату, але і безпеки як пасажирів, так і працівників залізничного транспорту. За роки незалежності України АТ «Укрзалізниця» неодноразово зіштовхувалася з повномасштабними надзвичайними ситуаціями, що вимагали гнучкого реагування на розвиток подій і підтвердили, що залізниця залишається стратегічно важливим видом транспорту і зобов'язує ураховувати можливі ризики в процесі перевезення та їхні наслідки.

Постановка проблеми

Розвиток і удосконалення автоматизованих систем управління на залізничному транспорті, зокрема швидкісними пасажирськими поїздами, дозволяє швидко розв'язувати складні розрахункові задачі та приймати раціональні рішення на всіх рівнях управління, особливо в період воєнного стану. Враховуючи, що планування обсягів пасажирських перевезень заздалегідь є складним процесом , а самі перевезення нерівномірними в
часі, існує необхідність створення технологій оперативного управління швидкісними пасажирськими перевезеннями з урахуванням потенційних ризиків.

Аналіз досліджень і публікацій

Організації швидкісного пасажирського залізничного сполучення в Україні присвячено багато досліджень, проте в них не приділено увагу оперативному управлінню рухом швидкісних поїздів в умовах невизначеності та постійних ризиків. Але певні кроки в цьому напрямку зроблені в секторі вантажних

©Т. В. Бутько, Л. О. Пархоменко, К. О. Тарасов, Д. А. Гайдук, 2023

перевезень. Так, у статті [1] для планування роботи вагонопотоків з небезпечними вантажами запропоновано оптимізаційну математичну модель за критерієм експозиції ризику. Цільовою функцією встановлено систему обмежень у кількості поїздів і вагонів у складі поїзда з небезпечними вантажами, які можуть одночасно прибувати на станцію. Робота [2] присвячена дослідженню ефективності мультимодальних вантажних перевезень за рахунок формування системи підтримки прийняття рішень (СППР) для визначення ризиків ще на етапі планування мультимодального маршруту, що передбачає вибір оптимального та ефективного варіанта за багатьма критеріями (як час, протяжність, швидкість, кліматичні та екологічні умови тощо) при існуючих обмеженнях. Серед останніх досліджень у пасажирському секторі перевезень у роботі [3] сформовано однокритеріальну оптимізаційну математичну модель визначення оптимальної кількості пасажирських поїздів і їхнього складу з урахуванням можливих ризиків під час перевезень, а для пошуку оптимального рішення запропоновано використання апарату генетичних алгоритмів. Питанням розвитку технологій управління ризиками на залізничному транспорті стурбовані і польські дослідники, які у своїй роботі [4] подали застосування хмарної СППР (Cloud DSS), метою якої є збір інформації про події з подальшим аналізом, на основі якої формується статистика, що буде використана для оцінювання загрози, імовірності та потенційних наслідків. Недоліком є те, що запропоноване рішення сортувальної станції в умовах переробки орієнтовано більше на невеличкі транспортні компанії і на етапі впровадження необхідно мати певну базу даних про події.

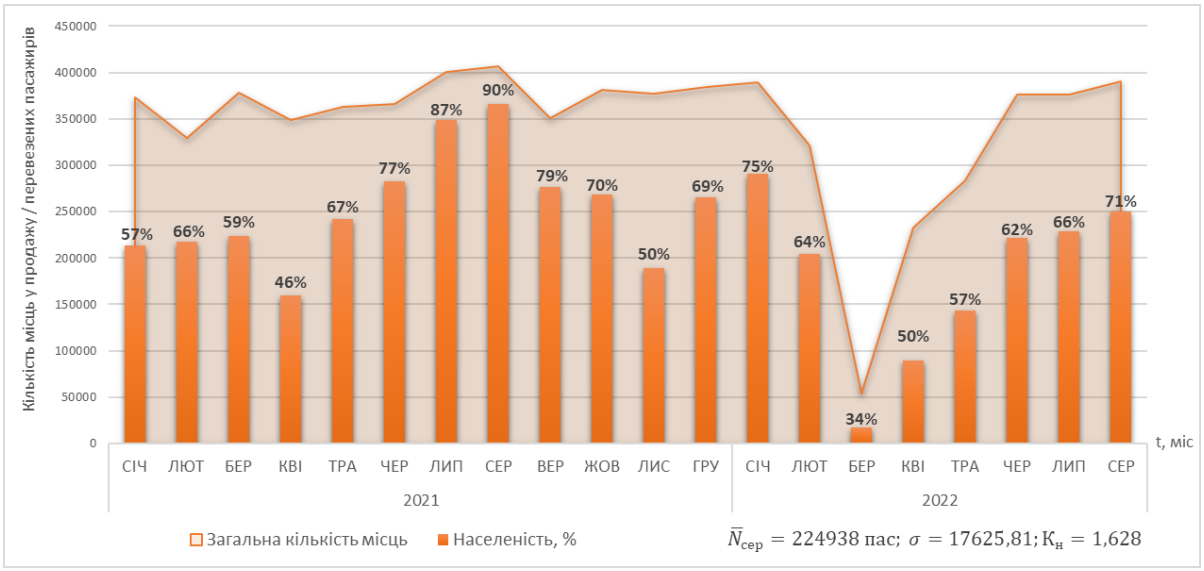
На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про необхідність формування автоматизованої технології управління швидкісним пасажирським рухом для підвищення надійності швидкісних пасажирських перевезень з використанням ризик-менеджменту.

Мета дослідження

Формування автоматизованої технології надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам для перевезень, що відбуваються.

Викладення основного матеріалу дослідження

У період воєнного стану в Україні основним стратегічним перевізником пасажирів, включно з евакуаційними поїздами, стає залізничний транспорт. Такі тенденції стосуються й діяльності «Української залізничної швидкісної компанії» (УЗШК). На основі попередньо проведеного аналізу (рис. 1) було доведено, що на кількість перевезених пасажирів швидкісними поїздами, як і звичайними, впливає сезонний фактор. При цьому найбільша населеність поїздів спостерігається в період літніх перевезень, що підтверджується відповідними параметрами: середнє значення $\overline{N}_{сер}$, середньоквадратичне відхилення σ, коефіцієнт нерівномірності $K_н$, що наведено на рис. 1.



Примітка. За 2022 р. враховано лише поїзди, на які було відкрито продаж квитків, у т.ч. евакуаційні. Статистика за даними АТ «Укрзалізниця».

Рис. 1. Динаміка розподілу кількості перевезених пасажирів відносно загальної кількості запропонованих місць у поїздах формування УЗШК за місяцями в період з 01.01.2021 по 31.08.2022 р.

Окремо було оцінено параметри за 2021 р. ($\overline{N}_{сер} = 254378{,}4\ пас,\ \ \sigma = 18764{,}06,\ \ K_н = 1{,}439$) і вісім місяців 2022 р. ($\overline{N}_{сер} = 180777{,}4\ пас,\ \sigma = 33904,\ K_н = 1{,}610$). Отже, швидкісні перевезення користуються високим попитом навіть під час правового режиму воєнного стану.

Воєнний стан у країні супроводжується підвищенням імовірності руйнування залізничної інфраструктури, а саме руйнування станцій, колій, контактної мережі та тягових трансформаторних підстанцій. Тобто, якщо перевезення вже відбувається, необхідно передбачити можливість надання альтернативного маршруту пасажирським поїздам, зокрема швидкісним, практично в оперативному режимі.

Вибір альтернативного маршруту для швидкісних поїздів типу Hyundai Rotem, Skoda, Тарпан залежить від багатьох факторів. Одним із основних є існуюча топологія залізничної системи та її підсистем на напрямку перевезень. Іншими вирішальними факторами є наявність електрифікованих дільниць і їхня пропускна спроможність.

Як критерії оптимізації при виборі альтернативного маршруту на множині можливих доцільно обрати або мінімальне підвищення експлуатаційних витрат порівняно зі штатним графіковим маршрутом, або мінімальний час перевезення пасажирів.

Для вирішення такого завдання запропоновано використання управління перевезенням на основі технології ризик-менеджменту, а як математичний апарат щодо формалізації процедури прийняття рішень при управлінні рухом швидкісних поїздів – апарат теорії графів.

Виходячи з вищенаведеного, топологію напрямку перевезень подаємо як зважений граф $G(I,J)$, де $I = I(i)$ – множина вершин графа (залізничні станції), $J(j)$ – множина ребер графа (залізничні дільниці) з вагою у вигляді кортежу: $j(i_к, i_{кн}) = (S_j, h_j, r_j)$, де S_j – довжина дільниці; h_j – булева змінна, $h_j = \begin{cases} 1 - \textit{дільниця j електрифікована,} \\ 0 - \textit{дільниця j неелктрифікована} \end{cases}$; r_j – пропускна спроможність j-ї дільниці; $к \in I(i)$ – номер вершини (станції). Як приклад на рис. 2, 3 наведено зважені графи на напрямках перевезень Київ-Львів, Київ-Одеса.

Рис. 2. Зважений граф залізничної підсистеми за напрямком перевезень Київ-Львів

Рис. 3. Зважений граф залізничної підсистеми за напрямком перевезень Київ-Одеса

Відповідно до положень теорії графів маршрут визначається як послідовність r ребер, необов'язково різних, але таких, що кожні вершини двох сусідніх ребер співпадають.

Як приклад розглянемо напрямок руху пасажирських швидкісних поїздів за напрямком Київ-Одеса (рис. 3), на якому червоним кольором позначено електрифіковані дільниці змінним струмом, а чорним – неелектрифіковані.

Граф, наведений на рис. 3, є двозв'язним, при цьому кількість можливих електрифікованих маршрутів, що пов'язують вершину 1 (Київ) і вершину 26 (Одеса) становить 8. Відповідно до графа (рис. 3) побудовано зважену матрицю суміжності (рис. 4), що повністю і однозначно відтворює цей граф. Вагу j-го ребра відображує довжина відповідної дільниці S_j.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
01	X	63										156				108										
02	63	X	95													100										
03		95	X	40											20											
04			40	X	22																					
05				22	X	47																				
06					47	X	82																			
07						82	X	37																		
08							37	X	54																	
09								54	X	26												26				
10									26	X	116											22				
11										116	X															72
12	156											X	88													
13												88	X	63												
14													63	X	121											
15			20											121	X											
16	108	100														X	76									
17																76	X	32								
18																	32	X	92							
19																		92	X	54			83			
20																			54	X	85					
21																				85	X	179	145	84		
22									26	22											179	X				
23																			83		145		X	185		
24																					84		185	X	61	
25																								61	X	124
26											72														124	X

Рис. 4. Зважена матриця суміжності графа за напрямком Київ-Одеса

З метою визначення оптимального альтернативного маршруту сформовано оптимізаційну математичну модель за критерієм мінімального підвищення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатаційними витратами на штатне графікове перевезення $\Delta E\left(S_{альт_m}\right)$ разом із відповідною системою обмежень

$$\underset{S_{альт_m}\forall\{S_{альт_m}\}}{\Delta E\left(S_{альт_m}\right)} = S_{гр}\cdot C_{поїздокм} + H\left[\left(S_{альт_m} - S_{гр}\right)\cdot C_{поїздокм} + + C_{відновл.інфр}\right] => min,$$

$$\begin{cases} R \geq 0{,}8 \\ W \leq 9 \\ N \leq N_{\text{наявна}} \\ V_{\text{ход}} \leq 160 \text{ км/год}, \end{cases} \quad (1)$$

де $\underset{S_{альт_m}\forall\{S_{альт_m}\}}{\Delta E\left(S_{альт_m}\right)}$ – величина підвищення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатаційними витратами на штатне графікове перевезення;

$C_{поїздокм}$ – вартість 1 поїзд-км, грн;

H – імовірність виникнення ситуації (визначається експертним шляхом);

m – індекс, номер альтернативного маршруту;

$S_{\text{альт}_m}$ – протяжність m-го альтернативного маршруту, км;

R – населеність поїзда;

W – кількість вагонів у поїзді;

N – пропускна спроможність лінії;

$V_{\text{ход}}$ – ходова швидкість, км/год.

Для формування множини альтернативних маршрутів $\{S_{альт_m}\}$ використовується зважена матриця суміжності за таким алгоритмом: якщо відбулось руйнування залізничної інфраструктури, то ребро $j = j(i_к, i_{к+1})$ вилучається з графа шляхом перетворення елемента матриці $(i_к, i_{к+1})$ на пусту клітинку. У скорегованій матриці розглядаються клітинки з ненульовими елементами, які пов'язують станцію $i_к$ з іншими суміжними станціями, що належать альтернативним маршрутам. Для кожної такої станції процедура повторюється до кінцевої станції. Протяжність дільниці S_j додається між собою для кожного маршруту $S_{\text{альт}_m}$. Отже, формується множина альтернативних маршрутів $\{S_{альт_m}\}$, серед яких знаходиться оптимальний, що є рішенням сформованої вище математичної моделі.

У випадку, коли до альтернативного маршруту доцільно включати неелектрифіковані дільниці (ребро графа), тобто передбачається, що на цій дільниці швидкісний потяг буде тягнути тепловоз до електрифікованої дільниці, то розмір зваженої матриці суміжності необхідно збільшити і додати станції на неелектрифікованій дільниці. При цьому до критерію оптимізації $\Delta E(S_{альт_m})$ додається величина $\Delta E_j^*(S_j)$. Доданок $\Delta E_j^*(S_j)$ являє собою експлуатаційні витрати у вигляді $\Delta E_j^* = S_j \cdot C_{поїздокм}^*$, де S_j – довжина неелектрифікованої дільниці на маршруті $S_{альт_m}$, $C_{поїздокм}^*$ – вартість 1 поїзд-км при тепловозній тязі.

Розроблена оптимізаційна математична модель (1) завжди має розв'язок, якщо внаслідок руйнування залізничної інфраструктури граф, що відтворює топологію підсистеми напрямку перевезень, залишається зв'язним.

Сформована модель може бути інтегрована в структуру інформаційно-керуючої системи АСК ПП УЗ як додаткова задача для АРМ ДНЦ, АРМ ДС, АРМ ДСП у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Висновки

З метою збільшення надійності швидкісних пасажирських перевезень і підвищення їхньої конкурентоспроможності на транспортному ринку, особливо в період воєнного стану в Україні і можливого руйнування залізничної інфраструктури. Запропоновано використання технологій ризик-менеджменту при управлінні рухом швидкісних поїздів компанії УЗШК. Для цього формалізовано процедуру надання альтернативного маршруту прямування швидкісним поїздом у випадку руйнування інфраструктурних об'єктів АТ «Укрзалізниця». Формалізацію проведено на основі формування оптимізаційної математичної моделі, де як критерій запропоновано мінімізацію експлуатаційних витрат при пересуванні швидкісного потяга за альтернативним маршрутом порівняно зі штатним графіковим маршрутом. Система обмежень ураховує технічні і технологічні характеристики швидкісних пасажирських поїздів і залізничної інфраструктури. Для знаходження оптимального альтернативного маршруту використано положення теорії графів, що дають можливість подати топологію напрямку перевезень у вигляді зваженого графа (за вагу прийнято довжину дільниці) і відповідної матриці суміжності. Множина можливих альтернативних маршрутів формується на основі зваженої матриці суміжності. Запропоновану процедуру надання альтернативного маршруту починаючи з будь-якої

станції на шляху прямування швидкісного поїзду у вигляді програмного продукту рекомендовано інтегрувати до АСК ПП УЗ та АРМи оперативного персоналу у вигляді додаткової задачі, що дозволяє автоматизувати цей процес для перевезення, яке вже відбувається.

Список використаних джерел

1. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2018. № 2. С. 18–22.
2. Науково-методичні підходи до управління транспортними ризиками в мультимодальних вантажних перевезеннях / М. Б. Янчук, С. В. Пронь, В. П. Федина, К. В. Чередніченко. *Бізнес Інформ*. 2021. № 2. С. 198–209.
3. Бутько Т. В., Примаченко Г. О., Тарасов К. О. Удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування залізничної інфраструктури. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2022. № 3. С. 3-9.
4. Cloud Decision Support System for Risk Management in Railway Transportation. Górka, W., Bagiński, J., Socha, M., Steclik, T., Leśniak, D., Wojtas, M., Flisiuk, B. and Michalak, M. In Proceedings of the 14th International Conference on Software Technologies (ICSOFT-2019). 2019. P. 475-482. DOI: 10.5220/0007837904750482.

Butko T.V., Parkhomenko L.O., Haiduk D.A., Tarasov K.O. Formalization of the procedure for providing an alternative route for high-speed passenger trains based on risk management.

Abstract. Despite the significant impact of external factors on the activities of railway transport during martial law in Ukraine, it continues to function quite reliably. Passenger transportation is of particular importance, because in the context of hostilities that lead to the destruction of transport infrastructure, the railways have taken on a significant burden in organizing evacuation routes. Hence the significant responsibility of all participants in the transportation process. Therefore, to improve the reliability of the high-speed rail passenger transportation system under martial law in Ukraine, the author proposes a procedure for providing an alternative route for high-speed trains. This process was formalized using risk management technology by forming an optimization mathematical model based on the criterion of minimal excess of operating costs during transportation by an alternative route compared to regular scheduled transportation. The system of constraints in the model reflects restrictions on the technical and technological parameters of high-speed trains and railway infrastructure. To form a set of alternative routes in a transportation direction, the provisions of graph theory are used. The topology of the direction is represented as a weighted graph, where the vertices are railway stations and the edges are railway sections with a weight in the form of a tuple (section length, electrification, capacity). The set of alternative routes is formed on the basis of the weighted adjacency matrix of the graph. The procedure for finding the optimal alternative route for high-speed passenger trains in the form of a software product is formed and proposed to be integrated into the ACS system of passenger transportation of Ukrzaliznytsia on the automated workplaces of operational staff in the form of a decision support system.

Keywords: high-speed traffic, passenger transportation, martial law, risk management, alternative routes.

Надійшла 29.01.2023 р.

***Бутько Тетяна Василівна**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.*

***Пархоменко Лариса Олексіївна**, кандидат технічних наук, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1647-7746.*

***Тарасов Кирило Олександрович**, аспірант, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com. ID ORCID 0000-0001-5976-4169.*

***Гайдук Дмитро Андрійович**, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: d.haiduk@ukr.net. ID ORCID 0000-0002-7816-2216.*

***Butko Tetiana Vasylivna**, Dr.Sc., professor, chief of department, department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: butko@kart.edu.ua. https://orcid.org/0000-0003-1082-599X.*

***Parkhomenko Larysa Oleksiivna**, Ph.D., department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua. https://orcid.org/0000-0003-1647-7746.*

Tarasov Kyrylo Oleksandrovych, *graduate student of the department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com. https://orcid.org/0000-0001-5976-4169.*

Haiduk Dmytro Andriyovych, *master student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: d.haiduk@ukr.net. https://orcid.org/0000-0002-7816-2216.*