

УДК 656.222

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТА РОЗВИТКУ ЛІНІЇ ШВИДКІСНОГО РУХУ ВІДПОВІДНО ДО ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ КРИТЕРІЇВ

Канд. техн. наук А. Л. Кравець, магістранти А. В. Чернолуцький, С. В. Серпокрилов

JUSTIFICATION OF A RATIONAL OPTION OF DEVELOPMENT OF THE HIGH-SPEED RAILWAY ACCORDING TO TECHNICAL, TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC CRITERIA

PhD (Tech.) A. Kravets, masters A. Chernolutskyi, S. Serpokrylov

***Анотація.** Запропоновано методикау обґрунтування раціонального варіанта розвитку лінії при організації швидкісного та високошвидкісного руху на основі техніко-технологічних та економічних критеріїв. Завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху пропонується вирішувати як завдання оптимального розподілу ресурсів за елементами лінії з урахуванням техніко-технологічних та економічних критеріїв. Залежно від цілей розрахунку, завдання пропонується розглядати у прямій та зворотній постановці.*

Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні рішень щодо застосування одноколійних елементів та визначення раціональної конфігурації одноколійно-двоколійних ліній при організації швидкісного руху.

***Ключові слова:** високошвидкісний рух, пасажирські перевезення, одно-, двоколійна лінія, час ходу поїзда, капіталовкладення в інфраструктуру.*

***Abstract.** When a new high-speed railway is designed on the routes with the existing mixed (freight and passenger) traffic, part of the trains can be relocated from the existing railway to the new one. This will have an additional effect of the increasing current capacity of the existing railway.*

A method is proposed for justification of a rational option for the development of a high-speed rail on the basis of technical, technological and economic criteria. It is proposed to solve the problem of determining the rational option for the development of a high-speed railway as the problem of optimal distribution of resources among the components of the railway, taking into account technical, technological and economic criteria. The result is a set of solutions consisting of options for the development of each component of the railway, which will provide the maximum systemic effect for the railway as a whole. Each j^{th} option of the development of the i^{th} component of a high-speed railway can be described by three main indicators: the travel time of a high-speed train; capital investments required to implement this option; and the available traffic capacity of the component. Depending on the problem being solved, each of the listed parameters can act both as a criterion and as a limitation.

Depending on the purposes of the design, it is proposed to consider the problem of determining the rational option for the railway development either in the direct or inverse setting. In the first case, the systemic effect is expressed by an objective function that minimizes the amount of necessary capital investments in the railway infrastructure while ensuring the stipulated travel time of a high-speed train. In the second case, the purpose is to minimize the travel time of the train without exceeding the specified amount of capital investment in the development of all components of the railway.

The results obtained can be used to justify decisions on the use of single-track components and to determine the rational configuration of single-track lines when high-speed traffic is organized.

***Keywords:** high-speed traffic, passenger transport, single/double tracked line, time of travel, capital investment in infrastructure.*

Вступ. Розвиток мережі залізниць в

Україні раніше не передбачав створення ліній, спеціалізованих для швидкісного (високошвидкісного) руху. За потреби організації такого руху проводилася реконструкція існуючих ліній під більші швидкості. Проте можливості збільшення швидкості обмежувались обсягом та вартістю робіт з необхідної реконструкції. Також обмеженням є характер експлуатаційної роботи існуючої лінії, розміри вантажного та пасажирського руху.

Однак завдання пошуку шляхів мінімізації необхідних капіталовкладень у створення ліній швидкісного та високошвидкісного руху є важливим. Існуючі залізничні лінії проектувалися переважно для умов вантажного руху, тому реконструкція не завжди може забезпечити підвищення швидкості та забезпечення необхідного скорочення часу ходу швидкісних поїздів. Додаткові складності створює організація швидкісного руху на існуючих лініях з високою пропускнуною спроможністю.

У зв'язку з цим можна розглядати варіант проектування нових ліній для швидкісного (високошвидкісного) руху на перспективних напрямках, зокрема у вигляді паралельних ходів, основним завданням яких буде забезпечення заданого мінімального часу перебування поїзда в русі. Однак питання доцільності спорудження таких ліній потребує окремих досліджень, які враховують наявність попиту на послугу такого швидкісного перевезення за певного рівня тарифів, який залежатиме від капітальних витрат на спорудження лінії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз зарубіжних робіт у галузі дослідження показав, що пропозицію використання для швидкісного і високошвидкісного руху одноколієних ліній вперше було надано в Канаді в 1987 р. вченими E. R. Petersen, A. J. Taylor з Queen's University (Kingston, Ontario) [1]. У рамках цієї пропозиції вирішувалися завдання щодо визначення раціонального розташування одноколієних ліній для пропуску

швидкісних поїздів на територіях з низькою щільністю населення.

У 2010 р. вчені Andreas Dyrpvik Landmark, Nils O. E. Olsson і Andreas Amdahl Seim з Норвезького університету науки і технологій (Norwegian University of Science and Technology) [2] при вирішенні завдань оптимізації графіка руху швидкісних поїздів займалися вивченням впливу окремих елементів інфраструктури (насамперед одноколійних елементів) на збільшення часу пропуску поїздопотоків. Полігоном для таких досліджень послужила норвезька мережа залізниць, яка здебільшого складається з одноколійних ліній.

Вплив одноколійних ліній на втрату часу руху поїздів у 2010 р. також розглядав Rob M. P. Goverd з Department of Transport and Planning, Delft University of Technology [3, 4], на полігоні шведської залізниці, яка також містить велику кількість одноколійних ділянок. Було розроблено алгоритм оцінки затримок з урахуванням графіка руху поїздів.

У 2014 р. іспанські вчені E. Castillo, M. Nogal і Z. Grande з університету Кастілла – Ла Манча (Universidad de Castilla – La Mancha) [5, 6] розглядали питання, пов'язані зі скороченням витрат на організацію високошвидкісного руху на другорядних напрямках за рахунок використання так званих Double-Single track (ADST) (одноколійно-двоколійних ліній). Ідея полягала в тому, щоб по можливості використовувати одноколійні ділянки, що містять дорогу інфраструктуру (тунелі, естакади). Вчені дійшли висновку, що використання одноколійно-двоколійних ліній замість повністю двоколійних при організації високошвидкісного руху може привести до скорочення капітальних витрат до 40 %.

Таким чином, пропозиції щодо використання для одноколійних та одноколійно-двоколійних ліній для швидкісного та високошвидкісного руху з'явилися за кордоном наприкінці 80-х років ХХ століття і набули розвитку в 2010–

2015 рр. При цьому вирішувалися питання обґрунтування розміщення таких ліній на мережі залізниць, а також питання розробки оптимального графіка руху по них швидкісних поїздів на основі перегінних часів ходу, що розраховуються.

В Україні проблемою підвищення швидкостей руху поїздів почали займатися у 60–70-х роках минулого століття. У 80-ті роки були спроби встановлення швидкостей руху пасажирських поїздів у напрямку Москва – Харків – Крим до 160 км/год (з експериментальними поїздками до 180 км/год). Однак після розпаду СРСР на залізничному транспорті України більше десятиліття не розглядалася можливість запровадження швидкісного руху поїздів. Тільки у 2003 р. було відкрито регулярний рух пасажирських поїздів зі швидкостями до 140 км/год [7].

Визначення мети і постановка завдання дослідження. Метою дослідження є вирішення завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху.

При розробці проектів організації швидкісного та високошвидкісного руху, особливо при спорудженні нових ліній, важливе значення має обґрунтування раціональних конструктивних та технологічних рішень з погляду можливості скорочення необхідного обсягу капіталовкладень. Витрати на проектування ліній залежать переважно від обраної концепції розвитку.

Як перший чинник, що впливає на величину капітальних витрат на реалізацію проектів, пов'язаних з підвищенням швидкості руху поїздів, є компонування лінії. Пропонується розглянути можливість використання для швидкісного та високошвидкісного руху одноколійних та одноколійно-двоколійних ліній.

Основним варіантом при цьому є одноколійна лінія. Потребу у двоколійних елементах (перегонах, двоколійних вставках) необхідно визначати з урахуванням оцінки рівня пропускну

спроможності одноколійних елементів, можливих затримок у пропуску поїздів, у т. ч. швидкісних (високошвидкісних).

Таким чином, за потреби організації або розширення використання швидкісного (високошвидкісного) руху на новій або існуючій лінії необхідно мати інструмент для відбору найбільш раціональних рішень щодо її розвитку. Розглядаючи лінію у вигляді багатьох елементів, необхідно визначити раціональний варіант розвитку кожного з них за умови досягнення максимального системного ефекту для лінії в цілому.

Основна частина дослідження.

Кількість можливих варіантів проектних рішень щодо кожного елемента лінії та його характеристики залежать від місцевих умов, потреб і технічних можливостей розвитку об'єкта та інших чинників. Наприклад, окремий перегін може бути одноколійним на всьому протязі, одноколійним з двоколійною вставкою, двоколійним, мати різні обмеження швидкості, протяжність.

Багато можливих варіантів може бути подано у вигляді матриці, з якої і відбираються найбільш раціональні

варіанти розвитку лінії [8]. Кожен j -й варіант розвитку i -го елемента залізничної лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху можна описати за допомогою трьох основних техніко-технологічних та економічних критеріїв:

- часу ходу швидкісного поїзда T_{ij} ;
- капітальних вкладень K_{ij} , необхідних для реалізації даного варіанта;
- наявної пропускної спроможності елемента N_{ij} .

Залежно від завдання, що вирішується, кожен із зазначених параметрів може виступати як критерієм, так і обмеженням. Основними критеріями пропонується вважати K і T . Пропускна спроможність при цьому розглядатиметься як обмеження для відбору варіантів проектних рішень за кожним елементом.

Обсяг необхідних капіталовкладень K_{ij} при обґрунтованих конструктивних та технологічних параметрах елемента може бути визначений кошторисним розрахунком [9].

При використанні як критерію сумарного обсягу капітальних вкладень буде застосовано мінімізуючу цільову функцію

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} K_{ij} \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} = T_x = const, \quad (1)$$

$$N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$$

де K_3 – допустимий коефіцієнт заповнення пропускної спроможності;

m – кількість елементів лінії;

n_i – кількість варіантів розвитку i -го елемента.

При використанні критерію часу ходу швидкісного поїзда можлива як мінімізуюча функція, так і функція, що прагне до заданого значення перебування швидкісного поїзда на шляху,

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} \rightarrow \begin{cases} \min \\ const \end{cases}, \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} K_{ij} = K = const, \quad (2)$$

$$N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$$

При визначенні варіанта розвитку лінії рішення, спрямовані на скорочення часу перебування в русі швидкісного поїзда або скорочення обсягу інвестицій, можна розглядати як зовнішні по відношенню до проекту: визначення раціональної конфігурації лінії при заздалегідь обмеженому обсязі інвестицій K або при заданому допустимому часі T проходження швидкісного поїзда лінії. В останньому випадку бажаний час T , який необхідно забезпечити під час руху швидкісних поїздів по лінії, може бути визначений на основі маркетингових та соціально-економічних досліджень затребуваності послуги швидкісного перевезення.

Час перебування швидкісного поїзда в русі є функцією швидкості. Мінімальний час забезпечується за відсутності технологічно обумовлених затримок пропуску поїздопотуку, а також реалізованої максимальної швидкості руху V^{\max} , що відповідає конструктивним можливостям використовуюваного рухомого складу. Однак при розвитку всіх елементів залізничної лінії під однаковий заданий рівень максимальної швидкості руху

$V_i^{\max} = V^{\max}$, $i = \overline{1, m}$ за низкою елементів можуть бути значні додаткові витрати, пов'язані з місцевими умовами. Це стосується дорогих штучних споруд, перегонів із складними умовами будівництва тощо. При цьому сумарний час перебування швидкісного поїзда в русі залежить не тільки від максимальної швидкості, що реалізується по кожному елементу. Прагнення максимальної швидкості руху на всій протяжності лінії можна вважати виправданим для ліній, спеціалізованих під високошвидкісний рух, за високої інтенсивності руху поїздів, коли критеріями є швидкість руху і пропускна спроможність. В інших умовах використання такого принципу розвитку лінії може призвести до необґрунтованого збільшення капітальних витрат.

Таким чином, залежно від цілей розрахунку, завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії пропонується розглядати у прямій та зворотній постановці. У першому випадку системний ефект виражається цільовою функцією, що мінімізує обсяг необхідних капіталовкладень в інфраструктуру лінії при забезпеченні заданого часу перебування швидкісного (високошвидкісного) поїзда в русі. У другому випадку метою є мінімізація витрат часу поїзда на шляху за умови неперевищення заданого обсягу капіталовкладень у розвиток усіх елементів лінії. Інтерпретацію задачі, обмеження та рекурентні рівняння, що застосовуються, подано у таблиці.

Альтернативним рішенням може бути забезпечення техніко-технологічного та економічно обґрунтованого (різного) рівня максимальної швидкості по кожному елементу лінії за умови виконання необхідного сумарного часу ходу ділянкою. Частина елементів лінії може і не забезпечувати максимальної швидкості руху, якщо за рахунок раціонального розподілу часу ходу по ділянці загалом втрати часу на таких елементах компенсуються вищою швидкістю руху на інших елементах. Таким чином, задачу раціонального розвитку лінії під швидкісний рух можна вважати вирішеною, якщо буде забезпечено заданий сумарний час руху швидкісного поїзда ділянкою, за умови не перевищення заданого обсягу капіталовкладень.

Висновок. Завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху пропонується вирішувати як завдання оптимального розподілу ресурсів за елементами лінії з урахуванням техніко-технологічних та економічних критеріїв: часу ходу швидкісного поїзда, наявної пропускної спроможності, обсягу капіталовкладень. Результат є безліч рішень, що складається з варіантів розвитку кожного елемента лінії, які забезпечать максимальний системний ефект для лінії в цілому.

Інтерпретація, обмеження та рекурентні рівняння, що застосовуються в задачі оптимального розподілу ресурсів

Задача в прямій постановці	Задача у зворотній постановці
1. Інтерпретація задачі	
1.1. T_x – загальний запас ресурсів (час ходу швидкісного поїзда по залізниці); 1.2. T_{ij} – обсяг ресурсів, що виділяється на об’єкт (час ходу швидкісного поїзда по i -му елементу); 1.3. $g_i(T_{ij})$ – «ефект» (витрати) на i -му об’єкті при виділенні йому T_{ij} ресурсів	1.1. K – загальний запас ресурсів (сумарний обсяг капіталовкладень, що розподіляється); 1.2. K_{ij} – обсяг ресурсів, що виділяється на об’єкт (витрати на розвиток i -го елемента лінії); 1.3. $g_i(K_{ij})$ – «ефект» (мінімально можливий час ходу швидкісного поїзда) на i -му об’єкті при виділенні йому K_{ij} ресурсів
1.4. m – кількість об’єктів, за якими виконується розподіл (кількість елементів на залізничній лінії, що розглядається)	
2. Обмеження	
2.1. $\sum_{i=1}^m T_{ij} \leq T_x$	2.1. $\sum_{i=1}^m K_{ij} \leq K$
2.2. $N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$ де N_{ij} – наявна пропускна спроможність i -го елемента; K_3 – коефіцієнт заповнення пропускної спроможності; N_n – необхідний рівень пропускної спроможності лінії	
3. Рекурентні рівняння	
$\left\{ \begin{array}{l} Z = f(T_x) = \min [f_{m-1}(T_x - T_{xm-1}) + g_{m-1}(T_{xm-1})], \quad T_{xm-1} = \overline{0, T_x}, \\ f_{m-1}(T_x) = \min [f_{m-2}(T_x - T_{xm-2}) + g_{m-2}(T_{xm-2})], \quad T_{xm-2} = \overline{0, T_x}, \\ \dots, \\ f_2(T_x) = \min [f_1(T_x - T_{x2}) + g_2(T_{x2})], \quad T_{x2} = \overline{0, T_x}, \\ f_1(T_x) = \min [f_0(T_x - T_{x1}) + g_1(T_{x1})], \quad T_{x1} = \overline{0, T_x}, \\ f_0(T_x - T_{x1}) = 0, \quad f_1(T_{x1}) = g_1(T_{x1}). \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} Z = f(K) = \min [f_{m-1}(K - K_{m-1}) + g_{m-1}(K_{m-1})], \quad K_{m-1} = \overline{0, K}, \\ f_{m-1}(K) = \min [f_{m-2}(K - K_{m-2}) + g_{m-2}(K_{m-2})], \quad K_{m-2} = \overline{0, K}, \\ \dots, \\ f_2(K) = \min [f_1(K - K_2) + g_2(K_2)], \quad K_2 = \overline{0, K}, \\ f_1(K) = \min [f_0(K - K_1) + g_1(K_1)], \quad K_1 = \overline{0, K}, \\ f_0(K - K_1) = 0, \quad f_1(K_1) = g_1(K_1). \end{array} \right.$

Список використаних джерел

- Petersen E. R. and Taylor A. J. Design of single-track rail line for high-speed trains / Transportation Research. Part A: General, 21(1), 1987. P. 47–57.
- Andersen S. Проблематика смешанных пассажирских и грузовых перевозок при большой разнице скоростей движения: пер. с нем. Eisenbahntechnische Rundschau. 1999. №№ 1–3. С. 15–16, 23–26, 28–29.
- Goverde R. M. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. Transportation Research. Part C: Emerg. Technol. 2010. 18(3). P. 269–287.

4. Goverde R. M. and Hansen I. A. Delay propagation and process management at railway stations. 5th World Conference on Railway Research (Köln, November 25–29, 2001).
5. Castillo E., Nogal M. and Grande Z. An Alternate Double-Single Track Proposal for High-Speed Peripheral Railway Lines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. 30. P. 181–201.
6. Castillo E., Gallego I., Urena J. and Coronado J. Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. 35. P. 859–878.
7. Пшинько А., Курган Н., Патласов А. Основные направления развития транспортной инфраструктуры при внедрении скоростного движения на железных дорогах Украины. Transport Bridge Europe-Asia: Proceedings of the V Georgian-Polish International Scientific-Technical Conference, October 15-17, 2019 / Akaki Tsereteli State University [et al.]. Kutaisi, Georgia, 2019. P. 85–90.
8. Andreas Dypvik Landmark and Nils O.E. Olsson Amdahl Seim Method of analysis for delay propagation in a single-track network. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. 7. P. 77–97.
9. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія. Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016. С. 269–284.

Кравець Анна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0003-1165-1960. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Чернолуцький Аркадій Валерійович, магістр кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (073) 0661838. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Серпокрилов Святослав Віталійович, магістр кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 0257315. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Kravets Anna Leonidovna, PhD (Tech.), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Tel.: ORCID ID: 0000-0003-1165-1960. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Chernolutskyi Arkadii Valerievich, master of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Тел.: +38 (073) 0661838. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Serpokrylov Svyatoslav Vitalievich, master of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Тел.: +38 (066) 0257315. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.09.2021 р.