

DOI: 10.18372/2310-5461.61.18296
УДК 656.025.2

А. А. Поздняков

Державний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0002-3359-586X
e-mail: andrei.pozdniakov.mail@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ МАЙБУТНІХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ЗІ СПІЛЬНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ПАСАЖИРСЬКИХ ТА ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Вступ і постановка проблеми

Враховуючи цілі Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (НТС-2030) щодо формування транспортного ринку та збільшення частки недержавних транспортних операторів у залізничному транспорті до 25 % до 2025 року та до 40 % до 2030 р. [1, с. 7–11] потреба узгодженості графіків руху поїздів, зручності та мобільності пасажирів, з урахуванням міського транспорту та все ширшого використання мультимодальних транспортних послуг, стає ще гострішою, особливо після появи окремого оператора інфраструктури нової високошвидкісної залізниці (ВШЗ) України.

НТС-2030 передбачає поетапне запровадження швидкісного залізничного сполучення (до 400 км/год) між основними центрами України на окремих коліях шириною 1435 мм та їх використання для змішаних пасажирських і вантажних перевезень (для прискореної доставки) товарів з високою доданою вартістю), а також приєднання національної мережі ВШЗ до транс'європейської мережі TEN-T.

Як відомо, навіть у Китаї з його потужними пасажиропотоками та великими відстанями далеко не всі високошвидкісні залізничні лінії є рентабельними, тому там змушені перевозити і високовартісні вантажі, які потребують термінової доставки [2, с. 1–2]. В Україні, тим більше, використання дуже дорогих ліній ВШЗ тільки для пасажирських перевезень буде явно неефективним і нерентабельним. Наші попередні оцінки, зроблені ще до повномасштабної російської війни проти України, показують, що термін окупності інвестицій в інфраструктуру та рухомий склад ВШЗ, якщо він використовуватиметься лише для пасажирських перевезень, становитиме сотні років, навіть із максимальним пасажиропотоком. З іншого боку, при відносно невеликому пасажиропотоку в Україні, ВШЗ матиме достатньо вільної потужності для вантажних перевезень.

Тому альтернативи спільному використанню майбутньої ВШЗ України для пасажирських і

вантажних перевезень, як частини міжнародних мультимодальних транспортних систем, немає. Дослідження балансу вантажних та пасажирських перевезень на ВШЗ за критеріями максимальної рентабельності для інфраструктурного оператора з урахуванням інтересів інших учасників ринку є важливою науково-прикладною проблемою та передумовою розвитку високошвидкісних мультимодальних перевезень в Україні.

Об'єктом дослідження, представленого в даній роботі, є сукупність процесів і факторів, що впливають на прибутковість та інші показники ефективності оператора інфраструктури ВШЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За результатами аналізу робіт у сфері високошвидкісних мультимодальних перевезень виявлено певні корисні положення та ідеї, які ми беремо в основу технологічного обґрунтування бізнес-моделі майбутнього оператора мережі ВШЗ України. У роботах Hammadi S. [4, с. 200–223] досліджено загальні основи та оптимальні моделі побудови та функціонування мультимодального транспорту. Janic M. [5, с. 2–3] проводить багатомірне дослідження інфраструктурних, техніко-економічних, експлуатаційних, соціальних та екологічних характеристик високошвидкісних залізничних систем (ВШЗ), включаючи їх огляд, аналіз деяких реальних випадків та обмежене (аналітичне) моделювання. У роботах Brunello L. [6, с. 23–118], Mahboob Q. [7, с. 6–10] досліджено методи оптимізації та доступності високошвидкісних ліній та суміжних транспортних мереж. Мироненко В. та ін. [8, с. 441–444; 9, с. 104.] досліджували проблеми пасажирських і вантажних мультимодальних перевезень в Україні, в тому числі комбінованого використання залізничних колій поїздами різних категорій. Максимальне використання мережі ВШЗ для пасажирських і вантажних перевезень є одним із головних питань у дослідженні Ghilas V. Та ін. [10, с. 6–12], Zhujun Li та ін. [11, с. 4–9]. Автори наголошують, що через нерівномірність пасажиропотоку протягом доби використання пропускної спроможності ВШЗ у міжпікові періоди може бути низьким.

Потенційним підходом до вирішення цих проб-лем є інтеграція спільної вантажно-пасажирської транспортної системи [12, с. 3–6]. Постійний графік руху пасажирських поїздів дає можливість повністю використати залишок пропускної здатності існуючої мережі для перевезень вантажів та отримати економічну вигоду [13, с. 8–10] від максимального використання пропускної спроможності ВШЗ. Підхід спільного використання мережі ВШЗ передбачає раціональне використання принаймні трьох ресурсів: станцій, колій і поїздів [14, с. 231–236]. У даному дослідженні розглядається резервна пропускна спроможність існуючого розкладу руху поїздів та описується економіко-математична модель, яка дозволяє оптимізувати проектні та технологічні рішення при будівництві та експлуатації високошвидкісних залізниць для підвищення гнучкості використання пропускної спроможності. Ці та інші роботи є достатньою основою для переходу на рівень обґрунтування бізнес-моделі майбутньої системи ВШЗ, що зробить її не лише зручною для користувачів, а й привабливим проектом для інвесторів.

Мета дослідження

Метою дослідження є техніко-економічне обґрунтування бізнес-моделі майбутньої ВШЗ України зі спільним використанням для перевезення як пасажирів, так і вантажів, враховуючи баланс інтересів оператора інфраструктури та операторів перевезень. Це передбачає розв'язання наступних завдань як основних цілей дослідження:

1) Розробка моделі оптимального функціонування мультимодальних пасажирських і вантажних перевезень у спільних коридорах високошвидкісних залізниць, пасажирських терміналів і автомагістралей;

2) Визначення раціональної пропорції пасажирських і вантажних перевезень на одній інфраструктурі з урахуванням балансу інтересів оператора інфраструктури та операторів перевезень;

3) Визначення оптимальної кількості станцій на лінії ВШЗ, що забезпечить її рентабельність, надійність, зручність для користувачів і баланс інтересів.

При цьому використовуються аналітичні моделі для виявлення основних взаємозв'язків параметрів запропонованих моделей з метою оцінки їх впливу на продуктивність функціонування оператора інфраструктури ВШЗ.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Комплексна модель пасажирських і вантажних перевезень у спільному користуванні лініями високошвидкісної залізниці

Майбутня транспортна система, яка включатиме високошвидкісну залізницю, будучи надзви-

чайно дорогим елементом інфраструктури (порівняно зі звичайною залізницею). Вона не буде ефективною, якщо не передбачатиме комплексного використання інфраструктури, по-перше, для масових пасажирських перевезень, а також для вантажних перевезень (в окремих нішах ринку), по-друге, як системоутворюючої складової в інших видах економічної діяльності (таких як туризм, готельний бізнес або житлове будівництво в зоні тяжіння ВШЗ). Майбутнє функціонування такої транспортної системи можна описати лише за допомогою відповідних комплексних математичних моделей.

Слід зазначити, що збалансованість перевезень вантажів і пасажирів на ВШЗ можлива з урахуванням двох обмежень, що впливають з необхідності задоволення попиту на перевезення:

1. Необхідність перевозити всіх бажаючих пасажирів.

2. Необхідність перевезення максимально можливої кількості вантажу в межах наявної пропускної спроможності.

Однією з проблем організації спільного використання інфраструктури ВШЗ для вантажних і пасажирських перевезень є різна швидкість, а також різна динаміка розгону/гальмування вантажних і пасажирських поїздів. Це призводить до відомого в практиці та теорії перевезень явища взаємного «зняття» поїздів різних категорій швидкості та втрати пропускної спроможності ліній. Наведемо деякі аналітичні залежності, що відображають це явище.

Для реалізації переваг швидкісного руху необхідно, щоб відстані між станціями були максимальними, а час розгону та уповільнення поїзда мінімальним. Розрахунки показують, що коли відстань між станціями менше 15 км і час розгону/гальмування більше 3 хв, то високошвидкісний рух взагалі не має сенсу, оскільки при збільшенні максимальної швидкості середня швидкість поїздів не збільшується, а зменшується. Це необхідно врахувати при техніко-економічному обґрунтуванні та проектуванні ВШЗ.

Як зазначалося вище, коли на лінії курсують поїзди з різними швидкостями, виникає явище «зняття» поїздів однієї категорії швидкості поїздами іншої категорії швидкості, що призводить до втрати пропускної спроможності лінії [4, с. 12]. Запропонована базова модель (1) пропускної спроможності відображає вплив на пропускну спроможність лінії, на якій курсують поїзди двох категорій швидкості:

$$N_q = \frac{24 - t_{reg}}{j} - \left[1 + \frac{2}{j} \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) l \right] N_a \quad (1)$$

де: N_q – загальна кількість вантажних поїздів за добу, поїзд; t_{reg} ;

– регламентований час перерв у русі протягом доби (наприклад, «вікна» для проведення планових робіт у колійному та енергетичному господарстві), год; j – інтервал часу між поїздами, год; l – довжина обмежувального перегону лінії (відстань між станціями, на яких середній час руху поїзда найбільший), км; v_a – середня швидкість пасажирських поїздів (2), км/год; v_q – середня швидкість вантажних поїздів (3), км/год; N_a – загальна кількість пасажирських поїздів за добу, поїзд.

$$v_a = v_a^{\max} \left(1 - \frac{v_a^{\max}}{2l} t_{ab} \right); \quad (2)$$

$$v_q = v_q^{\max} \left(1 - \frac{v_q^{\max}}{2l} t_{qb} \right), \quad (3)$$

де: v_a^{\max} – максимальна швидкість пасажирських поїздів, км/год; v_q^{\max} – максимальна швидкість вантажних поїздів, км/год; t_{ab} – час розгону/гальмування (гальмування) пасажирських поїздів, год; t_{qb} – час розгону/гальмування (гальмування) вантажних поїздів, год.

Загальна пропускна спроможність залізничної лінії визначається в формулах (4) та (5) як

$$N = N_a + N_q \quad (4)$$

де: N – загальна кількість поїздів за добу.

$$N = \left[24 - t_{reg} - 2 \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) N_a l \right]. \quad (5)$$

Застосування моделі проілюстровано в наступному прикладі (при мінімальній і максимальній кількості пасажирських поїздів на лінії за умови, що решта її пропускної спроможності використовується для вантажних поїздів).

2. Раціональне співвідношення пасажирських і вантажних перевезень на одній інфраструктурі

З світової практики управління залізницями, у тому числі й українських, відомо, що пасажирські перевезення часто є збитковими. У цьому випадку потрібні субсидії. У сучасній вітчизняній практиці це так зване «перехресне субсидування» збитків пасажирських перевезень за рахунок доходів від вантажних перевезень та інших джерел. У майбутньому це неприпустимо, як з

точки зору залізничного транспортного законодавства Європейського Союзу, так і з точки зору законів ринкової економіки.

Тому необхідний аналітичний інструмент для обґрунтування раціонального співвідношення пасажирських і вантажних перевезень на єдиній інфраструктурі, враховуючи баланс інтересів операторів інфраструктури та транспортних підприємств, враховуючи, що оператор інфраструктури не може нести збитків від надання інфраструктури для суспільних потреб пасажирських і вантажних перевезень.

Одним із критеріїв спільного використання інфраструктури ВШЗ для вантажних і пасажирських перевезень може бути сукупний дохід від курсування по лінії вантажних і пасажирських поїздів, які мають різні джерела і показники рентабельності (вартість квитка в пасажирському поїзді та тарифу на вантажне перевезення відповідної категорії вантажу).

Математична модель розрахунку доходу при максимальній швидкості руху пасажирських поїздів v_a^{\max} має такий загальний вигляд (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_a N_a + d_q N_q \Rightarrow \max \\ d_a > 0, N_a > N_{a \min}, N_a < N_{a \max} \\ d_q > 0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

де: d_a – ставка доходу поїзда за пасажирські перевезення, (наприклад, євро/потяг-км); d_q – ставка доходу поїздів за контейнерні перевезення, євро/потяг-км

При аналізі були прийняті наступні обмеження, відображені нижче в системі рівнянь і нерівностей (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_a N_a + d_q N_q \Rightarrow \max \\ N_q = \frac{24 - t_{reg}}{j} - \left[1 + \frac{2}{j} \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) l \right] N_a \\ t_{reg} = 3 \\ 0,03 \leq j_t \leq 0,3 \\ 250 \leq v_a \leq 350 \\ 150 \leq v_q \leq 290 \\ 30 \leq l \leq 70 \\ d_a > 0 \\ 2 < N_a < 18 \\ d_q > 0 \\ 70 < N_q < 102 \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Для того, щоб переконатися в коректності, ефективності та адекватності економіко-математичної моделі перевезень на одній інфраструктурі в поїздах різних категорій, які дають різний дохід оператору інфраструктури, висунемо робочу гіпотезу, що

1. Плата за користування інфраструктурою залізниці (інфраструктурна плата за потяго-кілометр при пропусканні поїзда певної категорії за певним маршрутом) має компенсувати оператору інфраструктури витрати на її будівництво та експлуатацію;

2. Витрати на будівництво та експлуатацію залізничної інфраструктури прямо залежать від максимальної швидкості поїзда, на яку вона розрахована, та обернено пропорційна до середньої відстані між станціями на залізничній лінії, причому вплив максимальної швидкості на ці витрати сильніший, ніж відстань між станціями.

Ці припущення підтверджуються діючими системами ставок плати за користування залізничною інфраструктурою, зокрема в Deutsche Bahn AG діє така система [15, с. 4–11]:

Таблиця 1

Ставки плати за інфраструктуру

Тарифи, євро/поїзд-км	d_q	d_a
min	2.98	2.65
max	4.22	12.17

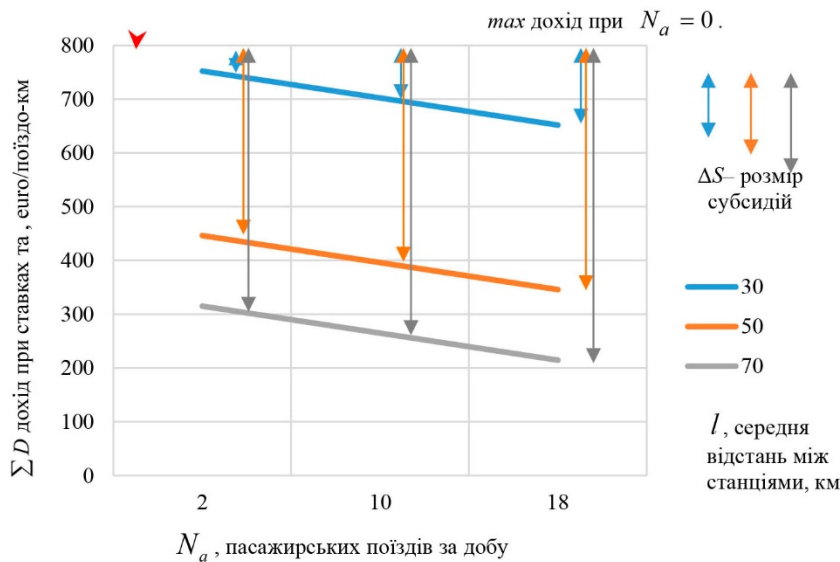


Рис. 2. Залежність доходу та обсягу субсидії за різних ставок плати за користування інфраструктурою та кількості пасажирських поїздів.

З графіків видно, що навіть за «ідеальних» умов, коли є необхідний вантажопотік для використання всієї потужності вантажних поїздів у розмірі N_q після проходження необхідної кількості пасажирських поїздів N_a , загальна виручка від перевезень $\sum D$ зменшується зі збіль-

Дані таблиці 1 показують, що пасажирські поїзди мають найвищі показники використання інфраструктури, що пов'язано з їх вищою швидкістю порівняно з вантажними поїздами, які курсують по тій же інфраструктурі. Враховуючи вищевикладене, дохід оператора інфраструктури можна представити за формулою (8), яка наведена без проміжних перетворень щодо прийнятих вагових коефіцієнтів впливу на витрати та доходи від перевезення таких факторів моделі, як швидкість поїздів v_q, v_a і відстань між проміжними пунктами l :

$$\sum D = d_q \left[2 \frac{v_q}{l} (24 - t_{reg}) - \left(5 - 4 \frac{v_q}{v_a} \right) N_a \right] + d_a N_a. \tag{8}$$

Формула (8) відображає «ідеальну» ситуацію, коли через елемент інфраструктури довжиною l пропускається необхідна кількість пасажирських поїздів N_a а решта пропускної спроможності використовується для пропуску вантажних поїздів у кількості N_q . Результати розрахунків за формулою (8) наведено на рис. 2.

шенням кількості пасажирських поїздів. Тобто збитковість і необхідність субсидування пасажирських перевезень тут має ще одне підтвердження. Пасажирські перевезення є «соціальним замовленням» (державними зобов'язаннями), тому в усіх країнах воно так чи інакше субсидується замовниками цих перевезень, якщо вони невигідні для перевізника:

Однак такий підхід не стимулює перевізника до зниження власних операційних витрат. Більш продуктивним ми вважаємо інший підхід, коли розмір дотацій буде базуватися не на розмірі збитків, а на розмірі дотування недоотриманого доходу (9).

$$\Delta \sum D_s = \sum D_{N_a=0} - \sum D \quad (9)$$

де: $\sum D_{N_a=0}$ – дохід від використання інфраструктури лише вантажними поїздами, за відсутності пасажирських поїздів ($N_a = 0$).

Приклад залежності, що відображається формулою (9), наведено на рис. 2..

Аналіз результатів розрахунків за моделлю показує, що рентабельність оператора інфраструктури зменшується при:

1. збільшенні довжини обмежувального перегону лінії;
2. збільшення кількості пасажирських поїздів;
3. зниження швидкості руху вантажних поїздів;
4. збільшення швидкості пасажирських поїздів (останнє пояснюється «зняттям» більш прибуткових вантажних поїздів пасажирськими).

З іншого боку, рентабельність найбільша при мінімальній довжині обмежувального перегону лінії, мінімальній кількості пасажирських поїздів і мінімальній різниці швидкостей пасажирських і вантажних поїздів.

Результати аналізу доходів оператора інфраструктури показують, що найбільша залежність пов'язана з мінімальною довжиною обмежувального перегону та швидкістю, особливо вантажних поїздів, а точніше мінімальною різницею між швидкостями пасажирських і вантажних поїздів. Враховуючи ці висновки, приймемо ваговий коефіцієнт впливу на прибутковість оператора інфраструктури від відстані на рівні $a_l = 0,2$ та ваговий коефіцієнт впливу на прибутковість оператора інфраструктури від швидкості на рівні $a_v = 0,8$.

Виходячи з цих обмежень, розрахуємо середньозважену ставку доходу від плати за користування залізничною інфраструктурою (10), (11):

$$d'_a = a_v d_q^v + a_l d_q^l; \quad (10)$$

$$d'_a = a_v d_a^v + a_l d_a^l, \quad (11)$$

де: d'_q – середньозважена ставка доходу плати за використання інфраструктури вантажними поїздами; d'_a – середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою пасажирськими поїздами; a_l – ваговий коефіцієнт впливу

швидкості; a_v – ваговий коефіцієнт впливу відстані; d_q^v – середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою вантажних поїздів залежно від швидкості; d_q^l – середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою вантажними поїздами залежно від відстані; d_a^v – середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою пасажирських поїздів залежно від швидкості; d_a^l – середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою пасажирськими поїздами в залежності від відстані.

Середньозважена ставка доходу плати за користування інфраструктурою пасажирськими та вантажними поїздами d_{aq} визначається як (12):

$$d_{aq} = \frac{d'_a N_a + d'_q N_q}{N_a + N_q}. \quad (12)$$

Формули (10), (11) та (12) використовуються для обґрунтування середньозваженого значення показників, які необхідно використовувати при формуванні та оцінці адекватності моделі оптимізації процесів управління інфраструктурою, а також при проектуванні параметрів інфраструктури ВШЗ, зокрема оптимальної кількості та розташування станцій і зупинок на лінії, що впливає як на необхідні капітальні вкладення, термін їх окупності, так і на умови експлуатації ВШЗ, у тому числі на залучення пасажиропотоку.

3. Оптимальна кількість станцій на лінії ВШЗ

Розташування та кількість вузлів відповідної мережі ВШЗ по окремих лініях є одним із основних аспектів її проектування, побудови та експлуатації. Іншими словами, більша чи менша кількість станцій на лінії означає коротші або довші маршрути між ними, що впливає на витрати на будівництво та експлуатацію, економічні показники та інші аспекти життєвого циклу ВШЗ. На нашу думку, при визначенні оптимальної кількості станцій на лінії слід враховувати такий економічний фактор, як дотування (субсидування) пасажирських перевезень у тій частині витрат оператора інфраструктури, яка не покривається доходами від пасажирських і вантажних перевезень, коли лінія функціонує за принципом спільного використання.

Як зазначалося вище, важливим фактором при прийнятті рішення є розмір субсидування недоотриманого доходу у разі збільшення кількості пасажирських поїздів, які будуть менш прибутковими для оператора інфраструктури, ніж вантажні.

Розмір дотації під час експлуатації ВШЗ S_{OP} , можна визначити як (13):

$$\left. \begin{aligned} S_{OP} &= D_{\max} - D_{act} \\ D_{\max} &= \left\{ \frac{24 - t_{reg}}{j} - \left[1 + \frac{2}{j} \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) l \right] N_a \right\} d'_q + N_a d'_a \\ S_{OP} &= \frac{24 - t_{reg}}{j} d'_q - \left\{ \frac{24 - t_{reg}}{j} - \left[1 + \frac{2}{j} \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) l \right] N_a \right\} d'_q + N_a d'_a \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де: D_{\max} – максимальний дохід на лінії ВШЗ за «ідеальних» умов (див. вище); D_{act} – фактичний дохід на лінії ВШЗ, враховуючи «видалення» прибуткових вантажних поїздів менш прибутковими пасажирськими поїздами, які займають більшу пропускну спроможність лінії.

Як видно з (13), на величину субсидій впливає відстань між станціями l , як безпосередньо, так і у вигляді більш складних залежностей, наприклад, її вплив на швидкість поїзда. Середнє значення цієї відстані, для певної довжини лінії, впливає на кількість станцій, які необхідно побудувати на лінії, а отже, на розмір капітальних вкладень, термін їх окупності та ефективність використання інфраструктури ВШЗ.

Формула для розрахунку загальних капітальних витрат E_C на будівництво інфраструктури на одну станцію наведена нижче (14):

$$E_C = C_{1km} \sum l_{tr} + \sum_{i=1}^{n_{tr}} n_{toi} C_{toi} + C_B \quad (14)$$

де: C_{1km} вартість будівництва 1 км станційної колії, євро; l_{tr} – загальна довжина поїзда, м; $\sum l_{tr}$ – сумарна довжина всіх колій на станції, м; n_{tr} – кількість колій на станції; n_{toi} – кількість рейкових стрілочних переводів певного типу; C_{toi} – вартість залізничних стрілочних переводів певного типу, євро; C_B – вартість усієї будівлі на вокзалі, євро.

Для подальших розрахунків будемо вважати, що для однієї станції в середньому буде достатньо 3 колій, а відстань між осями колій в середньому 5 м.

Загальні капітальні витрати $\sum E_C$ на будівництво інфраструктури всіх станцій визначаються за формулою (15):

$$\sum E_C = C_G + K_{st} \left[C_{1km} \sum l_{tr} + \sum_{i=1}^{n_{tr}} n_{toi} C_{toi} + C_B \right] \quad (15)$$

де: C_G – капітальні витрати на будівництво інфраструктури єдиного центру управління ВШЗ, незалежно від кількості станцій, євро; K_{st} – кількість станцій на лінії.

Для розрахунку оптимальної кількості станцій сформуємо цільову функцію оптимізаційної задачі, яка відображає пошук мінімальних сумарних витрат на субсидування збитків від проходження пасажирських поїздів на лініях ВШЗ $\sum S_{OP}$ замість більш прибуткових вантажних та витрати на будівництво та обслуговування інфраструктури ліній і станцій ВШЗ $\sum E_C$ які залежать від номера станції K_{st} . Введемо позначення $x = K_{st}$. Підставивши x у формули (13) і (15), які відображають два компоненти цільової функції, описані вище, знаходимо першу похідну $\frac{dY(x)}{dx}$ цільової функції, диференціюючи її за аргументом x . Опускаючи проміжні перетворення, наведемо підсумкову формулу (17), за якою розраховується оптимальна кількість станцій K_{st} на лінії ВШЗ довжиною L , при якій загальні витрати, відображені цільовою функцією (16), будуть мінімальними.

$$Y(x) = \sum S_{OP} + \sum E_C \Rightarrow \min; \quad (16)$$

$$x = \sqrt{\frac{2N_a d'_q \left(\frac{1}{v_q} - \frac{1}{v_a} \right) L}{j \left\{ C_B + (2n_{tr} + 1) \bar{C}_{to} + 2 \left[\frac{n_{tr}}{2} (m_B l_B + l_{loc}) + e(42n_{tr} - 37) \right] \frac{C_{1km}}{1000} \right\}}} \quad (17)$$

де: $x = K_{st}$ оптимальна кількість станцій на лінії ВШЗ довжиною L .

Результати розрахунків на основі описаної тут математичної моделі представлені на рис. 3.

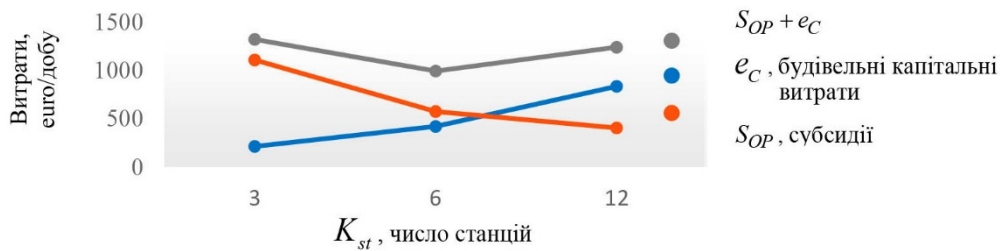


Рис. 3. Сума субсидій та сума капітальних витрат для різної кількості станцій

Як видно з рис. 3, запропонована економіко-математична модель дає змогу відобразити зменшення потреби в дотаціях S_{OP} при збільшенні кількості станцій K_{st} на лінії, оскільки її робота стає більш гнучкою при зміні розміру та структури потягопотоків. Збільшення потоку поїздів краще використовує пропускну спроможність. З іншого боку, будівництво більшої кількості станцій вимагає більших капітальних витрат e_C , що також видно з результатів розрахунку на основі моделі. Натомість цільова функція, що відображає загальні витрати $S_{OP} + e_C$, має чіткий мінімум (у нашому випадку при $K_{st} = 6$), що відповідає оптимальній кількості станцій на лінії за заданих умов її будівництва та експлуатації. Така кількість станцій і загальна довжина лінії дають можливість визначити середню довжину перегону та обґрунтовано розташувати на лінії ці станції в максимальній близькості до пунктів утворення та призначення пасажиропотоків.

Висновки

Для технологічно-економічного обґрунтування бізнес-моделі майбутньої системи високошвидкісного залізничного сполучення в Україні доцільно використовувати економіко-математичну модель раціонального співвідношення пасажирських і вантажних перевезень на одній лінії та розташування на ній станцій.

Моделювання ґрунтується на врахуванні витрат на будівництво та експлуатацію залізниці, плати за користування залізничною інфраструктурою, максимальної та середньої експлуатаційної швидкості поїздів, інших операційних змінних та, як запропоновано автором, на врахуванні субсидування нерентабельних пасажирських перевезень.

Результати розрахунків показують, що прибутковість оператора залізничної інфраструктури залежить від різних факторів, таких як середня довжина перегону, кількість і швидкість вантажних і пасажирських поїздів. Найбільша рентабельність спостерігається при мінімальній довжині перегону, мінімальній кількості пасажирських поїздів і мінімальній різниці швидкостей пасажирських і вантажних поїздів.

Запропоновано методику визначення раціонального співвідношення пасажиропотоку та вантажоперевезень на залізниці з урахуванням балансу інтересів оператора інфраструктури та операторів перевезень. Автор наголошує на необхідності зміни підходів до субсидування пасажирських перевезень, зокрема, акцентуючи увагу на недоотриманих доходах від вантажних перевезень у разі спільного використання швидкісної залізниці для пасажирських та вантажних перевезень.

Визначено параметри бізнес-моделі, в тому числі показники технології та економіки пасажирських і вантажних перевезень. Ці параметри використовуються для аналізу технологічних аспектів бізнес-моделі, таких як оптимальна відстань між станціями, необхідна кількість поїздів (вагонів/контейнерів у поїздах) для пасажирських і вантажних перевезень. Це дозволяє розрахувати транспортні витрати та ціну транспортних послуг для досягнення балансу інтересів операторів інфраструктури та транспортування.

На основі отриманих результатів можна аналізувати та моделювати різні сценарії розвитку інфраструктури високошвидкісних залізниць, а також визначити ринкову стратегію оператора інфраструктури з метою забезпечення оптимальної технологічної бази та досягнення балансу інтересів різних учасників системи за необхідного рівня якості транспортного обслуговування користувачів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року (НТС 2030): Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>. (дата звернення 31.03.2019).
- [2] Aya Shawn, "Is the Chinese High-Speed Rail operating at a loss? - Quora," 2016. [Online]. URL: <https://www.quora.com/Is-the-Chinese-High-Speed-Rail-operating-at-a-loss>, accessed February (access data 12.01.2024).
- [3] Elena G. Sevillano, "Spain's high-speed rail: One in four AVE stations used by fewer than 100 passengers a day | In English | EL PAÍS," 2016. [Online]. URL: https://english.elpais.com/elpais/2016/05/23/inenglish/1464003478_520592.html, accessed February (access data 12.01.2024).

- [4] Slim Hammadi, Mekki Ksouri: Multimodal transport systems, London: ISTE; Hoboken, NJ: Wiley, p. 256 (2014).
- [5] Janic, Milan: A multidimensional examination of performances of HSR (High-Speed Rail) systems, *Journal of Modern Transportation*, Vol. 24, pp. 1–21 (2016).
- [6] L. R. Brunello: High speed rail and access transit networks, Springer, p. 163 (2018).
- [7] Q. Mahboob, E. Zio: Handbook of RAMS in Railway Systems: Theory and Practice. CRC Press, p. 765 (2018).
- [8] Myronenko V., Samsonkin V. et al.: Ukraine in system of transport links. *International Journal of Engineering Research and Development (IJERD)*, Vol. 13, Issue No. 9, pp.1–6 (2017).
- [9] V. Myronenko and T. Hrushevskya: Problems of passenger and freight trains combined traffic on high-speed railway lines, *ETiL*, vol. 76, pp. 101–106, Mar. (2018).
- [10] Ghilas, V.; Demir, E.; Woensel, van, T. : Integrating passenger and freight transportation: model formulation and insights. *Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven*, Vol. 441, p. 23 (2013).
- [11] Zhujun Li, Amer Shalaby, Matthew J. Roorda, Baohua Mao: Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 147, p. 102205 (2021).
- [12] Ezzeddine Fatnassi, Jouhaina Chaouachi, Walid Klibi: Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 81, Part 2, pp. 440–460 (2015).
- [13] Siqiao Li, Xiaoning Zhu, Pan Shang, Tianqi Li, Wenqian Liu: Optimizing a shared freight and passenger high-speed railway system: A multi-commodity flow formulation with Benders decomposition solution approach, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 172, pp. 1–31 (2023).
- [14] Walid Behiri, Sana Belmokhtar-Berraf, Chengbin Chu: Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 115, pp. 227–245 (2018).
- [15] Standard Rates and other Provisions of DB Cargo AG, URL: https://www.dbcargo.com/resource/blob/9916364/fa3ea49b53069565bcfd0ba4dcc6f376/Standard-Rates-and-other-Provisions-of-DB-Cargo-AG-2023_EN-data.pdf, accessed February (2024).

Поздняков А. А.

МОДЕЛЮВАННЯ МАЙБУТНІХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ЗІ СПІЛЬНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ПАСАЖИРСЬКИХ ТА ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Розглянуто можливості спільного використання майбутніх високошвидкісних залізниць в транспортній системі України як для пасажирських, так і для окремих категорій вантажних перевезень. Для технологічно-економічного обґрунтування бізнес-моделі використано економіко-математичну модель раціонального співвідношення пасажирських і вантажних перевезень на одній лінії та розташування на ній станцій. Модель ґрунтується на врахуванні витрат на будівництво та експлуатацію залізниці, плати за користування залізничною інфраструктурою, максимальної та середньої експлуатаційної швидкості поїздів, інших операційних змінних та на врахуванні субсидування нерентабельних пасажирських перевезень. Запропоновано методику обґрунтування раціонального співвідношення пасажирських і вантажних поїздів на лінії та визначення технологічних та економічних параметрів функціонування високошвидкісних залізниць у складі мультимодальної транспортної системи України. Описано економіко-математичну модель, яка дозволяє оптимізувати проектні та технологічні рішення при будівництві та експлуатації високошвидкісних залізниць залежно від економічних та інших умов їх функціонування. Визначено параметри бізнес-моделі, в тому числі показники технології та економіки пасажирських і вантажних перевезень. Ці параметри використовуються для аналізу технологічних аспектів бізнес-моделі, таких як оптимальна відстань між станціями, необхідна кількість поїздів (вагонів/контейнерів у поїздах) для пасажирських і вантажних перевезень. Це дозволяє розрахувати транспортні витрати та ціну транспортних послуг для досягнення балансу інтересів операторів інфраструктури та операторів перевезень. На основі отриманих результатів можна аналізувати та моделювати різні сценарії розвитку інфраструктури високошвидкісних залізниць, а також визначити ринкову стратегію оператора інфраструктури.

Ключові слова: оператор інфраструктури, оператор перевезень, мультимодальний транспорт, пасажирські перевезення, доступність, високошвидкісна залізниця (ВШЗ).

Pozdniakov A.

MODELLING OF FUTURE UKRAINE'S HIGH-SPEED RAILWAYS WITH SHARED USE FOR PASSENGERS AND CARGO SERVICE

The possibilities of joint utilization of future high-speed railways in Ukraine's transportation system, both for passenger and specific freight categories, are examined. An economic-mathematical model of the rational ratio of passenger and freight transportation on one line and the location of stations on it was used for the technological and economic justification of the business model. The model is based on taking into account the costs of construction and operation of the railway, the fee for using the railway infrastructure, the maximum and average operational speed of trains, other operational variables and taking into account the subsidization of unprofitable passenger transport. A methodology for justifying the rational ratio of passenger and freight trains on the lines is proposed, along with the determination of technological and economic parameters for the operation of high-speed railways within Ukraine's multimodal transportation system. An economic-mathematical model is described, which allows for the optimization of design and technological decisions during the construction and operation of high-speed railways, depending on the economic and other conditions of their operation. The parameters of the business model, including indicators of technology and economy of passenger and cargo transportation, were determined. These parameters are used to analyze the technological aspects of the business model, such as the optimal distance between stations, the required number of trains (wagons/containers in trains) for passenger and freight transportation. This allows you to calculate transport costs and the price of transport services to achieve a balance of interests of infrastructure operators and transport operators. On the basis of the obtained results, it is possible to analyze and simulate various scenarios for the development of high-speed railway infrastructure, as well as to determine the market strategy of the infrastructure operator.

Keywords: infrastructure operator, carrier, multimodal transport, passenger transportation, availability, High Speed Railway (HSR).

Стаття надійшла до редакції 27.02.2024 р.
Прийнято до друку 13.03.2024 р.