УДК 656.022 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118181

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОБУДОВИ ГРАФІКА ОБІГУ ШВИДКІСНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ ВУЗЛАХ

Канд. техн. наук Я. В. Запара, магістранти І. В. Майоров, О. В. Петрів

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ ОБРАЩЕНИЯ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛАХ

Канд. техн. наук Я. В. Запара, магистранты И. В. Майоров, О. В. Петрив

OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION OF SCHEDULES OF HIGH-SPEED PASSENGER TRAINS IS IN RAILWAY UNITS

Cand. of techn. sciences Y. Zapara, magistrands I. Maiorov, O. Petriv

Визначено оптимальний графік побудови обігу швидкісних поїздів у залізничних вузлах, що дає можливість вивільнення составів швидкісних поїздів для подальшого їх раціонального використання на інших полігонах залізниць для задоволення потреб пасажирів. Застосування запропонованої методики дозволяє також ефективно використовувати стюардів поїздів та зменшити потребу у колійному розвитку станцій залізничного вузла для обслуговування швидкісних поїздів.

Ключові слова: *оптимізація, обіг, пасажирські перевезення, швидкісні поїзди, залізничний вузол.*

Определен оптимальный график построения обращения скоростных поездов в железнодорожных узлах, что дает возможность высвобождения составов скоростных поездов для дальнейшего их рационального использования на других полигонах железных дорог для удовлетворения потребностей пасажиров. Применение предложенной методики позволяет также эффективно использовать стюардов поездов и уменьшить потребность в путевом развитии станций железнодорожного узла для обслуживания скоростных поездов.

Ключевые слова: *оптимизация, оборот, пассажирские перевозки, скоростные поезда , железнодорожный узел.*

The optimal compilation of speed trains in railway junctions schedule is determined. The schedule allows release of compositions of high-speed trains to further their rational use at other railroad tracks to meet the passenger's needs. The application of the proposed methodology allows efficient use of train stewards, reducing the need for stations track development.

Today on Ukrainian railways there is a need to increase the frequency of rotation of high-speed trains in the existing directions and to introduce their rotation in other directions. Achieving this goal will be possible after replenishment of the fleet of high-speed trains or the release of compositions by constructing an optimal schedule of speed trains in railway junctions.

New approaches are required for the development of high-speed traffic in the conditions of high value both of the high-speed lines and the corresponding rolling stock, The further development of high-speed rail transport on the Ukrainian railways is possible by developing an optimal process for the operation of existing railways capacities. Taking into account the specifics

of the work of the railways, the needs of passengers in the transport of certain regions and nodes will allow the withdrawal of high-speed railway traffic to a new level.

Keywords: *optimization, circulation , passenger transportation, high-speed trains, railway junction.*

Вступ. На кінець 2017 року перевезення денними швидкісними поїздами категорії Інтерсіті+ і Інтерсіті в Україні практично досягають 15 % від загальних. Слід сказати, що за п'ять років, які пройшли з моменту виходу на ринок цього нового «продукту», швидкісні поїзди завоювали свого пасажира. Дуже багато людей вже не уявляють собі подорожей між найбільшими містами країни без цих поїздів, а середня населеність вагона давно перевищила 80 %. На сьогодні на залізницях України курсують 16 швидкісних поїздів. Вже відчувається необхідність збільшити частоту обертання на діючих напрямах – це передусім Харків, Дніпро, Львів. Перспективним є розвиток швидкісного сполучення з Луцьком і Рівним, а також з Миколаєвом і Херсоном. Так само перспективними є Кременчук, Черкаси, Кропивницький. Проте проблеми Черкас, Миколаєва і Херсона на сьогодні у відсутності електрифікації. Дуже потужний ринок для денних перевезень – це Вінниця, Хмельницький і Тернопіль – сумарне населення більше 1 мільйона людей, більше того, населення цих міст відрізняється високою мобільністю, що дозволяє ввести тактовий рух швидкісних поїздів (курсування поїздів через рівну кількість годин), але це буде можливо після поповнення парку швидкісних поїздів або вивільнення составів швидкісних поїздів шляхом побудови оптимального графіка обігу поїздів у залізничних вузлах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високий рівень розвитку швидкісних та високошвидкісних залізниць країн Європи та інших континентів зумовив «зародження» швидкісного руху в Україні. Перевагами його є підвищення безпеки, зниження екологічного навантаження, соціально-економічна ефективність тощо, серед основних недоліків – велика вартість будівництва та обслуговування швидкісних ліній [1]. Питанням перспектив розвитку, з урахуванням світового досвіду, та ефективності функціонування швидкісного залізничного руху на залізницях України приділено багато уваги [2-5]. Останніми роками вченими профільних університетів та фахівцями транспорту освітлено та запропоновано до вирішення низку актуальних задач з цього питання. Серед вчених Українського державного університету залізничного транспорту слід відзначити роботи Т. В. Бутько, В. Л. Диканя, П. В. Долгополова, Я. В. Запари, Т. Ю. Калашнікової, О. А. Малахової, А. В. Прохорченка, О. В. Розсохи, Г. М. Сіконенка та ін. [6-8]. Однак дослідженню питань ефективності функціонування швидкісних поїздів на регіональних філіях залізниць з точки зору знаходження раціональних варіантів ув’язки поїздів в загальний обіг з урахуванням зручного для пасажирів розкладу прибуття та відправлення по початково-кінцевим станціям приділена недостатня увага. Так, в роботі [6] визначено, що найбільш сприятливим та відповідним для умов залізниць України є застосування змішаної моделі використання швидкісних магістралей. Вона дає змогу використовувати швидкісну магістраль як для пропускання швидкісних поїздів, так і для пропускання нічних пасажирських та приміських поїздів, а також здатна ефективно використовувати пропускну спроможність ділянки для всіх цих категорій поїздів. Проте у даній моделі не враховано зручний час для пасажирів розкладу прибуття та відправлення по початково-кінцевим станціям швидкісних ліній та не зазначено, як модель впливає на

роботу обслуговуючих технічних станцій швидкісних поїздів. У статті [7] удосконалено математичну модель оптимального розподілу потоку пасажирських поїздів високошвидкісних магістралей на полігоні залізниці. Як критерій оптимальності обрано максимальний прибуток пасажирської компанії при організації руху високошвидкісних поїздів на даному полігоні, однак у моделі не враховані інтереси пасажирів за розкладом та можливість ув'язки швидкісних пасажирських поїздів в загальний обіг. У роботі [8] зазначено, що одним із напрямків підвищення конкурентоспроможності залізниць та стійкого розвитку залізничних пасажирських перевезень є подальший розвиток швидкісного руху. Акцентовано увагу на те, що максимальний ефект при цьому досягається при відокремленні пасажирського й вантажного руху, однак конкретних економічних викладок стосовно залізниць України не наведено. При техніко-економічному обґрунтуванні доцільності функціонування швидкісних поїздів на залізницях України необхідно мати на увазі не тільки галузевий ефект (інтереси перевізника), а й кількісну оцінку закону економії часу, проте для залучення пасажирів на залізничний транспорт, зокрема швидкісні поїзди, необхідно враховувати інтереси пасажирів в частині зручного часу розкладу прибуття та відправлення по станціях швидкісних магістралей.

Із останніх іноземних робіт слід відзначити [9], де автором зроблена оцінка економічної ефективності способів організації швидкісного руху з урахуванням пропускної спроможності та інших інфраструктурних особливостей перегонів залізниць, але у роботі не зазначено як від кількості швидкісних поїздів, які обертаються на дільниці, залежить необхідний колійний розвиток станцій дільниці з урахуванням існуючого пасажиропотоку. Заслуговує на увагу також робота [10], у якій описано розвиток високошвидкісних магістралей як інструмент економічної інтеграції досягнень економік Китаю та Європи, і такі підходи можуть бути в певній мірі адаптовані до умов України для ефективного розвитку швидкісного руху. Автором роботи [11] показано, як впливає функціонування високошвидкісних магістралей на зміну європейського пасажиропотоку, однак у роботі не зазначено яким чином можливо врахувати особливості інших залізниць, зокрема українських, для застосування запропонованої методики.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є побудова оптимального графіка обігу швидкісних поїздів у залізничних вузлах, який би дозволив вивільнити состави швидкісних поїздів для подальшого їх раціонального використання на інших полігонах залізниць. Завданнями дослідження є знаходження раціональних варіантів ув'язки швидкісних пасажирських поїздів в загальний обіг з урахуванням зручного для пасажирів розкладу прибуття та відправлення по початково-кінцевих станціях; організація ритмічної та рівномірної роботи технічних станцій обслуговування швидкісних поїздів.

Основна частина дослідження. Постановку задачі оптимізації побудови графіків обігу швидкісних составів пасажирських поїздів у залізничних вузлах для забезпечення якісного обслуговування пасажирів найменшим числом составів і ефективного функціонування пасажирських технічних станцій можна сформулювати в такому вигляді: визначити розклад прибуття і відправлення швидкісних поїздів і обрати оптимальний варіант ув'язки составів швидкісних пасажирських поїздів в крупних вузлах при таких обмеженнях: за зручним для пасажирів часу прибуття-відправлення за початково-кінцевими пунктам і часом прослідування поїздами крупних попутних адміністративних центрів; часом

надходження составів на початково-кінцевій станції; кількістю составів, які одночасно знаходяться на станції; освоєнням запланованого пасажиропотоку на даному напрямі; часом неперервної роботи бригади стюардів; величиною вагонного парку, який існує. Критерієм задачі є мінімум сумарних поїздо-годин простою

$$F = \sum_{s=1}^{S} \sum_{i}^{N_S} \sum_{j}^{N_S} d_{ij}^{s} t_{ij}^{s} \to \min, \qquad (1)$$

де d_{ij}^{s} – матриця ув'язки швидкісних составів, яка набуває двох значень 1 (якщо t_{-i}^{s} ув'язується з t_{j}^{-s}) і 0 (в інакшому випадку). Визначається як

$$d_{ij}^{s} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N} d_{ij} = 1; \sum_{j=1}^{N} d_{ij} = 1, \qquad (3)$$

де t_{ij}^{s} – простій состава ij-го поїзда на станції s, год; який обчислюється за формулою $t_{ij}^{s} = t_{j}^{-s} - t_{-i}^{s}$, де t_{-i}^{s} – розклад прибуття поїздів на станцію s, год; i = 1,.. N_s; t_{j}^{-s} – розклад відправлення поїздів зі станції s, год; j = 1,…….. N_s; N_s – розміри руху по кожній s-ій станції ($N_s \in N$), пар; N – розміри руху на полігоні мережі, яка складається з S станцій, пар.

Поставлена багатофакторна задача є нелінійною і може бути послідовно вирішена шляхом декомпозиції її на ряд окремих лінійних задач:

- визначення оптимальних розкладів прибуття і відправлення швидкісних пасажирських поїздів на початково-кінцеві станції, які забезпечують інтереси пасажирів і раціональне завантаження станцій шляхом вибору тимчасових меж для розкладу прибуття і відправлення поїздів в залежності від часу їх знаходження на шляху слідування і черговості обробки составів на пасажирських технічних станціях (ПТС);
- обґрунтування вибору раціональних схем ув'язки швидкісних поїздів в загальний обіг;
- розрахунок композицій составів швидкісних пасажирських поїздів, ув'язаних в загальний обіг, які максимально задовольняють потреби пасажирів у місцях за типами вагонів і ефективністю використання рухомого складу;
- оптимізація чисельності бригади стюардів, які обслуговують ув'язані в загальний обіг состави пасажирських швидкісних поїздів.

Наступні обмеження до (1):

1) облік вимог пасажирів щодо зручного часу прибуття і відправлення на початково-кінцеві станції і до прослідування крупних попутних адміністративних центрів в денний час

$$t_{-i} = \{[6^{00} \div 7^{00}], [9^{00} \div 11^{00}], \varphi = 1; [6^{00} \div 12^{00}], \varphi = 2; [6^{00} \div 22^{00}], \varphi = 3, \qquad (4)$$

$$\bar{t}_{j} = \{[23^{00} \div 1^{00}], [17^{00} \div 20^{00}], \varphi = 1; [17^{00} \div 1^{00}], \varphi = 2; [8^{00} \div 24^{00}], \varphi = 3, \qquad (5)$$

$$6^{00} \le t_{k}^{np} \le 24^{00}, \qquad (6)$$

де ϕ – номер часової зони;

2) простій составів на початково-кінцевих станціях повинен бути не менше технологічного, який залежить від часу знаходження швидкісного поїзда на шляху прямування

$$\text{при } s=i \; t_{ij} \geq \{6, \gamma = 0 \div 2; \lambda = 1 \div \Lambda; 8, \gamma \geq 2; \lambda = 2 \div \Lambda; 10, \gamma \geq 2; \lambda = 1, \quad (7)$$

$$\text{при } s=j \; t_{ij} \geq \{3, \gamma = 0 \div 2; \lambda = 1 \div \Lambda; 4, \gamma \geq 2; \lambda = 2 \div \Lambda; 6, \gamma \geq 2; \lambda = 1, \quad (8)$$

де λ – категорія поїзда. Набуває такого значення: – 1, якщо поїзд швидкісний категорії Інтерсіті+ та Інтерсіті; – 2, якщо поїзд пасажирський дальній; – 3, якщо поїзд пасажирський місцевий (нічний); – 4, якщо поїзд пасажирський місцевий (денний); – Λ, якщо поїзд має іншу категорію;

3) кількість составів, які одночасно знаходяться на станції, не повинна перевищувати її ємність, тобто

$$M^s(t) = \sum_{\tau \in [t_1, t]} N^s_{пр}(\tau) - \sum_{\tau \in [t_1, t]} N^s_{отпр} \leq \Pi_s, \quad (9)$$

де $N^s_{пр}$, $N^s_{отпр}$ – відповідно число швидкісних поїздів, які прибули і відправились по s-й станції і в момент часу τ; Π_s – ємність s-ї станції, колій; t_1 – початок інтервалу накопичення;

4) місткість составів, ув'язаних в єдиний обіг, повинна освоювати густоту пасажиропотоку на даному напрямі:

$$a_x x_{ij} + a_y y_{ij} + a_z z_{ij} + ... + a_k k_{ij} \geq A_{ij}, \quad (10)$$

де A_{ij} – величина густоти пасажиропотоку на напрямі ij, люд;

5) чисельність бригад провідників, які обслуговують ув'язані в єдиний обіг состави, не повинна перевищувати їх розрахункової чисельності за планом формування;

6) час роботи бригади стюардів, які обслуговують ув'язані в єдиний обіг состави, не повинен перевищувати нормативного (1);

7) парк вагонів за типами рухомого складу не повинен перевищувати наявний робочий парк вагонів на полігоні мережі

$$B_1 + B_2 \leq \sum_{1,2} B^{1,2}_{НП}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{24} \sum_{ij} \theta_{ij} x_{ij} = B_1; \frac{1}{24} \sum_{ij} \theta_{ij} y_{ij} = B_2; \quad (12)$$

де B_1, B_2 – потрібний парк вагонів відповідно 1-го та 2-го класу, який залежить від обігу составів θ_{ij} і наявності вагонів кожної категорії в составі поїзда;

8) обов'язкове дотримання умови повернення состава на станцію приписки або ПТС.

Рішенням комплексної задачі є матриця d_{ij} (2) при мінімальному значенні функції (1) при обмеженнях (4) – (12).

Запропонована процедура поетапного отримання підсумкової матриці можливих ув'язок (табл. 1) дозволяє на кожному етапі (кроці) значно зменшувати кількість варіантів, які розглядаються, шляхом порівняння і відбору можливих варіантів ув'язки за такими умовами: простоєм, який повинен бути не менше технологічного; належністю составів, які ув'язуються, і періодом їхнього призначення; категоріями поїздів, які ув'язуються; композиціями составів, які ув'язуються (місткістю).

Таблиця 1

Підсумкова матриця можливих ув'язок

$\bar{t}_j$ / t_{-i}	$\bar{t}_1$	$\bar{t}_2$	…	$\bar{t}_j$	…	$\bar{t}_{N-1}$	$\bar{t}_N$
$\bar{t}_1$	1 0 1 0	1 1 1 1		1 1 1 1		1 1 1 0	1 1 1 1
$\bar{t}_2$	1 0 1 1	1 1 1 0		1 0 0 0		1 1 1 1	1 1 1 0
…							
$\bar{t}_1$	1 1 1 0	1 1 1 1		1 1 1 1		1 1 1 1	1 1 1 0
…							
$\bar{t}_{N-1}$	0 0 0 0	1 1 1 0		1 1 1 1		1 1 1 1	1 1 0 0
$\bar{t}_N$	1 1 1 1	1 1 1 1		1 1 1 0		1 1 0 0	1 0 0 0

Для визначення підсумкової матриці ув'язки розкладів составів швидкісних пасажирських поїздів, яка дозволяє вивільнити з обігу состави шляхом скорочення їх непродуктивності простою на ПТС, необхідно розглянути підсумкову матрицю можливих ув'язок і визначити всі можливі варіанти ув'язки t_{-i} з $\bar{t}_j$. При цьому розглядаються тільки ті варіанти, які задовольняють чотири вищеперераховані умови. Варіанти для ув'язки t_{-i} з $\bar{t}_j$ (клітинка матриці з чотирма одиницями в кутках) обираються таким чином, щоб на перехресті рядка і стовпчика знаходилось тільки одне значення t_{ij}. Потім проводиться розрахунок поїздо-годин простою за критерієм $F = \sum_{ij} d_{ij} t_{ij}$, тобто знаходимо мінімум

$$F_{\min} \in \{F_1, F_2, F_3\}, \qquad (13)$$

де $F_1 = t_{1N} + t_{21} + t_{ij} + t_{N-1N-1} + t_{N2}$;

$$F_2 = t_{1N} + t_{2N-1} + t_{i2} + t_{N-1j} + t_{N1};$$

$$F_3 = t_{1N} + t_{21} + t_{1N-1} + t_{N-1j} + t_{N2}.$$

Підсумковий варіант ув'язки розкладів, який забезпечує мінімальний простій составів на ПТС, подано у вигляді матриці в табл. 2.

Висновки. Окреслені шляхи розвитку швидкісного пасажирського руху на залізницях України. Розроблена комплексна модель, яка дозволила формалізувати побудову графіку обігу швидкісних поїздів з урахуванням зручного для пасажирів розкладу прибуття та відправлення на початково-кінцеві станції, ритмічної та рівномірної роботи технічних станцій, вивільнити рухомий склад і зменшити потребу в колійному розвитку.

Подальший розвиток швидкісного залізничного транспорту на залізницях України в умовах великої вартості як самих швидкісних ліній, так відповідного

рухомого складу, можливий за рахунок розробки оптимального процесу функціонування наявних потужностей залізниць, врахування специфіки роботи залізниць та потреб пасажирів у перевезеннях окремих та регіонів та вузлів.

Таблиця 2

Підсумкова матриця можливих ув'язок

$\bar{t}_j$ / t_{-i}	$\bar{t}_1$	…	$\bar{t}_j$	…	$\bar{t}_N$
t_{-1}	1 0 0 1		1 1 1 1		1 0 1 0
t_{-i}	0 0 0 0		1 1 0 1		1 1 1 1
t_{-N}	1 1 1 1		0 1 1 1		1 0 0 1

Список використаних джерел

1. Анисимов, П. С. Высокоскоростные железнодорожные магистрали и пассажирские поезда [Текст]: монография / П. С. Анисимов, А. А. Иванов. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 542 с.
2. Момот, А. В. Економічна ефективність високошвидкісних пасажирських залізничних перевезень в Україні [Текст]: дис… канд. екон. наук / А. В. Момот. – Дніпропетровськ, 2014. – 192 с.
3. Журавель, В. Аналіз досвіду використання високошвидкісних залізничних сполучень [Текст] / В. Журавель // Українські залізниці. – 2016. – №1. – С. 34-41.
4. Божок, Н. О. Напрями впровадження швидкісних пасажирських перевезень в Україні [Текст] / Н. О. Божок // Проблеми економіки транспорту: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 5. – С. 46-56.
5. Босов, А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине [Текст] / А. А. Босов, Г. Н. Кірпа. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2004. – 144 с.
6. Калашнікова, Т. Ю. Визначення найкращої моделі використання високошвидкісних магістралей для залізниць України [Текст] / Т. Ю. Калашнікова, Ю. М. Чередніченко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 162. – С. 177-182.
7. Розсоха, О. В. Моделювання пасажирських поїздопотоків високошвидкісних залізничних магістралей [Текст] / О. В. Розсоха, В. М. Солонець // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 5-13.
8. Сіконенко, Г. М. Удосконалення перевезення пасажирів при розвитку залізничного швидкісного руху [Текст] / Г. М. Сіконенко, О. В. Кішко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 140. – С. 55-59.
9. Климова, Е. В. Оценка экономической эффективности способов организации скоростного движения пассажирских поездов: [Текст]: автореф. дис… канд. экон. наук: 08.00.05 / Е. В. Климова; [Сибирск. гос. ун-т путей сообщ.]. – Новосибирск, 2015. – 24 с.

10. Cheng. Y. High-speed rail networks, economic integration and regional specialization in China and Europe [Text] / Yuk-shing Cheng, Becky P.Y. Loo, Roger Vickerman // Travel Behaviour and Society, Volume 2, Issue 1, January 2015, P. 1-14.

11. Clewlow, R. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic [Text] / Regina R. Clewlow, Joseph M. Sussman, Hamsa Balakrishnan // Transport Policy, Volume 33, May 2014, P. 136-143.

Запара Ярослав Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.
E-mail: y.zapara@gmail.com.
Майоров Ігор Володимирович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: y.zapara@gmail.com.
Петрів Ольга Василівна, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: oliapetriv06031985@gmail.com.

Zapara Yaroslav, Ph.D., lecturer of management of freight and commercial work, Faculty of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-85. E-mail: y.zapara@gmail.com.
Maiorov Ihor, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport.
E-mail: y.zapara@gmail.com.
Petriv Olga, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport.
E-mail: oliapetriv06031985@gmail.com.

Стаття прийнята 02.10.2017 р.