УДК 656.211.26 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92810**

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ У ВЕЛИКОМУ ЗАЛІЗНИЧНОМУ ВУЗЛІ

Д-р техн. наук О. М. Огар, М. С. Дребот, А. Б. Мумінов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ В КРУПНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ УЗЛЕ

Д-р техн. наук А. Н. Огарь, М. С. Дребот, А. Б. Муминов

MATHEMATICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE PASSENGER STATION FOR HIGH-SPEED TRAINS SERVICE RATIONAL LOCATION IN A LARGE RAILROAD JUNCTION

Doct. of techn. sciences O. Ogar, M. Drebot, A. Muminov

Проаналізовано наукові підходи до розрахунку конструктивно-технологічних параметрів швидкісних і високошвидкісних магістралей. Сформовано математичну модель визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі на основі врахування множини факторів. Розроблено рекомендації щодо використання результатів моделювання з ув'язкою зі структурою міста.

Ключові слова: *пасажирська станція, високошвидкісні магістралі, високошвидкісний рух, залізничний вузол, математична модель.*

Проанализированы научные подходы к расчету конструктивно-технологических параметров скоростных и высокоскоростных магистралей. Сформирована

математическая модель определения рационального места расположения пассажирской станции для обслуживания высокоскоростных поездов в крупном железнодорожном узле на основе учета множества факторов. Разработаны рекомендации по использованию результатов моделирования с увязкой со структурой города.

Ключевые слова: *пассажирская станция, высокоскоростные магистрали, высокоскоростное движение, железнодорожный узел, математическая модель.*

Scientific approaches to the calculation of structural and technological parameters of high-speed lines were analyzed. It was concluded that known scientific approaches were mainly focused on improving of the mentioned parameters, and the issue of the justification of the parameters and location of passenger stations for high-speed trains service in large railroad junctions is considered insufficiently. A mathematical model for the determination of the rational location of a passenger station for high-speed trains service in a large railroad junction has been created. The model is based on taking into consideration the quantity, basic features of business objects, residential areas, and sights, and their distance from the conventional city center; the quantity and location of the underground system, the traffic capacity and availability of urban transport in the streets and avenues; the high-speed trains mileage from a city boundary to a passenger station. The objective of the determination of a passenger station location in a large railroad junction has been presented as an integer programming problem. However, since the solution of this problem is a point, in which a passenger station construction is impossible or causes certain difficulties, it has been proposed to analyze a city structure and to determine the passenger station rational location by the minimal distance to the optimal place.

Key words: *passenger station, high-speed lines, high-speed traffic, railroad junction, mathematical model.*

Вступ. Упровадження в Україні високошвидкісного екологічно чистого наземного транспорту є загальнонаціональним завданням і диктується в першу чергу умовами сучасного способу життя і ведення бізнесу. Його вирішення дало б змогу збільшити пасажирооборот, скоротити потребу в рухомому складі і поліпшити ситуацію щодо організації перевезень пасажирів на основних напрямках мережі залізниць. Результатом упровадження високошвидкісного руху в Україні стало б зростання престижу не тільки вітчизняних залізниць, а й держави в цілому.

При проектуванні високошвидкісних магістралей вирішується ряд складних питань, серед яких особливе місце посідають питання, пов'язані з розміщенням, технічним оснащенням і конструкцією колійного розвитку роздільних пунктів, які значною мірою визначають рівень забезпечення життєдіяльності високошвидкісних залізниць. При цьому раціональне розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великих залізничних вузлах належать до класу дуже складних завдань, що обґрунтовується необхідністю врахування великої кількості факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми розвитку швидкісного і високошвидкісного руху пасажирських поїздів вивчали такі вчені як Бещева Н. І., Бутько Т. В., Козлов В. Ю., Колодяжний Н. В., Кочнєв Ф. П., Миронов В. С., Пазойський Ю. О., Переселенков Г. С., Розсоха О. В., Шубко В. Г. та ін. [1-13].

Визначенням оптимальної технічної швидкості руху поїздів займалися під керівництвом Н.І. Бещевої у ВНДІЗТі [1]. Як критерій вибору вказаної швидкості був мінімум вартості поїздо-кілометра.

У [2] визначається раціональна топологія залізничної мережі високошвидкісних та швидкісних перевезень на основі сучасних досягнень в галузі інтелектуальних технологій.

Можливість застосування рухомого складу з керованим нахилом кузова для проходження кривих, що мають недостатній радіус, розглянуто в [3].

У [4] узагальнено наукові досягнення і практичні результати введення високих швидкостей.

У роботах [5, 6] запропоновано економіко-математичну модель оптимізації маси і швидкості руху пасажирських і вантажних поїздів в умовах поточної експлуатації залізничного транспорту на лініях зі змішаним рухом. У цих же роботах розглянуто питання етапного підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів та умови переходу до будівництва спеціалізованих ліній для високошвидкісного руху пасажирських поїздів.

У [7] висвітлено дослідження питань проектування високошвидкісних ліній в ув'язці з рівнем швидкості руху, передбачуваного в експлуатації, та оптимізації цих швидкостей у різних умовах.

Обґрунтування найважливіших параметрів організації пасажирських перевезень у далекоому, місцевому та приміському сполученні розглянуто у [8].

У [9] як критерій розвитку залізниць запропоновано використовувати основний показник розвитку й оцінки систем – надійність.

У [10] удосконалено математичну модель оптимального розподілу потоку пасажирських поїздів високошвидкісних магістралей на полігоні залізниці.

Отже, відомі наукові підходи були в основному спрямовані на удосконалення конструктивно-технологічних параметрів швидкісних і високошвидкісних магістралей. Питання обґрунтування параметрів і місця розташування пасажирських станцій для обслуговування високошвидкісних поїздів у великих залізничних вузлах розглянуто недостатньою мірою.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою роботи є формування наукового підходу до визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі на основі урахування множини факторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити головні фактори, що впливають на місце розташування пасажирської станції, розробити математичну модель визначення раціонального місця розташування вказаної станції у великому залізничному вузлі і рекомендації щодо використання результатів моделювання з ув’язкою зі структурою міста.

Основна частина дослідження. Серед головних факторів, що впливають на місце розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі, слід відзначити:

1) кількість, основні характеристики і віддаленість від загальноприйнятого центру міста об’єктів бізнесу, житлових масивів та пам’яток;

2) кількість та розміщення у місті станцій метрополітену;

3) пропускна здатність і рівень забезпеченості міським транспортом вулиць і проспектів;

4) пробіг високошвидкісних поїздів від межі міста до пасажирської станції.

У зв’язку з цим подамо місто як сукупність бізнес-центрів, житлових масивів, пам’яток та елементів інфраструктури залізничного і міського транспорту. Для спрощення вирішення науково-прикладного завдання визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому

залізничному вузлі вказану сукупність пропонується відобразити у вигляді розрахункових точок. Для бізнес-центрів, житлових масивів, пам'яток і станцій метрополітену ці розрахункові точки відображають їх умовні центри, для елементів інфраструктури залізничного транспорту – точки входу залізничних ліній у місто. Оскільки міські вулиці і проспекти неможливо подати у вигляді однієї розрахункової точки, їх пропонується показати у вигляді множини розрахункових точок з певним кроком одна від одної. При цьому слід зауважити, що до розрахунків необхідно обирати лише ті вулиці і проспекти, на яких відбувається інтенсивний рух транспорту.

Для побудови математичної моделі визначення раціонального місця розташування пасажирської станції введемо такі множини і величини:

B – множина бізнес-центрів міста;

b – номер бізнес-центру міста із множини B, $b \in B$;

G – множина житлових масивів міста;

g – номер житлового масиву міста із множини G, $g \in G$;

H – множина пам'яток міста;

h – номер пам'ятки міста із множини H, $h \in H$;

M – множина станцій метрополітену;

m – номер станції метрополітену із множини M, $m \in M$;

V – множина розрахункових точок вулиць і проспектів міста з інтенсивним рухом транспорту;

v – номер розрахункової точки вулиці або проспекту міста з інтенсивним рухом транспорту із множини V, $v \in V$;

Z – множина точок входу залізничних ліній у місто;

z – номер точки входу залізничної лінії у місто із множини Z, $z \in Z$.

Як критерій оптимізації пропонується прийняти сумарну вагову відстань від майбутньої пасажирської станції до центру бізнесу міста, центру населеності міста, центру пам'яток міста, точок входу залізничних ліній у місто і найближчих розрахункових точок інфраструктури міського транспорту $\sum S_B$.

Координати центру бізнесу міста $(x_{ЦБ}, y_{ЦБ})$ пропонується визначати з урахуванням рівня престижності бізнес-центрів:

$$x_{ЦБ} = \frac{\sum\limits_{b \in B} R_b \cdot x_b}{\sum\limits_{b \in B} R_b}; \quad y_{ЦБ} = \frac{\sum\limits_{b \in B} R_b \cdot y_b}{\sum\limits_{b \in B} R_b}, \quad (1)$$

де R_b – рівень престижності b-го бізнес-центру міста;

x_b, y_b – координати b-го бізнес-центру міста в локальній системі координат, м.

Координати центру населеності міста $(x_{ЦН}, y_{ЦН})$ можна визначати на основі оцінки чисельності населення житлових масивів міста:

$$x_{ЦН} = \frac{\sum\limits_{g \in G} P_g \cdot x_g}{\sum\limits_{g \in G} P_g}; \quad y_{ЦН} = \frac{\sum\limits_{g \in G} P_g \cdot y_g}{\sum\limits_{g \in G} P_g}, \quad (2)$$

де P_g – чисельність населення g-го житлового масиву міста, тис. люд.;

x_g, y_g – координати g-го житлового масиву міста в локальній системі координат, м.

Координати центру пам'яток міста $(x_{ЦП}, y_{ЦП})$ пропонується визначати з урахуванням рівня їх популярності:

$$x_{ЦП} = \frac{\sum\limits_{h \in H} C_h \cdot x_h}{\sum\limits_{h \in H} C_h}; \quad y_{ЦП} = \frac{\sum\limits_{h \in H} C_h \cdot y_h}{\sum\limits_{h \in H} C_h}, \quad (3)$$

де C_h – рівень популярності h-ї пам'ятки міста;

x_h, y_h – координати h-ї пам'ятки міста в локальній системі координат, м.

Отже, науково-прикладне завдання визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі можна розглянути як задачу мінімізації $\sum S_B$. При такій постановці науково-прикладного завдання цільова функція набуває такого виду:

$$\begin{aligned}\sum S_B = \omega_{ЦБ} \cdot S_{ЦБ}(x_{ПС}, y_{ПС}) + \omega_{ЦН} \cdot S_{ЦН}(x_{ПС}, y_{ПС}) + \omega_{ЦП} \cdot S_{ЦП}(x_{ПС}, y_{ПС}) + \\ + \omega_M \cdot S_M(x_{ПС}, y_{ПС}) + \omega_{IP} \cdot S_{IP}(x_{ПС}, y_{ПС}) + \omega_{ЗЛ} \cdot S_{ЗЛ}(x_{ПС}, y_{ПС}) \to \min,\end{aligned} \quad (4)$$

де $S_{ЦБ}(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань від пасажирської станції з координатами умовного центру останньої $(x_{ПС}, y_{ПС})$ до центру бізнесу міста, м,

$$S_{ЦБ}(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_{ЦБ})^2 + (y_{ПС} - y_{ЦБ})^2}; \quad (5)$$

$S_{ЦН}(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань від пасажирської станції до центру населеності міста, м,

$$S_{ЦН}(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_{ЦН})^2 + (y_{ПС} - y_{ЦН})^2}; \quad (6)$$

$S_{ЦП}(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань від пасажирської станції до центру пам'яток міста, м,

$$S_{ЦП}(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_{ЦП})^2 + (y_{ПС} - y_{ЦП})^2}; \quad (7)$$

$S_M(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань від пасажирської станції до найближчої станції метрополітену з координатами умовного центру останньої (x_m, y_m), де $m \in M$, м,

$$S_M(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_m)^2 + (y_{ПС} - y_m)^2}; \quad (8)$$

$S_{IP}(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань від пасажирської станції до найближчої розрахункової точки вулиці або проспекту міста з інтенсивним рухом транспорту з координатами останньої (x_v, y_v), де $v \in V$, м,

$$S_{IP}(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_{IP})^2 + (y_{ПС} - y_{IP})^2}; \quad (9)$$

$S_{ЗЛ}(x_{ПС}, y_{ПС})$ – середньозважена відстань до пасажирської станції від точок входу залізничних ліній у місто, м,

$$S_{ЗЛ}(x_{ПС}, y_{ПС}) = \frac{\sum_{z \in Z} N_z \cdot S_z(x_{ПС}, y_{ПС})}{\sum_{z \in Z} N_z}, \quad (10)$$

де N_z – кількість пар високошвидкісних поїздів, що будуть курсувати на z-й залізничній лінії;

$S_z(x_{ПС}, y_{ПС})$ – відстань до пасажирської станції від z-ї точки входу залізничної лінії у місто з координатами останньої (x_z, y_z), де $z \in Z$, м,

$$S_z(x_{ПС}, y_{ПС}) = \sqrt{(x_{ПС} - x_z)^2 + (y_{ПС} - y_z)^2}; \quad (11)$$

$\omega_{ЦБ}$, $\omega_{ЦН}$, $\omega_{ЦП}$, ω_M, $\omega_{ІР}$, $\omega_{ЗЛ}$ – ваговий коефіцієнт відповідно $S_{ЦБ}(x_{ПС}, y_{ПС})$, $S_{ЦН}(x_{ПС}, y_{ПС})$, $S_{ЦП}(x_{ПС}, y_{ПС})$, $S_M(x_{ПС}, y_{ПС})$, $S_{ІР}(x_{ПС}, y_{ПС})$, $S_{ЗЛ}(x_{ПС}, y_{ПС})$.

R_b, P_g, C_h, $\omega_{ЦБ}$, $\omega_{ЦН}$, $\omega_{ЦП}$, ω_M, $\omega_{ІР}$, $\omega_{ЗЛ}$ визначаються на основі методу експертних оцінок [14].

Указана задача розв'язується при таких обмеженнях:

$$\begin{cases} x_{ПС}^{\min} \le x_{ПС} \le x_{ПС}^{\max}; \\ y_{ПС}^{\min} \le y_{ПС} \le y_{ПС}^{\max}, \end{cases} \quad (12)$$

де $x_{ПС}^{\min}, x_{ПС}^{\max}$ – відповідно мінімальна і максимальна величина абсциси точки, що є умовним центром пасажирської станції, м;

$y_{ПС}^{\min}, y_{ПС}^{\max}$ – відповідно мінімальна і максимальна величина ординати точки, що є умовним центром пасажирської станції, м.

Науково-прикладне завдання визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі є задачею нелінійного програмування з нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями-нерівностями. Для зменшення обсягу обчислень пропонується цю задачу подати як задачу цілочислового програмування, тобто $x_{ПС}$ і $y_{ПС}$ будуть набувати тільки цілих значень. При цьому слід зазначити, що такий перехід суттєво не вплине на точність розрахунків.

Розв'язком цієї оптимізаційної задачі може бути точка, у якій будівництво нової пасажирської станції буде неможливим або викликати певні складності. У цьому випадку необхідно проаналізувати структуру міста і визначити раціональне місце її розташування за умовою мінімальної відстані до оптимального місця.

Для міст, де вже існує залізнична інфраструктура, як раціональне місце розташування нової пасажирської станції можна розглядати варіанти її розміщення на місці існуючих станцій або зупинних пунктів з відповідними реконструктивними заходами. При цьому можуть розглядатися варіанти змішаного використання пасажирської станції (для обслуговування поїздів звичайних і високошвидкісних магістралей) і спеціалізованого використання (для обслуговування поїздів тільки високошвидкісних магістралей).

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Основним підходом до визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у великому залізничному вузлі до сьогоднішнього дня була розробка декількох конкурентоспроможних варіантів і їх техніко-економічне порівняння. Указаний підхід хоча і базується на урахуванні ряду факторів (обсягу капітальних вкладень, зручності з точки зору транспортної доступності, ув'язки проектних рішень високошвидкісних магістралей з генеральним планом розвитку міста, комплексної оцінки організації далекого і приміського пасажирського сполучення у вузлі), однак не деє змоги знайти дійсно оптимальне місце розташування станції. Розробка конкурентоспроможних варіантів в основному базується на досвіді проектувальників, а останнім може бути дуже складно охопити і проаналізувати велику множину факторів, що впливають на вирішення поставленого завдання. Цього недоліку позбавлений запропонований науковий підхід, де поставлене завдання вирішується шляхом оптимізаційних розрахунків, а досвід проектувальника необхідний уже на заключному етапі.

Список використаних джерел

1. Бещева, Н. И. Местное пассажирское движение на электрифицированных линиях [Текст] / Н. И. Бещева // Тр. ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт. 1965. – Вып. 300. – С. 51-60.

2. Бутько, Т. В. Удосконалення підходів щодо розвитку швидкісного і високошвидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України [Текст] / Т. В. Бутько, Л. О. Пархоменко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2014. – Вип. 4. – С. 14.

3. Козлов, В. Ю. План трассы и новый тип подвижного состава для высоких скоростей движения [Текст] / В. Ю. Козлов // Сб. науч. тр. МИИТа. – М.: МИИТ, 1976. – Вып. 538. – С. 80-86.

4. Колодяжный, Н. В. Высокоскоростное пассажирское движение на железных дорогах [Текст] / Н. В. Колодяжный. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.

5. Кочнев, Ф. П. Повышение скорости движения пассажирских поездов [Текст] / Ф.П. Кочнев. – М.: Транспорт, 1970. – 272 с.

6. Кочнев, П. Ф. Комплексное повышение скоростей движения поездов [Текст] / П.Ф. Кочнев. – М.: Транспорт, 1989. – 176 с.

7. Миронов, В. С. Вопросы проектирования высокоскоростных линий [Текст]: дис. … канд. техн. наук: 05.22.06 / Миронов Виктор Степанович. – М., 1972. – 209 с.

8. Пазойский, Ю. О. Организация пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте (в примерах и задачах) [Текст] / Ю. О. Пазойский, Л. С. Рябуха, В. Г. Шубко; под ред. В. Г. Шубко. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.

9. Переселенков, Г. С. Высокоскоростные железные дороги и надежность пассажирских перевозок / Г. С. Переселенков // Развитие системы пассажирских сообщений: сборник. – М.: Наука, 1984. – С. 135-148.

10. 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.

11. Kanafani, A. The Economics of Speed – Assessing the performance of High Speed Rail in Intermodal Transportation [Text] / A. Kanafani, R. Wang, A. Griffin // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS

2012). – Elsevier Ltd, 2012. – Volume 43. – P. 692-708. – Режим доступу до ресурсу: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812010245.

12. Clewlow, R. R. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic [Text] / R. R. Clewlow, J. M. Sussman, H. Balakrishnan // Transport Policy. – 2014. – Vol. 33. – P. 136 – 143.

13. Espinosa-Aranda J. High-speed railway scheduling based on user preferences [Text] / J. Espinosa-Aranda [et al.] // European Journal of Operational Research. – 2015, November. – Vol. 246. – P. 772 – 786.

14. Хамханова, Д. Н. Теоретические основы обеспечения единства экспертных измерений [Текст] / Д. Н. Хамханова. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2006. – 170 с.

Огар Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.
Дребот Михайло Сергійович, магістрант кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: m.drebot@ukr.net.
Мумінов Азамат Бахтиярович, магістрант кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: azamat-90.tm@mail.ru.

Ogar Alexander, doct. of techn. sciences, professor, chair “Railway stations and junctions“, Ukrainian State University of Railway Transport, tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.
Drebot Mykhailo, master student, chair “Railway stations and junctions“, Ukrainian State University of Railway Transport, tel.: (057) 730-10-42. E-mail: m.drebot@ukr.net .
Muminov Azamat, master student, chair “Railway stations and junctions“, Ukrainian State University of Railway Transport, tel.: (057) 730-10-42. E-mail: azamat-90.tm@mail.ru.

Стаття прийнята 17.11.2016 р.