

УДК 656.254.5

**ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОПУСКНОЮ СПРОМОЖНІСТЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ
МЕРЕЖІ В УМОВАХ ШВИДКІСНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

Канд. техн. наук П. В. Долгополов, магістранти О. С. Черепков, Р. М. Карпов

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ
ПЕРЕВОЗОК**

Канд. техн. наук П. В. Долгополов, магистранты А. С. Черепков, Р. Н. Карпов

**OPTIMIZATION OF RAILWAY NETWORK CAPACITY MANAGEMENT
IN CONDITIONS OF SPEED PASSENGER TRANSPORTATION**

Cand. of techn. sciences P. V. Dolgoplov, master student A. S. Cherepkov, R. N. Karpov

Розроблено оптимізаційну математичну модель управління пропускною спроможністю залізничної мережі на основі методу Дейкстри, транспортної задачі відкритого типу з обмеженнями та методу Форда-Фалкерсона. Модель враховує обмеження пропускної спроможності дільниць полігона, потрібні розміри поїздопотоків (у тому числі швидкісних) та вартість слідування поїзда по кожній дільниці. Реалізація моделі дасть можливість ефективніше розподіляти поїздопотоки на залізничному полігоні в умовах швидкісного пасажирського руху.

Ключові слова: модель, поїздопотік, пропускна спроможність, поїзд, високошвидкісний рух, обмеження, залізнична мережа, управління, теорія графів, диспетчер.

Разработана оптимизационная математическая модель управления пропускной способностью железнодорожной сети на основе метода Дейкстры, транспортной задачи открытого типа с ограничениями и метода Форда-Фалкерсона. Модель учитывает ограничения пропускной способности участков полигона, размеры поездопотоков (в том числе скоростных) и стоимость следования поезда по каждому участку. Реализация модели позволит эффективнее распределять поездопотоки на железнодорожном полигоне в условиях скоростного пассажирского движения.

Ключевые слова: модель, поездопоток, пропускная способность, поезд, высокоскоростное движение, ограничения, железнодорожная сеть, управление, теория графов, диспетчер.

At the present time, it is relevant to develop organizational and technical measures to increase the available throughput of the network by optimizing the flow of trains, taking into account operational changes in its topological structure during repairs, as well as the cost of passing trains across every segment. The implementation of this task is complicated by the introduction of high-speed passenger trains into the train traffic graph, since at speeds up to 160 km / h and, in the future, up to 200 km / h, create a significant nonparallel graph of train traffic, which reduces the existing capacity of segments and the railway network as a whole. Therefore here an optimization mathematical model of controlling the capacity of the railway network is developed on the basis of mathematical apparatuses of graph theory, namely the Dijkstra's method, the open-type transport problem with constraints, and the Ford-Falkerson method. The model takes into account the limitations of the capacity of sections of the railway network, the predicted dimensions of the flows of freight and passenger (including high-speed) trains, as well as the cost of passing the train for each section. The implementation of the constructed model in the information

and control system of dispatching control will allow more efficient distribution of train traffic on a ramified railway network in conditions of mass high-speed passenger traffic.

Keywords: model, train traffic, throughput, train, high-speed traffic, restrictions, railway network.

Вступ. Загальною метою диспетчерського регулювання перевезень на залізничному транспорті є забезпечення виконання замовлення на перевезення при високій ефективності використання перевізних засобів.

Реалізація даної мети ускладнюється при введенні у графік руху поїздів швидкісних пасажирських поїздів, оскільки вони, прямуючи зі швидкостями до 160 км/год, а у перспективі до 200 км/год, створюють значну непаралельність графіка руху поїздів (ГРП), що знижує наявну пропускну спроможність дільниць і залізничної мережі загалом [1, 2].

Тому особливої актуальності набуває завдання розробки низки організаційно-технічних заходів з підвищення наявної пропускну спроможності мережі шляхом оптимізації поїздопотоків з урахуванням оперативних змін у її топологічній структурі під час ремонтних робіт, а також вартості проходження поїздів по кожній дільниці, що входить у відповідний шлях від початкових до кінцевих пунктів залізничної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Заходи з розв'язання завдань з оптимізації залізничної мережі відповідно до поїздопотоків, що діють та прогноуються в умовах прямування швидкісних пасажирських поїздів по дільницях загального користування, розроблялися в низці наукових робіт, зокрема у роботах [3-6].

Але, як показали дослідження, незважаючи на вагомість наукових рішень, в даних роботах не розв'язане завдання оперативної оптимізації поїздопотоків, яка враховувала б одночасно як оперативні зміни у топологічній структурі мережі під час закриттів головних колій, так і вартість слідування поїздів по кожній дільниці залізничного полігона.

Мета та завдання дослідження.

Метою роботи є оптимізація управління пропускну спроможністю залізничної мережі з урахуванням обмеженої пропускну спроможності її дільниць, потрібних поїздопотоків та вартості прямування поїзда по кожній дільниці в умовах швидкісного пасажирського руху.

Для реалізації цієї мети необхідно розв'язати таке завдання: розробити математичну модель управління пропускну спроможністю залізничної мережі на основі математичних апаратів теорії графів, реалізація якої в інформаційно-керуючій системі диспетчерського управління забезпечить можливість ефективніше розподіляти поїздопоток на залізничному полігоні в умовах швидкісного пасажирського руху.

Основна частина дослідження.

Регулювання перевезень на залізничному транспорті полягає у здійсненні заходів, спрямованих на усунення труднощів у просуванні вагонопотоків і відхилень від технічних нормативів. До цих заходів належать, зокрема, перерозподіл вагонного і локомотивного парків відповідно до змінних обсягів роботи, перерозподіл поїздопотоків по обхідних дільницях в разі перевищення пропускну спроможності тощо.

Оперативне керівництво перевізним процесом на залізничних підрозділах та напрямках (полігонах) здійснює диспетчерський персонал, що несе змінне цілодобове чергування. Об'єктами оперативного регулювання є навантаження, вагонопотоки, рух поїздів, вивантаження та технічні засоби залізниць (вагонні та локомотивні парки, провізна, пропускна і переробна спроможності станцій та дільниць) [1, 2].

Схема базового залізничного полігона подана на рисунку. Як вершини графу

обрано технічні станції, а як ребра – | дільниці полігона.

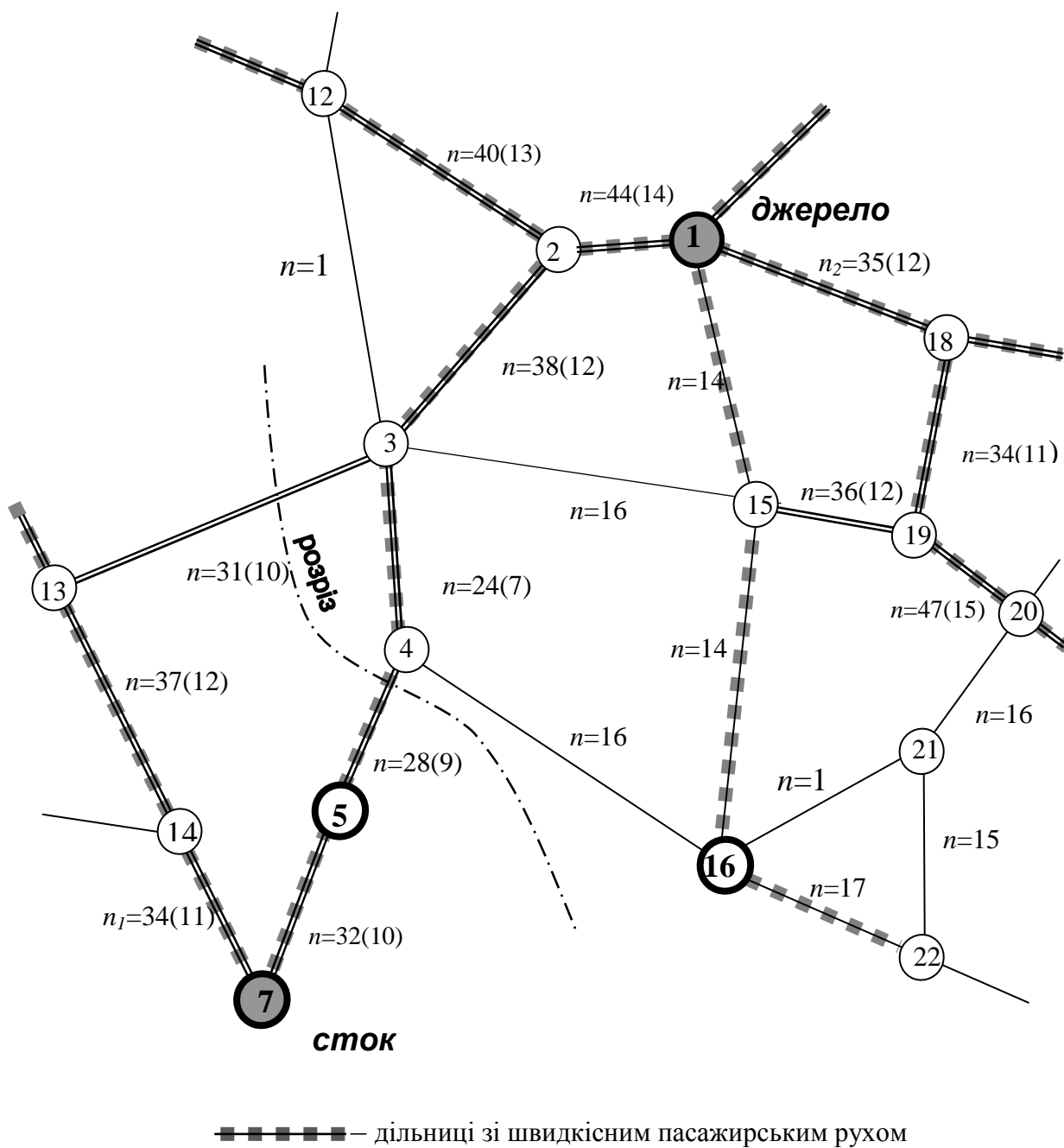


Рис. Зважений граф базового залізничного полігона

Даний полігон характеризується такими особливостями:

- наявністю розгалуженої мережі швидкісних пасажирських маршрутів та її

розширенням у перспективі, причому пасажирський рух не відділений від вантажного;

- масовими вантажними поїздопотоками, що мають стратегічне економічне значення.

Кожен з початкових пунктів $A_i (i=1, \dots, m)$ базового полігона повинен відправити p_i вантажних поїздів. Кожен з кінцевих пунктів $B_j (j=1, \dots, n)$ повинен прийняти w_j поїздів.

Питомі витрати c_{ij} на прямування одного поїзда від початкової до кінцевої станції доцільно оцінити матрицею витрат $C = \{c_{ij}\}$.

Однак, оскільки кожний такий шлях є багатоваріантним, то найвигідніші шляхи між кожною парою «початкова станція – кінцева станція» знайдено за допомогою методу Дейкстри [7].

Перевагою даного методу є його пристосованість до розв'язання задачі визначення оптимальних шляхів, а саме того, що мітки вершин (станцій) можуть бути двох типів – тимчасові і постійні, які змінюють свій статус, якщо найвигідніший шлях за завершенням відповідної ітерації знайдено.

Для моделювання процесу прямування поїздів на базовому полігоні при дослідженнях спочатку визначена питома вартість прямування одного вантажного поїзда по кожній ділянці.

Якщо буде знайдений більш короткий шлях до відповідної вершини, тимчасова мітка на кожній ітерації може бути замінена на іншу. Коли ж стане очевидним, що не існує більш короткого шляху від вихідної вершини до даного, статус тимчасової мітки змінюється на постійний.

При реалізації методу Дейкстри при переході з вершини i до наступної вершини j виконано процедуру помітки ребер. Найменшу відстань від початкової вершини 1 до вершини i позначено через u_i , а довжину ребра (i, j) через d_{ij} . Тоді для вершини j визначено мітку $[u_j, i]$, виконуючи умову

$$[u_j, i] = [u_i + d_{ij}, i], d_{ij} \geq 0. \quad (1)$$

Кожній з початкових вершин почергово присвоювалася тимчасова мітка $[0, i]$, причому спочатку покладено, що $i = 1$.

Тимчасові мітки $[u_i + d_{ij}, i]$ обчислено для всіх вершин j , які можна досягти безпосередньо з вершини i і які на відповідній ітерації не мають постійних міток. Причому, якщо вершина j уже мала мітку $[u_j, k]$, отриману від іншої вершини k , і якщо $u_i + d_{ij} < u_j$, тоді мітка $[u_j, k]$ змінювалася на $[u_i + d_{ij}, i]$.

Коли всі вершини після моделювання отримували постійні мітки, тоді процес обчислень завершувався. У другому разі обиралася мітка $[u_r, s]$ з найменшим значенням відстані u_r серед всіх тимчасових міток, потім приймалося, що $i = r$, та продовжувалися ітерації [7].

Таким чином, визначено витрати c_{ij} на найвигіднішому шляху прямування одного поїзда від початкової до кінцевої станції, масив яких подано у вигляді матриці витрат $C = \{c_{ij}\}$.

Результатом моделювання є остаточна транспортна таблиця, у якій містяться обсяги перевезень p_{ij} між усіма парами "пункт відправлення – пункт призначення".

Досліджено, що на базовому полігоні спостерігається випадок, коли

$$\sum_{i=1}^m p_i < \sum_{j=1}^n w_j, \quad (2)$$

тобто транспортна задача має вигляд відкритого типу з обмеженнями з такою цільовою функцією:

$$G_{\text{рац}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot p_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $G_{\text{рац}}$ – сумарні витрати на прямування всіх вантажних поїздів по базовому полігону з урахуванням закриття головних

колій для ремонтних робіт на дільницях, грн.

Умову оптимізації транспортної задачі при цьому подано як

$$\begin{cases} k_i + l_j + c_{ij} = 0 & \text{для базисних кліток} \\ k_i + l_j + c_{ij} \geq 0 & \text{для вільних кліток} \end{cases} \quad (4)$$

де k_i та l_j – потенціали, які додаються до всіх елементів відповідних рядків та стовпчиків.

На основі розв’язання транспортної задачі відкритого типу з обмеженнями отримано скорочену таблицю, яка подана

нижче. У ній згідно з визначеними найвигіднішими шляхами між кожною парою «початкова станція – кінцева станція» наведено поїздопотоки, що прямують між проміжними вершинами графу (попутними технічними станціями).

Таблиця

Розподіл поїздопотоків по ділянках залізничного полігона

Найменування ділянки	Кількість колій	Довжина, км	Наявна пропускна спроможність (у дужках – при закритті однієї колії двоколіїної ділянки) вантажних поїздів за зміну	Вантажні поїздопотоки, що пропускаються ділянкою згідно з моделюванням
1	2	3	4	5
1–2	2	38	44 (14)	1,18 –5,7,13; 12–16,18,22; 18–12
2–3	2	124	38 (12)	1,18 – 5,7,13
3–4	1–2	146	24 (7)	1,12,18 – 5,7
4–5	2	72	28 (9)	1,12,16,18,20,22 – 5,7; 16,22–13
5–7	2	51	32(10)	1,12,16,18,20,22 – 7; 16,22–13
2–12	2	89	40(13)	1,16,18,20,22–12
12–3	1	129	13	12–5,7,16,22
3–13	1–2	204	31(10)	18,20–13
13–14	2	113	37(12)	13–5,7,16,22
14–7	2	63	34(11)	13,14–5,7,16,22
1–15	1	80	14	1,12–16,22
3–15	1–2	133	16	20–5,7,13; 5,7,13–20
15–16	1	148	14	1,12–16,22
4–16	1	105	16	5,7,13,14–16,22; 16,22–5,7,13,14
1–18	2	74	35(12)	18–1, 5,7,12,13; 20–1; 1, 5,7,12,13–18; 1–20
18–19	2	80	34(11)	20–1,12,18; 1,12,18–20
19–15	2	46	36(12)	20–5,7,13; 5,7,13–20

Продовження таблиці

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

19–20	2	39	47(15)	20–5,7,13,18; 5,7,13,18–20; 19–16,22; 16,22–
20–21	1	106	16	19,20–16,22
21–16	1	58	16	19,20–16
21–22	1	49	15	19,20–22
16–22	1	55	17	5,7,13,14–22

Якщо задача пошуку оптимальних шляхів розподілу поїздопотоків розв'язується в умовах закриття головних колій для ремонтних робіт на дільницях, то доцільно на наступному етапі застосувати методіку на основі методу Форда-Фалкерсона, запропоновану у роботі [5].

Згідно з даними таблиці доцільно видавати вихідні дані диспетчерському персоналу, який на чолі зі старшим дорожнім диспетчером може планувати пропуск збільшеного поїздопотоків по дільницях з урахуванням цього розподілу [8-10].

Висновки. У роботі розроблено оптимізаційну математичну модель управління пропускнуою спроможністю залізничної мережі на основі математичних

апаратів теорії графів, а саме методу Дейкстри, транспортної задачі відкритого типу з обмеженнями та методу Форда-Фалкерсона.

Модель враховує обмеження пропускнуої спроможності дільниць полігона, розміри потрібних вантажних та пасажирських (у тому числі швидкісних) поїздопотоків та вартість прямування поїзда по кожній дільниці.

Реалізація побудованої моделі в інформаційно-керуючій системі диспетчерського управління дасть можливість більш ефективно розподіляти поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні в умовах масового швидкісного пасажирського руху.

Список використаних джерел

1. Пособие поездному диспетчеру и дежурному по отделению [Текст] / Г. М. Грошев, В. А. Кудрявцев, Г. А. Платонов [и др.]. – М.: Транспорт, 1992. – 368 с.
2. Грунтов, П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / П. С. Грунтов, А. М. Макарович, В. Г. Шубко; под общ. ред. П. С. Грунтова. – М.: Транспорт, 1994. – 543 с.
3. Krasemann, J. Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study [Text] / J. Krasemann // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2015. – Vol. 5. – №. 3. – P. 95-109.
4. Talebian, A., Zou, B. Integrated modeling of high performance passenger and freight train planning on shared-use corridors in the US [Text] / A. Talebian, B. Zou // Transportation Research Part B: Methodological. – 2015. – Vol. 82. – P. 114-140.
5. Долгополов, П. В. Удосконалення організації поїздопотоків на залізничному полігоні в умовах швидкісного руху [Текст]: П. В. Долгополов, Д. В. Трегубчак // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 163. – С. 25-30.
6. Implementation and validation of an Angle of Arrival (AoA) determination system for real-time on-board train positioning [Text] / M. Arenas, A. Podhorski, S. Arrizabalaga, J. Goya, B. Sedano, J. Mendizabal // Transportation Research Procedia. – 2016. – №. 14. – P. 1950-1956.
7. Балашевич, В. А. Математические методы в управлении производством [Текст] / В. А. Балашевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 184 с.

8. Долгополов, П. В. Удосконалення високошвидкісного руху на залізничній ділянці в умовах диспетчерської централізації [Текст]: П. В. Долгополов, Д. В. Суховецька // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 164. – С. 84-89.

9. Ходаківський, О. М. Дослідження надсистеми залізничної транспортної системи: визначення правових обмежень та умов підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту на основі теорії систем [Текст] / О. М. Ходаківський // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 6. – С. 8-12.

10. Удосконалення диспетчерського керівництва ділянки на основі прогностичного моделювання перевізного процесу [Текст]: П. В. Долгополов, Т. В. Головка, Т. В. Галишинець, І. А. Іванова // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – Вип. 49 (1158). – С. 36-39.

Долгополов Петро Віталійович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 730-10-88. E-mail: osnova2017@gmail.com.

Карпов Роман Миколайович, магістрант ІППК (Проект TEMPUS IV) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(050) 537-00-71.

Черепков Олександр Сергійович, магістрант ІППК (Проект TEMPUS IV) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (099) 516-39-99.

Dolgoplov Peter, PhD. Of tehn. Sciences, Associate Professor of Management of operational work of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 730-10-88. E-mail: osnova2017@gmail.com.

Karpov Roman, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (097) 155-54-53. E-mail: 23032006@ukr.net.

Cherepkov Alexander, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (099) 516-39-99.

Стаття прийнята 15.11.2017р.