

УДК 656.254.5

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПОЛІГОНІ В УМОВАХ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Канд. техн. наук П. В. Долгополов, Д. В. Трегубчак

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЕЗДОПОТОКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПОЛИГОНЕ В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Канд. техн. наук П. В. Долгополов, Д. В. Трегубчак

IMPROVING THE TRAIN FLOWS ON THE RAILWAY POLYGON IN CONDITIONS OF HIGH-SPEED TRAFFIC

Cand. of techn. sciences P. V. Dolgoplov, D. V. Tregubchak

Розроблено математичну модель регулювання поїздопотоків на залізничному полігоні з масовим швидкісним рухом на основі теорії графів. Реалізація моделі за допомогою інформаційно-керуючих систем дає змогу оптимізувати маршрути прямування поїздів в умовах скорочення пропускної спроможності окремих ділянок у періоди вимушених перерв у їх роботі.

Ключові слова: регулювання поїздопотоків, залізничний полігон, диспетчерське управління, теорія графів, скорочення пропускної спроможності, високошвидкісний рух.

Разработана математическая модель регулирования поездопотоков на железнодорожном полигоне с массовым скоростным движением на основе теории графов. Реализация модели с помощью информационно-управляющих систем позволяет оптимизировать маршруты следования поездов в условиях сокращения пропускной способности отдельных участков в периоды вынужденных перерывов в их работе.

Ключевые слова: регулирование поездопотоков, железнодорожный полигон, диспетчерское управление, теория графов, сокращение пропускной способности, высокоскоростное движение.

Research and practical experience shows you that the gasket of each high-speed train on the schedule greatly increases the demand of throughput capacity.

This requires a reorientation of part of train streams to other areas, and especially in terms of the need to upgrade railway infrastructure with the renovations with the closing of the tracks at stations and spans.

A mathematical model of regulation of train flows on the railway polygon with massive high-speed traffic based on the theory of graphs was developed. With the help of model it was simulated the distribution of train streams for the bypass routes in case of closure of one of the spans.

The implementation of the model using information management systems allows you to optimize the routes of trains in terms of throughput capacity reducing of individual sites during periods of forced interruptions in their work. This technology allows you to move from train control on certain sections to control on the extensive grounds of the railway and the network regions.

Keywords: *regulation of train flows, railway polygon, Supervisory control theory, graph theory, throughput capacity reducing, high-speed traffic.*

Вступ. У період впровадження нових технологій на залізницях набуває актуальності необхідність адаптації залізничної мережі та поїздопотоків до швидкісного руху. Проте наукові дослідження та практичний досвід свідчать, що прокладання кожного швидкісного поїзда на графіку руху поїздів значно збільшує потрібну пропускну спроможність ділянок $N_{номр}$ [1].

Це вимагає переорієнтування частки поїздопотоків на інші ділянки, причому особливо гостро дане питання стоїть в умовах необхідності модернізації залізничної інфраструктури з проведенням ремонтних робіт із закриттям колій на станціях та перегонах, коли є необхідним більш ефективне використання пропускну спроможності ділянок залізничного полігону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі з оптимізації поїздопотоків на розгалужених полігонах вирішувалися у певних наукових роботах, серед яких слід виділити [2,3,4,5]. Проте в них не враховано зменшення пропускну спроможності ділянок під час проведення робіт із закриттям колій.

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є побудова математичної моделі оптимізації поїздопотоків на залізничному полігоні в умовах тимчасових обмежень пропускну спроможності при ремонтних роботах із закриттям окремих колій та перегонів у термінах теорії графів.

На основі побудованої моделі доцільно створити інформаційно-керуючу систему диспетчерського управління, яка дасть змогу оптимально розподіляти поїздопотоки на залізничному полігоні та безперервно контролювати безпеку руху поїздів з боку оперативно-диспетчерського персоналу на основі сучасних методів оптимізації вагонопотоків в умовах швидкісного пасажирського руху.

Основна частина дослідження. Головними завданнями оперативного управління поїзною роботою є планування поїздоутворення і пропускання поїздів по ділянках. Послідовне спільне вирішення цих завдань значно розсовує тимчасові рамки оперативного планування поїздної роботи.

Проте необхідність надання технологічних "вікон" для ремонту технічних засобів створює значні труднощі у просуванні поїздопотоків, суттєво знижуючи пропускну спроможність ділянок протягом тривалого періоду впродовж року.

Диспетчерський апарат має володіти оперативною інформацією для можливості планування розподілу збільшеного поїздопотоків при регулюванні насичення ділянок поїздами, наданні "вікон" і інших перервах руху поїздів. Така технологія дає змогу перейти від управління рухом поїздів на окремих ділянках до управління поїздопотоками на розгалужених полігонах залізниці і регіонах мережі.

З метою скорочення затримок поїздів у період надання "вікон" застосовуються такі організаційно-технічні заходи, що дають можливість підвищити використання пропускну і провізної спроможності:

- організація сполучених поїздів [6];
- застосування пристроїв, що дають змогу забезпечити рух за сигналами локомотивних світлофорів у протилежному напрямі (по неправильному шляху);
- виділення найбільш кваліфікованих поїзних диспетчерів для чергування у дні надання "вікон" тощо.

Варіантний графік, що розробляється при наданні "вікон", забезпечує максимальні розміри вантажного руху при мінімальних затримках пасажирських.

Для визначення реальних розмірів руху в добу надання "вікон" необхідно провести розрахунки добової пропускну спроможності ділянки з урахуванням впливу перерв у русі.

Для створення оптимальних умов роботи ділянок полігону в умовах інтероперабельності [7] у період надання

"вікон" необхідно регулювати їх насичення поїздами. Для вибору оптимального розподілу поїздопотоків на розгалужених полігонах розроблена методика, що базується на теорії графів і потоків у мережах. Для досліджень базовий полігон представлено у вигляді зваженого графа, на якому кожній ділянці приведена у відповідність її наявна пропускну спроможність, що визначена як

$$N_{нал} = \frac{(1440 \cdot t_{техн}) \cdot \alpha_n}{T}, \quad (1)$$

де $t_{техн}$ – тривалість технологічного "вікна", хв;

α_n – коефіцієнт надійності, який враховує вплив відмов у роботі технічних засобів (колії, пристрої СЦБ і зв'язку, контактна мережа тощо) на наявну пропускну спроможність лінії;

T – період ГРП, хв.

Потрібна пропускну спроможність для ділянок розраховується як [1]

$$N_{потр} = N_{ван} + \epsilon_{шв} \cdot N_{шв} + \epsilon_{пс} \cdot N_{пс} + N_{пр} + \epsilon_{сб} \cdot N_{сб}, \quad (2)$$

де $\epsilon_{шв}; \epsilon_{пс}; \epsilon_{сб}$ – коефіцієнти знімання відповідно швидкісних, пасажирських та збірних поїздів;

$N_{ван}; N_{шв}; N_{пс}; N_{пр}; N_{сб}$ – середні розміри руху відповідно вантажних, швидкісних, пасажирських, приміських та збірних поїздів.

У розрахунках прийнято такі значення величин $\epsilon_{пс} = 4,3; \epsilon_{пс} = 2,4; \epsilon_{сб} = 2,0$ [1].

При насиченому ГРП більшість поїздів прямує на жовтий вогонь світлофора. В результаті не виконуються нормативи графіка руху й знижується використання пропускну спроможності.

У період "вікон" диспетчерський апарат змушений пропускати поїзди по

нерациональних маршрутах. Це значно збільшує експлуатаційні витрати при зменшенні дільничної швидкості.

Дана обставина обумовлює необхідність побудови та реалізації моделі визначення раціонального плану поїздопотоків в обхід закритих перегонів по найбільш доцільних маршрутах.

Сформуємо задачу визначення раціонального розподілу поїздопотоку на базовому залізничному полігоні у формальному вигляді у термінах математичного апарату теорії графів. Наукові дослідження проведено із застосуванням математичних методів спрямованого перебору варіантів та Форда-Фалкерсона [8].

Згідно з конфігурацією базового залізничного полігону побудовано граф $G(V, E)$ з пропускною спроможністю $c(u, v)$ його розрізу та потоком $f(u, v)$ для ребер з u до v . Необхідно знайти максимальний потік з джерела s до стоку t . На кожному кроці даного методу для кожного потоку діють однакові умови:

$$f(u, v) \leq c(u, v), \quad (3)$$

тобто потік з u до v не має перевищувати пропускної спроможності ребер;

$$f(u, v) = -f(v, u); \quad (4)$$

$$\sum_v f(u, v) = 0 \Leftrightarrow f_{in}(u) = f_{out}(u) \quad (5)$$

для всіх вузлів u , крім s та t . Потік не змінюється при проходженні через вузол.

Таким чином, маємо зважений граф G з пропускною спроможністю c , джерелом s та стоком t . Необхідно отримати оптимальний розподіл максимального потоку f з s до t .

Поки є шлях p з s до t , такий, що $c_f(u, v) > 0$ для всіх ребер $(u, v) \in p$, визначаємо $c_f(p) = \min\{c_f(u, v) \mid (u, v) \in p\}$, причому для кожного ребра $(u, v) \in p$ мають бути справедливими умови:

$$f(u, v) \leftarrow f(u, v) + c_f(p); \quad (6)$$

$$f(v, u) \leftarrow f(v, u) + c_f(p). \quad (7)$$

Отже, при надходженні на станцію 1, яка є джерелом графа, від 1 до 12 поїздів за зміну (12 годин) вони пропускаються по найкоротшому шляху 1–2–3–4–5–6–7–8–9–10. Пропускна спроможність ділянки 2–3 використовується також і для інших вантажних поздопотоків, тому з урахуванням максимального використання парку локомотивів та інтенсивного пасажирського руху вона становить 12 вантажних поїздів у зміну.

Внаслідок цього при необхідності пропускання від 13-го поїзда доцільно використовувати найбільш ефективний з економічної точки зору маршрут, що обминає ділянку 2–3, а саме 1–15–3–4–5–6–7–8–9–10, як наведено у табл. 1.

При зростанні поїздопотоків до 14-ти та більше поїздів стає лімітуючою ділянка 8–9, яка може пропустити лише 13 вантажних поїздів даного напрямку за зміну. Тому поїзди, починаючи з 14-го, доцільно спрямувати в обхід ділянки 8–9 за маршрутом 1–15–3–4–5–6–7–17–18–10.

Таким саме чином зіставлено потрібну та наявну спроможності ділянок і побудовано розподіл поїздопотоків 1–10 по різних раціональних маршрутах прямування.

При проведенні ремонтних робіт на двоколійній ділянці із закриттям однієї колії перегону пропускна спроможність всієї ділянки різко скорочується.

Таблиця 1

Розподіл змінних поїздопотоків за маршрутом 1–10

Можливі розміри поїздопотоків 1-10, поїзд/змін	Основний та додаткові шляхи прямування поїздопотоків	Лімітуючі ділянки
1 – 12	1–2–3–4–5–6–7–8–9–10	2–3
13	1–15–3–4–5–6–7–8–9–10	2–3, 8–9
14–16	1–15–3–4–5–6–7–17–18–10	2–3, 8–9, 5–6
17 – 19	1–15–16–8–9–10	2–3, 8–9, 5–6, 1–15
20–21	1–2–11–12–5–13–6–7–17–18–10	2–3, 8–9, 5–6, 1–15, 17–18
21 – 25	1–2–11–12–5–13–6–19	2–3, 8–9, 5–6, 1–15, 17–18, 12–5

У даній роботі проведено моделювання розподілу вантажних поїздопотоків на випадок закриття однієї колії перегону ділянки 2–3. При цьому наявна пропускна спроможність скорочується до одного вантажного поїзда за зміну. Порядок розподілу поїздопотоків для даного випадку наведено у табл. 2.

Як видно, тільки один вантажний поїзд може бути пропущеним за найефективнішим маршрутом 1–2–3–4–5–

6–7–8–9–10. Починаючи з другого, поїзди доцільно пропускати в обхід ділянки 2–3 за маршрутом 1–15–3–4–5–6–7–8–9–10. У такому випадку тепер стає лімітуючою одноколійна ділянка 1–15, яка може пропустити лише сім вантажних поїздів за зміну. Тому поїздопотік, що перевищує 8 поїздів, необхідно пропускати за третім варіантом – за маршрутом 1–2–11–12–5–6–7–8–9–10 тощо.

Таблиця 2

Розподіл змінних поїздопотоків за маршрутом 1–10 при закритті однієї колії перегону на ділянці 2–3

Можливі розміри поїздопотоків 1-10, поїзд/змін	Основний та додаткові шляхи прямування поїздопотоків	Лімітуючі ділянки
1	1–2–3–4–5–6–7–8–9–10	2–3
2–8	1–15–3–4–5–6–7–8–9–10	2–3, 1–15
9–13	1–2–11–12–5–6–7–8–9–10	2–3, 1–15, 8–9
14	1–2–11–12–5–6–7–17–18–10	2–3, 1–15, 8–9, 12–5
15–16	1–14–15–3–4–5–6–7–17–18–10	2–3, 1–15, 8–9, 12–5, 5–6
16–18	1–14–15–16–8–17–18–10	2–3, 1–15, 8–9, 12–5, 5–6, 1–14

Якщо на базовому полігоні виключити з експлуатації (у випадку ремонтів, транспортних пригод та надзвичайних ситуацій) усі ділянки, що визначають пропускну спроможність (дані ділянки являють собою розріз графа), то величина максимального потоку дорівнюватиме нулю.

Оскільки розріз блокує всі можливі маршрути для поїздів від початкової до кінцевої станції, то сума наявної пропускної спроможності вхідних у нього ділянок складає пропускну спроможність розгалуженого полігону мережі.

Завдання знаходження найкоротших шляхів пересування поїздопотоків має велике практичне значення.

Для кожного кола дорожнього диспетчера має розроблятися таблиця з

черговістю розподілу поїздопотоків при закритті перегонів на технологічні вікна або з іншим причин. Для реалізації можливостей регулювання насичення ділянок, що розглянуті, необхідно, щоб число поїздів, що надходять, не перевищувало пропускної спроможності розгалуженого полігону.

Використовуючи дані табл. 2 ДНЦ може планувати пропускання (розподіл) збільшеного поїздопотоків при регулюванні насичення ділянок поїздами, наданні "вікон" і інших перервах руху поїздів. Така технологія дає змогу перейти від управління рухом поїздів на окремих ділянках до управління поїздопотоків на розгалужених полігонах залізниці і регіонах мережі [9].

Для отримання достовірних оперативних даних запропонованою системою доцільно також впровадити підсистему ідентифікації поїздів з використанням контрольної ділянки та інформації АСК ВП УЗ Є, що дає змогу визначати статичні характеристики вагонів поїзда та зіставляти дані з телеграм-натурних аркушів з фактичними номерами вагонів [10].

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. У статті розроблена математична модель регулювання поїздопотоків на залізничному полігоні, що

базується на теорії графів. Реалізація розробленої моделі на виробництві на основі інформаційно-керуючих систем дає змогу оптимізувати розподіл поїздопотоків на розгалужених полігонах.

Використовуючи оперативну інформацію диспетчерський апарат може планувати розподіл збільшеного поїздопотоків при регулюванні насичення ділянок поїздами, наданні "вікон" і інших перервах руху поїздів. Така технологія дає можливість перейти від управління рухом поїздів на окремих ділянках до управління поїздопотоків на розгалужених полігонах залізниці і регіонах мережі.

Список використаних джерел

1. Грунтов, П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте [Текст]: учебник 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Долгополов, П. В. Оптимізація порожніх вагонопотоків з використанням математичного апарату задач на графах [Текст] / П.В. Долгополов, В.В. Петрушов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. №16. – С. 14-19.
6. Пособие поездному диспетчеру и дежурному по отделению [Текст] / Г.М. Грошев, В.А. Кудрявцев, Г.А. Платонов и др. – М.: Транспорт, 1992. – 368 с.
7. Калашнікова, Т. Ю. Удосконалення інформаційно-керуючої системи залізниць в умовах інтегрованості [Текст] / Т.Ю. Калашнікова, Є.М. Кушкін, Є.Д. Куценко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 146. – С. 61–65.
8. Балашевич, В. А. Математические методы в управлении производством [Текст] / В.А. Балашевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 184 с.
9. Долгополов, П. В. Удосконалення диспетчерського керівництва дільниці на основі прогнозного 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.

10. Егоров, О. И. Процедура идентификации поездов с использованием информации АСК ВП УЗ-Е [Текст] / И.В. Жуковицкий, О.И. Егоров // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2015. – Вип. 6(115). – С. 61–66.

Рецензент д-р техн. наук, професор О. В. Лаврухін

Долгополов Петро Віталійович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 730-10-88. E-mail: pit2013@mail.ru.
Трегубчак Дар`я Володимирівна, слухач магістратури ІППК Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(050) 537-00-71.

Dolgopolov 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: pit2013@mail.ru.
Tregubchak Darya, Lichistener IPPK of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (050) 537-00-71.

Стаття прийнята 04.07.2016 р.