

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗОВАНОГО СКЛАДАННЯ ГРАФІКА РУХУ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ

Вступ і актуальність задачі. В умовах реформування залізничного транспорту України повинна отримати розвиток модель організації перевезень, яка враховує наявність операторів перевезень, що виконують роботу з організації перевезень вантажів і пасажирів, та залізничного підприємства, яке володіє залізничною інфраструктурою та отримує основний прибуток за рахунок продажу пропускної спроможності (ниток графіка руху поїздів) [1]. В таких умовах постає необхідність найбільш повного та своєчасного задоволення потреб замовників у перевезенні, раціонального використання рухомого складу та пропускної спроможності дільниці при знаходженні раціональних інтервалів між поїздами різних категорій, покращення узгодження процесу передачі поїздів між структурними підрозділами (підсистемами).

Аналіз досліджень. На даний момент розроблення нормативного графіка руху поїздів (ГРП) в Україні виконується в ручному режимі на основі аналізу виконаних техніко-експлуатаційних показників за минулий визначений період за діючим графіком [2]. В умовах процедури узгодження заявок операторів перевезень та надання ниток графіка у визначені директивні строки першочерговим завданням для власника інфраструктури є пошук компромісу між мінімізацією власних витрат і задоволенням попиту на перевезення. За таких умов ГРП змінюється на кожний плановий рік відповідно до попиту, що вимагає автоматизації процесу розроблення ГРП.

Для вирішення зазначеного наукового завдання в роботі запропоновано подати процедуру прокладання ниток ГРП на дільниці як задачу оптимального розподілу обмежених ресурсів у часі, що в термінах теорії розкладу може бути формалізовано відповідно до задачі flow-shop (потокова лінія) [3,4].

Постановка задачі. Враховуючи складність розроблення ГРП для розрахункової дільниці, за якою здійснюється розрахунок графіку руху поїздів, прийнято одноколіїну лінію, обмежену технічними станціями, що обробляють більшу частину поїздопоток.

Позначимо через множину $M = \{1, 2, 3, \dots, i, \dots, m\}$ кількість ниток графіка руху поїздів, що відповідають числу заявок операторів перевезень, та через множину $N = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ кількість перегонів на дільниці. Час руху поїздів по дільниці можна записати у вигляді матриці $T = \|t_{ij}\|$, елементи якої t_{ij} відповідають часу прослідування i -го поїзда через j -тий перегін. Для опису послідовності прокладання ниток графіка, їх неперервності та обліку парного та непарного напрямків слідування поїздів необхідно задати технологічну матрицю F , яка встановлює порядок проходження поїздів по перегонах, тобто елемент матриці f_{il} визначає номер перегону, по якому прослідує i -тий поїзд на l -м етапі прокладання нитки поїзда, $i = \overline{1, m}$,

$l = \overline{1, L}$; L – максимальна кількість етапів прокладання нитки (перегонів на дільниці).

Якщо позначити g_{ij} як момент закінчення заняття поїздом i перегону j (або час прибуття поїзда на станцію $k + 1$ з

перегону j , де k - порядковий номер станції), то вектор $G = \{g_{ij}\}$, по суті, являє розклад руху вантажних поїздів. Діаграму Ганта, що описує розклад руху вантажних поїздів, наведено на рис. 1.

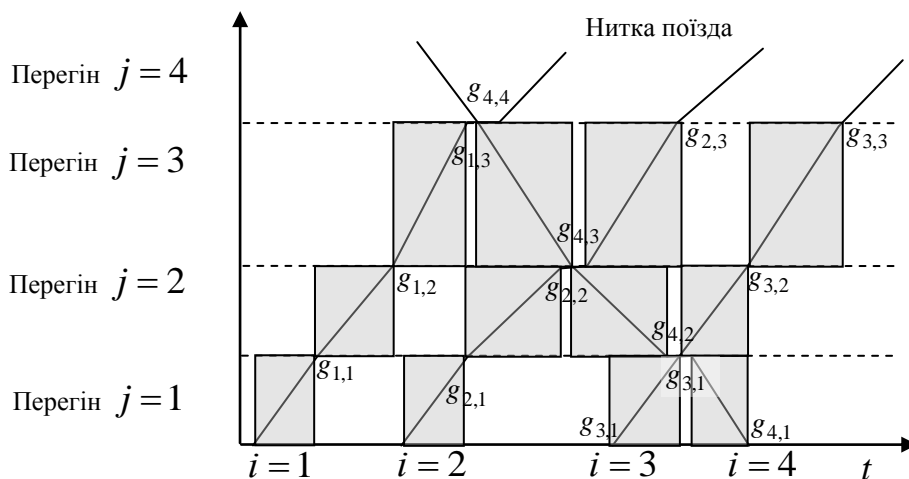


Рис. 1. Графічне уявлення діаграми Ганта, що описує розклад руху вантажних поїздів

Як критерій оцінки варіантів ГРП прийнято мінімум сумарних витрат на вартість простоїв всіх поїздів на дільниці, витрат на зупинку поїзда та вартості штрафу за невиконання директивних

строків прослідування поїзда через дільницю відповідно до заявок операторів. За таких умов цільова функція математичної моделі розрахунку графіка руху вантажних поїздів буде мати вигляд

$$F = \sum_{j=1}^{n-1} \left[\sum_{i=1}^m [c_{\text{ноіз-зод}}(g_{i,j+1} - t_{i,j+1} - g_{ij}) + \delta_{ij} c_{\text{зуп}}] \right] + \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1;n} c_{ij}^{\text{штраф}} \max(0, g_{ij=L} - D_i) \right] \rightarrow \min, \tag{1}$$

де n – остання проміжна станція на дільниці; j – перегін на дільниці; i – нитка прослідування поїзда; m – кількість поїздів на дільниці; $c_{\text{ноіз-зод}}$ – вартість простою поїзда на проміжній станції; g_{ij} – момент закінчення заняття поїздом i перегону j ; g_{ij+1} – момент закінчення заняття поїздом

i перегону $j + 1$; $t_{i,j+1}$ – час слідування i -тим поїздом по $j + 1$ перегону; δ_{ij} – функція Хевісайда, де $\delta_{ij} = 1$, якщо i -тий поїзд має зупинку на j -тому перегоні; $\delta_{ij} = 0$, якщо зупинки немає; $c_{\text{зуп}}$ – витрати, пов'язані з погашенням енергії поїзду при

зупинці на j -тому перегоні, що залежать від профілю перегону; $c_{ij}^{штраф}$ - вартість штрафу за несвоєчасне прибуття поїзду на станцію призначення; L – станція призначення поїзда; D_i – директивний строк прибуття поїзда на станцію призначення.

Для врахування технологічних обмежень при побудові графіка руху вантажних поїздів та забезпечення безпеки руху необхідним є дотримання таких обмежень [5]:

- за умови прокладання ниток графіка на перегоні j поїздів одного і того ж напрямку початок заняття поїздом перегону може бути визначено лише через міжпоїзний інтервал I після відправлення попереднього поїзда

$$g_{ij} - I_j \leq g_{i+1j} - t_{ij}, \quad (2)$$

де I_j – міжпоїзний інтервал на j -му перегоні;

- за умови прокладання ниток графіка на перегоні j поїздів, один з яких прибуває в парному напрямку, а зустрічного напрямку відправляється, початок заняття поїздом перегону може бути лише після прибуття парного поїзда з дотриманням інтервалу схрещення τ_{cxj}

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо поїзд } i \text{ займає перегін } j, \\ 0, & \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

- дотримання умови, за якою кожен поїзд в конкретний момент часу може займати тільки один перегін, має вигляд

$$\sum_j^n x_{ij} = 1, \quad j \in J. \quad (6)$$

- дотримання умови, що враховує бажаний час прибуття поїзда на кінцеву станцію дільниці

$$g_{ij} + \tau_{cxj} \leq g_{i+1j} - t_{ij}, \quad (3)$$

де τ_{cxj} – інтервал схрещення;

- за умови прокладання ниток графіка на перегоні j поїздів, один з яких прибуває в непарному напрямку, а зустрічного напрямку відправляється, початок заняття поїздом перегону може бути лише після прибуття непарного поїзда з дотриманням станційного інтервалу неодночасного прибуття τ_{nnj}

$$g_{ij} + \tau_{nnj} \leq g_{i+1j} - t_{ij}, \quad (4)$$

де τ_{nnj} – інтервал неодночасного прибуття на j -му перегоні;

- дотримання умови, за якою перегін може бути зайнятий тільки одним поїздом, має вигляд

$$\sum_i^m x_{ij} = 1, \quad i \in I, j \in J, \quad (5)$$

де x_{ij} набуває значення

$$g_{ij=L} \leq D_i, \quad (7)$$

де $g_{ij=L}$ – прибуття поїзда i з останнього перегону j , що відповідає останньому номеру перегону в логічному ланцюгу етапів слідування поїзда через дільницю; D_i – директивний строк прибуття поїзда i на кінцеву станцію дільниці.

Вирішення задачі. Поставлена математична модель (1-7) може бути вирішена з використанням генетичного алгоритму комбінаторного типу [6] Для підвищення швидкості пошуку оптимального ГРП запропоновано у фітнес-функції генетичного алгоритму використати метод вибору з активних розкладів [7] для корегування і уточнення розкладу. Застосування даного методу до вищезазначеної задачі дозволяє в процесі побудови ГРП виключити конфлікти, які можуть виникати між поїздами.

Згідно з запропонованим методом, на першому етапі складається так званий початковий розклад руху вантажних поїздів, тобто розклад, в якому можуть бути конфлікти між поїздами (конфлікти першого роду). Такі конфлікти можуть

виникнути в ситуації, коли на j -тий перегін призначено прослідування наступного поїзда за умови, що на цьому перегоні не закінчив прослідування попередній поїзд, (рис. 2). Якщо для j -того перегону записати послідовність відправлення поїздів як $\{1, 2, \dots, i, h, \dots, m\}$, то умову існування конфлікту першого роду математично можна записати як $g_{i,j} - (g_{h,j} - t_{h,j}) > 0$, де $g_{i,j}$ – момент прибуття i -того поїзда на j -тий перегін; $(g_{h,j} - t_{h,j})$ – момент відправлення h -того поїзда на j -тому перегоні; $t_{h,j}$ – час прослідування h -того поїзда на j -тому перегоні.

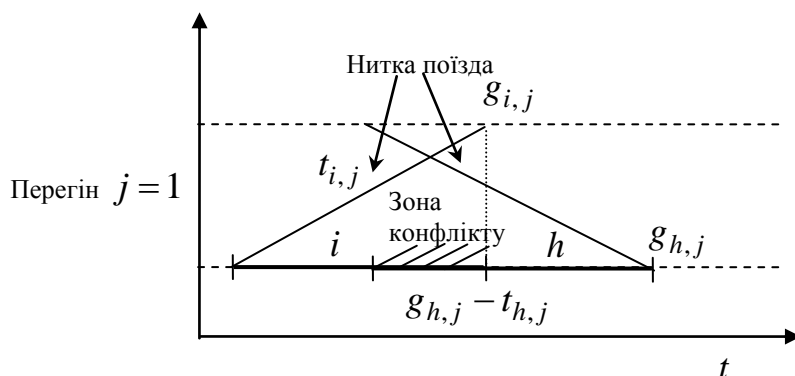


Рис. 2. Наявність конфлікту між поїздами

На другому етапі послідовно, починаючи з першого перегону, шляхом перевірки відповідних умов визначається наявність конфлікту між поїздами та здійснюється його вирішення. Для вирішення конфлікту між поїздами в роботі запропоновано використати спосіб розв'язання конфліктів, який полягає в тому, що поїзд, призначений на перегін пізніше, зсувається вправо на величину, при якій зникає конфлікт. Ілюстрація виконання способу вирішення конфлікту

між поїздами подана на рис. 3. Модифіковане значення моменту прибуття h -того поїзда $g_{h,j}^*$, для якого було виконано зсув, обчислюється як $g_{h,j}^* = g_{k,j} + \tau_{cx} + t_{h,j}$. Альтернативна формула для $g_{h,j}^*$ через величину зсуву $g_{h,j}^* = g_{h,j} + \Delta_1 + \tau_{cx}$.

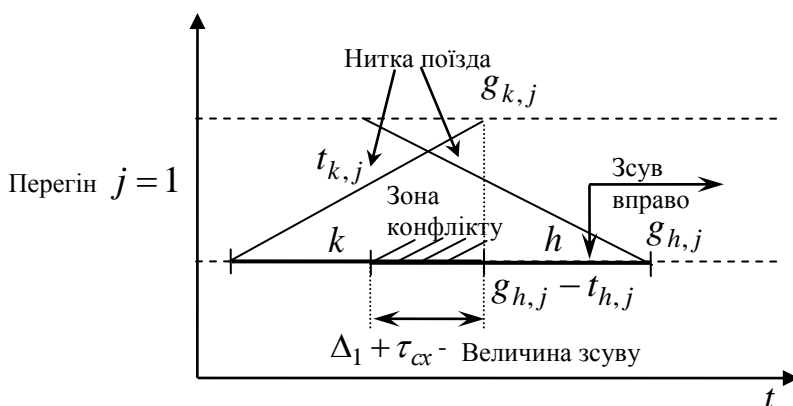


Рис. 3. Спосіб вирішення конфлікту між поїздами

На третьому етапі в тому випадку, коли при розв'язанні конфлікту між поїздами на другому етапі виникає ситуація, при якій i -тий поїзд призначено на відправлення на наступний за технологією перегін за умови, що не завершено його рух на попередньому перегоні, то виникає конфлікт між перегонами, або конфлікт другого роду. Рис. 4 ілюструє виникнення конфлікту між

перегонами. Умова існування конфлікту між перегонами подається аналітично у вигляді

$$g_{i,f_{i,l}} - (g_{i,f_{i,l+1}} - t_{i,f_{i,l+1}}) > 0.$$

Очевидно, що $f_{i,l}$ та $f_{i,l+1}$ – це номери перегонів, на яких слідує i -тий поїзд на l -тому та $l+1$ етапах прокладки ниток вантажних поїздів.

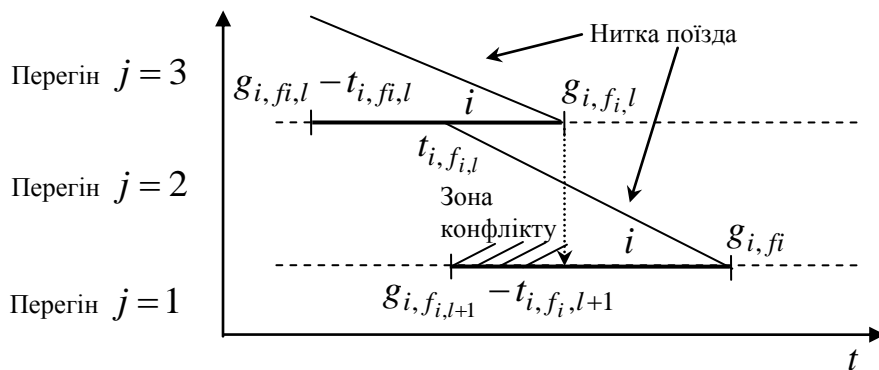


Рис. 4. Наявність конфлікту між перегонами

Після знаходження створеного конфлікту між перегонами він вирішується тим же способом, що і конфлікт між поїздами, на основі зсуву вправо нитки поїзда на $l+1$ етапі її прокладання, на

величину, при якій зникає конфлікт та дотримується безперервність ходу поїзда через дільницю. Так як розв'язання конфлікту між перегонами застерігає виникнення нових конфліктів між

перегонами, то виконується їх послідовне вирішення. Процедура виконується до тих пір, поки конфлікт між перегонами не буде вирішено для останньої за послідовністю прокладання нитки поїзда. Отже, після закінчення третього етапу в поточному розкладі відсутні конфлікти між перегонами. Виконується перехід на виконання другого етапу. На другому етапі виконується пошук нових конфліктів між поїздами. Якщо такі конфлікти відсутні, то

отримуємо активний розклад – тобто розклад руху вантажних поїздів, в якому відсутні одночасно конфлікти між поїздами та перегонами. В протилежному випадку знову вирішується конфлікт між поїздами та виконується перехід на третій етап для розв’язання конфліктів між перегонами, що виникли. Структурно-функціональну схему процесу вибору активного розкладу для побудови графіка руху вантажних поїздів наведено на рис. 5.

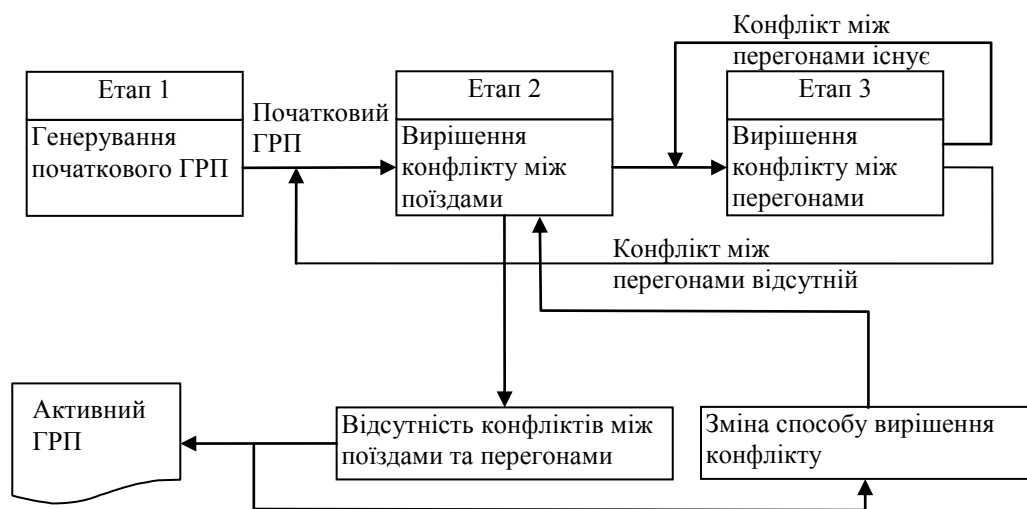


Рис. 5. Структурно-функціональна схема процесу вибору активного розкладу для побудови графіка руху вантажних поїздів

Висновки. Запропонована модель дозволить отримати раціональний розклад руху вантажних поїздів на дільниці при заданих вхідних параметрах та обмеженнях з мінімізацією сумарних витрат простою всіх поїздів на дільниці, витрат на зупинку поїзда та вартості штрафу за невиконання директивних строків прослідування поїзда через дільницю, що встановлені відповідно до заявок операторів. У подальшому на основі даної моделі можна створити

систему підтримки прийняття рішень для інтерактивного розроблення нормативного графіка руху поїздів на базі автоматизації процесу формування активних розкладів вантажних поїздів відповідно до вимог операторів перевезень. Результати розроблення дозволять оптимізувати використання інфраструктури та рухомого складу, покращити показники графіка руху поїздів.

Список літератури

1. Про особливості утворення публічного акціонерного товариства залізничного транспорту[Текст]: закон України від 23.02.2012 р. № 4442-IV // Урядовий кур'єр. – 2012. – 24 січня. – С. 7.

2. Каретников, А.Д. График движения поездов [Текст] / А.Д. Каретников, Н.А. Воробьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1979. – 301 с.
3. Конвей, Р.В. Теория расписаний [Текст] / Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. – М.: Транспорт, 1975. – 360 с.
4. Левин, В.И. Структурно-логические методы в теории расписаний [Текст]: монография / В.И. Левин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос.технол.акад., 2006. – 124 с.
5. Самарина, Н.А. Составление двухпутного графика движения поездов на ЭВМ [Текст] / Н.А. Самарина. – М.: Транспорт, 1971. – 124 с.
6. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д.Рутковская, М. Пилинський, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 383 с.
7. Черноморов, Г.А. Теория принятия решений [Текст]: учеб. пособие / Г.А. Черноморов. – Юж.-Рос. Гос.техн.ун-т. – Новочеркасск: Ред.журн. «Изв.вузов. Электромеханика», 2002. – 276 с.
8. Бутько, Т.В. Розробка адаптивної технології організації схем обігу пасажирських составів на основі процедур еволюційного моделювання [Текст] / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Є.В. Чеклова // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 1. – С. 27-31.

Ключові слова: графік руху вантажних поїздів, міжпоїзний інтервал, інтервал схрещення.

Анотації

Робота присвячена питанням формалізації процесу автоматизованого складання графіка руху вантажних поїздів на одноколіній дільниці. Для вирішення поставленої задачі в роботі сформовано оптимізаційну модель на основі теорії розкладів. Результати розробки дозволять оптимізувати використання інфраструктури та рухомого складу, покращити показники графіка руху поїздів.

Робота посвящена вопросам формализации процесса автоматизированного составления графика движения грузовых поездов на однопутном участке. Для решения поставленной задачи в работе сформированы оптимизационные модели на основе теории расписаний. Результаты разработки позволят оптимизировать использование инфраструктуры и подвижного состава, улучшить показатели графика движения поездов.

Work deals with aspects of the formalization process, automated scheduling of freight trains on single-track section. To solve this problem in the optimization model is formed based on the theory of scheduling. Results of development to optimize the use of infrastructure and rolling stock to improve the performance schedule of trains.