УДК 656.2.022.846:519.6

В. І. ХАРЛАН (Львівська залізниця), Д. М. КУРГАН, І. О. БОНДАРЕНКО (ДІІТ)

ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПОЇЗДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ДІЛЯНКИ

Запропонований метод встановлення раціональних швидкостей руху з урахуванням зміни стану об'єктів у часі за допомогою моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки як набору об'єктів шляхом використання функцій множини.

Предложен метод установления рациональных скоростей движения с учетом изменения состояния объектов во времени с помощью моделирования процесса эксплуатации железнодорожного участка как набора объектов путем использования функций множества.

The method of an establishment of rational speeds of movement in view of change of a condition of objects in time by means of modeling process of operation of a railway as set of objects by use of functions of set is offered.

Питання усунення постійнодіючих і тривалих обмежень швидкості руху є актуальними для багатьох ділянок Укрзалізниці. В ряді випадках вони можуть бути розглянути як оптимізаційні задачі. Сформульована таким чином проблема вибору послідовності реконструкції ділянки з метою встановлення максимально допустимих швидкостей руху мала рішення в ряді наукових робіт, наприклад [1, 2]. На сьогоднішній день потребує розв'язання задача у більш широкій постановці – визначення рівня раціональних швидкостей для всіх об'єктів, що складають ділянку, з розгляданням необхідності їх реконструкції і урахуванням зміни стану в часі в процесі експлуатації.

Для вирішення такої задачі ділянку залізничної колії будемо представляти як множену об'єктів $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_i, ..., \omega_n\}$. Окремий i-й об'єкт ω_i – це конструкція залізничної колії, рівень швидкості по якій, обмежується одним конкретним фактором, наприклад, стрілочний перевід, ділянка хворого земляного полотна тощо. При такому визначенні об'єкти ω_i можуть бути розташованими як окремо один від іншого, так і накладатися один на інший. Кожен об'єкт ω_i характеризується місцем розташування L_i (пікетажна прив'язка початку та кінця об'єкта), встановленою швидкістю руху $V_{0\,i} \in [V_{\min i}; V_{\max i}]$, де $V_{\min i}$ і $V_{\max i}$ – відповідно мінімальна і максимальна можливі швидкості руху по об'єкту. Для деяких об'єктів може бути необхідність встановлення обмеження й на мінімальну швидкість, наприклад, при русі в кривих ділянках колії з точки зору не перевищення від'ємного непогашеного прискорення.

При вирішенні задачі встановлення на об'єкті ω_i іншої швидкості руху $V_{\text{н}.i}$ у деяких випадках можлива ситуація $V_{\text{н}.i} > V_{\max i}$, але тоді на перебудову об'єкта потрібні капіталовкладення K_i

$$K_i = f(V_{\text{н}.i} - V_{\max i}). \qquad (1)$$

Звичайно, такі зміни стану об'єкта можливі не завжди і, як правило, носять диференційний характер

$$K_i = K_{0\,i} + \Delta K = f(V_{\text{н}.i} = V_{\max i} + \Delta V)$$

$$\forall \Delta K < \Delta K_{\min}, \Delta V = 0.$$

Таким чином, на встановлення відповідних швидкостей $V^* = \{V_{\text{н}.1}, V_{\text{н}.2}, ..., V_{\text{н}.i}, ..., V_{\text{н}.n}\}$ на всіх об'єктах ділянки треба вирішити задачу

$$V^* \to \begin{cases} \Delta t(V^*) \geq \Delta T \\ K(V^*) \to \min \end{cases}, \qquad (2)$$

де $\Delta t(V^*)$ – зміна часу руху по ділянці при встановленні швидкостей руху V^*; ΔT – заплановане скорочення часу руху після реконструкції ділянки.

Вирішення схожої задачі розглянуто в [2]. В цій роботі ставилася задача визначення множини об'єктів $\Omega^* \subseteq \Omega$, які потребують перебудови для забезпечення необхідного скорочення часу руху з мінімальними витратами коштів

$$\Omega^* \subseteq \Omega \to \begin{cases} \Delta t\left(\Omega^*\right) \geq \Delta T \\ K\left(\Omega^*\right) \to \min \end{cases}. \qquad (3)$$

При цьому кожен об'єкт характеризувався двома станами – швидкістю руху до і після можливої перебудови і відповідно вартістю такої операції.

Якщо розглядати подальше утримання ділянки, що розглядається у відповідності до встановлених швидкостей руху, то слід враховувати погіршення стану об'єктів з часом. Звичайно, швидкість зміни стану об'єкта буде залежати від умов експлуатації

$$S_i = f\left(V_{\text{н}i}, \Gamma, Ч_i\right),$$

де S_i – стан об'єкта ω_i; Γ – вантажонапруженість на ділянці; $Ч_i$ – час експлуатації об'єкта.

Під станом об'єкта будемо розуміти імовірність безвідмовної роботи цього об'єкта в заданих умовах експлуатації. Звичайно зміна стану об'єкта буде відбуватися по-різному в залежності від умов експлуатації. На рис. 1 показана якісна залежність стану об'єкту від часу експлуатації для різних швидкостей руху при інших однакових умовах.

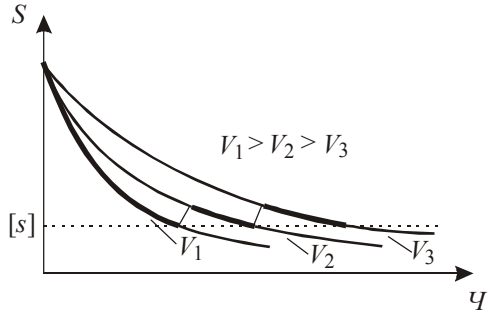

Рис. 1. Зміна стану об'єкта в часі для різних встановлених швидкостей руху

Подальшу експлуатацію об'єкта з прийнятими параметрами будемо вважати можливою, якщо імовірність його роботоспроможності не менше встановленого значення

$$S_i \geq [s].$$

Але стан об'єкта $S_i < [s]$, ще не означає, що об'єкт не можливо експлуатувати. В залежності від виду об'єкта може бути продовжена його подальша експлуатація, але з обмеженням швидкості руху. Характеристика технічного стану об'єкта, що експлуатується з поступовим обмеженням швидкості показана жирною лінією на рис. 1. Прикладом такого об'єкту може бути крива ділянка колії. Її геометричний стан (положення рейок в горизонтальній площині) може з часом погіршуватися, але, при відповідному обмеженні швидкості, подальша експлуатація буде можлива.

Якщо в задачі, що вирішується, має місце обмеження

$$\Delta t\left(V^*\right) \geq \Delta T,$$

то стан об'єкта треба повернути у відповідність до встановленої швидкості. Після часу експлуатації $Ч_i = f\left(S_i = [s]\right)$ виникає потреба в коштах на ремонт (якщо об'єкт ремонтопридатний) або заміну (якщо об'єкт не відновлюється). Тоді характеристика його експлуатації буде змінюватись так, як показано на рис. 2.

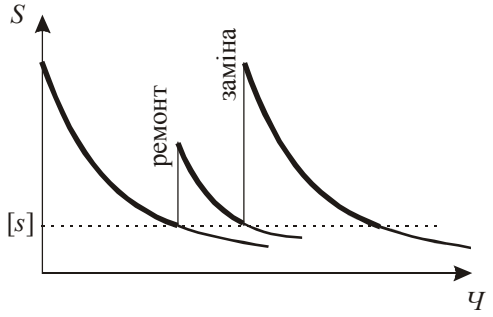

Рис. 2. Зміна стану об'єкта в часі за наявності ремонту і (або) заміни

Таким чином, якщо задача (3) вирішується за умови тривалої експлуатації ділянки залізниці, то формула (1) без урахування щорічних експлуатаційних витрат прийме вигляд

$$K_i(\omega_i) = \begin{cases} 0, V_{\text{н}.i} \leq V_{0\,i} \\ K_i\left(V_{\text{н}.i} - V_{0\,i}\right), V_{\text{н}.i} > V_{0\,i} \end{cases} + \\ + \begin{cases} 0, S_i(Ч_i) \geq [s] \\ K_i\left(V_{\text{н}.i}\right) \cdot \eta(Ч_i), S_i(Ч_i) < [s] \end{cases}, \qquad (4)$$

де η – коефіцієнт дисконтування різночасових витрат.

Графічно задачу (2) можна представити у вигляді, показаному на рис. 3.

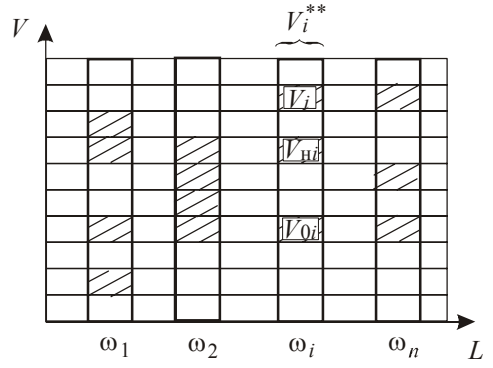

Рис. 3. Множини можливих швидкостей (умов експлуатації) для об'єктів

Кожен об'єкт $\omega_i \in \Omega$, може мати декілька умов експлуатації з різними швидкостями

$$V_i^{**} = \begin{Bmatrix} V_{i,1}, V_{i,2}, ..., V_{0i}, ..., \\ V_{ij}, ..., V_{\text{н.і}}, ..., V_{in} \end{Bmatrix}.$$

Кожній умові експлуатації V_{ij} буде відповідати скорочення часу руху відносно вихідної швидкості V_{0i}

$$\Delta t(V_{ij}) = t(V_{0i}) - t(V_{ij})$$

і затрати коштів $K_i(V_{ij})$ (див. формулу (4)) на утримання або перехід і утримання об'єкту до такої умови експлуатації.

Задача ускладнюється тим, що функція $\Delta t(V_{ij})$ може бути визначена тільки за результатами тягових розрахунків і не є адитивною, бо на її значення будуть впливати вибрані стани суміжних об'єктів. Докладно це питання було розглянуто в роботі [2] і запропоновано рішення задачі (3) для неадитивної функції скорочення часу руху з використанням методики оптимізації функцій множини, розробленої проф. А. А. Босовим [3]. Використаємо результати цих досліджень для вирішення задачі (2).

Для кожного об'єкта $\omega_i \in \Omega$ визначимо множину його можливих положень V_i^{**}, упорядковану по зростанню відношення $\dfrac{K_i(V_{ij})}{\Delta t_i(V_{ij})}$

$$V_i^{**} = \left\{ V_{ij} \in \{V_{ij}\} : \frac{K_i(V_{ij})}{\Delta t_i(V_{ij})} \right\},$$

де $\Delta t_i(V_{ij})$ розраховується як різниця між часом руху, визначеним за тяговими розрахунками для вихідного стану об'єктів Ω, і часом руху, що відповідає новій швидкості, встановленій для об'єкта ω_i

$$\Delta t_i(V_{ij}) = t(\Omega \leftarrow \forall V = V_0) - t(\Omega \leftarrow \forall V \setminus V_{ij} = V_0).$$

Якщо отримати підмножину $V' \subseteq V^*$, яка формується як набір упорядкованих об'єктів

$$V' = \left\{ V_{ij} \in \{V_{ij}\} : \frac{K_i(V_{ij})}{\Delta t_i(V_{ij})} \le \mu \right\}, \qquad (5)$$

де множник μ керує, на якому об'єкті необхідно зупинитися при формуванні множини V', і визначається з нерівності

$$\sum_{V_{ij} \in V'(\mu)} \Delta t(V_{ij}) \ge \Delta T, \qquad (6)$$

то отриманий набір швидкостей V' буде відповідати нерівності (6) і умові

$$\sum_{V_{ij} \in V'(\mu)} K(V_{ij}) = \min$$

серед всіх інших можливих варіантів [3].

Однак, специфіка задачі накладає на формування множини V' ряд певних обмежень. По-перше, швидкість повинна бути встановлена для кожного з об'єктів залізничної ділянки $\omega_i \in \Omega$, по-друге, для кожного з об'єктів може бути встановлено тільки одне значення швидкості

$$\exists V_{ij} \in V_i^{**}, V_{ij} \in V', V_i^{**} \setminus V_{ij} \notin V'. \qquad (7)$$

Якщо сформувати множину швидкостей, що треба встановити для об'єктів ділянки, з перших елементів можливих варіантів V_i^{**} кожного об'єкту, то умова (6) буде виконана, а отриманий стан ділянки буде відповідати мінімальним витратам

$$V^*(K = \min) = \left\{ V_{i1} \in V_i^{**}, \frac{\Delta t(V_{i1})}{K(V_{i1})} = \min \right\}.$$

Рішення задачі (2), відповідно до [1] повинно відповідати умові (5) та, враховуючи специфіку задачі, відповідати умові (7). Таким чином остаточне рішення задачі (2) може бути представлено у наступному вигляді

$$V^* = \left\{ V_{ij} \in \{V_{ij}\} : \frac{\Delta t(V_{ij})}{K(V_{ij})} - \frac{\Delta t(V_{i1})}{K(V_{i1})} \le \mu \right\}$$

$$\sum_{V_{ij} \in V'(\mu)} \Delta t(V_{ij}) \ge \Delta T$$

$$\exists V_{ij} \in V_i^{**}, V_{ij} \in V^*$$

$$V_i^{**} \setminus V_{ij} \notin V^*,$$

$$V_i^{**} = \left\{ V_{ij} \in \{V_{ij}\} : \frac{\Delta t(V_{ij})}{K(V_{ij})} \right\}.$$

Множина V^* буде складатися зі швидкостей по кожному об'єкту ділянки і такий набір буде відповідати умові (2). Взагалі можна отримати всі можливі варіанти множини V^*, кожен з яких буде відповідати різному значенню часу руху по ділянці, але буде оптимальним з точки

зору співвідношення часу руху і витрат на реконструкцію та подальше утримання. Таким чином, результат розрахунків можна представити у вигляді графіку залежності часу руху (або його скорочення відносно існуючого стану) від витрат, на якому точки будуть відповідати наборам швидкостей, які треба встановити на ділянці, рис. 4.

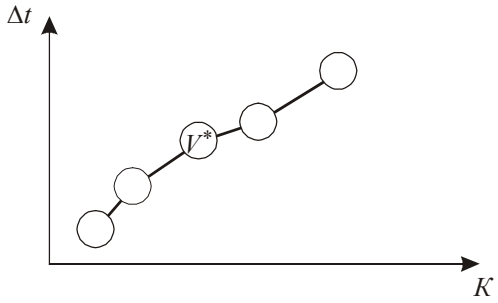

Рис. 4. Співвідношення Δt і K для можливих варіантів рішень V^*

Графік буде мати $\sum_{i=1}^{n}(m_i - 1)$ точок, де n – кількість об'єктів на ділянці; m_i – кількість можливих рівнів швидкості для i-го об'єкту. Загальна кількості можливих варіантів стану такої системи $\prod_{i=1}^{n} m_i$.

Запропонована методика дає змогу визначити рівні швидкостей, які можуть бути встановлені на об'єктах ділянки, що розглядається, такими, що будуть раціональними з точки зору накладених умов. Причому результат можна отримати у вигляді послідовності рішень і мати змогу вибору між варіантами з близькими характеристиками або керуючись менш важливими і неврахованими обмеженнями. Крім того, запропонована модель експлуатації залізничної ділянки може бути інструментом для розв'язання інших питань, що пов'язані з вирішенням оптимізаційних задач з урахуванням зміни стану у часі та відказу залізничних об'єктів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Игнатов Ж. А. Влияние распределения локальных ограничений на повышение скоростей движения пассажирских поездов / Ж. А. Игнатов, М. И. Карпов, А. А. Матвиенко // Меж. сб. науч. тр. – Д. 1989. – С. 63–66.
2. Курган М. Б. Розробка метода оптимальної перебудови ділянки залізниці для організації швидкісного руху поїздів // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: ДІІТ, 2003. – Вип. 1. – С. 66–73.
3. Босов А. А. Применение функций множества в инженерных и экономических задачах / Транспорт / Зб. наук. праць ДІІТу. Вип. 12. – Д., ДІІТ, 2002. – С. 20–29.

Надійшла до редколегії 30.03.07.