

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ОБМЕЖЕНЬ ШВИДКОСТІ

Запропоновано модель щодо прогнозування зміни часу руху та механічної роботи сили тяги локомотива при виникненні обмежень швидкості руху поїздів.

Предложена модель для прогнозирования изменения времени хода и механической работы силы тяги локомотива при возникновении ограниченной скорости движения поездов.

The mathematical model for prediction of change of running time and mechanical work of the locomotive traction force at occurrence of restrictions of the train traffic speed is suggested.

Постановка задачі

Сьогодні на залізницях України досить розповсюджене таке явище, як обмеження швидкості руху поїздів, що зумовлено станом залізничної колії. Детальний аналіз таких явищ викладено у роботі [1]. Ділянки з діючими обмеженнями потребують чималих капітальних вкладень для їх усунення, але в умовах обмеженого фінансування неможливо виділити кошти для усунення усіх обмежень швидкості одразу. Виникає питання, на яких ділянках необхідно виконувати ремонтно-колійні роботи у першу чергу. До першочергових відносяться ділянки, на яких невиконання ремонту може призвести до порушення безпеки руху поїздів та зумовити закриття перегону. До ділянок другої черги належать обмеження, які призводять до значних фінансових втрат. Саме такі випадки й розглядаються у статті.

У роботах [2 – 3] викладено методику оцінки ефективності зняття обмеження швидкості, яке досягається за рахунок зниження експлуатаційних витрат, на які впливають скорочення часу руху поїзда та зменшення механічної роботи сили тяги локомотива на ділянках гальмування та розгону. Методика, що викладена у роботі [2], опосередковано враховує такі характеристики дослідної ділянки як план лінії, поздовжній профіль та ін. У реальних умовах для визначення скорочення часу руху та зменшення витрат електроенергії необхідно виконувати багаторазові тягові розрахунки, що інколи призводить до великого обсягу розрахунків. Тому виникла необхідність розробки моделі, яка б дозволяла визначати зміни часу руху та механічної роботи з урахуванням характеристик дослідних ділянок з допустимою точністю.

Методика дослідження

В роботі дослідні показники описуються множиною факторів $\Omega = \{x_j\}$, $j = 1, m$ ($m = 29$), таких як: тип профілю; вид тяги; маса поїзда; вантажонапруженість лінії; кількість діючих обмежень швидкості, їх допустимі швидкості та довжини (мінімальні, середні та максимальні); значення ухилів поздовжнього профілю безпосередньо на ділянці обмеження та за нею; протяжність кривих на дослідній ділянці, в тому числі радіусом до 600 м; мінімальне та середнє значення радіусів кривих на ділянці.

Інформація про перелічені показники була представлена результатами пасивного експерименту у вигляді матриці спостережень

$$X = \{x_{ij}\}, i = 1, n, j = 1, m \quad (n = 108, m = 29),$$

де x_{ij} – значення j -го показника в i -му спостереженні.

При розробці моделі виникло питання, яким чином з даної множини показників $\Omega = \{x_j\}$ обрати найвпливовіші (предиктори), а також як врахувати ступінь їх впливу на час руху та механічну роботу сили тяги локомотива (відгуки).

Для вирішення задачі у даному дослідженні було застосовано метод структурного моделювання, основні положення якого викладено у роботах [4 – 6].

У якості об'єкта дослідження було розглянуто ділянки, на яких рухаються пасажирські і вантажні поїзди. З дослідним процесом пов'язано поняття системи. Під системою розуміється така сукупність взаємопов'язаних елементів, що отримує нову властивість, не притаманну жодному з елементів.

Таким чином, щоб визначити структуру системи, необхідно встановити взаємозв'язки між елементами множини Ω .

Будемо вважати, що два елемента x_i та x_j локально взаємозв'язані, якщо зі зміною одного з них змінюється й інший.

У якості математичної моделі, що спрямовує локальний взаємозв'язок між елементами, було застосовано відношення толерантності τ [4 – 6], одна з можливих реалізацій якого має вигляд

$$x_i \tau x_j \Leftrightarrow (|r_{ij}| > r_{кр}(\alpha)), \quad (1)$$

де r_{ij} – вибірковий коефіцієнт кореляції між x_i та x_j , який визначається за виразом

$$r_{ij} = \frac{\overline{x_i x_j} - \overline{x_i} \overline{x_j}}{S_{x_i} \cdot S_{x_j}}, \quad (2)$$

де $\overline{x_i}$, $\overline{x_j}$ – середні значення показників x_i та x_j відповідно; $\overline{x_i x_j}$ – середнє значення добутку x_i та x_j ; S_{x_i} – середнє квадратичне відхилення x_i ; S_{x_j} – середнє квадратичне відхилення x_j ; $r_{кр}(\alpha)$ – критичне значення коефіцієнта кореляції, яке залежить від рівня значущості α та об'єму вибірки.

Матрицю толерантності визначимо за правилом

$$\tau_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_i \tau x_j; \\ 0, & \text{якщо } x_i \bar{\tau} x_j. \end{cases} \quad (3)$$

Враховуючи, що множина Ω складається зі скінченної кількості елементів, матрицю толерантності представлено за допомогою неорієнтованого графа $G_n(X, E)$, X – множина вершин графа, що відповідають показникам $\{x_j\}$; E – множина ребер графа, яка визначається за правилом: дві вершини x_i та x_j поєднуються ребром, якщо відповідний елемент матриці толерантності $\tau_{ij} = 1$.

Матриця толерантності суттєво залежить від довірчої ймовірності $P = 1 - \alpha$. А тому множини побудованих структур математичних моделей буде суттєво залежати від рівня довірчої ймовірності.

При розв'язанні задачі структурного моделювання необхідно відмітити такі важливі моменти.

Пов'яжемо з відношенням толерантності τ відношення еквівалентності θ за правилом:

$$x_i \theta x_j \Leftrightarrow ((x_i \tau x_j) \vee (\exists (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \in \Omega, (x_i \tau \xi_1 \wedge \xi_1 \tau \xi_2 \wedge \xi_k \tau x_j))) \quad (4)$$

З точки зору математичного моделювання це означає, що множину Ω можна розкласти на класи еквівалентності, а вихідну систему показників можна розбити на незалежні підсистеми і кожену з них у подальшому досліджувати окремо. В основі алгоритму побудови класів еквівалентності лежить принцип виділення зв'язних компонентів графа $G_n(\tau)$.

Таким чином, основні елементи розв'язання задачі математичного моделювання наступні:

- за матрицею спостережень X на основі кореляційного аналізу експериментальних даних встановлюється відношення толерантності τ ;
- за відновленим відношенням толерантності τ , яке визначено на множині $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, будується множина $M(\tau)$ наборів можливих предикторів;
- у відповідності з заданим відношенням переваги Q визначається множина

$$M^Q(\tau) \subset M(\tau).$$

Аналіз отриманих результатів

Проведені розрахунки за описаною методикою дозволили визначити набори предикторів. Параметричну ідентифікацію для отриманих наборів предикторів було проведено за методом найменших квадратів.

Нижче наведено отримані моделі для прогнозування зміни часу руху при виникненні обмежень швидкості на дослідній ділянці для вантажного та пасажирського руху (5), а також для прогнозування зростання механічної роботи сили тяги локомотива для вантажного (6) і пасажирського руху (7). Коефіцієнти до моделей наведено у табл. 1.

$$t_{(обм)} = a_0 + a_1 \cdot L_{дл} + a_2 \cdot n_{обм} + \frac{a_3}{V_{\min(обм)}} + a_4 \cdot L_{sr(обм)} + a_5 \cdot i_{sr(за обм)} + a_6 \cdot t; \quad (5)$$

$$R_{\text{мех}(обм)}^{\text{вант}} = a_0 + a_1 \cdot L_{дл} + a_2 \cdot Q + a_3 \cdot n_{обм} + \frac{a_4}{V_{\min(обм)}} + a_5 \cdot i_{sr(за обм)} + a_6 \cdot R_{\text{мех}}; \quad (6)$$

$$R_{\text{мех(обм)}}^{\text{пас}} = a_0 + a_1 \cdot n_{\text{обм}} + \frac{a_2}{V_{\text{min(обм)}}} + a_3 \cdot i_{\text{sr(за обм)}} + a_4 \cdot R_{\text{мех}}. \quad (7)$$

З наведених аналітичних залежностей видно, що на зміни часу руху впливають такі показники: довжина дослідної ділянки ($L_{\text{дл}}$), кількість обмежень, що виникли ($n_{\text{обм}}$), мінімальна швидкість, що обмежує рух ($V_{\text{min(обм)}}$), середня

довжина ділянки обмеження ($L_{\text{sr(обм)}}$), середній ухил профілю за ділянкою обмеження ($i_{\text{sr(за обм)}}$), а також значення часу руху при відсутності обмежень (t). На зміну механічної роботи локомотива, окрім перелічених, впливають такі показники, як середня маса вантажного поїзда (Q) і значення механічної роботи до виникнення обмежень швидкості ($R_{\text{мех}}$).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів до моделей

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів	
	вантажний рух	пасажирський рух
$t_{\text{обм}}$		
a_0	-7,395	-5,53
a_1	-0,023	-0,015
a_2	0,807	0,032
a_3	265	221
a_4	0,913	0,994
a_5	0,015	0,718
a_6	1,05	1,027
$R_{\text{обм}}$		
a_0	-49,58	0
a_1	0,119	-1,78
a_2	0,01	636
a_3	-1,592	-0,715
a_4	1765	1,024
a_5	-0,75	-
a_6	0,987	-

Для оцінки якості моделей було визначено коефіцієнт детермінації (R^2), значення якого наведено у табл. 2. Отримані значення R^2 свідчать про достатньо високу якість моделі. Також було проаналізовано залишки, які розподілилися за нормальним законом, як того й вимагає одна з необхідних умов [6], що пред'являється до моделі.

Розглянемо приклад. На ділянці довжиною 15 км виникло 2 обмеження швидкості з рівня-

ми допустимої швидкості 25 і 40 км/год відповідно та з довжинами 0,5 і 1,0 км. Середні ухили профілю за ділянками обмеження складають 7,3 ‰ та -2,3 ‰. До виникнення обмежень швидкості час руху становив 16 хв. для вантажного поїзда та 13 хв. для пасажирського поїзда. Механічна робота сили тяги локомотива складала 251 та 86 т-км для вантажного та пасажирського поїздів відповідно. Середня маса вантажного поїзда складає 3 500 т. Для визначення зростання часу руху та механічної робо-

ти локомотива, що зумовлені виникненням обмежень швидкості, скористаємося формулами (5)...(7). Тоді час руху при виникненні обмежень швидкості складе 21 та 16 хв., а механічна робота 98 та 277 т-км для вантажного і пасажирського поїздів, відповідно. З отриманих результатів видно, що час руху зростає на 24 % та 19 % для вантажного і пасажирського поїзда, а

механічна робота – на 9 і 12 %. Якщо відомі розміри руху на дослідній ділянці, то нескладно визначити добові та річні втрати часу руху від дії обмежень швидкості, а також зростання витрат паливо-енергетичних ресурсів, значення яких залежить від тягово-енергетичних показників, в тому числі і механічної роботи сили тяги локомотива.

Таблиця 2

Коефіцієнт детермінації побудованих моделей (R^2)

Модель	Вантажний рух	Пасажирський рух
$t_{\text{обм}}$	0,985	0,969
$R_{\text{мех(обм)}}$	0,957	0,961

Висновки

Наведені аналітичні залежності дозволяють визначати зміну тягово-енергетичних показників при виникненні обмежень швидкості руху поїздів з урахуванням характеристик дослідних ділянок. Результати, отримані за моделями (5)...(7) необхідні при визначенні зростання експлуатаційних витрат на ділянках з діючими обмеженнями, а також для встановлення раціональної послідовності усунення бар'єрних місць.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Курган, М. Б. Вплив обмеження швидкості на енергетичні показники руху поїздів [Текст] / М. Б. Курган, О. С. Маркова / Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 29-36.
2. Столична магістраль в цифрах і фактах [Текст] : довідник / О. М. Кривопішин, Г. Д. Ейтутіс. – К., 2006. – С. 102.
3. Курган, М. Б. Економічна ефективність від усунення обмежень швидкості руху поїздів, що зумовлені простроченням ремонтів [Текст] / М. Б. Курган, О. С. Маркова / Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 84-87.
4. Босов, А. А. Підвищення ефективності роботи транспортної системи на основі структурного аналізу [Текст] : монографія / А. А. Босов, Н. А. Мухіна, Б. П. Піх. – Д., 2005. – 200 с.
5. Босов, А. А. Функции множества и их применение [Текст] : учебн. пособие / А. А. Босов. – Днепродзержинск: Издательский дом «Андрей», 2007. – 182 с.
6. Босов, А. А. Структурное моделирование по экспериментальным данным с использованием бинарного отношения толерантности [Текст] / А. А. Босов, Н. А. Мухіна // Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук. праць – Д.: Січ, 1998. – С. 134-142.

Надійшла до редколегії 25.12.2008.