

## МОДЕЛЬ КОЛІЙНОГО РОЗВИТКУ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГІРКОВИХ ПРОЦЕСІВ

Наведено структуру моделі колійного розвитку для імітаційного моделювання процесу розформування-формування вантажних поїздів на сортувальних гірках. Модель побудовано на основі зважених орієнтованих графів. Поздовжній профіль гірки апроксимовано модифікованим кубічним сплайном.

Приведена структура модели путевого развития для имитационного моделирования процесса расформирования-формирования грузовых поездов на сортировочных горках. Модель построена на основе взвешенных ориентированных графов. Продольный профиль горки аппроксимирован кубическим сплайном.

A model structure of track lay-out for simulation of the process of braking-up and making up of freight trains on the sorting humps is presented. The model is made on the basis of weighed directed graphs. The longitudinal hump profile is approximated by a cubic spline.

Сортувальні гірки є основними пристроями для розформування составів вантажних поїздів на залізничних станціях. Вони відіграють важливу роль у прискоренні доставки вантажів та скороченні простоїв вагонів. У зв'язку з цим особливо актуальними є задачі вдосконалення їх конструкції, технічного оснащення та технології роботи для забезпечення умов безпечного розформування составів з мінімальними експлуатаційними витратами. Відповідно до Правил та норм проектування сортувальних пристроїв [1], конкуруючі варіанти сортувальної гірки повинні бути оцінені за допомогою моделювання процесу розформування потоку составів. Однак у сучасних умовах виконується лише перевірка плану та поздовжнього профілю сортувальної гірки, яка ґрунтується на результатах імітаційного моделювання скочування відцепів розрахункової групи. Подібна методика дозволяє визначати тільки працездатність гірки і не дозволяє розраховувати техніко-експлуатаційні та техніко-економічні показники, які необхідні для пошуку її оптимальних параметрів.

Сортувальна гірка є невід'ємною частиною сортувального комплексу, тому для її комплексної оцінки необхідна модель, що дозволяє імітувати всі елементи гіркового технологічного циклу разом з процесом накопичення вагонів у сортувальному парку. Загальна модель гірки включає модель колійного розвитку, модель технологічного процесу, модель пересування об'єктів, модель системи управління стрілками і уповільнювачами та інформаційну модель.

У даній статті викладено основні принципи побудови однієї з базових моделей зазначеного комплексу – моделі колійного розвитку. Ця мо-

дель повинна забезпечувати інформацією взаємодіючі з нею моделі комплексу, а також реалізовувати необхідні керуючі команди. Зокрема модель колійного розвитку повинна надавати наступну інформацію: стан і положення стрілочних переводів і гальмівних уповільнювачів; стан ділянок колії; положення об'єктів рухомого складу; параметри маршрутів руху об'єктів. Окрім того, модель повинна сприймати наступні команди: змінити стан стрілки чи гальмівного уповільнювача; помістити новий об'єкт на ділянку колії; видалити об'єкт з моделі колійного розвитку; перемістити об'єкт на задану відстань у визначеному напрямку.

Для виконання наведених функцій модель колійного розвитку містить інформацію про план та поздовжній профіль колійних ділянок, стрілочні переводи, гальмівні уповільнювачі, їх поточний стан та розташування рухомого складу на коліях. В основу моделі колійного розвитку сортувального комплексу покладено універсальну модель колійного розвитку станції [2], яку було вдосконалено для можливості моделювання гіркових процесів. До складу моделі колійного розвитку входить геометрична модель (ГМКР) та модель зайняття колійних ділянок (МЗК). Структура ГМКР представлена на основі зваженого орієнтованого графа  $G(V, E)$ , в якому виділено п'ять підмножин вершин:  $V^S$ ,  $V^C$ ,  $V^W$ ,  $V^Z$ ,  $V^P$ . Вершини  $v_i \in V^S$  є центрами стрілочних переводів (ЦП), вершини  $v_j \in V^C$  – світлофорами (СВ), вершини  $v_k \in V^W$  – кінцями колій (КП), вершини  $v_l \in V^Z$  – стиками колійних ділянок (СТ), вершини  $v_n \in V^P$  – точками початку вертикальних кривих (ПВК). Для розподілу множини вершин графа  $G$  на підмножи-

ни кожній із них виділені непересічні групи номерів:  $N^S = \{1, 2, \dots, 199\}$ ,  $N^C = \{201, 202, \dots, 399\}$ ,  $N^{W,Z} = \{401, 402, \dots, 999\}$ ,  $N^P = \{1001, 1002, \dots, 1099\}$ .

Дугам графа  $e \in E$  поставлені у відповідність ділянки колій між вершинами. Орієнтований граф  $G$  у пам'яті ЕОМ представляється списком дуг. При цьому кожна дуга орграфа  $e = (v \rightarrow u)$  позначається упорядкованою парою вершин, де  $v$  – початкова, а  $u$  кінцева вершина; прийнято, що всі дуги орієнтовані зліва направо.

Орграф  $G(V, E)$  є зваженим. Кожній вершині графа у відповідність поставлена її відмітка (апліката)  $z$ . Відмітка  $z$  може бути задана безпосередньо або розрахована. Інші параметри визначаються типом вершини. Так, кожній вершині  $v_i$  підмножини  $V^S$  поставлено у відповідність вектор параметрів:

$$\mathbf{X}^S = \{e_1, e_2, e_3, e_4, s_{ck}\},$$

де  $e_1, \dots, e_4$  – колійні ділянки, що входять до складу стрілочного перевалу;

$s_{ck}$  – положення стрілки ( $s_{ck} = 0$  – вліво,  $s_{ck} = 1$  – вправо).

Параметри  $e_2$  та  $e_4$  відповідають правій колії стрілочного перевалу (рис. 1). При цьому використовується лише один з них залежно від напрямку укладки стрілочного перевалу (пошерстний чи протишерстний); інший параметр приймає нульове значення. Таке представлення стрілочного перевалу дозволяє контролювати його зайнятість рухомим складом та визначати напрям слідування по ньому відчепів.

Для вершин  $v_j \in V^C$  (СВ) повинен бути заданий напрямок сигналу (дозволяє прослідування зліва направо  $dr = 0$ , дозволяє прослідування справа наліво  $dr = 1$ ):

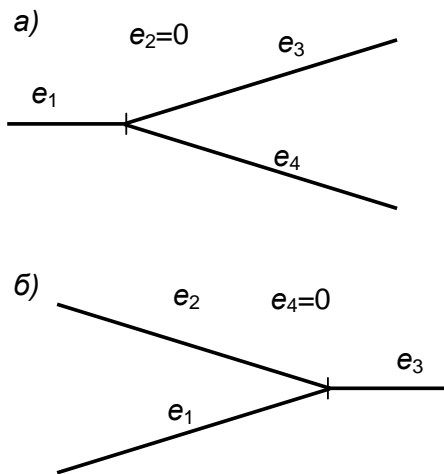


Рис. 1. Схема кодування стрілочних перевалів: а – протишерстний перевід; б – пошерстний перевід

$$\mathbf{X}^C = (dr).$$

Кожна вершина  $v_n$  підмножини  $V^P$  характеризується вектором параметрів:

$$\mathbf{X}^P = \{i_n, R_B\},$$

де  $i_n$  – ухил елемента поздовжнього профілю, що знаходиться справа від вертикальної кривої, %о;

$R_B$  – радіус вертикальної кривої, м.

Вершини  $v_l \in V^W$  (КП) та  $v_k \in V^Z$  (стики) використовуються лише для вказівки меж ділянок і додаткових параметрів не мають.

Кожній дузі орграфа  $e \in E$  поставлено у відповідність вектор параметрів

$$\mathbf{Y}_{пл} = \{l_e, w_{ck}, w_{ci}, w_3, N_n, P_1, P_2\},$$

де  $l_e$  – довжина ділянки колії, м;

$w_{ck}$  – питомий опір стрілок та кривих на ділянці колії;

$w_{ci}$  – питомий опір снігу та інею на ділянці колії;

$w_3$  – питомий опір гальмівних уповільнювачів на ділянці колії;

$N_n$  – номер колії відповідно до нумерації, яка прийнята на станції;

$P_1, P_2$  – ідентифікатори робіт, які повинні бути виконані, при занятті та звільненні колійної ділянки.

Останні три параметри є необов'язковими і наводяться при необхідності.

Додатково в ГМКР описуються гальмівні уповільнювачі. При цьому кожен із уповільнювачів представляється структурою:

$$\mathbf{R} = \{T_y, s_y, t_y, \mathbf{e}_y, \mathbf{p}_y\},$$

де  $T_y$  – тип гальмівного уповільнювача;

$s_y$  – стан уповільнювача ( $s_y = 0$  – розгальмований,  $s_y = 1$  – загальмовується,  $s_y = 2$  – загальмований,  $s_y = 3$  – розгальмовується);

$t_y$  – момент часу подачі команди на зміну стану уповільнювача;

$\mathbf{e}_y$  – список колійних ділянок, що відповідають уповільнювачу;

$\mathbf{p}_y$  – список додаткових параметрів уповільнювача, що залежить від його типу.

У процесі скочування в залежності від типу уповільнювача  $T_y$ , його стану  $s_y$  та кількості осей рухомого складу, що знаходяться у зоні гальмування, встановлюється гальмівний опір  $w_3$  для колійних ділянок  $\mathbf{e}_y$ , що входять до його складу. При цьому в перехідних станах ( $s_y = 1$  чи  $s_y = 3$ ) гальмівний опір також залежить від різниці між поточним моментом часу та моментом подачі команди на зміну стану  $t_y$ .

Для моделювання скочування відчепів інформацію про план колійного розвитку, що міститься в ГМКР, необхідно доповнити інформацією про поздовжній профіль. В основу представлення поздовжнього профілю покладена його апроксимація модифікованим кубічним сплайном, що запропонована в [3].

В загальному вигляді задача апроксимації поздовжнього профілю гірки формулюється наступним чином: задано значення відміток профілю гірки  $h(s_1), \dots, h(s_n)$  в точках  $s_1 < \dots < s_n$ . Необхідно побудувати інтерполяційну сплайн-функцію  $f$  ступеня  $m$  з точками з'єднання (вузлами)  $s_1, \dots, s_n$ , яка на відрізку  $[s_1, s_n]$  має неперервні похідні до  $(m - 1)$  включно і на кожному з інтервалів  $[s_i, s_{i+1}]$  представляється багаточленом ступеню  $m$ , тобто  $f = P_i(s)$ . Кожен багаточлен  $P_i$  повинен відповідати вимогам:

$$P_i(s_i) = h(s_i); P_i(s_{i+1}) = h(s_{i+1});$$

$$P'_i(s_i) = K_i; P'_i(s_{i+1}) = K_{i+1}; i = 1, \dots, n - 1,$$

де  $K_1, \dots, K_n$  – вільні параметри – кутові коефіцієнти дотичних.

Враховуючи, що при моделюванні скочування відчепів відмітки точок переломів  $h(s)$  не використовуються, інтерес представляють лише кутові коефіцієнти дотичних.

В моделі сортувальної гірки, запропонованій у [4], сплайн, що описує поздовжній профіль маршруту скочування, представляється списком

$$I_j = \{ S_j, K_{1,j}, K_{2,j}, K_{3,j} \}, j = 1, \dots, n_y + 1,$$

де  $S_j$  – абсиси вузлів сплайну від початку маршруту скочування.

Враховуючи значну кількість можливих варіантів маршрутів скочування відчепів та значну кількість їх спільних ділянок, таке представлення профілю призводить до дублювання інформації. Окрім того, при такому підході ухил колії в деякій точці визначається не лише параметрами колії, а й таким суб'єктивним параметром об'єкта рухомого складу як відстань від початку маршруту скочування, що створює проблеми при моделюванні інших маневрових пересувань з урахуванням поздовжнього профілю. Враховуючи те, що в процесі скочування можуть траплятися випадки нерозділення відчепів на стрілках, то виникає необхідність переходу від одного сплайну до іншого, що не забезпечує повною мірою неперервність похідних функції  $f$  по маршруту скочування.

Зазначені проблеми можуть бути усунені, якщо кутові коефіцієнти сплайнів, що опису-

ють поздовжній профіль, поставити у відповідність дугам графа  $G$ . Таке представлення поздовжнього профілю дає можливість визначити ухил колії лише за поточним розташуванням вагонів відчепа.

Для побудови поздовжнього профілю на попередньому етапі на підставі даних про відмітки  $z$  окремих вершин, а також даних про довжину колійних ділянок та ухил елементів профілю, на яких вони розташовані, виконується розрахунок відміток всіх інших вершин та параметри вертикальних кривих.

Відповідно до [3], коефіцієнти сплайну в межах прямолінійних ділянок поздовжнього профілю приймають значення  $K_{1,i} = i, K_{2,i} = 0, K_{3,i} = 0$ . Вертикальні криві апроксимуються квадратичними параболою. Коефіцієнти сплайну в межах вертикальних кривих визначаються на підставі списку точок  $P_j = \{x_j, y_j\}, j = 1, n$  за допомогою виразів:

$$K_{1,j} = \phi_{1,j},$$

$$K_{2,j} = 2(\phi_{1,j} - \phi_{2,j} + \phi_{3,j}) / \tau_{x,j},$$

$$K_{3,j} = \frac{\phi_{3,j}}{6\tau_{x,j}^2},$$

де  $\tau_{x,j} = x_{j+2} - x_j, \phi_{1,j} = (y_{j+1} - y_j) / (x_{j+1} - x_j), \phi_{2,j} = (y_{j+2} - y_j) / \tau_{x,j}, \phi_{3,j} = \phi_{1,j} + \phi_{1,j+1} - 2\phi_{2,j}$ .

Відповідно до запропонованої моделі колійного розвитку, в межах однієї ділянки колії може знаходитись максимум два елементи профілю: кругова крива на його початку та прямолінійна ділянка в кінці. Тому для представлення поздовжнього профілю в моделі дугам орграфа  $G$  у відповідність поставлено наступний вектор параметрів

$$Y_{np} = \{K_1, K_2, K_3, l_k\},$$

де  $l_k$  – довжина вертикальної кривої в межах колійної ділянки.

Необхідно відзначити, що відстань, яка вимірюється по маршруту скочування, не дорівнює її проекції, але через невеликі значення кутів повороту вертикальних кривих цією різницею можна знехтувати. Для забезпечення неперервності похідних в якості довжини кривої в моделі приймається довжина її проекції, а залишок (не перевищує 5 мм) відноситься на наступну за нею прямолінійну ділянку.

При подібній організації моделі величина ухилу в деякій точці на ділянці колії, що знаходиться на відстані  $l$  від її початку, визначається за формулою

$$i(l) = K_1 - K_2 \cdot l - \frac{K_3}{2} \cdot l^2 \quad \text{при } l < l_k;$$

$$i(l) = K_1 - K_2 \cdot l_k - \frac{K_3}{2} \cdot l_k^2 \quad \text{при } l \geq l_k.$$

Наведене представлення поздовжнього профілю дозволяє отримувати неперервні поверхні скочування по будь-якому із маршрутів, при цьому на спільних ділянках маршрутів профіль є ідентичним.

Модель заняття колійних ділянок рухомим складом (МЗК) дозволяє контролювати заняття кожної колійної ділянки рухомим складом і визначати ідентифікатори об'єктів (локомотивів, составів, відцепів), що знаходяться на даній ділянці колії, а також положення окремих осей рухомого складу на коліях.

До складу МЗК входить список об'єктів, модель розташування рухомого складу на коліях (МРСК) та модель розташування осей рухомого складу на коліях (МОК).

Об'єкти рухомого складу, що знаходяться на коліях, представляються структурами

$$O = \{N_{об}, A\},$$

де  $N_{об}$  – ідентифікатор об'єкта рухомого складу;

$A$  – вектор міжосьових відстаней, в якому також вказується положення крайніх осей відносно вагона.

Для представлення розташування рухомого складу на коліях використовується динамічний

список, кожен з елементів якого є структурою

$$Q = \{N_{кд}, N_{об}, l_{об}, d\},$$

де  $N_{кд}$  – номер зайнятої колійної ділянки;

$l_{об}$  – відстань від правого кінця об'єкта до кінця колійної ділянки (відповідно до прийнятої орієнтації графа), м;

$d$  – відстань, що займає об'єкт  $N_{об}$  на колійній ділянці  $N_{кд}$ , м.

Для представлення розташування осей рухомого складу на коліях використовується динамічний список, кожен з елементів якого є структурою

$$V = \{N_{кд}, N_{об}, N_{ос}, l_{ос}\},$$

де  $N_{ос}$  – порядковий номер осі рухомого складу;

$l_{ос}$  – відстань від даної осі до кінця колійної ділянки, м.

Наявність в МЗК МРСК та МОК дозволяє контролювати як фізичне зайняття колії, що необхідно при моделюванні процесу підходу одного вагону до іншого, так і зайняття рейкових кіл, що необхідно для моделювання функцій гіркової автоматики. Осьові моделі рухомого складу використовуються лише при моделюванні скочування відцепів, при моделюванні інших процесів МОК не ведеться, а зайнятість колійних ділянок визначається за МРСК.

Для прикладу на рис. 2, а наведено розташування двох відцепів на колійних ділянках; на рис. 2, б наведено представлення цієї ситуації в МЗК.

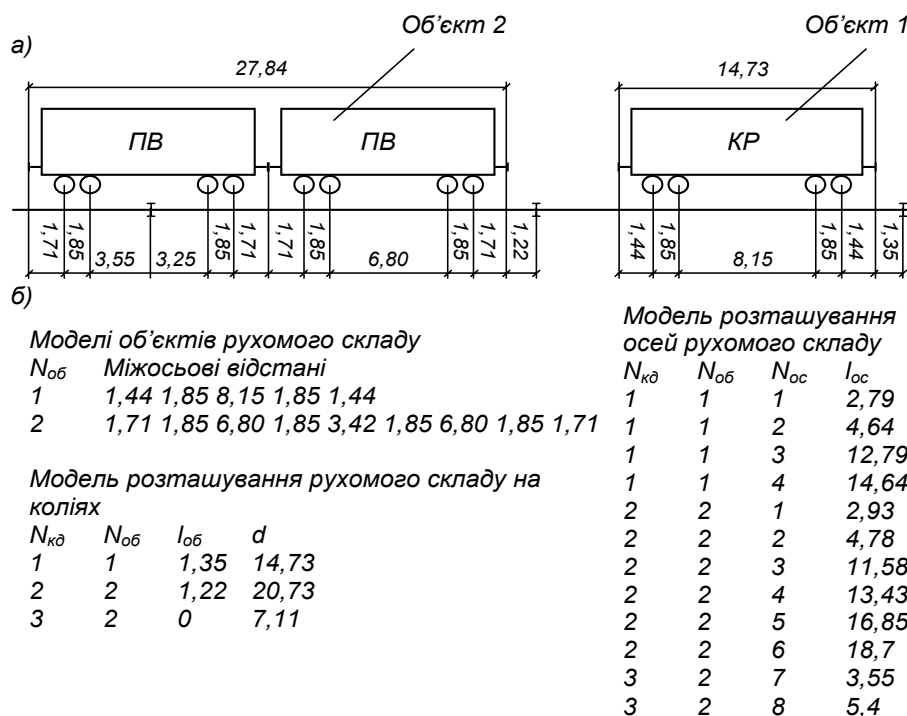


Рис. 2. Фрагмент моделі заняття колій: а – схема заняття колійних ділянок; б – модель заняття колій

Оновлення МЗК виконується при додаванні та видаленні об'єктів (готовність состава до розформування, прибирання состава з сортувального парка і т.ін.), а також в дискретні моменти системного часу за командами моделі пересувань об'єктів.

Модель колійного розвитку сортувальної гірки реалізована у вигляді компонента Builder C++, побудованого з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. При розробці імітаційної моделі гірки необхідно додати зазначений компонент до головного програмного модуля і, відповідно до викладеної методики, підготувати файл вихідних даних для побудови ГМКР гірки. Цей файл може бути створений за допомогою програми автоматизованого проектування станцій [5].

Розроблена методика побудови МКР є універсальною і може бути застосована для моделювання роботи будь-яких гірок.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза

ССР. ВСН 207-89 [Текст]. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.

2. Бобровський, В. І. Базова модель колійного розвитку в імітаційних моделях залізничних станціях [Текст] / В. І. Бобровський, Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора // Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України : зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2004. – Вип. 62. – С. 20-25.
3. Бобровский, В. И. Представление продольного профиля сортировочных горок в АСУ расформированием составов [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 1-2. – С. 19-25.
4. Бобровский, В. И. Эргатические модели сортировочных горок [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2001. – № 5. – С. 7-11.
5. Бобровский, В. И. Информационные технологии в проектировании железнодорожных станций и узлов [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Залізн. трансп. України. – 1999. – № 6 (15). – С. 6-10.

Надійшла до редколегії 24.07.2009.

Прийнята до друку 29.07.2009.