

УДК 656.212.5

Д-р техн. наук О.М. Огар

Doct. of techn. sciences O.M. Ogar

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ НАСУВНОЇ ЧАСТИНИ
СОРТУВАЛЬНИХ ГИРОК**

**MATHEMATICAL MODEL OF SORTING HUMPS SLIP-ON PART
LONGITUDINAL PROFILE RATIONAL PARAMETERS
DETERMINATION**

Постановка проблеми у загальному вигляді, її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Однією з головних проблем залізничного транспорту України є проблема ресурсозбереження. Ним щорічно споживається до 5 % електроенергії, що виробляється, і до 10 % дизельного палива. Суттєвий вплив на витрати паливно-

енергетичних ресурсів мають технологія роботи, система управління, стан і конструкція засобів транспорту. Поряд з цим перераховані фактори значною мірою визначають і ступінь використання перевізних і виробничих ресурсів (вагонів, технічних засобів, що забезпечують виконання технологічного процесу, тощо). Виходячи з цього дослідження процесу

функціонування і конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок слід спрямовувати на раціональне використання паливно-енергетичних, виробничих і перевізних ресурсів при дотриманні встановлених технічних і технологічних вимог.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням удосконалення конструкції поздовжнього профілю насувної частини приділено недостатньо уваги. Останні дослідження в основному спрямовані на створення імітаційних моделей насуву і розпуску составів з метою визначення витрат паливно-енергетичних ресурсів та оптимізації режимів роботи маневрових локомотивів [1-4]. У минулому сторіччі удосконаленням параметрів профілю насувної частини займалися такі вчені як, В.Є. Павлов, Л.Б. Тишков, В.Ф. Пригоровський, О.П. Шипулін та ін. [5-8]. Головним і загальним недоліком виконаних зазначеними вченими досліджень є відсутність ресурсозберігаючого підходу при оптимізації поздовжнього профілю.

Мета дослідження. Метою даних досліджень є забезпечення заощадження паливно-енергетичних ресурсів при

виконанні операцій гіркового технологічного процесу шляхом удосконалення наукового підходу до розрахунку раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини сортувальних гірок.

Основна частина. У рамках вирішення проблеми ресурсозбереження визначення раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини повинно здійснюватись за умови мінімізації витрат дизельного палива (електроенергії) на насув і розпуск составів. При цьому пропонується:

1) розглянути завдання раціоналізації конструкції профілю на прикладі використання у гірковому технологічному процесі маневрових тепловозів ЧМЕ-3;

2) для підвищення достовірності результатів моделювання використовувати осьову модель вагона та окремо враховувати додатковий питомий опір від середовища і вітру;

3) розглянути двохелементну конструкцію поздовжнього профілю.

При допущенні про постійність швидкості та напрямку вітру протягом насуву та розпуску состава його рух можна описати диференціальним рівнянням

$$\frac{dV}{dt} = g'(S) \cdot \left(f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) + I_{екв}(S, I_1^{нас}, I_2^{нас}) - \omega_0^{лок}(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) - \omega_0^{сост}(S) - \omega_{ск}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) - \omega_{св}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) \right) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де $g'(S)$ – прискорення вільного падіння з урахуванням моменту інерції мас, що обертаються, локомотива і вагонів состава, м/с²;

$f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))$ – миттєва питома сила тяги локомотива, Н/кН;

$V(I_1^{нас}, I_2^{нас})$ – миттєва швидкість состава, що насувається або розпускається з гірки, м/с;

$I_1^{нас}, I_2^{нас}$ – крутість відповідно першого і другого елементів поздовжнього профілю, ‰;

$I_{екв}(S, I_1^{нас}, I_2^{нас})$ – миттєва крутість еквівалентного уклону, ‰;

S – шлях, що пройдено локомотивом з вагонями з моменту початку насуву состава на гірку, м;

$\omega_0^{лок}(V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))$ – миттєвий основний питомий опір гіркового локомотива, Н/кН;

$\omega_0^{сост}(S)$ – основний питомий опір состава, Н/кН;

$\omega_{ск}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))$, $\omega_{св}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))$ – миттєвий додатковий питомий опір руху

локомотива і состава відповідно від стрілок і кривих, середовища і вітру, Н/кН.

У загальному випадку цільова функція має такий аналітичний вигляд:

$$G_n = \sum_{i=1}^r B_{z_i} \cdot \Delta t \rightarrow G_{n \min}, \quad (2)$$

де G_n – витрати дизельного палива, кг;

r – число проміжків часу (Δt) від початку насуву до закінчення розпуску;

B_z – витрати палива за одиницю часу, кг/с.

Цільову функцію (2) можна розкласти на таку суму добутоків:

$$G_n = B_{z_{XX}} \cdot t_{XX} + B_{z_{1\Pi}} \cdot t_{1\Pi} + \dots + B_{z_{8\Pi}} \cdot t_{8\Pi} = B_{z_{XX}} \cdot \left(\int_{t_0^{XX}}^{t_1^{XX}} dt + \int_{t_2^{XX}}^{t_3^{XX}} dt + \dots + \int_{t_{k-1}^{XX}}^{t_k^{XX}} dt \right) +$$

$$+ B_{z_{1\Pi}} \cdot \left(\int_{t_0^{1\Pi}}^{t_1^{1\Pi}} dt + \int_{t_2^{1\Pi}}^{t_3^{1\Pi}} dt + \dots + \int_{t_{m-1}^{1\Pi}}^{t_m^{1\Pi}} dt \right) + \dots + B_{z_{8\Pi}} \cdot \left(\int_{t_0^{8\Pi}}^{t_1^{8\Pi}} dt + \int_{t_2^{8\Pi}}^{t_3^{8\Pi}} dt + \dots + \int_{t_{p-1}^{8\Pi}}^{t_p^{8\Pi}} dt \right) \rightarrow G_{n \min},$$

де $B_{z_{XX}}, B_{z_{1\Pi}}, \dots, B_{z_{8\Pi}}$ – витрати палива за одиницю часу відповідно на холостому ході, 1-й, ..., 8-й позиціях контролера, кг/с;

$t_{XX}, t_{1\Pi}, \dots, t_{8\Pi}$ – тривалість роботи гiркового локомотива протягом насуву та розпуску состава відповідно на холостому ході, 1-й, ..., 8-й позиціях контролера, с;

$t_0^{XX}, t_2^{XX}, t_{k-1}^{XX}, t_0^{1\Pi}, t_2^{1\Pi}, t_{m-1}^{1\Pi}, \dots, t_0^{8\Pi}, t_2^{8\Pi}, t_{p-1}^{8\Pi}$;

$t_1^{XX}, t_3^{XX}, t_k^{XX}, t_1^{1\Pi}, t_3^{1\Pi}, t_m^{1\Pi}, \dots, t_1^{8\Pi}, t_3^{8\Pi}, t_p^{8\Pi}$ – моменти часу початку і кінця роботи гiркового локомотива відповідно на холостому ході, 1-й, ..., 8-й позиціях контролера, с.

Враховуючи те, що

$$\int_{t_0}^{t_1} dt = 10^3 \cdot \int_{V_0}^{V_1} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})}, \quad \int_{t_2}^{t_3} dt = 10^3 \cdot \int_{V_2}^{V_3} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})},$$

$$\int_{t_4}^{t_5} dt = 10^3 \cdot \int_{V_4}^{V_5} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})}, \dots, \quad (3)$$

де $Z(I_1^{нас}, I_2^{нас}) = g'(S) \cdot (f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))) + I_{екв}(S, I_1^{нас}, I_2^{нас}) - \omega_0^{лок}(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) - \omega_0^{cosm}(S) - \omega_{ск}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) - \omega_{св}(S, V(I_1^{нас}, I_2^{нас}))$, цільова функція набуває такого вигляду:

$$G_n = 10^3 \left(B_{\varepsilon_{XX}} \cdot \left(\int_{V_0^{XX}}^{V_1^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{XX}}^{V_3^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{k-1}^{XX}}^{V_k^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) + \right. \\ \left. + B_{\varepsilon_{1П}} \cdot \left(\int_{V_0^{1П}}^{V_1^{1П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{1П}}^{V_3^{1П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{m-1}^{1П}}^{V_m^{1П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) + \dots + \right. \\ \left. + B_{\varepsilon_{8П}} \cdot \left(\int_{V_0^{8П}}^{V_1^{8П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{8П}}^{V_3^{8П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{p-1}^{8П}}^{V_p^{8П}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) \right) \rightarrow G_{n \min},$$

де $V_0^{XX}, V_2^{XX}, V_{k-1}^{XX}, V_0^{1П}, V_2^{1П}, V_{m-1}^{1П}, \dots, V_0^{8П}, V_2^{8П}, V_{p-1}^{8П}; V_1^{XX}, V_3^{XX}, V_k^{XX},$

$V_1^{1П}, V_3^{1П}, V_m^{1П}, \dots, V_1^{8П}, V_3^{8П}, V_p^{8П}$ – швидкості состава у моменти часу початку і кінця роботи гіркового локомотива відповідно на холостому ході, 1-й, ..., 8-й позиціях контролера, м/с.

Задача визначення раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини розв'язується при таких обмеженнях-нерівностях:

$$\begin{cases} 0 \leq I_1^{нас} \leq 2; \quad 8 \leq I_2^{нас} \leq 16; \\ (I_1^{нас} \cdot l_1^{нас} + I_2^{нас} \cdot l_2^{нас}) \cdot 10^{-3} = h_{np}; \\ 0 < V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) \leq V_{нас}^{max} \quad \text{при } 0 \leq t \leq T_{кд}^{зан}; \\ V_p \leq V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) < V_{нас}^{max} \quad \text{при } T_{кд}^{зан} < t \leq T_{кд}^{зв}; \\ |V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_p| \leq \Delta V \quad \text{при } T_{кд}^{зв} < t \leq T_{зр}; \\ f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) \cdot (P + Q) \cdot 10^{-3} \leq F_{m \max}, \end{cases}$$

де $l_1^{нас}, l_2^{нас}$ – довжина відповідно першого і другого елементів поздовжнього профілю насувної частини, м;

h_{np} – задана профільна висота насувної частини, м;

$V_{нас}^{max}$ – максимальна швидкість насуву состава на гірку, м/с;

V_p – задана швидкість розпуску состава, м/с;

$T_{кд}^{зан}, T_{кд}^{зв}$ – моменти часу відповідно зайняття і звільнення першою віссю состава контрольної дільниці (зони зменшення швидкості насуву состава до заданої швидкості розпуску), м/с;

ΔV – задане найбільше відхилення миттєвої швидкості состава від заданої швидкості розпуску, м/с;

$T_{зр}$ – момент закінчення розпуску состава, с;

P, Q' – вага відповідно локомотива і состава, Н;

$F_{m \max}$ – максимальна сила тяги локомотива, Н.

При заданій профільній висоті насувної частини довжини першого і другого елементів поздовжнього профілю розраховуються за формулами

$$l_1^{\text{нас}} = \frac{1000 \cdot h_{\text{пр}} - I_2^{\text{нас}} \cdot l_{\text{нас}}}{I_1^{\text{нас}} - I_2^{\text{нас}}};$$

$$l_2^{\text{нас}} = l_{\text{нас}} - l_1^{\text{нас}},$$

де $l_{\text{нас}}$ – довжина насувної частини, м.

Слід зазначити, що для розв'язання рівнянь (3) слід зробити припущення про постійність на кроці інтегрування складових диференціального рівняння (1).

Для визначення миттєвої сили тяги локомотива використано характеристики тепловоза ЧМЕ-3. У моделі вказані характеристики апроксимовані методом найменших квадратів такими залежностями:

$$F_k(V) = 70,07 \cdot e^{-0,31V} \text{ при позиції контролера } n_k = 1;$$

$$F_k(V) = 145 - 22,2 \cdot V \text{ при } n_k = 2 \text{ и } V \leq 1,8;$$

$$F_k(V) = 118,06 \cdot e^{-0,14V} \text{ при } n_k = 2 \text{ и } V > 1,8;$$

$$F_k(V) = 230 - 24,4 \cdot V \text{ при } n_k = 3 \text{ и } V \leq 4,3;$$

$$F_k(V) = 214,55 \cdot e^{-0,13V} \text{ при } n_k = 3 \text{ и } V > 4,3;$$

$$F_k(V) = 277 - 20,5 \cdot V \text{ при } n_k = 4 \text{ и } V \leq 4;$$

$$F_k(V) = 269,16 \cdot e^{-0,11V} \text{ при } n_k = 4 \text{ и } V > 4;$$

$$F_k(V) = 375 - 31,7 \cdot V \text{ при } n_k = 5 \text{ и } V \leq 3;$$

$$F_k(V) = 399,2 \cdot e^{-0,13V} \text{ при } n_k = 5 \text{ и } V > 3;$$

$$F_k(V) = 411,76 - 17,39 \cdot V - 1,74 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 6 \text{ и } V \leq 4;$$

$$F_k(V) = 397,34 \cdot e^{-0,08V} \text{ при } n_k = 6 \text{ и } V > 4;$$

$$F_k(V) = 437,08 - 11,7 \cdot V - 1,92 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 7 \text{ и } V \leq 4,5;$$

$$F_k(V) = 441,73 \cdot e^{-0,07V} \text{ при } n_k = 7 \text{ и } V > 4,5;$$

$$F_k(V) = 450,72 - 8,49 \cdot V - 1,32 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 8 \text{ и } V \leq 6,3;$$

$$F_k(V) = 465,63 \cdot e^{-0,06V} \text{ при } n_k = 8 \text{ и } V > 6,3.$$

Задача визначення раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини є задачею нелінійного програмування з обмеженнями. Враховуючи складний аналітичний вигляд цільової функції, визначення її похідних

викликає певні труднощі. У зв'язку з цим пропонується для розв'язання вказаної задачі використати метод штрафних функцій. Вказана функція має такий аналітичний вигляд:

$$\Theta'(I_n) = 0,25 \cdot \left[\begin{aligned} & \left(I_1^{нас} - 2 + |I_1^{нас} - 2| \right)^2 + \left(8 - I_2^{нас} + |8 - I_2^{нас}| \right)^2 + \\ & + \left(I_2^{нас} - 16 + |I_2^{нас} - 16| \right)^2 + \\ & + \left(\left(I_1^{нас} \cdot I_1^{нас} + I_2^{нас} \cdot I_2^{нас} \right) \cdot 10^{-3} - h_{np} + \right. \\ & \left. + \left| \left(I_1^{нас} \cdot I_1^{нас} + I_2^{нас} \cdot I_2^{нас} \right) \cdot 10^{-3} - h_{np} \right| \right)^2 + \\ & + \left(h_{np} - \left(I_1^{нас} \cdot I_1^{нас} + I_2^{нас} \cdot I_2^{нас} \right) \cdot 10^{-3} + \right. \\ & \left. + \left| h_{np} - \left(I_1^{нас} \cdot I_1^{нас} + I_2^{нас} \cdot I_2^{нас} \right) \cdot 10^{-3} \right| \right)^2 + \\ & + \left(V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_{нас}^{max} + |V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_{нас}^{max}| \right)^2 \Big|_{0 \leq t \leq T_{ко}^{3аn}} + \\ & + \left(V_p - V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) + |V_p - V(I_1^{нас}, I_2^{нас})| \right)^2 \Big|_{T_{ко}^{3аn} < t \leq T_{ко}^{3б}} + \\ & + \left(V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_{нас}^{max} + |V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_{нас}^{max}| \right)^2 \Big|_{T_{ко}^{3аn} < t \leq T_{ко}^{3б}} + \\ & + \left(\left| V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_p \right| - \Delta V + \right. \\ & \left. + \left| V(I_1^{нас}, I_2^{нас}) - V_p \right| - \Delta V \right)^2 \Big|_{T_{ко}^{3б} < t \leq T_{3р}} + \\ & + \left(f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) \cdot (P + Q) \cdot 10^{-3} - F_{m \max} + \right. \\ & \left. + \left| f_m(V(I_1^{нас}, I_2^{нас})) \cdot (P + Q) \cdot 10^{-3} - F_{m \max} \right| \right)^2 \end{aligned} \right] \cdot$$

Зведемо задачу визначення раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини до задачі мінімізації спеціальної функції:

$$\begin{aligned} T'(I_n, t) &= G_n + t \cdot \Theta'(I_n) = \\ &= 10^3 \left(B_{\varepsilon_{XX}} \cdot \left(\int_{V_0^{XX}}^{V_1^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{XX}}^{V_3^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{k-1}^{XX}}^{V_k^{XX}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) + \right. \\ &+ B_{\varepsilon_{1\Pi}} \cdot \left(\int_{V_0^{1\Pi}}^{V_1^{1\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{1\Pi}}^{V_3^{1\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{m-1}^{1\Pi}}^{V_m^{1\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) + \dots + \\ &+ B_{\varepsilon_{8\Pi}} \cdot \left(\int_{V_0^{8\Pi}}^{V_1^{8\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \int_{V_2^{8\Pi}}^{V_3^{8\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} + \dots + \int_{V_{p-1}^{8\Pi}}^{V_p^{8\Pi}} \frac{dV}{Z(I_1^{нас}, I_2^{нас})} \right) \Bigg) + \\ &+ t \cdot \Theta'(I_n) \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Процедура пошуку раціональних параметрів поздовжнього профілю насувної частини за методом штрафних функцій аналогічна процедурі пошуку раціональних параметрів профілю спускної частини, що наведена у роботі [9]. Відмінність процедур полягає тільки у тому, що при оптимізації профілю насувної частини не передбачається статистичне моделювання процесів насуву та розпуску составів, виходячи з прийнятого допущення про детермінованість параметрів метеорологічних умов.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Використання запропонованого підходу щодо оптимізації конструкції поздовжнього профілю насувної частини за критерієм мінімуму витрат палива на насув і розпуск составів дозволить отримати такі конструктивні параметри, які забезпечать безпеку сортувального процесу та заощадження паливно-енергетичних ресурсів протягом життєвого циклу функціонування сортувальної гірки.

Список літератури

1. Данько, М.І. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій при організації вантажних залізничних перевезень [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01 / М.І. Данько. – Харків, 2005. – 357 с.
2. Топчієв, М.П. Удосконалення технології роботи технічних засобів сортувальних станцій на основі ресурсозбереження [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / М.П. Топчієв. – Харків, 2004. – 246 с.
3. Похилко, С.П. Забезпечення ресурсозбереження шляхом удосконалення технології роботи технічних засобів підсистеми розформування сортувальних станцій [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / С.П. Похилко. – Харків, 2005. – 273 с.
4. Бобровский, В.И. Совершенствование имитационной модели процесса надвига и роспуска составов на сортировочных горках [Текст] / В.И. Бобровский, Е.Б. Демченко // Транспортні системи та технології перевезень: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012. – Вип. 3. – С. 5 – 9.
5. Павлов, В.Е. Проектирование сортировочных горок [Текст] / В.Е. Павлов, М.М. Уздин, Ю.И. Ефименко. – Л.: ЛИИЖТ, 1987. – 97 с.
6. Основные требования к техническому оснащению сортировочных станций [Текст]: труды ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – Вып. 270. – 220 с.
7. Пригорювский, В.Ф. Выбор рациональных сортировочных устройств малой мощности на железнодорожных станциях [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1962. – 24 с.
8. Шипулин, А.П. Проектирование подвижной части сортировочных устройств с использованием ЭВМ для применения АЗСР [Текст] / А.П. Шипулин // Вопросы совершенствования проектирования и использования устройств железнодорожных и промышленных узлов: труды МИИТа. – М., 1976. – С. 88 – 89.
9. Огар, О.М. Розробка процедури розрахунку раціональних параметрів поздовжнього профілю спускної частини сортувальних гірок [Текст] / О.М. Огар, Л.А. Страна, Л.В. Бригіна // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 135. – С. 37–45.

Ключові слова: сортувальна гірка, поздовжній профіль, насувна частина, паливно-енергетичні ресурси, гірковий локомотив.

Анотації

Обґрунтовано критерій оптимізації поздовжнього профілю насувної частини сортувальної гірки. Наведено математичну модель визначення раціональних параметрів профілю за умови використання у гірковому технологічному процесі маневрових тепловозів.

Обоснован критерий оптимизации продольного профиля надвижной части сортировочной горки. Приведена математическая модель определения рациональных параметров профиля при условии использования в горочном технологическом процессе маневровых тепловозов.

The criterion of optimization of sorting hump slip-on part longitudinal profile is grounded. The mathematical model of profile rational parameters determination on condition of mobile diesel engines use in the hump technological process is resulted.