

Розглядаються математичні моделі управління безпекою розформування составів на гірках та визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами. Отримані моделі дають можливість раціонально управляти безпекою розформування составів за умовою мінімізації ризиків, що можуть мати місце на сортувальній гірці та визначати рекомендовані параметри керування вагонними уповільнювачами

Ключові слова: безпека розформування составів, ризик, рекомендовані параметри керування, сортувальна гірка

Рассматриваются математические модели управления безопасностью расформирования составов на горках и определения рекомендованных параметров управления вагонными замедлителями. Полученные модели дают возможность рационально управлять безопасностью расформирования составов при условии минимизации рисков, которые могут иметь место на сортировочной горке и определяют рекомендованные параметры управления вагонными замедлителями

Ключевые слова: безопасность расформирования составов, риск, рекомендованные параметры управления, сортировочная горка

УДК 656.212.5:656.25

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42400

УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ РОЗФОРМУВАННЯ СОСТАВІВ НА СОРТУВАЛЬНИХ ГІРКАХ

С. О. Бантюкова

Кандидат технічних наук,
старший викладачКафедра обчислювальної
техніки та систем управлінняУкраїнський державний
університет залізничного транспорту

пл. Фейєрбаха, 7,

м. Харків, Україна, 61050

E-mail: b-sv-a@mail.ru

1. Вступ

На даний момент сформувався декілька напрямків вирішення задачі ефективного управління безпекою розформування составів на гірках, основним з яких є застосування новітніх засобів обчислювальної техніки, що здатні вирішувати складні інформаційно-плануючі завдання в нових та існуючих комплексних системах автоматизованого управління розформуванням составів. Вказані засоби спроможні забезпечити більш високий рівень реакції на зміну ситуації, швидко її проаналізувати та обрати найбільш безпечний режим управління сортувальним процесом.

Як показує досвід експлуатації автоматизованих сортувальних гірок, що обладнані сучасними комплексними системами управління сортувальним процесом, використання мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки дозволяє звести до мінімуму вплив людини на хід вказаного процесу. Тим не менше цей вплив не виключається.

Отже, удосконалення існуючих або розробка нових методів управління безпекою розформування составів на сортувальній гірці є однією з головних науково-прикладних задач галузі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У зв'язку з тим, що на цей час відсутня загальна математична модель сортувального процесу, управління ризиками виникнення порушень безпеки проводиться за рахунок обліку та регулювання

окремих складових частин технологічного процесу сортувальних станцій. Так, в [1] управління безпекою пропонується здійснювати за рахунок розробки методів оцінки безпеки процесу регульованого скочування відцепів на сортувальних гірках, розробки методів оцінки якості інтервального та прицільного регулювання швидкості скочування відцепів, удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки конструкції та технічного стану сортувальних гірок. Управління безпекою можливо на основі запропонованих у [2] методів оцінки показників безпеки руху при скочуванні відцепів з гірки, що дозволяють аналізувати умови руху відцепів та попереджувати процеси викочування коліс вагонів на рейки і шини уповільнювачів під час регульованого скочування з урахуванням конструктивних особливостей та технічного стану рухомого складу, колії та уповільнювачів.

На основі теорії розрахунку основних параметрів сортувальної гірки, що дозволяє розрахувати висоту, поздовжній профіль спускної частини, гальмові засоби гірки та швидкість розпуску составів з урахуванням характеру вагонопотоку, що переробляється, і кліматичних умов, у яких працює сортувальна станція, існує можливість одержати оптимальні результати за критерієм економічної ефективності, оцінити ступінь близькості до оптимальних значень параметрів існуючих сортувальних гірок і тим самим оцінити безпеку функціонування гірок [3].

На безпеку сортувальної гірки суттєво впливає автоматизація сортувального процесу. При цьому автоматизацію сортувального процесу можна роз-

поділити на дві частини: яка забезпечує безпеку (безпосередньо зв'язана з процесом розформування составів) і яка не забезпечує безпеку (безпосередньо не зв'язана з процесом розформування составів) [4].

Питання безпеки сортувального процесу також зручно розглядати за допомогою використання математичних моделей. На основі застосування методу динамічного програмування у [5] запропоновані системи імітації сортувальної гірки. Стохастична модель для оцінки імовірності сходу рухомого составу на основі оцінки точки сходу та кількості вагонів, що зійшли з колії під час виконання звичайних операцій на сортувальній гірці розглядається у [6]. Але враховуючи складність сортувального процесу увага приділяється тільки діям та послідовності виконання оперативного плану для конкретної гірки.

Заслужують уваги методи управління безпекою розформування составів з точки зору організації сортувального процесу та впливу на нього відповідних факторів [7], стратегії мінімізації ризику сходу рухомого складу за рахунок розміщення вагонів з врахуванням імовірності сходу вагонів як на маршруті так і при виконанні операцій на сортувальній гірці [8] та системи моніторингу функціонування залізничної інфраструктури та контролю технічного персоналу [9].

Таким чином, недостатня оцінка та облік множини впливів на безпеку сортувального процесу, утримання та регулювання окремих складових частин технологічного процесу сортувальних станцій обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету підвищення безпеки функціонування сортувальних гірок на основі обліку випадкових факторів, що впливають на сортувальний процес.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розроблення математичної моделі управління безпекою розформування составів на гірках з урахуванням мінімізації ризиків, що можуть бути на сортувальній гірці;
- розроблення математичної моделі визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами для ефективного управління безпекою розформування составів на гірках.

4. Розробка математичних моделей

4. 1. Розробка математичної моделі управління безпекою розформування составів на гірках

Розформування составів на гірках є складним процесом і потребує жорсткого виконання умов безпеки функціонування сортувальних пристроїв. Наслідками невиконання вказаних умов є виникнення небезпечних ситуацій або зниження ефективності технологічного процесу.

Особливістю управління розформуванням составів на більшості сортувальних гірок країн СНД є

надмірна експлуатація «людського фактору». Навіть на автоматизованих сортувальних гірках пріоритетним є «ручне» управління, що пов'язано з недоліками пристроїв гіркової автоматики, які експлуатуються (збої систем, відмови датчиків тощо). При цьому сам оператор гальмової позиції не завжди достатньо повно може оцінити ситуацію за короткий проміжок часу та сформувані ефективні і безпечні параметри керування. Наведене вище накладає суттєвий відбиток на рівень безпеки сортувального процесу.

На даний момент сформувалося декілька напрямків вирішення задачі ефективного управління безпекою розформування составів на гірках, основним з яких є застосування новітніх мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки, що здатні вирішувати складні інформаційно-плануючі завдання в нових та існуючих комплексних системах автоматизованого управління розформуванням составів. Вказані засоби спроможні забезпечити більш високий рівень реакції на зміну ситуації, швидко її проаналізувати та обрати найбільш безпечний режим управління.

Як показує досвід експлуатації автоматизованих сортувальних гірок, що обладнані сучасними комплексними системами управління сортувальним процесом, використання мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки дозволяє звести до мінімуму вплив людини на хід вказаного процесу. Тим не менше цей вплив не виключається.

Отже, удосконалення існуючих або розробка нових методів управління безпекою розформування составів є однією з головних науково-прикладних задач галузі.

Раціональне управління безпекою розформування составів пропонується визначати за умовою мінімізації ризиків R , що можуть мати місце на даному технічному засобі. При цьому вказані ризики доцільно представити як суму двох складових – ризиків, пов'язаних з невірними діями оперативного персоналу $R_{оп}$, і можливих ризиків за інших причин $R_{пп}$.

Цільову функцію можна записати у наступному аналітичному виді

$$R = R_{оп} + R_{пп} = C_{лнс} \cdot \left(P_{оп} \left(U_{пп}^{оп} \left(N_{вкс}^{оп} \right), t_{пр}^{нс} \left(N_{вкс}^{оп} \right), U_{пп}^{оп} \left(N_{вкс}^{оп} \right) \right) + P_{пп} \left(N_{вкс}^{сс} \right) \right) \rightarrow R_{доп.} \quad (1)$$

де $C_{лнс}$ – середня вартість ліквідації наслідків виникнення небезпечної ситуації, грн; $P_{оп}$ – ймовірність виникнення небезпечної ситуації за причиною невірних дій оперативного персоналу; $U_{пп}^{оп}$ – рівень реалізації рекомендованих параметрів гальмування оперативним персоналом гірки; $t_{пр}^{нс}$ – швидкість прийняття оперативним персоналом правильних рішень в нестандартних ситуаціях, с; $U_{пп}^{оп}$ – рівень професійної підготовки оперативного персоналу; $N_{вкс}^{оп}$ – номер впливу керівництва станції на ефективність дій оперативного персоналу; $P_{пп}$ – ймовірність виникнення небезпечної ситуації за інших причин; $N_{вкс}^{сс}$ – номер впливу керівництва станції на ефективність дій суміжних служб (ПЧ, ШЧ, ВЧ,

ЕЧ); $R_{\text{доп}}$ – допустимі ризики, що можуть мати місце на сортувальній гірці, грн.

Середня вартість ліквідації наслідків виникнення небезпечної ситуації може бути визначена шляхом усереднення витрат, пов'язаних з усуненням вказаних наслідків. На мережі залізниць України $C_{\text{ЛНС}}$ в 2013 році в середньому склала 10 тис. грн.

Ймовірність виникнення небезпечної ситуації за причиною невірних дій оперативного персоналу визначається як відношення числа відчепів, регулювання швидкості скочування яких призвело до порушення безпеки технологічного процесу сортувальної гірки $n_{\text{відч.}}^{\text{оп}}$, до загального числа перероблених відчепів $n_{\text{відч.}}$ за проміжок часу $[0, T]$.

Рівень реалізації рекомендованих параметрів гальмування оперативним персоналом гірки є функцією середньостатистичної похибки реалізації вказаних параметрів.

Рекомендовані параметри гальмування визначаються системою підтримки прийняття рішень для оперативного персоналу гірки, що представляє собою програмне забезпечення, яке формує рекомендовані параметри гальмування перед розпуском кожного состава. Математичну модель визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами наведено далі.

Слід зазначити, що $U_{\text{РПГ}}^{\text{оп}}$ і $t_{\text{пр}}^{\text{НС}}$ залежать від багатьох факторів, серед яких найбільш вагомим є психофізичний стан оператора. На підставі аналізу вказаного стану за встановлений період часу керівництво станції може застосовувати певні заходи щодо підвищення ефективності його дій. Тому $U_{\text{РПГ}}^{\text{оп}}$ і $t_{\text{пр}}^{\text{НС}}$ можна представити залежними від $N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}}$.

Рівень професійної підготовки оперативного персоналу можна визначити шляхом тестування знань за відповідними робочими спеціальностями.

Ймовірність виникнення небезпечної ситуації за інших причин визначається як відношення числа відчепів, в процесі скочування яких виникла небезпечна ситуація не за вини оперативного персоналу $n_{\text{відч.}}^{\text{оп}}$ (відмови елементів колії, рухомого складу, вагонних уповільнювачів тощо), до загального числа перероблених відчепів за проміжок часу $[0, T]$.

Отже, цільову функцію (1) можна представити у наступному виді

$$R = R_{\text{оп}} + R_{\text{пп}} = \frac{C_{\text{ЛНС}}}{n_{\text{відч.}}} \cdot \left(n_{\text{відч.}}^{\text{оп}} \left(U_{\text{РПГ}}^{\text{оп}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right), t_{\text{пр}}^{\text{НС}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right), U_{\text{ПП}}^{\text{оп}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right) \right) + n_{\text{відч.}}^{\text{пп}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{СС}} \right) \right) \rightarrow R_{\text{доп}}$$

Задача визначення оптимального управління безпекою розформування составів вирішується при наступних обмеженнях-нерівностях

$$\begin{cases} 1 \leq N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \leq N_{\text{ВКС}}^{\text{оп max}}, \\ 1 \leq N_{\text{ВКС}}^{\text{СС}} \leq N_{\text{ВКС}}^{\text{СС max}}, \end{cases}$$

де $N_{\text{ВКС}}^{\text{оп max}}$, $N_{\text{ВКС}}^{\text{СС max}}$ – максимально можливі номери впливів керівництва станції на ефективність дій відповідно оперативного персоналу і суміжних служб.

Залежності $n_{\text{відч.}}^{\text{оп}}$ від

$$U_{\text{РПГ}}^{\text{оп}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right), t_{\text{пр}}^{\text{НС}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right), U_{\text{ПП}}^{\text{оп}} \left(N_{\text{ВКС}}^{\text{оп}} \right) \text{ і } n_{\text{відч.}}^{\text{оп}} \text{ від } N_{\text{ВКС}}^{\text{СС}}$$

для конкретної станції можуть бути отримані шляхом моніторингу процесу управління безпекою розформування составів або за допомогою метода експертних оцінок і представлені у вигляді розрахункових таблиць.

Допустимі ризики, що можуть мати місце у сортувальному процесі, можуть бути пронормовані для кожної станції окремо в залежності від обсягів переробки, структури вагонопотоку, технічного оснащення сортувальної гірки та інших факторів.

4. 2. Розробка математичної моделі визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами

Побудову математичної моделі визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами будемо виконувати за критерієм мінімуму суми кількостей нагонів кожного відчепу на спускній частині гірки, кількості випадків перевищення кожним відчепом допустимої швидкості входу на уповільнювачі гальмових позицій та кількості випадків перевищення кожним відчепом допустимої швидкості співударяння з відчепами, що знаходяться у сортувальному парку з урахуванням впливу метеорологічних умов.

Для цього необхідно ввести наступні множини і величини:

I – множина підсистем «зона регулювання – зона вільного скочування» («ЗР–ЗВС») по маршруту скочування відчепів;

i – номер підсистеми «ЗР–ЗВС» із множини I , $i \in I$;

J – множина відчепів состава, що надійшов у переробку;

j – номер відчепу із множини J , $j \in J$.

Крім того, зробимо припущення, що протягом гіркового інтервалу температура зовнішнього повітря не змінюється ($t^{\circ}(t) = \text{const}$), а процеси зміни у часі швидкості $V_b(t)$ і напрямку $\beta_b(t)$ вітру в зоні розташування метеорологічних датчиків є ергодичними, тобто закони розподілу випадкових величин у вказаних процесах є одними і тими ж як за перетинами для ансамблю реалізацій, так і за координатою розвитку. Тоді при наявності реальних залежностей швидкості і напрямку вітру від часу за певний його період (від моменту початку насуву состава на гірку до моменту початку його розпуску T) математичне очікування відповідних випадкових процесів визначається за наступними формулами:

$$m_{V_b}(t) = M(V_b(t)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_b(t) \cdot dt;$$

$$m_{\beta_b}(t) = M(\beta_b(t)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \beta_b(t) \cdot dt.$$

Цільову функцію можна представити у наступному виді:

$$\sum_{\substack{i \in I, \\ j \in J}} N_{H_{ij}} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}j}, t_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, t_{r.n \text{ уп.}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) +$$

$$+ \sum_{\substack{i \in I, \\ j \in J}} N_{\text{вх.}j} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}j}, t_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, t_{r.n \text{ уп.}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) +$$

$$+ \sum_{j \in J} N_{c_j} \left(Z_{r.\text{ПП}j}, t_{r.\text{ПП}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) \rightarrow \min,$$

де $N_{H_{ij}}$ – кількість нагонів j -го відцепу $(j+1)$ -м відцепом на i -й підсистемі «ЗР–ЗВС»; $Z_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}j}, t_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, t_{r.n \text{ уп.}j}$ – відповідно ступені і тривалості гальмування j -го відцепу на 1-му, ..., n -му уповільнювачі i -ої підсистеми «ЗР–ЗВС»; $\omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^*$ – випадкове значення основного питомого опору 1-го, ..., k -го вагону j -го відцепу, Н/кН. Згідно з [10] випадкові значення основного питомого опору підпорядковуються гама-розподілу з різними параметрами α і β ; $N_{\text{вх.}j}$ – кількість випадків перевищення j -м відцепом допустимої швидкості входу на уповільнювачі $(i+1)$ -ої підсистеми «ЗР–ЗВС»; N_{c_j} – кількість випадків перевищення j -м відцепом допустимої швидкості співударення з відцепами, що знаходяться у сортувальному парку (у третій підсистемі «ЗР–ЗВС»); $Z_{r.\text{ПП}j}, t_{r.\text{ПП}j}$ – відповідно ступені і тривалості гальмування j -го відцепу на парковій гальмовій позиції (ППГ).

Задача вирішується при наступних обмеженнях-рівностях і обмеженнях-нерівностях

$$\begin{cases} 0 \leq Z_{r.1 \text{ уп.}j} \leq Z_{r.}^{\max}, \dots, 0 \leq Z_{r.n \text{ уп.}j} \leq Z_{r.}^{\max}; \\ 0 \leq t_{r.1 \text{ уп.}j} \leq t_{r.}^{\max}, \dots, 0 \leq t_{r.n \text{ уп.}j} \leq t_{r.}^{\max}; \\ 0 \leq Z_{r.\text{ПП}j} \leq Z_{r.\text{ПП}}^{\max}, 0 \leq t_{r.\text{ПП}j} \leq t_{r.\text{ПП}}^{\max}; \\ F(\omega_o) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\omega_o} \exp(-\beta \cdot \omega_o) \cdot \omega_o^{\alpha-1} \cdot d\omega_o, \end{cases}$$

де $Z_{r.}^{\max}, t_{r.}^{\max}$ – відповідно максимально можливі ступені і тривалість гальмування відцепів у першій і другій підсистемах «ЗР–ЗВС»;

$Z_{r.\text{ПП}}^{\max}, t_{r.\text{ПП}}^{\max}$ – відповідно максимально можливі ступені і тривалість гальмування відцепів на ППГ.

ω_o^{\max} і $Z_{r.\text{ПП}}^{\max}$ визначаються за умовою виключення вижимання уповільнювачами колісних пар вагонів

$$q_b > \frac{4 \cdot k_{\text{пер}} \cdot S_{\text{п}} \cdot (p_{\text{гц}} - p_0)}{3000},$$

де q_b – навантаження колісної пари на рейки, кН; $k_{\text{пер}}$ – коефіцієнт передачі важільної системи; $S_{\text{п}}$ – площа поршня гальмового циліндру, см²; p_0 – частина загального тиску $p_{\text{гц}}$, що витрачається на підйом (переміщення) маси гальмової системи, Н/см².

Враховуючи те, що ступінь гальмування відцепів є дискретною величиною, а тривалість їх гальмування – безперервною, представимо задачу визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами як задачу стохастичного цілісного програмування з нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями-нерівностями. Для

цього необхідно інтервали часу $[0; t_{r.}^{\max}]$ і $[0; t_{r.\text{ПП}}^{\max}]$ розбити на n часових діапазонів гальмування. В цьому випадку параметром керування буде не тривалість гальмування, а номер його часового діапазону – дискретна величина. Виходячи з цього, цільова функція набуває наступного виду

$$\sum_{\substack{i \in I, \\ j \in J}} N_{H_{ij}} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}j}, T_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) +$$

$$+ \sum_{\substack{i \in I, \\ j \in J}} N_{\text{вх.}j} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}j}, T_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) +$$

$$+ \sum_{j \in J} N_{c_j} \left(Z_{r.\text{ПП}j}, T_{r.\text{ПП}j}, \omega_{o.1 \text{ вар.}j}^*, \dots, \omega_{o.k \text{ вар.}j}^* \right) \rightarrow \min,$$

де $T_{r.1 \text{ уп.}j}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}j}$ – номери часових діапазонів гальмування j -го відцепу на 1-му, ..., n -му уповільнювачі i -ої підсистеми «ЗР–ЗВС»; $T_{r.\text{ПП}j}$ – номери часових діапазонів гальмування j -го відцепу на ППГ, а система обмежень

$$\begin{cases} 0 \leq Z_{r.1 \text{ уп.}j} \leq Z_{r.}^{\max}, \dots, 0 \leq Z_{r.n \text{ уп.}j} \leq Z_{r.}^{\max}; \\ 1 \leq T_{r.1 \text{ уп.}j} \leq T_{r.}^{\max}, \dots, 1 \leq T_{r.n \text{ уп.}j} \leq T_{r.}^{\max}; \\ 0 \leq Z_{r.\text{ПП}j} \leq Z_{r.\text{ПП}}^{\max}, 1 \leq T_{r.\text{ПП}j} \leq T_{r.\text{ПП}}^{\max}; \\ F(\omega_o) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\omega_o} \exp(-\beta \cdot \omega_o) \cdot \omega_o^{\alpha-1} \cdot d\omega_o, \end{cases}$$

де $T_{r.}^{\max}$ – максимально можливий номер часового діапазону гальмування відцепів у першій і другій підсистемах «ЗР–ЗВС»; $T_{r.\text{ПП}}^{\max}$ – максимально можливий номер часового діапазону гальмування відцепів на ППГ.

Вихідними даними для визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами є число стрілочних переводів $n_{\text{стр}}$ і кривих дільниць колій $n_{\text{кр}}$, координати центрів переводів $(x_{\text{цп}}, y_{\text{цп}})$ і вершин кутів повороту $(x_{\text{вк}}, y_{\text{вк}})$, число вагонних уповільнювачів, що розташовані на спускній частині $n_{\text{сч}}$ і сортувальних коліях $n_{\text{ск}}$, координати вхідних стиків вагонних уповільнювачів $(x_{\text{вв}}, y_{\text{вв}})$, кути повороту на стрілочних переводах $\alpha_{\text{стр}}$ та кривих дільницях колій $\alpha_{\text{кр}}$, радіуси перевідних кривих стрілочних переводів $R_{\text{стр}}$ і кривих дільниць колій $R_{\text{кр}}$, радіуси вертикальних кривих $R_{\text{в}}$, координати точок перелому поздовжнього профілю $(x_{\text{п}}, y_{\text{п}})$, крутизна елементів поздовжнього профілю $I_{\text{п}}$, число відцепів $n_{\text{в}}$, координати перших осей $(x_{\text{в}}, y_{\text{в}})$ і миттєві швидкості $V_{\text{в}}$ відцепів, номери колій призначення відцепів $N_{\text{к}}$, число вагонів у кожному відцепі $m_{\text{в}}$, типи вагонів $T_{\text{в}}$, число осей у кожному вагоні $n_{\text{ос}}$, довжини $l_{\text{в}}$, міделі $S_{\text{в}}$, маси $Q_{\text{в}}$ і осьові моделі $O_{\text{в}}$ вагонів, випадкові значення основних питомих опорів руху вагонів $w_{o.}^*$, тиски в гальмових циліндрах уповільнювачів $p_{\text{гц}}$, довжини вільної частини колій сортувального парку $l_{\text{к}}$.

Перетворимо задачу стохастичного цілісного програмування з нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями-нерівностями в еквівалентну детерміновану задачу

$$\sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} N_{ij} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}ij}, T_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}ij}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) +$$

$$+ \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} N_{\text{вх.}ij} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}ij}, T_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}ij}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) +$$

$$+ \sum_{j \in J} N_{c_j} \left(Z_{r.\text{ПП}j}, T_{r.\text{ПП}j}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} 0 \leq Z_{r.1 \text{ уп.}ij} \leq Z_{r.1 \text{ уп.}ij}^{\max}, \dots, 0 \leq Z_{r.n \text{ уп.}ij} \leq Z_{r.n \text{ уп.}ij}^{\max}; \\ 1 \leq T_{r.1 \text{ уп.}ij} \leq T_{r.1 \text{ уп.}ij}^{\max}, \dots, 1 \leq T_{r.n \text{ уп.}ij} \leq T_{r.n \text{ уп.}ij}^{\max}; \\ 0 \leq Z_{r.\text{ПП}j} \leq Z_{r.\text{ПП}j}^{\max}, 1 \leq T_{r.\text{ПП}j} \leq T_{r.\text{ПП}j}^{\max}. \end{cases}$$

Дана задача відноситься до екстремальних комбінаторних задач, які є достатньо складними з точки зору їх вирішення. В експертних системах управління для вирішення вказаних задач, як правило, застосовують метод спрямованого перебору варіантів. Одним із ефективних алгоритмів рішення екстремальних комбінаторних задач є алгоритм д. т. н. Литвиненка О. Є. [11], який і пропонується використати для визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами.

Екстремальна комбінаторна задача згідно з [11] вирішується шляхом максимізації цільової функції $f(x)$ при дотриманні системи обмежень

$$f_i(x) = 0, i = 1, \dots, k,$$

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, l.$$

Канонічна форма задачі визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами, виходячи із загальної постановки комбінаторної задачі, набуває наступного виду

$$- \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} N_{ij} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}ij}, T_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}ij}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) -$$

$$- \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} N_{\text{вх.}ij} \left(Z_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, Z_{r.n \text{ уп.}ij}, T_{r.1 \text{ уп.}ij}, \dots, T_{r.n \text{ уп.}ij}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) -$$

$$- \sum_{j \in J} N_{c_j} \left(Z_{r.\text{ПП}j}, T_{r.\text{ПП}j}, M(\omega_{o.1 \text{ ваг.}j}^*), \dots, M(\omega_{o.k \text{ ваг.}j}^*) \right) \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} -Z_{r.1 \text{ уп.}ij} \leq 0, Z_{r.1 \text{ уп.}ij} - Z_{r.1 \text{ уп.}ij}^{\max} \leq 0, \dots, \\ -Z_{r.n \text{ уп.}ij} \leq 0, Z_{r.n \text{ уп.}ij} - Z_{r.n \text{ уп.}ij}^{\max} \leq 0; \\ -T_{r.1 \text{ уп.}ij} \leq 0, T_{r.1 \text{ уп.}ij} - T_{r.1 \text{ уп.}ij}^{\max} \leq 0, \dots, \\ -T_{r.n \text{ уп.}ij} \leq 0, T_{r.n \text{ уп.}ij} - T_{r.n \text{ уп.}ij}^{\max} \leq 0; \\ -Z_{r.\text{ПП}j} \leq 0, Z_{r.\text{ПП}j} - Z_{r.\text{ПП}j}^{\max} \leq 0; \\ -T_{r.\text{ПП}j} \leq 0, T_{r.\text{ПП}j} - T_{r.\text{ПП}j}^{\max} \leq 0. \end{cases}$$

Результати розрахунку ступені і тривалості гальмування десятих відцепів на уповільнювачах гальмової позиції за допомогою розробленого програмного

продукту для розрахунку конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами другої гальмової позиції

№ відцепу	Маса відцепу, т	Довжина відцепу, м	Типи вагонів у відцепі	Ступінь і тривалість гальмування відцепів на уповільнювачах другої гальмової позиції			
				Z ₁	t _{r1} , с	Z ₂	t _{r2} , с
1	87,3	13,92	ПВ	3	3,0–3,5	3	3,5–4,0
2	112,4	28,30	КР/ЦС	2	2,0–2,5	2	2,5–3,0
3	103,0	24,11	ХП/ХП	1	1,5–2,0	1	2,0–2,5
4	222,4	49,42	ПВ/ПВ/ПВ	0	0,0	0	0,0
5	23,5	14,73	КР	1	3,0–3,5	1	5,0–5,5
6	69,0	13,92	ПВ	3	1,5–2,0	3	2,0–2,5
7	88,4	20,24	ПВ	2	2,5–3,0	2	3,0–3,5
8	49,7	14,62	ПЛ	2	1,5–2,0	2	2,0–2,5
9	105,9	16,40	ПВ	0	0,0	0	0,0
10	25,0	13,57	ЦС	1	0,5–1,0	1	1,5–2,0

Примітка: ПВ – тівагон; КР – критий вагон; ЦС – цистерна; ХП – хопер; ПЛ – платформ

Результати розрахунку рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендовані параметри керування вагонними уповільнювачами гальмової позиції, розраховані з використанням різних способів

№ відцепу	Ступінь і тривалість гальмування відцепів на уповільнювачах другої гальмової позиції, розраховані прямим перебором варіантів / методом спрямованого перебору варіантів / методом гілок і границь			
	Z ₁	t _{r1} , с	Z ₂	t _{r2} , с
1	3/3/3	3,0 – 3,5/3,0 – 3,5/3,0 – 3,5	3/3/3	3,5 – 4,0/3,5 – 4,0/3,5 – 4,0
2	2/2/2	2,0 – 2,5/2,0 – 2,5/2,0 – 2,5	2/2/2	2,5 – 3,0/2,5 – 3,0/2,5 – 3,0
3	1/1/1	1,5 – 2,0/1,5 – 2,0/1,5 – 2,0	1/1/1	2,0 – 2,5/2,0 – 2,5/2,0 – 2,5
4	0/0/0	0,0/0,0/0,0	0/0/0	0,0/0,0/0,0
5	1/1/1	3,0 – 3,5/3,0 – 3,5/3,0 – 3,5	1/1/1	5,0 – 5,5/5,0 – 5,5/5,0 – 5,5
6	3/3/3	1,5 – 2,0/1,5 – 2,0/1,5 – 2,0	3/3/3	2,0 – 2,5/2,0 – 2,5/2,0 – 2,5
7	2/2/2	2,5 – 3,0/2,5 – 3,0/2,5 – 3,0	2/2/2	3,0 – 3,5/3,0 – 3,5/3,0 – 3,5
8	2/2/2	1,5 – 2,0/1,5 – 2,0/1,5 – 2,0	2/2/2	2,0 – 2,5/2,0 – 2,5/2,0 – 2,5
9	0/0/0	0,0/0,0/0,0	0/0/0	0,0/0,0/0,0
10	1/1/1	0,5 – 1,0/0,5 – 1,0/0,5 – 1,0	1/1/1	1,5 – 2,0/1,5 – 2,0/1,5 – 2,0

Розроблену математичну модель визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами перевірено на достовірність шляхом порівняння результатів розрахунку параметрів ке-

рування вагонними уповільнювачами за трьома методами – методом прямого перебору варіантів комбінацій гальмування, методом спрямованого перебору у дискретному фазовому просторі та методом гілок і границь із результатами, що отримано за допомогою запропонованої моделі.

5. Висновки

Розроблені математичні моделі дозволяють раціонально управляти безпекою розформування составів на сортувальних гірках. При цьому раціональне управління безпекою визначається за умовою мінімізації ризиків, що можуть бути на сортувальній гірці та

врахування впливу людського фактору на сортувальний процес шляхом обліку імовірності виникнення небезпечної ситуації за причиною невірних дій оперативного персоналу.

Розроблена математична модель визначення рекомендованих параметрів керування вагонними уповільнювачами враховує критерій мінімуму суми кількостей нагонів кожного відчепа на спускній частині гірки, кількостей перевищення кожним відчепом допустимої швидкості входу на уповільнювачі гальмових позицій та кількостей перевищення кожним відчепом допустимої швидкості співударяння з відчепами, які перебувають у сортувальному парку, що дає можливість підвищити безпеку та ефективність технологічного процесу сортувальної гірки.

Література

1. Мямлин, С. В. Динамика вагонов в отцепе при скатывании с сортировочной горки [Текст] / С. В. Мямлин, Д. Н. Козаченко // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2009. – Вип. 17. – С. 150–155.
2. Козаченко, Д. М. Розвиток теоретичних основ оцінки техніко-експлуатаційної ефективності та безпеки функціонування сортувальних гірок [Текст]: дис. ... д-р. техн. наук / Д. М. Козаченко. – Дніпропетровськ, 2011. – 297 с.
3. Бессоненко, С. А. Теория расчета сортировочных горок для различных климатических зон [Текст]: автореф. дис. ... д-р техн. наук / С. А. Бессоненко. – М., 2010. – 37 с.
4. Zářecký, S. The newest trends in marshalling yards automation [Text] / S. Zářecký, J. Grůň, J. Žilka // Transport problems. – 2008. – Vol. 3, Issue 4. – P. 1. Available at: http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2008/zeszyt4/2008t3z4_13.pdf
5. Dick, C. T. Advancing the science of yard design and operations with the CSX hump yard simulation system [Text] / C. T. Dick, J. R. Dimberger // Proceedings of the 2014 Joint Rail Conference. – Colorado Springs, CO, USA, 2014. – P. 1–10. Available at: <http://railtec.illinois.edu/articles/Files/Conference%20Proceedings/2014/JRC2014-3841.pdf>
6. Bagheri, M. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist [Text] / M. Bagheri, F. Saccomanno, S. Chenouri, L. Fu // Accident Analysis & Prevention. – 2011. – Vol. 43, Issue 3. – P. 613–620. doi: 10.1016/j.aap.2010.09.008
7. Zhao, X. H. Research on safety evaluation of railway marshalling station [Electronic resource] / X. H. Zhao. – Globe Thesis, 2015. – Available at: <http://www.globethesis.com/?t=2232330371995530>
8. Bagheri, M. Modeling hazardous materials risks for different train make-up plans [Text] / M. Bagheri, F. Saccomanno, L. Fu // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2012. – Vol. 48, Issue 5. – P. 907–918. doi: 10.1016/j.tre.2012.02.004
9. Annual report on railway safety in the Slovak republic. Railway regulatory authority [Electronic resource] / 2013. – Available at: http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.era.europa.eu%2FDocument-Register%2FDocuments%2FNSA%2520Annual%2520Report%25202012%2520Slovakia.pdf&ei=_t1EVf3KEcG6UJahgsAF&usg=AFQjCNEp328J0vp1JbtTUKKWK0vUj3uJ3Q&bvm=bv.92291466,d.bGg&cad=rjt
10. Жуковицкий, И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 1. Модель системы [Текст] / И. В. Жуковицкий, Г.И. Загарий, Н. И. Луханин // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. – № 5. – С. 10–15.
11. Литвиненко, А. Е. Метод направленного перебора в системах управления и диагностирования [Текст]: монография / А. Е. Литвиненко. – К., 2007. – 328 с.