

ОГАР О. М., д.т.н., професор кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

КУЦЕНКО М. Ю., к.т.н., доцент кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

ГУРІН Д. О., к.т.н., асистент кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

КОНДРАТЬЄВ І. В., аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту,

ЛЕВЧЕНКО А. О., аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів,
Український державний університет залізничного транспорту



Розроблення методу розрахунку швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням

Анотація. Доведено складність завдання прицільного регулювання швидкості скочування відчепів. Розроблено метод розрахунку швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням. Метод базований на процедурі визначення приблизних значень основного питомого опору руху відчепа і питомого опору його руху від повітряного середовища і вітру та оптимізації швидкості виходу відчепа з паркових уповільнювачів. Для використання запропонованого методу на практиці розроблено архітектуру автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами.

Ключові слова: прицільне гальмування, регулювання швидкості, відчеп, сортувальний пристрій, гальмова позиція, вагонний уповільнювач, опір руху.

Постановка проблеми

Прицільне регулювання швидкості скочування відчепів у сортувальному парку є одним із найважливіших і водночас найскладніших етапів процесу сортування вагонів. Суть проблеми полягає в необхідності забезпечення такого режиму руху кожного окремого відчепа, щоб він досяг точки прицілювання з допустимою швидкістю співударяння вагонів і не створив «вікно» на підгірковій колії.

На вирішення цієї проблеми впливає багато факторів. Основними з них є різноманітність характеристик вагонів, зміна зовнішніх умов, неоднорідність профілю колій, труднощі в налаштуванні гальмівних засобів, необхідність швидкого ухвалення рішень операторами гальмових позицій та інші.

Якщо ширше аналізувати вплив зазначених факторів, то слід зазначити таке.

Відчепи мають різну вагу, довжину, технічний стан та основний питомий опір. Це безпосередньо впливає на прискорення та уповільнення їх під час скочування. Одні й ті самі гальмівні зусилля можуть бути недостатніми або надмірними для різних вагонів.

Такі погодні умови, як дощ, сніг, ожеледь, призводять до зниження коефіцієнта тертя між колесами вагонів і рейками, у результаті чого змінюється динаміка руху, що ускладнює точне регулювання швидкості відчепів на парковій гальмовій позиції (ПГП).

Незначні ухили або підйоми на сортувальних коліях також можуть призводити до істотних змін у швидкості руху відчепів. Особливо важко прицільно відрегулювати швидкість на коліях зі складним профілем.

Ефективність гальмових засобів ПГП може варіюватися залежно від їхнього технічного стану, затримок у спрацьовуванні, неправильного вибору сили гальмування.

Часто у процесі сортування вагонів операторам необхідно в режимі реального часу реагувати на зміну ситуації, для чого потрібні висока кваліфікація та швидка корекція параметрів скочування.

Відомими наслідками неякісного регулювання швидкості є пошкодження вантажу і вагонів та аварійні ситуації в разі зіткнення вагонів із сильним ударом, потреба в додатковому втручанні у випадку зупинки відчепів на сортувальній колії, порушення ритму роботи сортувального парку.

Зазначена проблема має місце і за застосування сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останніх опублікованих дослідженнях активно розглядають проблематику прицільного регулювання швидкості скочування відчепів на сортувальних гірках. Так, у статті [2] розроблено ймовірнісний підхід для визначення допустимих режимів гальмування відчепів в умовах невизначеності їхніх ходових характеристик. Запропоновано два критерії оцінювання режимів гальмування:

- середня величина «вікна» на сортувальній колії за встановлених норм імовірності перевищення допустимих швидкостей зіткнення вагонів і зупинки їх в уповільнювачах;

- ризик нерозділення відчепів на стрілочних переводах.

У результаті досліджень встановлено конфігурацію області допустимих швидкостей виходу відчепів із гальмових позицій, що забезпечує безпечне розділення відчепів на стрілочних переводах та уповільнювачах. Розроблена методика дає змогу спростити вибір режимів гальмування відчепів у системах автоматичного керування швидкістю їхнього скочування.

У статті [3] розглянуто вплив зниження сили притискання вагонних уповільнювачів на безпеку сортувального процесу. Автори запропонували комплекс залежностей, що визначають вимоги щодо

потужності гальмівних пристроїв і можуть встановлювати відповідні обмеження для режимів розформування составів поїздів, убезпечуючи маневрові операції.

Інше дослідження [4] присвячено вирішенню актуального завдання оптимізації швидкості виходу вагонів із вагонних уповільнювачів на сортувальних гірках з урахуванням таких випадкових факторів, як опір коченню вагонів, швидкість і напрямок вітру, похибки в роботі гальмівних пристроїв. У роботі визначено діапазон допустимих початкових швидкостей виходу вагонів із гальмівних позицій, який убезпечує розділення відчепів на стрілочних переводах, і запропоновано методику, що дає змогу спростити вибір режимів гальмування в автоматизованих системах керування сортувальними гірками.

У роботі [5] також проаналізовано вплив випадкових факторів, таких як питомий опір руху, погодні умови та похибки в роботі гальмівних пристроїв, на точність прогнозування швидкості і тривалості скочування відчепів. Використовуючи методи імітаційного моделювання і статистичного аналізу, автори встановили, що основними факторами, що впливають на середньоквадратичне відхилення тривалості скочування, є довжина дільниці вільного скочування та задана швидкість виходу відчепа з гальмових позицій.

У статті [6] формалізовано та вирішено завдання пошуку оптимальних режимів гальмування всіх відчепів состава, які забезпечують надійні умови розділення суміжних відчепів на стрілочних переводах і гальмових позиціях спускної частини гірки, шляхом застосування ітераційної процедури оптимізації зазначених режимів. Запропонований метод може бути використаний для дослідження процесу розформування составів поїздів, а також у системах автоматизації технологічних операцій на сортувальних гірках.

Дослідження, що опубліковано у статті [7], присвячено застосуванню нечітких нейронних мереж для прогнозування швидкості виходу відчепів на сортувальних гірках із метою забезпечення безпечного та ефективного сортування вагонів, ураховуючи складні та змінні умови експлуатації. Запропонований підхід дає змогу моделі адаптуватися до невизначеності та варіабельності вхідних даних, таких як маса та довжина відчепів, опір коченню, погодні умови і технічний стан гальмівних пристроїв. Модель навчали на основі реальних даних, зібраних із сортувальних станцій, щоб урахувати широкий спектр експлуатаційних ситуацій. Дослідження демонструє ефективність використання нечітких нейронних мереж для вирішення складних завдань управління на залізничному транспорті. За допомогою цього підходу

можна підвищити безпеку та ефективність сортувального процесу, зменшити ризик зіткнень і оптимізувати використання гальмівних пристроїв.

Отже, сучасні дослідження в галузі прицільного регулювання швидкості скочування відцепів зосереджені на оптимізації алгоритмів управління для забезпечення безпеки та ефективності сортувального процесу, урахуванні випадкових факторів, що впливають на точність прогнозування руху відцепів, підвищенні ефективності функціонування гальмівних пристроїв і розробленні методів контролю в умовах їхньої зниженої потужності. Ці дослідження сприяють вдосконаленню систем автоматичного керування сортувальним процесом, підвищуючи їхню надійність і ефективність.

Разом із тим слід зазначити, що основною перешкодою на шляху досягнення високої ефективності прицільного регулювання швидкості скочування відцепів є відсутність процедур розрахунку приблизних значень питомих опорів руху відчепа, що мають стохастичну природу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

На сьогодні невирішеним питанням є забезпечення достатньої точності розрахунку швидкості виходу відцепів із ППП за наявності множини випадкових факторів. Слід зазначити, що точне значення основного питомого опору руху відчепа невідомо. Цей опір розглядають як випадкову величину, що підпорядкована гамма-розподілу [8]. Також невідомо точне значення питомого опору руху відцепів від повітряного середовища і вітру. Цей опір залежить від швидкості і напрямку вітру, які можуть суттєво змінюватися протягом коротких проміжків часу, і спрогнозувати його величину після виходу відчепа з ППП до моменту зупинки на сортувальній колії або зіткнення з вагонами дуже складно. Крім того, величина зазначеного опору залежить від середньої швидкості відчепа на ділянці скочування, а щоб визначити середню швидкість, необхідно знати початкову швидкість – швидкість виходу відчепа з ППП, яку потрібно визначити спочатку.

Отже, для підвищення точності розрахунку швидкості виходу відчепа з ППП необхідно розробити процедуру розрахунку приблизних значень питомих опорів руху відчепа, що мають випадковий характер.

Формулювання мети

Метою дослідження є підвищення ефективності регулювання швидкості скочування відцепів на ППП сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням. Для цього

необхідно розробити метод розрахунку швидкості виходу відцепів із ППП на основі визначення приблизних значень основного питомого опору їхнього руху і питомого опору їхнього руху від повітряного середовища і вітру та оптимізації вказаних швидкостей. Це дасть змогу забезпечити допустиму швидкість співударяння вагонів і мінімізувати довжину «вікон» на коліях сортувального парку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розрахункову швидкість виходу відчепа з ППП розраховують за формулою

$$V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}} = \sqrt{V_{\text{снів.}}^2 + 2 \cdot g' \cdot (i_{\text{СП}} - \omega) \cdot l_{\text{проб.}} \cdot 10^{-3}}, \quad (1)$$

де $V_{\text{снів.}}$ – допустима швидкість співударяння відцепів, м/с;

g' – приведенне прискорення вільного падіння з урахуванням інерції маси елементів відчепа, що обертаються, м/с²;

$i_{\text{СП}}$ – ухил поздовжнього профілю колій сортувального парку, ‰;

ω – питомий опір руху відчепа, Н/кН;

$l_{\text{проб.}}$ – відстань, яку необхідно подолати відчепу з моменту виходу з ППП до точки прицілювання (ТП), м,

$$l_{\text{проб.}} = l_{\text{ППП-ТП}} - l_{\text{відч.}}, \quad (2)$$

де $l_{\text{ППП-ТП}}$ – відстань від кінця ППП до ТП, м;

$l_{\text{відч.}}$ – довжина відчепа за осями автозчеплень, м.

З виходом відцепів із ППП на швидкість їх скочування впливають чотири види питомого опору: основний питомий опір руху (ω_0), питомий опір руху від повітряного середовища і вітру ($\omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}$), питомий опір руху від криволінійної ділянки колії (за наявності її на коліях сортувального парку) ($\omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}$) і

питомий опір руху відчепів від снігу та інею ($\omega_{сн.}^{СП}$).
Отже,

$$\omega = \omega_0 + \omega_{CB}^{СП} + \omega_{кр.}^{СП} + \omega_{сн.}^{СП}. \quad (3)$$

Підвищити точність розрахунку швидкості виходу відчепів із ПГП можна впровадженням на

сортувальному пристрої з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами (АСКПУ), структуру якої наведено на рис. 1.

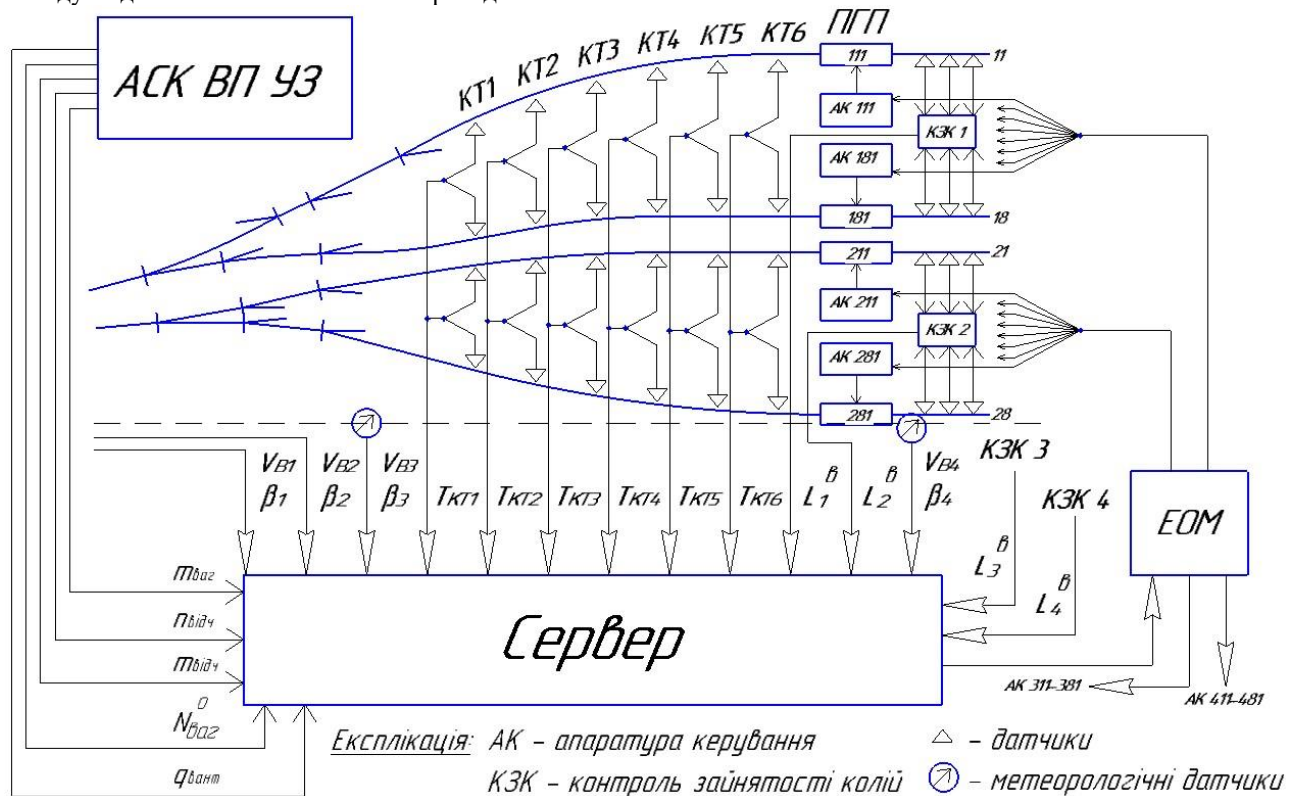


Рис. 1. Архітектура автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами

Протягом часу руху першої осі відчепа, обмеженого моментами проходження нею контрольних точок (КТ) 1 і 6, АСКПУ фіксує та зберігає в сервері поточні значення швидкості і напрямку вітру в місці розташування кожного метеорологічного датчика та моменти проходження цієї віссю КТ1 ($T_{КТ1}$), КТ2 ($T_{КТ2}$), КТ3 ($T_{КТ3}$), КТ4 ($T_{КТ4}$), КТ5 ($T_{КТ5}$) і КТ6 ($T_{КТ6}$). На основі інформації про моменти проходження першою віссю відчепа контрольних точок і з урахуванням відстані між цими точками розраховують середні швидкості відчепа на ділянках КТ1-КТ2, КТ2-КТ3, КТ3-КТ4, КТ4-КТ5 і КТ5-КТ6 і будують залежність швидкості відчепа від часу $V = V(t)$, де $t \in [T_{КТ1}; T_{КТ6}]$. Також у вказаний проміжок часу будують залежності

від часу швидкості і напрямку вітру, що мають місце в зоні розташування кожного метеорологічного датчика. Зазначені залежності і дані про відчеп (тип, маса і довжина вагонів, кількість осей у кожному вагоні) використовують для розрахунку питомих опорів його руху від криволінійних ділянок і стрілочних переводів ($\omega_{СК}^{КТ1-КТ6}$), Н/кН, повітряного середовища і вітру ($\omega_{CB}^{КТ1-КТ6}$), Н/кН, протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$. Кількість стрілочних переводів і суму кутів повороту, які проходить відчеп у зазначений проміжок часу, і середню крутизну підйому, по якому рухається центр ваги відчепа протягом цього проміжку часу ($i_C^{КТ1-КТ6}$), ‰, визначають на основі вісної моделі вагона.

Зазначених даних достатньо для того, щоб розрахувати приблизне значення основного питомого опору руху відчепа ($\omega_0^П$). У разі розташування ділянки, обмеженої КТ1 і КТ6, на підйомі

$$\omega_0^П = \frac{(V_{КТ1}^2 - V_{КТ6}^2) \cdot 10^3}{2 \cdot g' \cdot l_{КТ1-КТ6}} - i_C^{КТ1-КТ6} - \omega_{СК}^{КТ1-КТ6} - \omega_{СВ}^{КТ1-КТ6} - \omega_{сн.}^{КТ1-КТ6}, \quad (4)$$

де $V_{КТ1}$, $V_{КТ6}$ – швидкість відчепа в момент проходження його першою віссю відповідно КТ1 і КТ6, м/с;

$l_{КТ1-КТ6}$ – довжина ділянки колії, обмеженої КТ1 і КТ6, м;

$\omega_{сн.}^{КТ1-КТ6}$ – питомий опір руху відчепа від снігу та інею, Н/кН, протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, $\omega_{СН}^{КТ1-КТ6}$ розраховують за галузевими будівельними нормами [8];

$i_C^{КТ1-КТ6}$, $\omega_{СК}^{КТ1-КТ6}$ і $\omega_{СВ}^{КТ1-КТ6}$ – визначають шляхом моделювання руху відчепа одразу після проходження його першої осі КТ6.

Миттєве значення крутизни підйому, яким рухається центр ваги відчепа, ‰, коли його перша вісь знаходиться в точці S [9] ($S \in [S_{КТ1}; S_{КТ6}]$,

де $S_{КТ1}$, $S_{КТ6}$ – координата відповідно КТ1 і КТ6, м),

$$i(S) = \frac{1}{Q_{відч.}} \sum_{j=1}^{m_{відч.}} \frac{Q_{ваг. j}}{n_{ос. j}^{ваг.}} \sum_{r=1}^{n_{ос. j}^{ваг.}} i(S_{rj}), \quad (5)$$

де $Q_{відч.}$, $m_{відч.}$ – відповідно маса відчепа, т, і кількість вагонів у відчепі;

$Q_{ваг. j}$ – маса j -го вагона відчепа, т;

$n_{ос. j}^{ваг.}$ – кількість осей в j -му вагоні відчепа;

S_{rj} – координата точки, у якій знаходиться вісь r j -го вагона, м;

$i(S_{rj})$ – крутизна елемента профілю, на якому знаходиться вісь r j -го вагона, ‰.

Випадкове миттєве значення питомого опору руху відчепа від стрілок і кривих у разі вісної його моделі [9]

$$\omega_{СК}^* = - \frac{0,125 \cdot V^2}{n_{ос.}^{відч.}} \cdot \sum_{y=1}^{n_{ос.}^{відч.}} \frac{(0,56 \cdot \Theta_{by} + 0,23 \cdot \varphi_{by}) \cdot \ln \left(\prod_{x=1}^8 R_{bx} \right)}{l_{СКby}}, \quad (6)$$

де V – миттєва швидкість відчепа, м/с (визначають на основі залежності $V = V(t)$, яку формує АСКПУ);

$n_{ос.}^{відч.}$ – кількість осей у відчепі;

Θ_{by} , $l_{СКby}$ – відповідно тип і довжина, м, елемента b , по якому проходить вісь відчепа у ($\Theta_{by} = 0$, якщо вісь відчепа у знаходиться у кривій або на прямій ділянці; $\Theta_{by} = 1$, якщо у вісь відчепа знаходиться на стрілочному переводі);

φ_{by} – кут повороту кривої елемента b , по якому проходить вісь відчепа у, °;

R_{bx} – випадкові числа, що рівномірно розподілені в інтервалі [0;1], для елемента b .

Миттєве значення питомого опору руху відчепа від середовища і вітру, Н/кН, визначають за формулою [8]

$$\pm \omega_{CB} = \frac{17,8 \cdot \left(C_{x_1} \cdot S_1 \cdot V_{P_1}^2 + \sum_{j=2}^{m_{відч.}} C_{xx_j} \cdot S_j \cdot V_{P_j}^2 \right)}{(273 + t_n) \cdot \sum_{j=1}^{m_{відч.}} Q_{ваг. j}}, \quad (7)$$

де C_{x_1} , C_{xx_j} , S_1 , S_j – значення коефіцієнта миттєвого повітряного опору і площа поперечного перерізу, м², першого і j -го вагона відчепа, де $j \in 2, n$;

t_n – температура зовнішнього повітря, °C;

V_{P_1} , V_{P_j} – результуюча миттєва швидкість вітру відносно першого і j -го вагона відчепа, м/с,

$$V_{P_j} = \sqrt{V^2 + V_{B_j}^2 + 2 \cdot V \cdot V_{B_j} \cdot \cos \beta_{ваг. j}}, \quad (8)$$

де V_{B_j} – миттєва швидкість вітру в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, м/с;

$\beta_{ваг. j}$ – миттєвий кут між векторами напрямків руху j -го вагона відчепа і вітру, °,

$$\beta_{ваг. j} = |\beta_j - \gamma_j|, \quad (9)$$

де β_j – миттєвий напрямок вітру відносно базису гіркової горловини в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, °. β_j можна фіксувати двома варіантами: від 0° до $\pm 180^\circ$ або від 0° до 360°;

γ_j – кут між дотичною до осі колії і базисом гіркової горловини в точці місцезнаходження j -го вагона відчепа, °. Цей кут може мати знаки «+» або «-» залежно від величини кутового коефіцієнта дотичної [10]. Якщо $\beta_{ваг. j} \geq 180^\circ$, то слід використовувати формулу

$$\beta_{ваг. j} = |360 - |\beta_j - \gamma_j||. \quad (10)$$

V_{B_j} і β_j пропонують розраховувати на основі значень дійсної (a) і уявної (b) частин комплексного числа $w \leftrightarrow (a, b)$ [10]:

$$w = - \frac{\begin{vmatrix} 1 & z_0 & z_0^2 & \dots & z_0^n & w_0 \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^n & w_1 \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^n & w_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_n & z_n^2 & \dots & z_n^n & w_n \\ 1 & z & z^2 & \dots & z^n & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & z_0 & z_0^2 & \dots & z_0^n \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_n & z_n^2 & \dots & z_n^n \end{vmatrix}}, \quad (11)$$

де $z_0, z_1, z_2, \dots, z_n$ – комплексні числа. Дійсна і уявна частини цих чисел є відповідно абсцисами і ординатами розміщення n метеорологічних датчиків на полігоні [10];

$w_0, w_1, w_2, \dots, w_n$ – комплексні числа. Дійсна і уявна частини цих чисел є абсолютними величинами проекції вектора миттєвої швидкості вітру відповідно на вісь X і Y в зоні розміщення 0-го, 1-го, 2-го, ..., n -го метеорологічних датчиків [10];

z – комплексне число. Дійсна і уявна частини цього числа є абсолютними величинами проекції радіус-вектора до точки місцезнаходження j -го вагона відчепа ($x_{ваг. j}$, $y_{ваг. j}$) відповідно на вісь X і Y [10].

Отже,

$$V_{B_j} = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad (12)$$

$$\beta_j = \arctg \frac{b}{a}. \quad (13)$$

Метеорологічні датчики слід встановлювати на рівних відстанях один від одного. З розміщенням на сортувальному пристрої чотирьох датчиків інтерполяційний багаточлен має такий вигляд:

$$+ \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_1) \cdot (z - z_3)}{(z_2 - z_0) \cdot (z_2 - z_2) \cdot (z_2 - z_3)} \cdot w_2 + \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_1) \cdot (z - z_2)}{(z_3 - z_0) \cdot (z_3 - z_1) \cdot (z_3 - z_2)} \cdot w_3. \quad (14)$$

$$w = \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2) \cdot (z - z_3)}{(z_0 - z_1) \cdot (z_0 - z_2) \cdot (z_0 - z_3)} \cdot w_0 + \frac{(z - z_0) \cdot (z - z_2) \cdot (z - z_3)}{(z_1 - z_0) \cdot (z_1 - z_2) \cdot (z_1 - z_3)} \cdot w_1 +$$

Отже, формулу (1) можна записати в такому вигляді:

$$V_{вих}^{ППП} = \sqrt{V_{снів.}^2 + 2 \cdot g' \cdot (i_{СП} - \omega_0^П - \omega_{СВ}^{СП} - \omega_{кр.}^{СП} - \omega_{сн.}^{СП}) \cdot (l_{ППП-ТП} - l_{відч.}) \cdot 10^{-3}}. \quad (15)$$

Для розрахунку питомого опору від повітряного середовища і вітру, що діє на відчеп із моменту його виходу з ПГП до моменту співударання з вагонами, що знаходяться на колії сортувального парку, результуючу швидкість вітру відносно відчепа можна знайти за формулою

$$V_p^{СП} = \sqrt{V_{СП}^2 + V_{B_c}^2 + 2 \cdot V_{СП} \cdot V_{B_c} \cdot \cos \beta_{сеп.}}, \quad (16)$$

де $V_{СП}$ – середня швидкість відчепа з моменту його виходу з ПГП до моменту співударання з вагонами, м/с,

$$V_{СП} = \frac{V_{вих}^{ППП} + V_{снів.}}{2}; \quad (17)$$

V_{B_c} – середнє значення швидкості вітру, що діяв на вагони відчепа протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, м/с;

$\beta_{сеп.}$ – середнє значення напрямку вітру, що діяв на вагони відчепа протягом часу $[T_{КТ1}; T_{КТ6}]$, відносно базису гіркової горловини, °.

Виходячи з формули (17), видно, що $\omega_{СВ}^{СП} = f(V_{вих}^{ППП})$, де $V_{вих}^{ППП}$ є параметром, який необхідно розрахувати спочатку. Від $V_{вих}^{ППП}$ також залежить $\omega_{кр.}^{СП}$. Одним із методів розв'язання задач такого типу є метод послідовних наближень.

У цьому випадку оптимальну швидкість виходу відчепа з ПГП можна визначити з використанням такої моделі:

$$\Delta V_{снів.} = |V_{снів.}^{зад.} - V_{снів.}^{мод.}(V_{вих}^{ППП})| \rightarrow \min, \quad (18)$$

$$0 \leq V_{вих}^{ППП} \leq V_{вих. \max}^{ППП}, \quad (19)$$

де $\Delta V_{снів.}$ – критерій оптимізації – різниця між заданою швидкістю співударання вагонів на коліях сортувального парку ($V_{снів.}^{зад.}$) і швидкістю співударання вагонів, що отримують у результаті моделювання залежно від заданої швидкості виходу відчепа з ПГП, ($V_{снів.}^{мод.}(V_{вих}^{ППП})$), м/с;

$V_{вих. \max}^{ППП}$ – максимальна швидкість виходу відчепа з ПГП (визначають виходячи з умови проходження відчепа без гальмування на ПГП), м/с.

$V_{снів.}^{зад.}$ можна прийняти 0,75 м/с, виходячи з того, що максимально допустима швидкість

співударення складає 1,4 м/с, а мінімальна швидкість співударення, за якої забезпечено зчеплення вагонів, – 0,1 м/с. Отже, 0,75 м/с – середнє значення в інтервалі $[0,1;1,4]$.

Швидкість співударення вагонів, що отримують у результаті моделювання, визначають за формулою

$$V_{\text{снів.}}^{\text{мод.}} = \sqrt{\frac{V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}^2} - 2 \cdot g' \cdot (i_{\text{СП}} - \omega_0^{\text{П}} - \omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}) - \omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}) - \omega_{\text{сн.}}^{\text{СП}})}{\cdot (l_{\text{ППП-ТП}} - l_{\text{відч.}}) \cdot 10^{-3}}}. \quad (20)$$

Отже, цільова функція (18) набуває вигляду

$$\Delta V_{\text{снів.}} = \left| 0,75 - \sqrt{\frac{V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}^2} - 2 \cdot g' \cdot (i_{\text{СП}} - \omega_0^{\text{П}} - \omega_{\text{СВ}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}) - \omega_{\text{кр.}}^{\text{СП}}(V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}) - \omega_{\text{сн.}}^{\text{СП}})}{\cdot (l_{\text{ППП-ТП}} - l_{\text{відч.}}) \cdot 10^{-3}}} \right| \rightarrow \min. \quad (21)$$

Для оцінювання величини відхилення $V_{\text{снів.}}^{\text{мод.}}$ від $V_{\text{снів.}}^{\text{зад.}}$ за різних значень $V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}$ проведено імітаційне моделювання скочування відчепів від ПГП до ТП у разі випадкових параметрів метеорологічних умов, що дає змогу відтворити умови скочування, наближені до реальних. У результаті для конкретного значення $V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}$ отримано розмиту область значень $V_{\text{снів.}}^{\text{мод.}}$. У кожній такій області розраховано математичне очікування швидкості співударення вагонів $M(V_{\text{снів.}}^{\text{мод.}})$, яке далі використовували для визначення $\Delta V_{\text{снів.}}$. Результати оптимізації швидкості виходу відчепів розрахункового состава з ПГП наведено в таблиці.

Оптимальна швидкість виходу відчепів розрахункового состава з ПГП

Ном ер відч епа	Кільк ість вагон ів у відче пі	$Q_{\text{відч.}}$, т	ω_0 , Н/ кН	$V_{\text{вих.}}^{\text{ППП}}$, м/с	$M(V_{\text{снів.}}^{\text{мод.}})$, м/с	$\Delta V_{\text{снів.}}$, м/с
1	3	152, 7	1,3 4	3,0	0,65	0,10
2	2	129, 2	1,4 7	3,9	0,76	0,01
3	1	53,2	1,3 7	3,5	0,81	0,06
4	5	260, 0	0,9 7	3,6	0,63	0,12
5	14	712, 4	1,3 5	2,3	0,69	0,06
6	2	131, 6	1,1 8 _а	3,1 Т	0,77	0,02
7	1	22,0	0,6 0 _и	4,1	0,86	0,11
8	5	332, 2	1,5 6	4,4	0,80	0,05
9	3	110, 1	1,6 7	5,0	0,76	0,01

10	2	46,4	2,1 5	5,3	0,74	0,01
11	6	348, 6	2,1 1	5,2	0,65	0,10
12	6	254, 4	1,5 8	2,9	0,82	0,07

Отже, найбільше відхилення $V_{снів.}^{мод.}$ від $V_{снів.}^{зад.}$ складає 0,12 м/с, що є прийнятним результатом. На рис. 2 як приклад наведено залежність $\Delta V_{снів.}$ від швидкості виходу восьмого відчепа з ПГП.

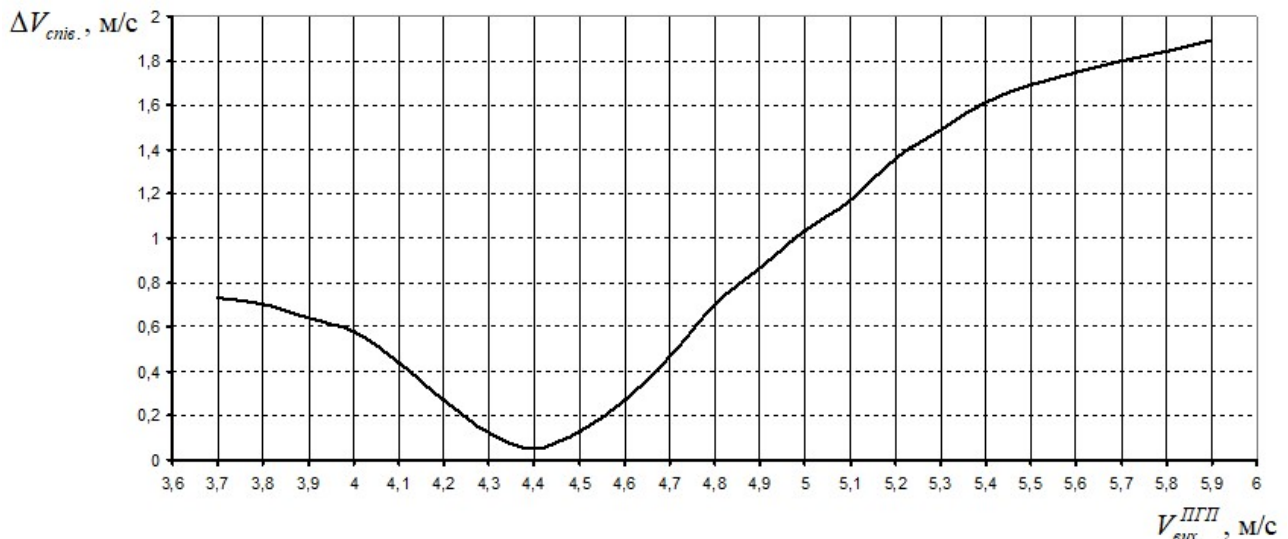


Рис. 2. Залежність різниці між заданою швидкістю співударяння вагонів на коліях сортувального парку і математичним очікуванням швидкості співударяння вагонів від швидкості виходу відчепа з ПГП

Висновки з даного дослідження і перспективи

У статті досліджено складне завдання прицільного регулювання швидкості скочування відцепів на ПГП сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним їх гальмуванням. Встановлено, що точний розрахунок швидкості виходу відцепів ускладнений наявністю значної кількості випадкових факторів, насамперед питомих опорів руху, що мають стохастичну природу.

Запропоновано метод розрахунку швидкості виходу відцепів із ПГП із використанням актуальної інформації про метеорологічні умови, параметри плану і профілю, склад відцепів і їхні миттєві параметри руху.

Уперше в контексті завдання прицільного гальмування запропоновано метод визначення приблизного значення основного питомого опору руху відчепа на основі фіксації поточних значень швидкості і напрямку вітру та визначення фактичної його швидкості з проходженням першої осі відчепа контрольних точок, що дає змогу значно підвищити точність обчислень параметрів гальмування. Для практичного застосування такого методу розроблено

структуру автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами.

За допомогою запропонованої оптимізаційної моделі можна знаходити значення швидкості виходу відчепа з ПГП, яке мінімізує відхилення від заданої швидкості співударяння з вагонами на колії призначення. Для цього використано метод послідовних наближень та імітаційне моделювання. Оптимізаційні розрахунки здійснюють з урахуванням приблизного значення основного питомого опору руху відчепа та середніх значень швидкості і напрямку вітру протягом часу руху першої осі відчепа, що обмежено моментами проходження нею першої і останньої контрольних точок.

Результати моделювання для відцепів розрахункового состава підтверджують ефективність і практичну придатність розробленого методу: максимальне відхилення швидкості співударяння від заданої не перевищує 0,12 м/с, що є допустимим у реальних умовах сортування вагонів.

Розроблений підхід може бути використаний у складі автоматизованих систем керування парковими уповільнювачами для підвищення ефективності та

безпеки роботи сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відцепів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення запропонованої структури автоматизованої системи керування парковими уповільнювачами шляхом оптимізації кількості контрольних точок і відстані між ними та дослідження ефективності застосування комп'ютерного зору [11] для визначення фактичної швидкості скочування відцепів на контрольній ділянці.

Список використаних джерел

1. Ohar O., Berestov I., Kutsenko M., Smachilo J., Kogaro I. Using the new car braking systems in marshalling yards. *ICTE in Transportation and Logistics 2019: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. 2020. P. 203-210. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_27.
2. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the gravity humps / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, A. Dorosh et al. *Transport Problems*. 2016. 11(1). P. 147-155. URL: <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>.
3. Kozachenko D. M., Bobrovskiy V. I., Grevtsov C. V., Berezovyi M. I. Controlling the speed of rolling cuts in conditions of reduction of brake power of car retarders. *Science and Transport Progress*. 2021. 3(63). P. 28-40. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74710>.
4. Kozachenko D., Grevtsov S., Titova A. Determination of the Optimal Cars Exit Speeds from the Retarders on Sorting Humps. *Proceedings of 27th International Scientific Conference Transport Means 2023. Part II*. 2023. P. 966-971. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85176262755&origin=recordpage>.
5. Kozachenko D., Hermaniuk Y., Grevtsov S. The influence of random factors on the estimation of the speed and time of rolling cuts from sorting humps. *EOT-2023: MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390, 04001. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439004001>.
6. Дорош А. С. Оптимізація режимів гальмування відцепів на сортувальній гірці. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпро: ДНУЗТ, 2021. Вип. 22. С. 28-35.
7. Calculating Exit Speed of Rolling Cuts Based on Fuzzy Neural Networks / XU Wan-an, SHI Xuan, LIN Tong-yuan. *China Railway Science*. 2001. No. 03. P. 161-165.
8. ГБН В.2.3-37472062-1:2012. Галузеві будівельні норми України. Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування : затв. Наказом Міністерство інфраструктури України 17.01.2013 р. № 25. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2012. 112 с.
9. Бобровський В. І. Теоретичні основи вдосконалення конструкції та технології роботи залізничних станцій : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.20. Дніпропетровськ, 2002. 534 с.
10. Огар О. М. Розвиток теорії експлуатації та методів розрахунку конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20. Харків, 2011. 368 с.
11. Куценко М. Ю., Шамота А. О. Обґрунтування доцільності застосування комп'ютерного зору у технології гравітаційно-прицільного гальмування відцепів. *Матеріали XIX Міжнар. наук.-практ. конф. «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика»*, м. Харків, 1-2 червня 2023 р. Харків, 2023. С. 88-89.

Ohar O., Kutsenko M., Hurin D., Kondratiev I., Levchenko A. Development of a Method for Calculating the Exit Speed of Cuts from the Parking Retarder Position of a Sorting Device with Target Gravity Braking of Cuts.

Abstract. The complexity of the problem of targeted regulation of cuts rolling speed has been demonstrated. It has been established that the accurate calculation of this speed is complicated by the presence of numerous random factors, primarily the specific resistances to movement, which have a stochastic nature.

A method for calculating the exit speed of cuts from the parking retarder position has been proposed, utilizing up-to-date information on meteorological conditions, track alignment and profile parameters, the composition of the cuts, and their instantaneous motion characteristics.

For the first time in the context of targeted braking tasks, a method has been introduced to estimate the approximate value of the basic specific resistance to movement of a cut, based on recording real-time wind speed and direction as well as determining the actual speed of the cut during the passage of its first axle through control points. This significantly improves the accuracy of braking parameter calculations.

To enable the practical application of this method, the structure of an automated control system for park retarders has been developed.

The proposed optimization model allows for determining the exit speed of a cut from the parking retarder position that minimizes deviation from the target coupling speed with the cars on the destination track. The model employs a method of successive approximations and simulation modeling. The optimization is performed with consideration of the approximate value of the basic specific resistance to motion and the average wind speed and direction during the time interval in which the first axle of the cut travels between the initial and final control points.

The simulation results for the cuts of a test train confirm the effectiveness and practical applicability of the developed method: the maximum deviation of the coupling speed from the target value does not exceed 0.12 m/s, which is acceptable under real marshalling yard conditions.

The proposed approach can be implemented as part of automated control systems for park retarders to improve the efficiency and safety operations of a sorting device with target gravity braking of cuts.

Key words: targeted braking, speed control, cut, sorting device, retarder position, car retarder, rolling resistance.

Огар Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Куценко Максим Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного

транспорту, Харків, Україна. E-mail: kucenko@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6020-7749>.

Гурін Дмитро Олегович, кандидат технічних наук, асистент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: gurin@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3089-1217>.

Кондратьєв Ігор Вікторович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Левченко Антон Олександрович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.

Ohar Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Kutsenko Maksym, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kucenko@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6020-7749>.

Hurin Dmytro, PhD (Tech), Assistant Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: gurin@kart.edu.ua. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3089-1217>.

Kondratiev Ihor, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Levchenko Anton, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.