

УДК 656.212.5

О. В. КЛИГА^{1*}

¹Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта: aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X

ОБЛАСТЬ ДОПУСТИМИХ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ В СТОХАСТИЧНИХ УМОВАХ

Мета. Метою цього дослідження є встановлення зв'язків між режимами гальмування відчепів на сортувальних гірках та параметрами випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів. **Методика.** Дослідження у цій роботі виконані на підставі використання методів теорії експлуатації залізниць, математичної статистики та імітаційного моделювання. **Результати.** Незважаючи на тривалу історію досліджень гіркових процесів та наявність значного обсягу даних натурних спостережень та експериментів по визначенню параметрів розподілу випадкових величин характеристик вагонів існує прогалина в наукових методах оцінки впливу режимів гальмування відчепів на параметри розподілу випадкових величин швидкості та скочування відчепів. Розробка таких методів суттєво спростить вирішення прикладної задачі пошуку безпечних режимів розформування составів в залежності від технічного оснащення гірок. Визначення випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів у дослідженні виконується на підставі результатів серії імітаційних експериментів, що обробляються методами математичної статистики. Допустимі режими гальмування відчепів формують замкнену область. Встановлено, що залежності математичного очікування швидкості та часу скочування на межах області допустимих режимів представляються s-подібними кривими. Така форма залежностей пов'язана з обмеженими можливостями гальмових позицій керувати швидкістю скочування відчепів. Залежності середнього квадратичного відхилення швидкості та часу скочування від режимів гальмування мають складну немонотонну форму. Така форма залежності є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа. В роботі представлено алгоритми пошуку вершин області допустимих режимів гальмування на підставі даних обчислювальних експериментів. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у тому, що в ній удосконалено метод побудови областей допустимих режимів скочування відчепів. На відміну від попередніх методів у цій роботі оцінка виконання вимог регулювання скочування відчепів здійснюється із заданою статистичною надійністю. **Практична значимість.** Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

Ключові слова: залізничний транспорт, вантажні перевезення, сортувальна станція, сортувальна гірка, математичне моделювання

Вступ

Сортувальні гірки є ключовим елементом сортувальних станцій. Вони відіграють критичну роль в ефективному функціонуванні залізничного транспорту, забезпечуючи формування та розформування вантажних поїздів. Від продуктивності, безпеки та надійності роботи гіркових комплексів безпосередньо залежить загальна пропускна спроможність залізничної мережі та швидкість доставки вантажів.

Незважаючи на значний технологічний прогрес, функціонування сортувальних гірок в Україні та багатьох країнах світу стикається з низкою системних проблем. Сучасні умови характеризуються значним зменшенням обсягів їх роботи на мережі в цілому та водночас необхідністю інтенсифікації роботи на опорних станціях. Застарілі технічні системи автоматизації та

механізації сортування вагонів, а також використання башмачного гальмування підвищує ризики пошкодження вантажів та вагонів, а також травмування персоналу. В таких умовах на перший план виходять питання безпеки сортувального процесу.

Процес керованого скочування відчепів на сортувальних гірках є ключовим елементом розформування поїздів. Він пов'язаний з рухом великих за масою груп вагонів під дією сили тяжіння. На гірках традиційної конструкції можливість керування цим рухом обмежена гальмовими позиціями. Складність процесу керованого скочування пов'язана з відсутністю повної інформації про ходові характеристики відчепів та умови їх скочування. Незважаючи на тривалу історію досліджень гіркових процесів та наявність значного обсягу даних натурних спостережень та експериментів по визначенню параметрів

розподілу випадкових величин характеристик вагонів існує прогалина в наукових методах оцінки впливу режимів гальмування відцепів на параметри розподілу випадкових величин швидкості та скочування відцепів. Розробка таких методів суттєво спростить вирішення прикладної задачі пошуку безпечних режимів розформування составів в залежності від технічного оснащення гірок. Тому тема наукової статті є актуальною.

Мета

Метою цього дослідження є встановлення зв'язків між режимами гальмування відцепів на сортувальних гірках та параметрами випадкових величин швидкості та часу скочування відцепів.

Методика

Розформування-формування составів поїздів та маневрових передач є однією з основних маневрових операцій на залізничному транспорті. Для її інтенсифікації з кінця 19-го сторіччя використовують сортувальні гірки. Протягом 20-го сторіччя наукові дослідження були переважно спрямовані на розвиток методів проектування сортувальних гірок. Значний обсяг спостережень та експериментів, проведених для визначення опорів руху, був покладений в основу галузевих будівельних норм, що встановлюють вимоги до проектування сортувальних пристроїв залізниць [1].

Основним методом оцінки проектних рішень при цьому є математичне моделювання гіркових процесів. При вирішенні задач проектування параметри, що характеризують ходові характеристики розрахункових відцепів, їх сполучень та умови навколишнього середовища обираються несприятливими і вважаються точно відомими. Таким чином, вирішення задачі моделювання керуемого скочування відцепів при проектуванні здійснюється у детермінованій постановці.

В рамках вирішення задач проектування сортувальних гірок було розроблено методи моделювання скочування відцепів, що ґрунтуються на вирішенні диференціального рівняння руху [2] у яких незалежною змінною є шлях

$$ds = \frac{v dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{ск}(v) - w_{св}(v) - b_r(s)) \cdot 10^{-3}} \quad (1)$$

w_0 – основний питомий опір руху вагона;

$w_{ск}$ – питомий опір руху вагона від стрілок і кривих;

$w_{св}$ – питомий опір руху вагона від середовища та вітру;

b_r – питомий опір гальмових засобів;

i – ухил колії.

Також були розроблені та перевірені на адекватність методи визначення опорів руху вагонів.

В цілому такий підхід відзначається високою надійністю прийнятих проектних рішень та відносною простотою їх отримання, що забезпечує його широке застосування у всьому світі.

На сьогодні відомі методи аналітичного вирішення рівняння руху відчепа [3]. Однак вони мають виключно теоретичне значення і їх використання суттєво обмежено. В практичних задачах вирішення рівняння (1) виконується чисельними методами в ході комп'ютерного моделювання скочування відцепів [4-8]. У порівнянні з аналітичним методом такий підхід вимагає виконання значно більшого обсягу обчислень і є досить витратним за часом отримання рішення.

Задачі, що вирішуються під час експлуатації сортувальних гірок, суттєво відрізняються від задач проектування. При їх вирішенні основна увага приділяється питанням безпеки та економічності процесу розформування поїздів [9-11]. Тому урахування стохастичного характеру процесу скочування відцепів стає критично важливим.

Вирішення проблеми моделювання скочування відцепів в умовах відсутності точної інформації про ходові характеристики відцепів та неточної реалізації уповільнювачами заданих режимів гальмування ґрунтується на декількох підходах.

Перший підхід ґрунтується на обладнанні гіркових комплексів системами, що забезпечують уточнення інформації у реальному часі [12-14] та системами автоматичного управління уповільнювачами. Перевага такого підходу полягає у тому, що уточнена інформація дозволяє приймати рішення, які за своєю якістю наближаються до рішень, що можуть бути отримані при вирішенні задачі у детермінованій постановці. Недоліки пов'язані з високою вартістю впровадження та експлуатації подібних систем, а також обмежені можливості уточнення інформації до початку скочування відцепів.

Другий підхід ґрунтується на приведенні стохастичної задачі керуемого скочування відцепів до детермінованої постановки шляхом заміни випадкових величин їх розрахунковими значеннями. Для урахування відхилень процесу від очікуваного рішення воно передбачає резерви, що нівелюють вплив випадкових факторів [15]. Перевагою цього підходу є відносна

простота отримання рішень, однак вони можуть суттєво відрізнятись від оптимальних.

Третій підхід ґрунтується на вирішенні задачі керуемого скочування відчепів у стохастичній постановці [16, 17]. Такий підхід дозволяє отримувати оптимальні рішення відповідно до якості наявної інформації про ходові характеристики відчепів і умови їх скочування. Однак він ґрунтується на методах прямого пошуку та виконанні багаточисельних обчислювальних експериментів для визначення параметрів розподілу випадкових величин швидкості та часу скочування відчепів. Через це такий підхід залишається громіздким та мало придатним для вирішення задач управління реального часу.

На сортувальних гірках крупних станцій з балковими уповільнювачами гальмування відчепів здійснюється на трьох гальмових позиціях. Будемо називати вектор $\mathbf{V}=\{v_1, v_2, v_3\}$ (тут v_1, v_2, v_3 – швидкості виходу відчепа з першої (ГП1), другої (ГП2) та третьої (ГП3) гальмівних позицій) режимом гальмування відчепа.

Позначимо комплекс показників, що характеризують результати керованого скочування відчепів

$$\mathbf{P} = \{\bar{v}(x), \bar{t}(x), \sigma_v(x), \sigma_t(x), P_v, P_d, \Delta_l\}, \quad (2)$$

де x – відстань скочування відчепа від вершини гірки;

$\bar{v}(x), \bar{t}(x)$ – залежності математичного очікування швидкості у м/с та часу у секундах скочування відчепів від відстані скочування у м;

$\sigma_v(x), \sigma_t(x)$ – залежності середнього квадратичного відхилення швидкості у м/с та часу у секундах скочування відчепів від відстані скочування у м;

P_v – імовірність перевищення встановленої швидкості підходу відчепа до вагонів на сортувальній колії;

P_d – імовірність зупинки вагона на стрілочній горловині;

Δ_l – математичне очікування відстані між точною зупинки відчепа і точкою прицілювання, м.

Виходячи з необхідності подолання обчислювальної громіздкості стохастичного підходу, у цьому дослідженні висунуто гіпотезу про те, що показники сортувального процесу можуть бути описані гладкими неперервними функціями від режимів гальмування

$$\mathbf{P}=\mathbf{F}(\mathbf{V}). \quad (3)$$

Це дозволяє обмежити кількість моделювань скочувань відчепів та встановлювати значення

показників сортувального процесу методами функціональної апроксимації.

Для побудови ефективних оптимізаційних алгоритмів необхідно скоротити обсяги затратних за часом обчислювальних експериментів по скочуванню відчепів. Цим пояснюється важливість досліджень, спрямованих на зменшення розмірності задачі. Дослідження, представлені у роботі [18], показують, що, при детермінованому підході, допустимі режими скочування відчепів можуть бути представлені у вигляді області допустимих режимів

$$\mathbf{V}=\{v_1, v_2\}$$

графічним зображенням якої є багатокутник $\mathbf{D}_{det}$ на площині (v_3 не враховується через залежність від v_1 та v_2). При цьому встановлено, що оптимальні режими можуть знаходитись лише на межі області допустимих режимів. Тому у детермінованій постановці задача вибору режиму гальмування може бути зведена до одномірної задачі оптимізації режиму, що знаходиться на межі області $\mathbf{D}_{det}$.

Дослідження області допустимих режимів скочування відчепів для стохастичних умов $\mathbf{D}_{st}$ виконано в [16]. Встановлено особливості області $\mathbf{D}_{st}$ у порівнянні з $\mathbf{D}_{det}$, що полягає у наявності двох підобластей $\mathbf{D}_{st1}$ та $\mathbf{D}_{st2}$. В підобласті $\mathbf{D}_{st1}$ величина Δ_l не залежить від режиму $\mathbf{V}$, а $\mathbf{D}_{st2}$ залежить від нього. Як наслідок в [16] запропоновано використовувати різні критерії оптимальності для режимів підобластей $\mathbf{D}_{st1}$ та $\mathbf{D}_{st2}$. Виходячи із результатів досліджень [18] в цій роботі увага буде сконцентрована на вивченні межі вказаних підобластей.

Слід зазначити, що як у випадку детермінованого так і у випадку стохастичного підходу до вирішення задачі керуемого скочування відчепів область допустимих режимів гальмування використовується лише для ідентифікації ділянки межі, вздовж якої встановлюються режими гальмування для моделювання скочування відчепів при вирішенні оптимізаційних задач. Такий процес є затратним у часі. Враховуючи, що одні і ті ж режими гальмування викликають однакову зміну показників, що характеризують процес скочування, то можливим підходом до удосконалення методики моделювання скочування відчепів є попереднє встановлення аналітичних залежностей цих показників від режимів гальмування.

В цілому виконаний огляд еволюції існуючих методів моделювання скочування відчепів від детермінованих задач проєктування до стохастичних задач експлуатації, виявив що

головним обмеженням для розробки ефективних алгоритмів вибору режимів гальмування є обчислювальна громіздкість існуючих методів оцінки показників регульованого скочування відцепів. Це обґрунтовує необхідність розробки нової, менш витратної, методики на основі функціональної апроксимації.

Результати

За відсутності точної інформації про ходові характеристики відцепів та умови їх скочування, а також при неточній реалізації гальмовими уповільнювачами заданих режимів гальмування показники процесу скочування відцепів, що формують вектор $\mathbf{P}$ є випадковими величинами. Оцінка параметрів цих випадкових величин здійснюється на підставі серій імітаційних експериментів. Прийнято, що імовірність появи подій, що призводять до появи економічних збитків не повинна перевищувати 0,005, інших небажаних подій - 0,1. За таких умов кількість експериментів, які необхідно виконати для того, щоб стверджувати, що якщо під їх час подія не трапилася жодного разу, її імовірність з надійністю 0,95 не перевищує 0,005 визначається за виразом

$$N \geq \frac{\ln(1 - 0,95)}{\ln(1 - 0,005)}$$

і складає 598 експериментів.

Межа, яка дозволяє стверджувати що, якщо у N експериментах подія трапилася $k_{кр}$ разів, то її імовірність не буде перевищувати 0,1 встановлюється із виразу

$$0,1 \geq \frac{k_{кр}}{N} + Z_{0,95} \sqrt{\frac{k_{кр}(N - k_{кр})}{N^3}}$$

Для $N=598$ експериментів $k_{кр}=46$.

Обмеження швидкості руху відцепів по маршруту пов'язані із обмеженнями допустимої швидкості входу відцепів на гальмові позиції, з забезпеченням прицільного регулювання швидкості підходу відцепів до вагонів на сортувальних коліях $v_{прц}$, з необхідністю звільнення відцепом гірки. Перевищення відцепом встановленої швидкості входу на гальмові позиції є небажаною подією так як може призводити до прискореного зносу вагонів та уповільнювачів. Прийнято, що імовірність появи такої події не повинна перевищувати 0,1, а кількість сценаріїв із порушеннями цієї вимоги не повинна перевищувати $k_{кр,1}=46$. Перевищення відцепом встановленої ПТЕ швидкості підходу по вагонів 5 км/год (1,39 м/с) викликає прискорений знос вагонів і є

небажаною подією. Прийнято, що імовірність появи такої події не повинна перевищувати 0,1. Розрахунок розміщення та кріплення вантажів, конструкції поглинаючих апаратів здійснюється з умови, що швидкість зіткнення не перевищує 10 км/год (2,78 м/с). Прийнято, що імовірність порушення цієї вимоги повинна бути не більше 0,005. Умови прицільного регулювання швидкості скочування відцепів вважаються виконаними, якщо у жодному із сценаріїв не спостерігалась $v_{прц} > 2,78$ м/с ($k_{кр,2}=0$), а кількість сценаріїв із $v_{прц} > 1,39$ м/с не перевищує $k_{кр,3}=46$. Зупинка вагонів у зоні скочування до виходу з паркової гальмової позиції викликає економічні втрати, пов'язані з зупинкою розпуску і виконанням додаткової маневрової роботи. Прийнято, що імовірність появи таких подій повинна бути не більше 0,005, а сценаріїв з такими зупинками не повинно бути ($k_{кр,4}=0$).

В результаті обмеження режимів гальмування відцепів приймають вигляд:

$$\sum_{i=1}^{598} 1_{(v_{сп}(x)_i > v_{доп}(x))} (v_{рг}) = k_{кр,b}, v_{рг} \rightarrow \max, \text{ або } \sum_{i=1}^{598} 1_{(l_{сп,i} < l_{доп})} (v_{рг}) = k_{кр,b}, v_{рг} \rightarrow \min,$$

де $v_{сп}(x_b)_i$ - швидкість скочування відчепа у точці x_b , що спостерігається у i -му досліді;

$v_{доп}(x_b)$ - максимально допустима швидкість скочування відчепа у точці x_b ;

$l_{сп,i}$ - відстань скочування відчепа, що спостерігається у i -му досліді;

$l_{доп}$ - мінімально допустима відстань скочування відчепа;

$v_{рг}$ - швидкість виходу відчепа із регулюємої гальмової позиції.

Кожен обчислювальний експеримент реалізує окремий сценарій руху відчепа з встановленими значеннями випадкових характеристик. Такий відцеп будемо називати реплікою. Оцінки показників вектора $\mathbf{P}$ визначаються на підставі статистичної обробки даних сценаріїв. Принципи моделювання скочування відцепів в умовах дії випадкових факторів представлено в роботі [17].

Факторами, що формують обмеження області допустимих режимів, є потужності гальмових позицій по маршруту скочування, допустима швидкість входу відчепа на гальмові позиції, максимально можлива та мінімально допустима швидкість руху відчепа. Детальні дослідження обмежень області $\mathbf{D}_{det}$ виконані в роботі Бобровського на ін. [19]. Згідно з ними детермінована область допустимих режимів скочування відцепів $\mathbf{D}_{det}$ являє собою криволінійний

багатокутник з максимальною кількістю вершин 6. В залежності від параметрів відчепа і умов скокування кількість вершин у багатокутнику може зменшуватись аж до виродження у точку. Область D_{st} має таку ж конфігурацію [16]. Для порівняння режимів гальмування V та V^* будемо використовувати принцип лексикографічного упорядкування так, що вважається

$$V > V^*, \quad (4)$$

якщо виконуються умови

$$\begin{aligned} v_1 > v_1^*, \text{ або } v_1 = v_1^* \text{ та } v_2 > v_2^*, \\ \text{або } v_1 = v_1^* \text{ та } v_2 = v_2^* \text{ та } v_3 > v_3^*. \end{aligned}$$

Для аналізу впливу режимів гальмування відчепів на показники вектору P встановленні залежності швидкості та часу його скокування від швидкості виходу з ГП1. ГП1 не впливає на умови руху на частині маршруту від точки відриву до входу відчепа на цю позицію. Максимальна та мінімальна можлива швидкість руху по маршруту після ГП1 досягається відповідно при скокуванні відчепа через неї без гальмування та з повним використанням її гальмової потужності. Для прикладу на рис. 1 наведено залежності математичного очікування та середнього квадратичного відхилення швидкості входу відчепа на ГП2 від заданої швидкості виходу відчепа з ГП1:

$$\bar{v}_{ГП2п} = f_1(v_{ГП1к}), \quad (5)$$

$$\sigma_{v,ГП2п} = f_2(v_{ГП1к}). \quad (6)$$

Залежність (5) являє собою гладку функцію і має чітку s-подібну форму. Вона складається із трьох ділянок. Така форма пояснюється можливістю ГП1 керувати швидкістю скокування відчепів.

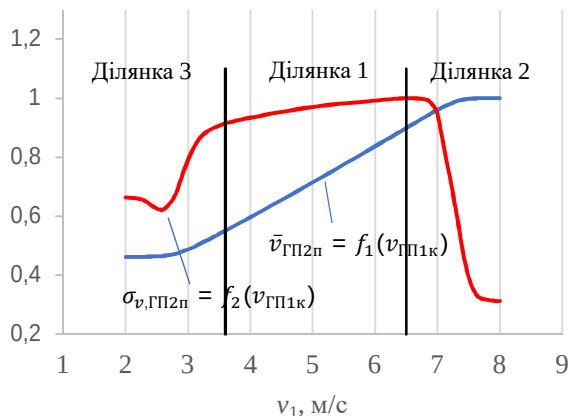


Рис. 1. Залежність математичного очікування та середнього квадратичного відхилення

швидкості входу відчепа на ГП2 від заданої швидкості його виходу з ГП1

Для пояснення форми залежності (5) на рис. 2 наведено зміну частки керованих реплік в залежності від $v_{ГП1к}$. При цьому некерованими вважаються репліки, що скокуються без гальмування, або з гальмуванням повною потужністю ГП1. В межах першої ділянки $\bar{v}_{ГП2п}$ змінюється пропорційно $v_{ГП1к}$. Ця ділянка відповідає робочому діапазону, де усі репліки є керованими і ГП1 може гнучко змінювати режими гальмування в умовах впливу випадкових факторів. В межах ділянки 2 із збільшенням $v_{ГП1к}$ величина $\bar{v}_{ГП2п}$ досягає свого максимуму формуючи верхнє плато. Така форма залежності пояснюється обмеженими фізичними можливостями набору швидкості відчепом.

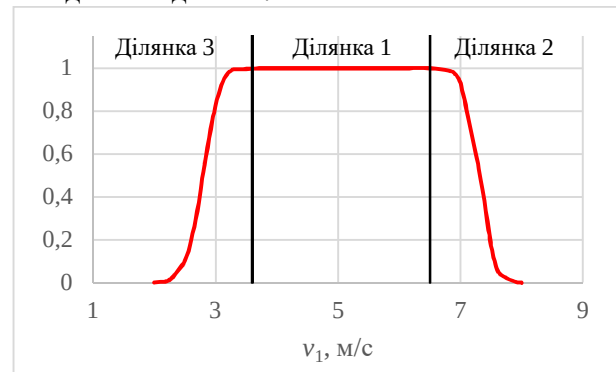


Рис. 2. Залежність частки керованих реплік від заданої швидкості виходу відчепа з ГП1

Як наслідок, при збільшенні величини $v_{ГП1к}$ все менша частина реплік відчепа потребує гальмування, що призводить до втрати керованості процесом. Максимум $\bar{v}_{ГП2п}$ відповідає скокуванню усіх реплік без гальмування. В межах ділянки 3 із зменшенням $v_{ГП1к}$ величина $\bar{v}_{ГП2п}$ досягає свого мінімуму формуючи нижнє плато. Це пояснюється обмеженням гальмової потужності ГП1. В результаті, при зменшенні величини $v_{ГП1к}$ все більша частина реплік відчепа потребує повного гальмування, що також призводить до втрати керованості процесу скокування відчепа. Мінімум $\bar{v}_{ГП2п}$ відповідає скокуванню усіх реплік з гальмуванням повною потужністю ГП1.

Середнє квадратичне відхилення швидкості входу відчепа на ГП2 в межах ділянки 1 змінюється монотонно і має тенденцію до зростання при збільшенні $v_{ГП1к}$. Це пояснюється сполученням випадкових відхилень опору гальмових уповільнювачів та погано прогнозованого опору середовища та вітру у загальній величині опору руху. При цьому величина останнього пропорційна квадрату відносної швидкості відчепа та

вітру. Для ділянок 2 та ділянок 3 характерна складна, немонотонна та змінна поведінка залежності (6). Така форма залежності пов'язана є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа.

Зміна математичного очікування $\bar{t}_{\text{ГП2п}}$ та середнього квадратичного відхилення $\sigma_{t, \text{ГП2п}}$ часу скочування відчепів описується залежностями, що є оберненими до (5) та (6) як показано на рис. 3.

В таких умовах, встановлення єдиної функціональної залежності, що описує зміну параметрів вектору **P**, незважаючи на їх гладкість і неперервність, є недоцільним і може призвести до значної похибки в розрахунках при оцінці області **D_{st}**.

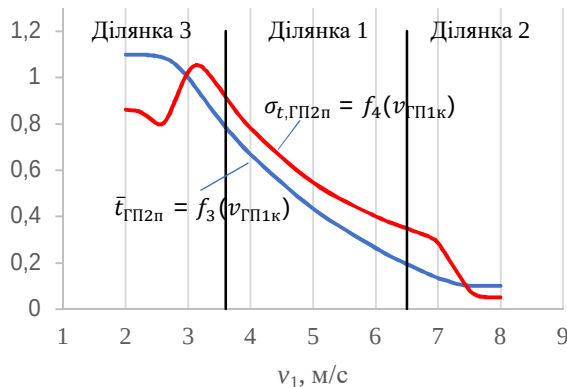


Рис. 3. Залежність математичного очікування та середнього квадратичного відхилення часу скочування відчепів до другої гальмової позиції від заданої швидкості його виходу з першої гальмової позиції

Тому задання функцій (3) буде виконуватись табличним способом з подальшим застосуванням інтерполяції для встановлення значень, які відповідають проміжним точкам області **D_{st}**. Такий опис області **D_{st}** робить недоцільним попереднє встановлення усіх її меж. Зменшення витрат обчислювальних ресурсів може бути досягнуто за рахунок доповнення обмежень області **D_{st}** в міру необхідності.

Побудова області **D_{st}** здійснюється покроково. В процесі побудови виконується ряд формальних процедур.

По-перше, виконується перевірка існування області **D_{st}**. Цей крок є неов'язковим так як існування області **D_{st}** перевіряється на етапі проєктування. Однак, область допустимих режимів **D_{st}** може не існувати у випадку несправності технічних засобів та при невідповідності відчепів, або умов скочування умовам проєктування

сортувальної гірки. Для перевірки існування області **D_{st}** виконується моделювання скочування відчепів без гальмування та при максимальному гальмуванні на ГП1 та ГП2. Умовами існування області **D_{st}** є

- відсутність випадків зупинки реплік відчепа у зоні скочування при русі без гальмування;

- відсутність випадків, коли застосування повної гальмової потужності ГП1 та ГП2 було недостатньо для зупинки реплік відчепа на ГП2;

- кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП2 при використанні повної гальмової потужності ГП1 не перевищує $k_{\text{кр},1}$.

Характерними режимами скочування відчепів, оцінка параметрів яких є необхідною для визначення існування можливості розформування состава без перерв у розпуску є швидкий (Ш) та повільний (П) режими скочування.

Швидкий режим є максимально можливим відповідно до визначення (4). Він забезпечує найшвидше звільнення відчепом стрілочної зони за рахунок найбільш пізнього гальмування. Алгоритм ідентифікації швидкого режиму скочування побудований на послідовному каскадному принципі, коли кожен наступний етап враховує обмеження попереднього.

Максимальна швидкість виходу відчепа з ГП1 відповідає скочуванню відчепа без гальмування. Ця швидкість обмежена допустимою швидкістю входу відчепа на ГП2 та потужністю ГП2 та ГП3. Якщо при скочуванні відчепа без гальмування на ГП1 кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП2 не перевищує $k_{\text{кр},1}$, то приймається режим без гальмування. Інакше методом Брента [20] здійснюється пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП1, при якому кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП2 складає рівно $k_{\text{кр},1}$. Позначимо максимальну швидкість виходу відчепа з ГП1, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП2 як $v_{\text{ГП1-ГП2}}$.

ГП1 спільно з ГП2 повинні забезпечувати допустиму швидкість входу на ГП3. Якщо при встановленій швидкості $v_1 = v_{\text{ГП1-ГП2}}$ і при скочуванні відчепа без гальмування на ГП2 кількість випадків порушення встановленої швидкості входу на ГП3 не перевищує $k_{\text{кр},1}$, то обирається цей режим. В іншому разі виконується скочування при $v_1 = v_{\text{ГП1-ГП2}}$ та гальмуванні відчепа на ГП2 повною потужністю уповільнювача. Якщо при такому режимі кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 перевищує $k_{\text{кр},1}$, то необхідно знайти таку швидкість

виходу відчепа з ГП1, за якої при повному гальмуванні на ГП2 кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 становитиме рівно $k_{кр}$. Інакше при $v_1 = v_{ГП1-ГП2}$ здійснюється пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій кількість порушень швидкості входу відчепа на ГП3 становить рівно $k_{кр,1}$. Позначимо максимальну швидкість виходу відчепа з ГП1, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП2 та ГП3 як $v_{ГП1-ГП3}$, а максимальну швидкість виходу відчепа з ГП2, що забезпечує допустиму швидкість входу відчепа на ГП3 як $v_{ГП2-ГП3}$.

ГП1, ГП2 та ГП3 спільно повинні забезпечувати підхід відчепа до вагонів на сортувальних коліях із допустимою швидкістю. При цьому перевищення встановленої ПТЕ швидкості $v_{прц}=1,39$ м/с не повинна перевищувати $k_{кр,3}$, а швидкості $2v_{прц}=2,78$ м/с не повинна перевищувати $k_{кр,2}$. Пошук необхідного режиму полягає у встановленні максимально допустимих швидкостей виходу відчепа із гальмових позицій, які задовольняють цим вимогам. Якщо при скочуванні відчепа при встановлених швидкостях $v_{ГП1-ГП3}$ та $v_{ГП2-ГП3}$ та використанні повної гальмової потужності ГП3 кількість випадків порушення умов прицільного гальмування не перевищує допустимих значень, то приймається режим $v_{ГП1-ГП3}$ та $v_{ГП2-ГП3}$. Інакше, якщо при скочуванні відчепа при встановленій швидкості $v_{ГП1-ГП3}$ та при гальмуванні відчепа повною гальмовою потужністю на ГП2 та ГП3 кількість випадків порушення умов прицільного гальмування не перевищує допустимих значень, то виконується пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП2 при $v_{ГП1-ГП3}$ та при використанні повної гальмової потужності ГП3, коли кількість порушень умов прицільного гальмування становить рівно $k_{кр}$. Інакше, виконується пошук такої швидкості виходу відчепа з ГП1 та при використанні повної гальмової потужності ГП2 та ГП3, коли кількість порушень умов прицільного гальмування становить рівно $k_{кр,2}$ та $k_{кр,3}$.

Повільний режим скочування (П) є мінімально можливим відповідно до визначення (4). Він забезпечує найбільші інтервали з попередніми відчепами за рахунок найбільш раннього гальмування. Алгоритм ідентифікації повільного режиму скочування також побудований на послідовному каскадному принципі.

Мінімальні швидкості виходу відцепів з гальмових позицій обмежені умовою звільнення ними зони скочування. Мінімально можлива швидкість виходу відчепа з ГП1 відповідає скочуванню відчепа з гальмуванням повною

потужністю цієї позиції. Виходячи з умови існування області D_{st} , потужності другої гальмової позиції достатньо для зупинки на ній відчепа. Тому методом Брента здійснюється пошук такої найменшої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій у серії розрахункових експериментів не спостерігається жодного випадку зупинки відцепів у зоні скочування ($k_{кр,4}=0$).

Недоліком повільного режиму є різке погіршення показників прицільного регулювання швидкості скочування відцепів. Через це більш привабливим є використання найбільш повільного режиму підобласті D_{st1} (ПР). При цьому методом Брента здійснюється пошук такої найменшої швидкості виходу відчепа з ГП2, при якій у серії розрахункових експериментів кількість перевищення встановлених швидкостей підходу відцепів до вагонів на сортувальних коліях становить $k_{кр,2}=0$, $k_{кр,3}=46$.

Ідентифікація інших вершин області D_{st} здійснюється аналогічним чином за необхідності. Межі області допустимих режимів гальмування відцепів встановлюються шляхом поєднання суміжних вершин. Для урахування можливої нелінійності меж області D_{st} застосовується метод Брента. Приклад області D_{st} наведено на рис. 4.

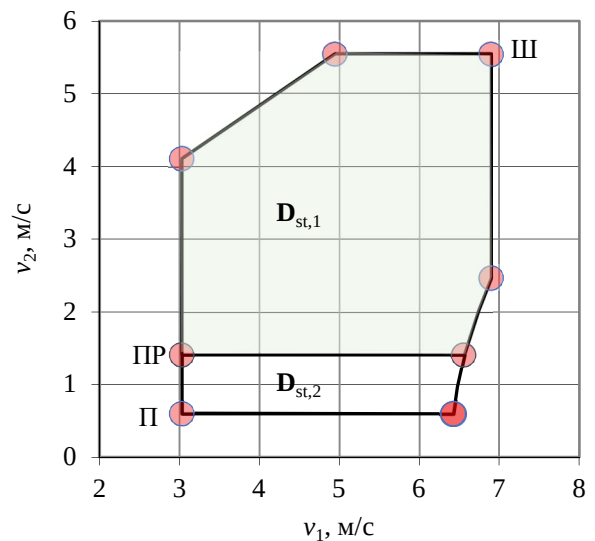


Рис. 4. Область допустимих режимів скочування відчепа для стохастичних умов

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у тому, що в ній удосконалено метод побудови областей допустимих режимів скочування відцепів. На відміну від попередніх методів у цій роботі оцінка виконання вимог регулювання скочування відцепів здійснюється із заданою статистичною

надійністію.

Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

Висновки

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Сучасні умови експлуатації залізничної мережі вимагають інтенсифікації процесів розформування-формування поїздів на опорних станціях на тлі загального скорочення обсягів роботи. Попри значний масив емпіричних даних, досі бракувало науково обґрунтованих методів, які б кількісно оцінювали вплив режимів гальмування на статистичні параметри руху відчепів, що робить розробку методів оцінки стохастичних процесів на гірках критично важливою для безпеки та ефективності.

2. За відсутності точної інформації про ходові властивості відчепів та умови і скочування оцінку виконання вимог, що накладаються на режими гальмування відчепів запропоновано виконувати на підставі серії із 598 експериментів, що дозволяє забезпечувати надійність висновків 0,95. Якщо порушення вимог регулювання швидкості скочування відчепів є лише небажаними подіями, то їх поява допускається із імовірністю не більше ніж 0,1, що відповідає 46 випадкам появи у серії обчислювальних експериментів. Якщо негативні наслідки порушення вимог регулювання швидкості скочування відчепів викликають економічні збитки, то їх поява допускається із імовірністю не більше ніж 0,005. Такі випадки не повинні спостерігатись у жодному обчислювальному експерименті в серії.

3. На основі імітаційного моделювання встановлено, що залежності математичного очікування швидкості та часу скочування від режимів гальмування на межах області D_{st} мають s-подібну форму. Така форма залежностей пов'язана з обмеженими можливостями гальмових позицій керувати швидкістю скочування відчепів. Залежності середнього квадратичного відхилення швидкості та часу скочування від режимів гальмування мають складну немонотонну форму. Така форма залежності є наслідком нелінійного зв'язку між швидкістю та опорами руху в умовах одночасної зміни швидкості руху та частки керуємих реплік відчепа.

4. Розроблено алгоритм ідентифікації вершин та обмежень області допустимих режимів скочування відчепів. Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють

підвищити ефективність алгоритмів управління процесом розформування-формування поїздів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сортивальні пристрої залізниць. Норми проектування. ГБН В.2.3-37472062-1:2012: Схвалено: рішенням Мінрегіонбуду України 11.09.2012 р. № 140. – Київ, 2012.
2. Бобровський В. І., Дорош А. С., Демченко Є. Б. Імітаційна модель процесу розпуску составів на сортувальних гірках. *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2015. , № 49(1158). С. 94–98.
3. Жуковичський І.В. Розв'язання диференціального рівняння вільного скочування відчепа з гірки. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 1997. № 4. С. 14–17..
4. Meng L. J., Zhang C. Computer Implementation of Hump Checking. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 584-586. P. 1913–1916. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1913>
5. Mathematical model for defining rational constructional technological parameters of marshalling equipment used during gravitational target braking of retarders / M. Mezitis et al. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 288–296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.137>.
6. Moczariski J. Modeling and Simulation in the Research of Automatic Wagon Shunting Control Systems. *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means 2020, Part 1*, Kaunas, 30 September – 2 October 2020. Kaunas, 2020. P. 81–84.
7. A method of complex calculation of rational structural parameters of railway humps / S. Panchenko et al. *Acta Polytechnica*. 2018. Vol. 58, no. 6. P. 370–377. URL: <https://doi.org/10.14311/ap.2018.58.0370>
8. Zhang H., Yang J., Yang T. Multiobjective Optimization Model for Profile Design of Hump Distributing Zone. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/9318025>
9. Козаченко, Д. М. Моделювання скочування відчепа як динамічної системи взаємопов'язаних вагонів. *Зб. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. т-ту*. 2009. № 20. С. 5–15.
10. Using the New Car Braking Systems in Marshalling Yards / O. Ohar et al. *ICTE in Transportation and Logistics 2019*. Cham, 2020. P. 203–210. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_27
11. Evaluation of the railway traffic safety level using the additive resultant indicator / O. Ohar et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, №. 3 (90). P. 48–57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119237>
12. Sasor, M., Wydrych, J. Using fuzzy logic in order to determinate cut's out speed from wagon retarder-practical experiments. *Transport System Telematics*, Katowice-Ustron, 4–6 November 2004. Zeszyty Naukowe. Transport, 2004. P. 375–380.

13. Zarecky, S., Grun, J., Zilka, J. The newest trends in marshalling yards automation. *Transport Problems*, 2008, №3(4), 87–95.

14. Analysis of hump automation in China. / C. Zhang et al. *Proceedings of the Second International Conference on Transportation and Traffic Studies*, Beijing, 31 July – 2 August 2000. 2000. P. 285–290. URL: [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)45](https://doi.org/10.1061/40503(277)45)

15. Бобровський В. І., Кудряшов А. В. Оптимізація режимів розформування составів на сортувальних гірках. *Наука та прогрес транспорту*. 2010. №. 32. P.224–229. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13436>

16. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the gravity humps / V. Bobrovskyi et al. *Transport Problems*. 2016. №. 11 (1). P. 147–155. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>

17. 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. *MATEC Web Conf. Volume 390, 2024*, Lviv, 9–10 November 2023. 04001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004001>.

18. Kozachenko D., Bobrovskyi V., Demchenko Y. A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26, no. 3. P. 189–199. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0161-2>.

19. Оптимізація режимів гальмування відцепів на сортувальних гірках : монографія / В. І. Бобровський та ін. Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький, 2010. 260 с.

20. Computer methods for mathematical computations / ed. by Malcolm, Michael A., 1945- joint author., Moler, Cleve B., joint author. Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, 1977. 259 p.

Надійшла в редколегію 12.09.2025

Прийнята до друку 19.11.2025

O. KLYGA

DOMAIN OF ADMISSIBLE HUMP BRAKING MODES UNDER STOCHASTIC CONDITIONS

Purpose. The purpose of this study is to establish relationships between the braking modes of cuts on sorting humps and the parameters of random variables of cut speed and rolling time. **Methodology.** The research in this work is performed based on the methods of the theory of railway operation, mathematical statistics, and simulation modeling. **Results.** Despite the long history of research on humping processes and the availability of a significant volume of field observation data and experiments to determine the distribution parameters of random variables of wagon characteristics, there is a gap in scientific methods for assessing the influence of cut braking modes on the distribution parameters of random variables of speed and rolling. The development of such methods will significantly simplify the solution of the applied problem of searching for safe humping modes depending on the technical equipment of the humps. The determination of random variables of speed and rolling time in the study is performed based on the results of a series of simulation experiments processed by methods of mathematical statistics. Admissible cut braking modes form a closed domain. It was established that the dependencies of the mathematical expectation of speed and rolling time at the boundaries of the domain of admissible modes are represented by s-shaped curves. This form of dependencies is associated with the limited capabilities of braking positions to control the rolling speed of cuts. The dependencies of the standard deviation of speed and rolling time on braking modes have a complex non-monotonic form. This form of dependency is a consequence of the non-linear relationship between speed and motion resistances under conditions of simultaneous changes in speed and the proportion of controlled cut replicas. The paper presents algorithms for searching for the vertices of the domain of admissible braking modes based on computational experiment data. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the improvement of the method for constructing domains of admissible cut rolling modes. Unlike previous methods, in this work, the assessment of compliance with the requirements for regulating the rolling of cuts is carried out with a given statistical reliability. **Practical value.** The practical significance of the results is that they allow increasing the efficiency of control algorithms for the train sorting process.

Keywords: railway transport, freight transportation, marshalling yard, sorting hump, mathematical modeling.