

УДК 656.212.5

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ГРЕВЦОВ<sup>2\*</sup>, О. В. КЛИГА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта: dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</sup> Каф. «Транспортні технології», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 32, м. Львів, Україна, 79052, тел. +38 (067) 771 77 59, ел. пошта: serhii.v.hrevtsov@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-2925-4293

<sup>3\*</sup>Каф. «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

## РОЗВИТОК МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СКОЧУВАННЯ ВІДЧЕПІВ ІЗ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК

**Мета.** Метою цієї статті є проведення історичного аналізу розвитку методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок та визначення напрямків їх удосконалення для вирішення задач, що сьогодні стоять перед залізничним транспортом України. **Методика.** Дослідження виконані на підставі обробки літературних джерел бібліотеки Українського державного університету науки та технологій, а також наукометричних баз Scopus та Google Scholar. **Результати.** Основним елементом процесу розформування составів на сортувальних гірках є процес керованого скочування вагонів. Зародження методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок відбулося на початку 20-го сторіччя, коли вони виділилися із методів тягових розрахунків. До середини 20-го сторіччя моделювання скочування відчепів здійснювалося з метою вирішення задач проектування сортувальних гірок. Для цього періоду характерним є моделювання скочування поодиноких вагонів в відомих умовах. Ускладнення методів моделювання роботи сортувальних гірок пов'язано з задачами автоматизації управління скочування відчепів. З цією метою були вирішені задачі встановлення законів та параметрів розподілу випадкових величин що опору, що діють на відчепа, врахування зміни поздовжнього профілю колії під відчепом, моделювання роботи гальмових уповільнювачів та систем управління ними та ін. Сучасні умови функціонування сортувальних гірок України характеризуються значним зменшенням обсягів роботи. **Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній на підставі історичного аналізу розвитку методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок встановлені зв'язки між умовами роботи залізничного транспорту та методами моделювання гіркових процесів. **Практична значимість.** Практична значимість результатів полягає в тому, що вони вказують на необхідність розвитку методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок за неточної інформації про їх ходові характеристики та умови скочування. Це дозволить підвищити ефективність роботи сортувальних гірок без значних капітальних вкладень у системи управління розпуском.

*Ключові слова:* залізничний транспорт, сортувальна гірка, розформування составів, скочування відчепів, моделювання

### Вступ

Сортувальні гірки являють собою складні системи, в процесі функціонування яких взаємодіє значна кількість об'єктів. Принципово визначення експлуатаційних показників цих систем можливо на підставі експериментів з реально діючими гірками. Однак наведені експерименти пов'язані із значними витратами коштів і тимчасовим виведенням гірок з експлуатаційної роботи. Тому основою сучасних методів оцінки сортувального процесу є математичне моделювання розформування составів. Результати такого моделювання використовуються на стадії проектування сортувальних гірок, оцінки ефективності їх механізації, при розробці автоматизованих систем управління розформуванням, а

також в експлуатаційній роботі при аналізі техніко-експлуатаційних показників роботи сортувальних гірок, при дослідженні випадків порушення безпеки руху, при навчанні оперативного персоналу та ін. У зв'язку з цим дослідження методів моделювання розформування составів поїздів на сортувальних гірках є актуальною задачею для залізничного транспорту.

### Мета

Метою цієї статті є проведення історичного аналізу розвитку моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок та визначення напрямків їх удосконалення для вирішення задач, що сьогодні стоять перед залізничним транспортом України.

## Методика

В цьому дослідженні сортувальна гірка розглядається як система, що знаходиться у взаємодії з іншими підсистемами залізничної станції і з'єднана з ними множиною прямих та зворотних зв'язків, які змінюються у часі. Характеристика сортувальної гірки як системи наведена у табл. 1.

Таблиця 1

### Характеристики сортувальної гірки як системи

Класифікаційна ознака	Клас системи
Природа елементів	Реальна
Походження	Штучна
Мінливість властивостей	Динамічна
Передбачуваність станів	Стохастична
Характер поведінки	З управлінням
Ступінь складності	Складна
Ступінь зв'язку з зовнішнім середовищем	Відкрита
Ступінь участі людини у реалізації керуючих впливів	Ергатична

Цілями сортувальної гірки як системи є забезпечення розформування-формування потоку составів поїздів у заданому темпі з мінімальними експлуатаційними витратами та при безумовному дотриманні умов безпеки руху.

Дослідження у цій роботі виконані на підставі обробки літературних джерел бібліотеки Українського державного університету науки та технологій, а також наукометричних баз Scopus та Google Scholar.

## Результати

Розформування-формування составів вантажних поїздів є одним із найбільш масових видів маневрової роботи. З цією роботою пов'язані значні витрати часу та палива. Тому розробка технічних засобів для підвищення ефективності розформування-формування составів поїздів почалися ще на етапі становлення залізничного транспорту. В ході перших років експлуатації залізниць було встановлено, що ухил колії в сторону сортувальних колій створює умови для самостійного руху вагонів та прискорює їх сортування. Історична довідка про розвиток сортувальних гірок наведена в роботах [1, 2]. Основні інноваційні рішення в цьому напрямку були здійснені у 19-му сторіччі у Німеччині. В 1846 році в Німеччині у Дрездені була побудована станція на суцільному ухилі, що зменшувало участь локомотивів при сортуванні вагонів. Можливість побудови станцій на суцільному ухилі суттєво обмежена рельєфом місцевості тому

були конструкція сортувального пристрою продовжувала удосконалюватись. Перша сортувальна гірка сучасної конструкції з протиухилом та площадкою на вершині гірки була побудована на станції Speldorf в 1876 році. У США перша сортувальна гірка була побудована в 1982 році, у Франції у 1888 р. З тих часів сортувальні гірки почали розвиватися і на сьогодні вони стали основним технічним засобом, що забезпечує розформування-формування составів вантажних поїздів.

Поява методів моделювання розформування-формування составів поїздів на сортувальних гірках була пов'язана з необхідністю вирішення задач проектування і припадає на початок 20-го сторіччя. Необхідно відмітити, що рух вагонів на сортувальних гірках підкоряється тим же самим фізичним законам, що і їх рух у складі поїздів. Тому методи моделювання руху вагонів на сортувальних гірках розвивалися як спеціальні методи тягових розрахунків теорії тяги поїздів. Наукові методи теорії тяги поїздів розвивалися у другій половині 19-го сторіччя. Зокрема у 1858 р. була опублікована праця професора Добронравова «Загальна теорія парових машин та теорія паровозів», де він навів рівняння руху поїзда та детально розглянув складові сил опору руху. Детальні дослідження опорів руху залізничного рухомого складу наведено у 1889 р. в роботі Петрова [3].

Перший етап розвитку методів моделювання скочування відцепів з сортувальної гірки пов'язаний з вирішенням задач їх проектування. Зокрема перший розрахунок висоти сортувальної гірки був опублікований Фроловим у роботі [4]. Методика розрахунку швидкості скочування одиночного відчепа була опублікована Дубеліром у 1910 р. [5]. Метою розрахунку було вирішення задачі проектування поздовжнього профілю сортувальної гірки та сортувального парку. При цьому поздовжній профіль було розділено на три ділянки: спускна частина гірки, стрілочна зона та сортувальні колії. Відцеп розглядався як матеріальна точка.

Формування сучасного підходу до моделювання процесу скочування відцепів з сортувальної гірки здійснено Образцовим в 1928 в роботі [6]. Так же як і Дубелір в роботі [5] Образцов при моделюванні руху вагонів ґрунтувався на методах тягових розрахунків для поїзної роботи. Однак ним було вказано на суттєві відмінності в умовах руху вагона в составі поїзда та під час скочування з гірки, що викликає необхідність розробки спеціальних методів розрахунку. В

якості основного рівняння руху в роботі використано формулу

$$P = mv \frac{dv}{ds'}$$

де  $P$  – рушійна сила;  $m$  – маса відчепа;  $s$  – відстань скочування.

Рушійна сила в цій формулі визначається за виразами

$$P = F - W,$$
$$F = Q \sin \alpha_n,$$

$$W = Qw_0 + 0,07 f_b (v + v_b)^2 + 0,75 \frac{Q}{R},$$

де  $F$  – проекція ваги вагона на площину скочування відчепа;  $W$  – сила опору руху відчепа;  $\alpha_n$  – кут нахилу;  $w_0$  – основний питомий опір руху вагона;  $f_b$  – площа поперечного перетину вагона;  $v_b$  – швидкість вітру;  $Q$  – вага відчепа;  $R$  – радіус кривої.

В роботі наведено три методи вирішення рівняння руху: графічний (метод Ліпеца), спрощений графічний та аналітичний метод. На відміну від роботи [5] в роботі [6] виконується побудова залежності часу скочування відчепа від відстані та сформульована задача перевірки умов розділення відцепів на стрілочних переводах. На відміну від методики тягових розрахунків для поїзної роботи та від [5] в роботі [6] опір повітря враховується не разом з основним опором руху вагонів, а разом з опором вітру. Тому значення основного питомого опору руху вагонів при виконанні гіркових розрахунків не залежить від швидкості руху. Також в [6] викладено порядок виведення формули для визначення опору руху від кривих на підставі формули з методики тягових розрахунків для поїзної роботи.

Порівняння підручників [7] та [8] показує, що методи моделювання скочування відцепів для вирішення задач проектування сортувальних гірок цілісно сформувалися в 30-х роках ХХ-го сторіччя. Так в підручнику «Залізничні станції» проф. Карейші 1930-го року [7] наведено лише опис загальних принципів проектування сортувальних гірок. В той час як у підручнику проф. Образцова 1938-го року [8] наведена цілісна методика проектування сортувальних гірок і, зокрема, методів моделювання скочування відцепів. В основу методики [8] була покладена робота [6]. На відміну від [6] в [8] уже враховувались опори від ударів в стрілках, а також наведена методика визначення опору гальмових уповільнювачів. Також, додатково до методів графічного моделювання руху із [6] в роботі [8]

наведено табличний метод моделювання скочування вагонів, в основу якого покладено чисельний метод рішення рівняння руху. Методика Образцова була покладена в основу діючих на той час правил проектування залізниць. В цілому методика, що наведена в [8], відповідає сучасним методам моделювання руху вагонів на сортувальних гірках. Однак вона розглядає сортувальну гірку як детерміновану систему, коли параметри гірки, відцепів та навколишнього середовища точно відомі. Методика [8] була орієнтована виключно на моделювання руху одновагонних відцепів як матеріальних точок. При цьому поздовжній колій гірки задавався ламаючою лінією, перевірка умов розділення здійснювалася лише на стрілочних переводах на ділянках від гостряків до граничних стовпчиків, опори руху вагонів в ній визначаються досить спрощено.

Другий етап розвитку методів моделювання скочування відцепів з сортувальної гірки пов'язаний з вирішенням задач автоматизації управління розпуском составів, урахуванням її вимог та оцінкою їх ефективності під час проектування.

Технічною основою для автоматизації розформування составів було впровадження в роботу залізниць вагонних уповільнювачів, гіркової автоматичної централізації та електронно-обчислювальних машин.

Уповільнювачі для сортувальних гірок вперше було запатентовано у 1923 в США [9]. При цьому значне підвищення переробної спроможності сортувальних станцій за рахунок механізації управління швидкістю скочування відцепів викликало бурхливий розвиток цих пристроїв. Тому до 1935 року було винайдено переважну кількість конструкцій вагонних уповільнювачів, які використовуються і до теперішнього часу. У 40-х роках 20-го сторіччя почалося впровадження систем автоматичного управління швидкістю скочування відцепів на сортувальних гірках. Першою в світі станцією, обладнаною такою системою була збудована у 1948 році станція North Platt (США) [10, 11].

При вирішенні задачі автоматичного управління розформування реальних составів виник цілий ряд додаткових проблем у порівнянні з задачами проектування. Так при проектуванні сортувальних гірок використовують розрахункові параметри вагонів та умов навколишнього середовища. В той же час в задачах управління розпуском составів ці параметри повинні відповідати умовам скочування конкретного відчепа. Опір руху вагонів залежить від великої кількості

факторів і являє собою випадкову величину, що суттєво впливає на ходові характеристики відчепів. Тому виникли задачі уточнення ходових характеристик відчепів. Так з метою удосконалення методів моделювання розпуску составів у 1965 під керівництвом Ющенка було виконано оцінку основного та додаткового опору руху восьмивісних вагонів [12]. Питанням розробки методів оцінки ходових характеристик відчепів в оперативних умовах та їх точності присвячені роботи [13-19]. Масштабні дослідження по встановленню опорів руху вагонів були виконані у 1975 році Всесоюзним науково-дослідним інститутом залізничного транспорту [20]. В ході виконаних спостережень, експериментальних та теоретичних досліджень були встановлені залежності для визначення опорів руху відчепів під час їх скочування. Результати цих досліджень були покладені в основу Правил та норм проєктування сортувальних пристроїв на залізницях Союзу РСР [21]. Необхідно відмітити, що в [21] були наведені вирази для моделювання основного питомого опору відчепів та опору руху відчепів від стрілок та кривих як випадкових величин. Однак відсутність таких же виразів для визначення опору руху від середовища та вітру і від гальмових засобів не дозволяє побудувати адекватну модель скочування відчепів, що враховує дію випадкових факторів.

Дослідження по встановленню опорів руху залізничних вагонів на сортувальних гірках США та по розробці методів розрахунку їх величини представлені в [22].

Керованим параметром під час скочування відчепів є опір гальмових уповільнювачів чи гальмових башмаків. Починаючи від перших моделей і до діючих на сьогодні в Україні галузевих будівельних норм «Споруди транспорту: сортувальні пристрої залізниць» [23] при вирішенні задач проєктування питомий гальмовий опір визначався на підстав розрахункового значення питомої потужності уповільнювача чи гальмового башмака, заданої в метрах енергетичної висоти. При цьому, величина цього опору враховувалася рівномірно в зоні дії уповільнювача чи башмака. Така модель суттєво відрізняється від реального процесу гальмування відчепів, що є джерелом похибок. По-перше, процес гальмування підлягає впливу великої кількості випадкових факторів, тому гальмовий питомий опір уповільнювача чи башмака являє собою випадкову величину і точне його значення є невідомим. По-друге, процес гальмування відчепів відбувається через взаємодію уповільнювача чи

башмака з окремими колесами вагонів, а не відчепів в цілому. Гальмові уповільнювачі діють на колеса під час їх проходження повною гальмовою потужністю на певному ступені гальмування від моменту приведення їх в робочий стан, до моменту вимкнення. Через це процес гальмування відчепів не є рівномірним, а залежить від конструкції гальмових засобів. Рішення по початок, зміну ступеня та закінчення гальмування приймає оператор сортувальної гірки чи алгоритм управління уповільнювачем. Рішення про укладання додаткового гальмового башмака приймає регулювальник швидкості. Тому процес гальмування є керуємим. При цьому в реальних системах реалізація рішення щодо зміни режиму гальмування відчепів відбувається з деякою похибкою. Узагальнення результатів спостережень та експериментів з гальмовими уповільнювачами на діючих станціях наведені в роботі Мухи та ін. [24].

Одним із методів врахування випадкового питомого опору та похибок реалізації заданого режиму гальмування є встановлення швидкості виходу відчепів із гальмової позиції що відрізняється від заданої на випадкову величину  $\Delta v$ . Величина  $\Delta v$ , як правило, моделюється за нормальним законом розподілу. Такий підхід реалізовано зокрема в роботах [25, 26]. Перевагою вказаного методу є його простота, Недоліки пов'язані з тим, що оптимальні швидкості скочування відчепів, як правило, відповідають областям мінімальних та максимальних режимів гальмування відчепів, в яких швидкість виходу має відмінний від нормального закон розподілу. Також в моделях не враховується залежність між швидкістю руху відчепів та величиною похибки її реалізації, хоча на низьких швидкостях руху час взаємодії вагонів та уповільнювачів є більшим, що дозволяє більш точно реалізувати задану швидкість виходу. Моделі гальмових уповільнювачів, в залежності від їх конструкції (натискні, вагові, з плоско-паралельною схемою) представлені в монографії Бобровського та ін. [27]. Моделі пасивних точкових уповільнювачів представлені в роботі Назарова [28]. Принципи роботи систем управління уповільнювачами, як правило, являють собою комерційну таємницю і принципи їх дії опубліковані лише в роботах окремих авторів. Зокрема, результати детальних теоретичних досліджень побудови систем управління балковими уповільнювачами наведені в монографії Жуковицького [29].

Точність вирішення задач управління розформуванням составів вимагає удосконалення поділу маршруту скочування відчепів на ділянки, в межах яких діють ті чи інші сили. В цих умовах моделі скочування, в яких відчепа розглядаються як матеріальні точки, стають не адекватними або громіздкими. Методи моделювання руху багатовагонних відчепів розроблено в роботах Мухи [30] та Шафіта [31]. Найбільш точно оцінювати сили, що діють на відчеп під час його скочування дозволяє осьова модель відчепа запропонована Мухой та Бобровським у [32]. В цій моделі відчеп розглядається як нерозтяжний гнучкий стержень, що представляє собою систему шарнірно з'єднаних матеріальних точок, які відповідають окремим колісним парам вагонів. Експерименти із більш складними моделями в яких розглядаються процеси переміщення окремих вагонів у відчепі, а також вантажів у вагонах [33] показали, що ці процеси несуттєво впливають на швидкість та час руху. Через громіздкість використання таких моделей в задачах управління розпуском составів є недоцільним. Областю використання цих моделей є дослідження випадків порушення безпеки руху [34].

Джерелом похибок при визначенні швидкості та часу скочування відчепів є метод представлення поздовжнього профілю гірки. Поздовжній профіль реальних сортувальних гірок складається з прямолінійних ділянок та вертикальних кругових кривих. В перших моделях [5, 6] скочування відчепів поздовжній профіль колії задавався прямолінійними відрізками між вершинами кутів повороту вертикальних кривих. При виконанні моделювання скочування відчепів через спотворення профілю розрахунки швидкості та часу скочування в окремих точках маршруту здійснюються з похибкою. Одним із методів подолати цієї проблеми є кусочно лінійна апроксимація поздовжнього профілю, або його задання у вигляді відрізків та дуг. Подібна методика представлена у роботі Огаря та ін. [35]. Такий підхід дозволяє використовувати при моделюванні опис поздовжнього профілю, що відповідає реальному. В той же час функція, що описує поздовжній профіль, має розриви першої і другої, або другої похідної, що не дозволяє використовувати аналітичні методи рішення диференціального рівняння руху. Для подолання цієї проблеми Шафітом у [36] було запропоновано використовувати для апроксимації поздовжнього профілю неперервні криві, зокрема поліномами четвертого ступеня. Подібний підхід використано також в роботах [37, 38]. Дослідження,

виконані в [36], показали, що похибка при розрахунку швидкості та часу скочування відчепа є такою ж як і при кусочно-лінійній апроксимації. Загальним недоліком апроксимації поздовжнього профілю гірки неперервними кривими (парабола, експонента, циклоїда) є те, що отримані профілі відрізняються від реальних профілів гірок, що як наслідок приводить до похибок. Проблема представлення профілю сортувальної гірки для використання аналітичних методів рішення рівняння руху відчепа була вирішена Бобровським в [39]. В цій роботі викладено метод представлення поздовжнього профілю за допомогою модифікованого кубічного сплайну, що з однієї сторони дозволяє забезпечити неперервність першої та другої похідних, а з іншої – відповідність функції реальному профілю гірки.

Виконання багаторазових моделювань скочувань відчепів потребує удосконалення методу вирішення рівняння руху. Починаючи з перших моделей для встановлення параметрів руху залізничного рухомого складу для його вирішення застосовувались два підходи, коли змінною є відстань, чи час. Зокрема, рівняння руху в якому змінною є шлях представляється виразом:

$$ds = \frac{1000dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{ck}(v) - w_{cb}(v) - b_r(s, r))}, \quad (1)$$

в якому змінною є час, представлений виразом:

$$dt = \frac{1000dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{ck}(v) - w_{cb}(v) - b_r(s, r))} \quad (2)$$

В перших моделях рівняння руху відчепа вирішувалось вручну чисельними або аналітичними методами [6]. Точність цих методів суттєво залежить від кількості ділянок, на яку розбивається маршрут скочування. Тому підвищення точності рішення напряму залежить від витрат часу на розрахунки. Враховуючи, що задача моделювання скочування відчепів вирішувалась під час проектування, то для спрощення її розв'язання було розроблено різноманітні графічні та графоаналітичні методи, наприклад представлений в роботі Ющенко [40]. Поява в середині 20-го сторіччя електронних обчислювальних машин дозволила зняти проблему виконання рутинних розрахунків у різноманітних галузях, зокрема і в галузі моделювання скочування відчепів з сортувальних гірок. Однак швидкодія існуючих на той час комп'ютерів дозволяла автоматизувати лише окремі задачі проектування поздовжнього профілю гірки [41]. При виконанні масових розрахунків під час техніко-економічної оцінки варіантів конструкції

гірки, а особливо в задачах реального часу управління скочування відчепів тривалість розрахунків була неприпустимою. Тому розробка аналітичних методів вирішення рівняння руху відчепів була продовжена, наприклад у роботах [42-44]. Найбільш точне рішення рівняння руху наведено в роботі Жуковицького [45]. Так як залежність сил опору руху від відстані скочування являє собою кусочно задану функцію, то аналітичні рішення передбачають спрощення, які знижують точність отриманих рішень. Через це в сучасних умовах аналітичні методи рішення рівняння руху відчепів застосовуються лише при виконанні теоретичних досліджень. Комбінований метод рішення рівняння руху відчепів запропоновано Бобровським у [46]. Так же як і чисельні методи в [46] пропонується розбивати маршрут скочування на ділянки де характер дії на відчеп зовнішніх сил залишається постійним. В межах кожної з ділянок рішення рівняння руху відчепів отримують аналітичним методом Рунге-Кутта II-го чи IV порядку. Такий підхід з одного боку забезпечує точність, необхідну для практичних розрахунків, а з другого, через відносно велику протяжність ділянок, і необхідну для практичних розрахунків швидкість отримання рішення.

Під час руху відчепів сортувальними коліями відбувається його складна взаємодія з вагонами, що на ній знаходяться. Моделювання таких процесів описано в роботі [47].

Сортувальна гірка є керованою системою. Тому швидкість та час скочування відчепів суттєво залежать від обраних режимів гальмування. До впровадження цифрових електронних обчислювальних машин здійснювалися спроби вирішення задачі автоматизації управління швидкістю скочування відчепів шляхом встановлення швидкості виходу відчепів з гальмових позицій на підставі їх вагової категорії [48], або вирівнювання швидкості їх руху [49]. Однак для сортувальних гірок традиційної конструкції вказані підходи не дозволили вирішити проблему.

В загальному випадку проблема управління швидкістю скочування відчепів передбачає вирішення задач прицільного та інтервального регулювання. Одним із підходів, який застосовується при виборі режимів гальмування є використання алгоритмів управління реальних автоматизованих систем. Такий підхід реалізовано, зокрема в [50, 51]. Однак на сьогодні в світі переважна частина гірок залишаються неавтоматизованими, а алгоритми функціонування автоматизованих систем переважно є комерційною таємницею. Тому актуальною є задача розробки

загальних методів вибору режимів гальмування. Методика оптимізації режимів гальмування була запропонована Мухом у [52]. В цій роботі була сформульована задача пошуку таких режимів гальмування, при яких виконуються умови розділення відчепів по маршрутам скочування, а загальний час розпуску був би мінімальним. В результаті формалізації була отримана оптимізаційна задача з лінійною цільовою функцією та нелінійними обмеженнями. Значний обсяг досліджень по формалізації та розробці алгоритмів пошуку оптимальних режимів гальмування виконано Бобровським. В ході досліджень встановлено існування областей допустимих режимів гальмування відчепів. В роботі [53] доведено, що при відомих параметрах відчепів та умовах їх скочування оптимальні режими гальмування завжди досягаються на межі області допустимих режимів гальмування, що дозволяє представляти режим гальмування відчепів одним числом. В якості ефективного методу пошуку оптимальних режимів гальмування в роботах [55, 56] запропоновано ітераційний метод. Цей метод являє собою метод прямого пошуку заснований на ідеї виділення розрахункових сполучень відчепів та вирівнювання інтервалів між ними. Недоліком такого підходу є те, що він реалізує вирішення задачі в детермінованій постановці.

Методи вирішення задачі вибору режимів гальмування відчепів в стохастичній постановці наведено в роботах [54, 57]. Необхідно відмітити, що на відміну від [53] де область допустимих режимів гальмування відчепів з відомими характеристиками побудована на підставі теоретичних досліджень, в [54] область допустимих режимів гальмування відчепів з випадковими характеристиками отримана лише на підставі узагальнення даних експерименту. Тому проблема побудови областей допустимих режимів гальмування вимагає додаткових досліджень.

Характерною рисою сучасних умов експлуатації сортувальних гірок України є значне зменшення обсягів роботи у порівнянні з тими, для яких вони були запроектовані. В той же час їх технічні засоби є суттєво зношеними [58]. Тому вирішення задачі управління розпуском составів в стохастичних умовах необхідне в першу чергу не для побудови автоматизованих систем управління гірок, а для організації безпечної роботи існуючих сортувальних гірок з механізованими та не механізованими гальмовими позиціями.

## Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній на підставі історичного аналізу розвитку методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок встановлені зв'язки між умовами роботи залізничного транспорту та методами моделювання гіркових процесів.

Практична значимість результатів полягає в тому, що вони вказують на необхідність розвитку методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок за неточної інформації про їх ходові характеристики та умови скочування. Це дозволить підвищити ефективність роботи сортувальних гірок без значних капітальних вкладень у системи управління розпуском.

## Висновки

1. Методи моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок з'явилися на початку ХХ-го сторіччя як спеціальні методи тягових розрахунків теорії тяги поїздів. Виділення їх із методів тягових розрахунків у окрему групу методів виконано академіком Образцовим. Початковий етап формування методів моделювання скочування відчепів із сортувальних гірок пов'язаний із вирішенням задач проектування. Його характерними рисами були використання спрощених моделей та ручних розрахунків.

2. Впровадження механізованих засобів регулювання швидкості скочування вагонів з однієї сторони та поява електронно-обчислювальних машин з іншої створили в середині ХХ-го сторіччя умови для автоматизації управління розформуванням составів поїздів на сортувальних гірках. Необхідність вирішення задач управління швидкістю відчепів в реальному часі призвело до суттєвого ускладнення математичних моделей скочування відчепів за рахунок уточнення сил, що діють на відчепа та більш досконалих методів вирішення рівняння руху відчепів.

3. Характерною рисою сучасних умов експлуатації сортувальних гірок України є значне зменшення обсягів їх роботи у порівнянні з тими, для яких вони були запроєктовані. Тому основний напрямок наукових досліджень удосконалення моделей скочування відчепів повинен бути пов'язаний не з проблемою збільшенням переробної спроможності гірок, а проблемами підвищення безпеки та зниження собівартості сортувального процесу. В цих умовах актуальною задачею є удосконалення методів

функціонального моделювання гірки як стохастичної системи в цілому і удосконалення моделей скочування відчепів в умовах відсутності точної інформації про їх ходові характеристики та умови скочування зокрема.

## БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Droege, J. A., Freight terminals and trains. New York [etc.]: McGraw-Hill Book Company, 1912, 465 p. <https://archive.org/details/freightterminal04droeogoo/page/64/mode/2up>
2. Берндт Т., Власенко С. В. Сортировочные горки на железных дорогах мира. *Автоматика, связь, информатика*. 2007. № 6. С. 45-48.
3. Петров Н., Сопротивление поезда на железной дороге. Санкт-Петербург: Типография В. Демакова, 1889. - 394 с.
4. Фролов А. Н., Сборник статей, касающихся станций и маневров. Саратов. 1906. 143 с.
5. Дубелир Г.Д., О проектировании горок для сортировочных станций. Санкт-Петербург: 1910. 9 с.
6. Образцов В.Н., К вопросу о тяговых расчетах сортировочных горок. *Труды МИИТа*. 1928. Вып.9. С. 129 - 152.
7. Карейша С. Д., Железнодорожные станции: Посobie для учебных заведений транспорта. Москва: Транспечать НКПС, 1930. 305 с.,
8. Образцов В. Н., Станции и узлы. Ч.2. Москва: Трансжелдориздат. 1938. 492 с.
9. American railway signaling principles and practices. Chapter XXI, Hump Yard Systems. Signal Section. New York: AAR. 1935, 89 p. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015026081862&view=1up&seq%0B=845&seq=893>
10. Builds second large retarder yard to improve operations. *Railway age*. 1948. October 30. P. 88-91. [https://archive.org/details/sim\\_railway-age\\_1948-10-30\\_125\\_18/page/794/mode/2up](https://archive.org/details/sim_railway-age_1948-10-30_125_18/page/794/mode/2up)
11. Автоматическое управление роспуском вагонов с сортировочной горки. *Железнодорожный транспорт*. 1955. №11. С. 88-90.
12. Ющенко Н.Р., Шафит Е.М., Третьяк Б.А., Иванков Н.М., Сопротивление движению восьмиосных вагонов при скатывании с сортировочной горки. *Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок*. Москва: Транспорт. 1966. С. 18-27.
13. Красовский Г.А., Автоматизация процесса определения ходовых свойств отцепов в системе горочной автоматизации. Диссертация к.т.н. Москва: ЦНИИ МПС. 1958. 223 с.
14. Ваванов Ю.В., Фонарев Н.М., Методы измерения ускорений отцепов и анализ их погрешностей. *Вестник ВНИИЖТа*. 1967. №8. С. 22-25.
15. Рудановский В.М., Об определении удельных сопротивлений движению вагонов на путях с переменным уклоном. *Вестник ВНИИЖТа*, 1969. №1. С. 46-50.

16. Страковский И.И., Тишков Л.Б., Об измерительном участке для определения ходовых свойств вагонов на сортировочных горках. *Вестник ВНИИЖТа*. 1975. №5. с.54-59.
17. Муха Ю. А., Павловский А. И., Динамика скатывания отцепов с горки и проблема оценки их ходовых свойств. *Труды ДИИТа*. 1981. Вып. 216/14. С. 37-47.
18. Павловский А.И., О погрешностях оценки ходовых свойств отцепов на измерительном участке. *Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Сб. научн. тр. ДИИТа*. 1981. Вып. 216/14. с.61-68.
19. Жуковицкий И.В., Устенко А.Б., Использование метода статистических решений для повышения точности идентификации ходового сопротивления отцепов. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2020. Вип. 19. С.55-59. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2020/208696>
20. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок. *Труды ВНИИЖТа*. Москва: Транспорт. 1975. 151 с.
21. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207 – 89. Москва: Транспорт. 1992. 104 с.
22. Wong P.J., Stock W.A., Hackworth M. A. et al., Railroad classification yard technology manual – Volume III: Freight Car Rollability. Springfield: National Technical Information Service. 1981. 160 p. <https://rosap.nsl.gov/view/doc/32570>
23. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування. ГБН В.2.3-37472062-\_:201\_ [Текст]: Схвалено: рішенням Мінрегіонбуду України 11.09.2012 р. № 140. – Київ, 2012.
24. Муха Ю.А., Харланович И.В., Шейкин В.П. и др., Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях. Москва: Транспорт. 1985. 248 с.
25. Козаченко Д. М., Березовий М. І., Таранець О. І., Моделювання роботи сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відцепів та характеристик навколишнього середовища. *Вісник ДНУЗТ*. 2007. Вип. 16. С. 73-76.
26. Кудряшов А. В., Дослідження впливу різних факторів на величину інтервалів на розділових стрічках. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ"*. 2015. № 11 (1120). С. 57-62.
27. В.И. Бобровский, Д.И. Козаченко, И.И. Божко и др., Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках: Монография. Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2010. 260 с.
28. Назаров О. А. Підвищення ефективності сортувального процесу на гірках шляхом впровадження систем розподіленого регулювання швидкості відцепів: автореф. Дисертація к. т. н. Дніпропетровськ: ДНУЗТ. 2012. 157 с.
29. Жуковицкий И. В., Цифровые системы управления скоростью скатывания отцепов на сортировочных горках : монография. Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2012. – 203 с.
30. Муха Ю. А., Построение кривых скорости скатывания длинных отцепов с сортировочной горки и сравнение этих кривых с опытными. *Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок: Труды ДИИТа*. 1962. Вып. 41. С. 85-110.
31. Шафит Е.М. Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля. *Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок: Труды ДИИТа*. 1965. Вып. 52. С. 55 - 72.
32. Муха Ю.А., Бобровский В.И., Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири - К» сортировочного процесса на горках. *Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа*. 1977. Вып. 194/11. С. 53 - 102.
33. 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.
34. Козаченко, Д. Н. Устойчивость вагонов при торможении замедлителями / Д. Н. Козаченко, С. А. Пожидаев, К. И. Железнов // *Транспортні системи та технології перевезень*. 2015. Вип. 10. С. 57–63. – DOI: 10.15802/tstt2015/57068.
35. Огар, О. М., Бантюков, С.Є., & Антуф'єва, М. В., Математичний опис плану і поздовжнього профілю елементів сортувального комплексу в імітаційних моделях гіркових технологічних процесів. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010. Том 2/3(44). С. 53–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2640>
36. Шафит Е. М., Аппроксимация продольного профиля сортировочных горок *Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок: Труды ДИИТа*. 1965. Вып. 52. С. 35 - 54.
37. Ахвердиев К.С., Алибеков Б.И., Жуков В.П., Оптимальный горочный профиль и динамика скатывания отцепа по нему. *Транспорт: наука, техника, управление*. 1991. №8. С. 13 - 18.
38. Смирнов В.И. Динамика скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки. *Транспорт: наука, техника, управление*. 1994. - №1. - с. 17 - 23.
39. Бобровский В.И. Представление продольного профиля сортировочных горок в АСУ расформированием составов. *Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 1996. №1, 2. С. 19 - 25.
40. Ющенко Н. Р. Графический метод построения кривых скорости и времени скатывания отцепов с горки. *Труды ДИИТа*. 1951. Вып. 21. С. 271 - 287.
41. Никитин В. Д., Мацкель С.С., Проектирование продольного профиля парков сортировочной станции с помощью математического моделирования маневровых процессов на ЭЦВМ. *Вопросы расчета и проектирования железнодорожных станций и узлов: Труды МИИТа*. 1969. Вып. 304. С. 4 - 41.
42. Шафит Е.М. Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с

сортировочной горки. *Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок: Труды ДИИТа*. 1965. Вып. 52. С. 73 - 95.

43. Буянова В.К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки. *Вестник ВНИИЖТа*. 1965. №6. С. 60 - 64.

44. Павлов В.Е. Об алгоритме расчета скорости вагона на горке в зависимости от расстояния. 1967. *Труды ЛИИЖТа*. Вып. 259. С. 95 - 100.

45. Жуковицкий И.В. Решение дифференциального уравнения свободного скатывания отцепа с горки // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1997. - №4. - с. 14 - 17

46. Бобровский В.И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения. *Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 1996. №6. С. 34 - 39.

47. Kornienko K., Olgeizer I., Mayer O., Tanaino I., Simulation Modelling of Car Movement on Sorting Tracks. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. vol 509. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_42)

48. Car weighing device. *Railway Age*. 1955. Vol 139. Iss 2. P. 27. [https://archive.org/details/sim\\_railway-age\\_1955-07-11\\_139\\_2/page/28/mode/2up](https://archive.org/details/sim_railway-age_1955-07-11_139_2/page/28/mode/2up)

49. Бунин, Д. А., Автоматизация целевого торможения. *Железнодорожный транспорт*. 1958, № 7. С. 87-89.

50. Тененбаум Э. М., Москвичева Т. Е. Организация имитационной модели управляемого роспуска составов. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях: Межвуз. сб. научн. тр.* 1982. Вып. 224/11. С. 61 - 69.

51. Moczarski J., Modeling and Simulation in the Research of Automatic Wagon Shunting Control Systems. *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means 2020*. 2020. Part 1. P. 81-84. Available from: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-A4-I-dalis.pdf>

52. Муха Ю.А. Оптимизация режимов торможения скатывающихся отцепов при расформировании составов на сортировочной горке. *Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа*. 1976. Вып. 181/10. С. 17 - 23.

53. Kozachenko, D., Bobrovskiy, V., Demchenko, Y., A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. 26. P. 189–199. <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0161-2>

54. Bobrovskiy V, Kozachenko D, Dorosh A et al. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the sorting humps. *Transport Problems*. 2016. 11(1), 147–155. Available from: <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>

55. Бобровский В. И., Рогов Н. В., Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках. *Вісник ДНУЗТ*. 2004. Вип. 4. С. 174-182. <https://crust.ust.edu.ua/items/29e9a56b-37c7-436a-8a10-8d2e3db4c9fa>

56. Бобровский В. И., Кудряшов А. В., Оптимизация режимов расформирования составов на сортировочных горках. *Вісник ДНУЗТ*. 2010. Вип. 32. С. 224–229. <https://crust.ust.edu.ua/bitstreams/99ff9496-26a6-426e-9407-dc0f558b0b8b/download>

57. 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.

58. Kozachenko, D. M., Bobrovskiy, V. I., Grevtsov, C. V., & Berezoviy, 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. <https://doi.org/10.15802/stp2016/74710>

Надійшла до редколегії 08.10.2023.

Прийнята до друку 22.10.2023.

D. KOZACHENKO, S. GREVTSOV, O. KLYGA

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR SIMULATION OF RAILCARS ROLLING FROM SORTING HUMPS

**Purpose.** The purpose of this article is to carry out a historical analysis of the development of methods for simulation of railcars rolling from sorting humps and to determine directions for their improvement in order to solve the problems facing the railway transport of Ukraine today. **Methodology.** The research was carried out on the basis of the processing of literary sources of the library of the Ukrainian State University of Science and Technology, as well as scientometric databases Scopus and Google Scholar. **Findings.** The origin of the methods for simulation of railcars rolling from sorting humps took place at the beginning of the 20th century, when they were separated from the methods of traction calculations. Until the middle of the 20th century, the simulation of the railcars rolling was carried out in order to solve the problems of designing sorting humps. This period is characterized by the simulation of the rolling of individual cars under known conditions. The complication of the simulation methods of the sorting humps operation

is connected with the tasks of automating the control of the trains breaking-up. For this purpose, the tasks of establishing the laws and parameters of the distribution of random resistance values acting on the cuts, taking into account changes in the longitudinal profile of the track under the cuts, modeling the operation of brake retarders and their control systems, etc., were solved. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the fact that, on the basis of a historical analysis of the development of methods for simulation of railcars rolling from sorting humps, the connections between the working conditions of railway transport and the methods of modeling rolling processes are established. **Practical value.** The practical value of the results lies in the fact that they indicate the need to develop methods development of methods for simulation of railcars rolling from sorting humps in conditions of inaccurate information about their running characteristics and rolling conditions. This will make it possible to increase the efficiency of the sorting humps operation without significant capital investments in their control systems.

*Keywords:* railways, sorting humps, breaking-up of trains, rolling of railcars, simulation