

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Козаченко Дмитро Миколайович

УДК 656.212



РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Станції та вузли» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства інфраструктури України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор **Бобровський Володимир Ілліч**,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри «Станції та вузли».

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Негрей Віктор Якович**,  
Білоруський державний університет транспорту Міністерства освіти Республіки Беларусь, перший проректор;

доктор технічних наук, професор **Самсонкін Валерій Миколайович**,  
Державний науково-дослідний центр Державної адміністрації залізничного транспорту Міністерства інфраструктури України, директор;

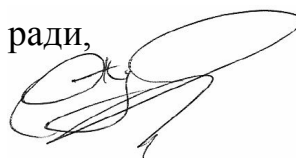
доктор технічних наук, доцент **Чепцов Михайло Миколайович**,  
Донецький інститут залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту Міністерства інфраструктури України, проректор з наукової роботи.

Захист відбудеться «27» жовтня 2011 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. акад. Лазаряна, 2, зал засідань, к. 314

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. акад. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «27» вересня 2011 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



І. В. Жуковицький

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сортувальні гірки є основними технічними засобами, що забезпечують розформування-формування составів вантажних поїздів на залізничних станціях України. Ефективність їх експлуатації являється одним з чинників, який впливає на собівартість вантажних перевезень, швидкість доставки вантажів та скорочення простоїв вагонів. Сучасні умови експлуатації залізничного транспорту характеризуються з однієї сторони нестабільністю вагонопотоків, жорсткою конкуренцією з автомобільним транспортом, фізичним і моральним старінням інфраструктури та рухомого складу залізниць, обмеженням інвестиційних ресурсів на їх оновлення, а з іншої - суттєвим прогресом обчислювальної техніки та появою значної кількості технічних засобів автоматизації гіркових процесів, що створює підґрунтя для вирішення проблеми автоматизації керування розпуском составів. В цих умовах рішення щодо ремонту, модернізації чи реконструкції технічних засобів забезпечення сортувального процесу для кожної конкретної станції повинно ґрунтуватись на всебічній оцінці впливу цих заходів на техніко-експлуатаційні показники сортувального процесу при безумовному забезпеченні безпеки руху.

**Актуальність роботи.** У відповідності до Правил та норм проектування сортувальних пристроїв конкуруючі варіанти сортувальної гірки повинні бути оцінені за допомогою моделювання процесу розформування потоку составів. Однак у сучасних умовах виконується лише перевірка плану та поздовжнього профілю сортувальної гірки, яка ґрунтується на результатах імітаційного моделювання скочування відчепів розрахункової групи. Подібна методика дозволяє визначати тільки роботоспроможність гірки і не дозволяє розраховувати техніко-експлуатаційні та техніко-економічні показники, які необхідні для пошуку її оптимальних параметрів. Методи оцінки безпеки сортувального процесу в залежності від технічного забезпечення гірки та обраних режимів гальмування практично відсутні. У зв'язку з цим розвиток теорії оцінки безпеки сортувального процесу та техніко-експлуатаційних показників сортувальних гірок з метою підвищення безпеки та ефективності їх експлуатації є актуальною проблемою та має суттєве значення для залізничного транспорту України.

**Зв'язок теми з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетними напрямками розвитку залізничної галузі, які визначені у Транспортній стратегії України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 № 2174-р), а також пов'язана з науково-дослідними роботами, що виконані Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Автоматизація проектування залізничних станцій» (державний реєстраційний номер (№ держреєстрації) 0105U001800); «Розробка методики оптимізації режимів гальмування відчепів на сортувальних гірках» (№ держреєстрації 0105U001801); «Удосконалення методики оперативного управління сортувальним процесом на станціях» (№ держреєстрації 0108U000642); «Расчет динамики и стабильности под-

вижного состава во время торможения вагонов на замедлителях, предусматриваемых к установке на станции Вайдотай (Литва) на третьей (парковой) тормозной позиции, в кривых радиусом 200 м» (№ держреєстрації 0107U011636); «Удосконалення розподілу сортувальної роботи в залізничних вузлах» (№ держреєстрації 0107U001826); «Розробка технологічного процесу Одеської залізниці» (№ держреєстрації 0108U010418); «Галузеві будівельні норми. Споруди транспорту. "Правила і норми проектування сортувальних пристроїв на залізницях України» (№ держреєстрації 0111U003612); «Удосконалення конструкції та технології роботи сортувальних комплексів на станціях» (№ держреєстрації 0109U000480); «Определение тормозной мощности и времени срабатывания исследовательского образца замедлителя УВСК ТЗ, установленного на восточной сортировочной горке станции Ясиноватая Донецкой железной дороги» (№ держреєстрації 0109U002987), в яких автор дисертації є виконавцем та автором звітів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення безпеки та експлуатаційної ефективності процесу розформування-формування составів вантажних поїздів за рахунок покращення якості проектних та управлінських рішень, що приймаються на підставі науково-обґрунтованих методів оцінки сортувальних гірок.

Поставлена мета досягається в результаті вирішення наступних **задач**: дослідження технічного забезпечення сортувальних станцій України та характеристик вагонопотоків, що надходять у розформування; розробка математичної моделі процесу скочування, в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система; розробка методів оцінки безпеки процесу регульованого скочування відчепів на сортувальних гірках; удосконалення методів аналізу динаміки регульованого скочування відчепів для урахування впливу випадкових факторів, що діють під час розпуску; розробка методів оцінки якості інтервального та прицільного регулювання швидкості скочування відчепів; розробка методів розв'язання задачі оптимізації режимів гальмування відчепів у стохастичній постановці; удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки конструкції та технічного стану сортувальних гірок.

**Об'єктом дослідження** є процес розформування-формування составів вантажних поїздів на сортувальних гірках.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язки техніко-технологічних параметрів сортувальних гірок та характеристик вагонопотоків з експлуатаційними показниками роботи залізничних станцій та показниками безпеки руху поїздів.

**Методи дослідження.** Постановка задач дослідження, вибір методів їх вирішення та аналіз результатів здійснено з використанням методів системного аналізу. Вирішення окремих задач дослідження здійснено з використанням наступних методів: реляційна алгебра та математична статистика для дослідження характеристик вагонопотоків і технічного забезпечення сортувальних станцій України; методи теоретичної механіки, чисельні методи рішення диференціальних рів-

нянь для моделювання процесів руху відчепів на сортувальних гірках як динамічних систем; теорія безпеки руху поїздів, математичне моделювання для оцінки показників безпеки процесу регульованого скочування відчепів на сортувальних гірках; теорія імовірностей, математична статистика, теорія гіркових процесів, методи планування факторних експериментів для удосконалення методів аналізу динаміки регульованого скочування відчепів з метою урахування впливу випадкових факторів, що діють під час розпуску; теорія корисності, математична статистика для оцінки якості інтервального та прицільного регулювання швидкості скочування відчепів; динамічне програмування для розробки методів розв'язання задачі оптимізації режимів гальмування відчепів у стохастичній постановці; об'єктно-орієнтований аналіз, імітаційне моделювання, методи економічного аналізу для техніко-експлуатаційної та техніко-економічної оцінки конструкції та технічного стану сортувальних гірок.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у вирішенні актуальної науково-практичної проблеми оцінки техніко-експлуатаційної ефективності та безпеки функціонування сортувальних гірок для чого в дисертаційній роботі:

1) Вперше розроблено математичну модель скочування відчепів з гірки, в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система, що дозволяє визначати зусилля між вагонами відчепа, а також між вагонами та колією і гальмовими уповільнювачами і на цій основі оцінювати умови безпеки руху.

2) Вперше розроблено методи оцінки показників безпеки руху при скочуванні відчепів з гірки, що дозволяють аналізувати умови руху відчепів та попереджувати процеси викочування коліс вагонів на рейки і шини уповільнювачів під час регульованого скочування з урахуванням конструктивних особливостей та технічного стану рухомого складу, колії та уповільнювачів.

3) Вперше розроблено метод оцінки якості прицільного гальмування відчепів, який дозволяє при виборі режимів гальмування враховувати взаємозв'язок між швидкістю підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях, показниками заповнення колій та параметрами системи керування сортувальним процесом.

4) Вперше розроблено метод оцінки якості інтервального регулювання швидкості скочування відчепів, що ґрунтується на оцінці ризиків їх нерозділення на стрілках і дозволяє визначати раціональні режими гальмування відчепів в умовах дії випадкових факторів.

5) Вперше сформульовано задачу визначення раціональних режимів гальмування відчепів складу у стохастичній постановці та запропоновано метод її вирішення на основі динамічного програмування, що дозволяє оптимізувати процес керування розформуванням складів та вибір режимів гальмування, як в умовах експлуатації діючих сортувальних гірок, так і при виконанні оцінки якості проектуємих сортувальних гірок.

6) Удосконалено метод техніко-економічної оцінки функціонування сортувальних гірок на основі математичного моделювання процесу розформування со-

ставів, що, на відміну від існуючих, враховує параметри технічного забезпечення процесу розформування составів, функціонування системи керування роботою гірки при виборі режимів гальмування відчепів та дозволяє отримувати показники роботи гірки як системи.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

Запропоновані методи та алгоритми реалізовано у вигляді програмного комплексу для ЕОМ «Скатывание одиночного отцепа «VS» (свідоцтво про державну реєстрацію авторських прав на твір № 30170).

Результати роботи використані: для оцінки безпеки процесу розформування составів при реконструкції станції Вайдотай (Литовські залізниці), при розробці нормативного документа «Правила і норми проектування сортувальних пристроїв на залізницях України», для удосконалення роботи станцій Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці та Красний Лиман Донецької залізниці, а також в навчальному процесі при підготовці спеціалістів та магістрів спеціальності «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті» напряму «Транспортні технології» в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Відповідні акти впровадження результатів дослідження наведені у додатках до дисертації.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати теоретичних та експериментальних досліджень, що наведені у роботі, отримані автором самостійно. Статті [18, 19, 20, 25, 26, 28] опубліковані без співавторів. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає у наступному: в монографії [1] автором удосконалено модель скочування відчепів та розроблено модель розпуску потоку составів; в монографії [2] та в статті [3] розроблено методи автоматизованого формування моделей колійного розвитку; в [4] виконано дослідження величини сил, що діють на рухомий склад; в [5, 6, 7] виконано декомпозицію загальної моделі станції та розроблено моделі об'єктів рухомого складу; в [8] розроблено модель заняття колій рухомим складом; в [9, 10, 13] виконано статистичні дослідження параметрів вагонопотоків; в [11, 12, 14, 16] розроблено методи оцінки динаміки скочування відчепів в умовах дії випадкових факторів; в [15, 17] створено модель, в якій відчеп розглядається як динамічна система, та розроблено методи оцінки безпеки регульованого скочування вагонів; в [22, 23] розроблено систему моделей гальмових уповільнювачів; в статті [24] автору належить методика випробування уповільнювача; в статті [29] розроблено методи оцінки режимів гальмування при випадкових параметрах відчепів та умов скочування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на: 65, 66, 67, 68, 69, 70 та 71 міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2005-2011 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (Місхор, ДНУЗТ, 2009); 3-й Міжнародній науково-практичній конференції

«Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті» (Київ, ДЕТУТ, 2008); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ, ДЕТУТ, 2011); Всеросійській науково-технічній конференції «Транспорт, наука, бізнес: проблемы и стратегия развития», присвяченій 130-річчю Свердловської залізниці (Єкатеринбург, УрГУПС, 2008); 2-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, БелГУТ, 2008); 10-й науково-практичній конференції «Безопасность движения поезов» (Москва, РосГУПС, 2009). У повному обсязі дисертація доповідалась і була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (2011 р.).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 43 наукових публікації у тому числі: 2 монографії, 27 наукових статей у фахових виданнях, затверджених ВАК України, 1 патент на корисну модель, 3 додаткових статті та 10 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 7 розділів, висновків і 7 додатків. Повний обсяг роботи – 308 сторінок; з них основного тексту 256 сторінок; додатків, списку використаних джерел, рисунків і таблиць 52 сторінки. Список використаних джерел із 224 найменувань.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність проблеми, сформульовані мета і задачі досліджень, основні положення, що захищаються автором, дані про практичне використання результатів дисертації.

**В першому розділі** виконано аналіз сучасного стану проблеми техніко-експлуатаційної оцінки сортувальних гірок.

Значний внесок у вирішення проблеми удосконалення роботи сортувальних гірок зробили вчені Акулінічев В.М., Архангельський Є.В., Безсоненко С.А., Берестов І.В., Бобровський В.І., Божко М.П., Бутько Т.В., Гаврилюк В.І., Грунтов П.С., Долаберідзе О.М., Єфименко Ю.І., Іванченко В.М., Жуковицький І.В., Загарій Г.І., Кобзев В.А., Муха Ю.О., Нагорний Є.В., Негрей В.Я., Нікітін В.Д., Образцов В.М., Павлов В. Є., Правдін М.В., Сотніков Є.А., Страковский І.І., Шафіт Є.М., Федотов М.І., Фонарьов Н.М., Шабельніков О.М., Шейкін В.П., Ющенко М.Р. та інші. Теорія динаміки залізничного рухомого складу розроблена вченими Блохіним Є.П., Босовим А.А., Веріго М.Ф., Вершинським С.В., Гаргом В.К., Дановичем В.Д., Дуккіпаті Р.В., Коротенко М.Л., Коганом А.Я., Лазаряном В.А., Мямліним С.В., Петровим М.П., Ушкаловим В.Ф. Теоретичні основи безпеки функціонування залізничного транспорту сформульовані в роботах Бойніка А.Б., Козлова П.О., Лісенкова В.М., Модіна М.К., Пшінька О.М., Самсонкіна В.М., Сокола Е.М., Шалягіна Д.В., Чепцова М.М., Черкашина Ю.М.

Працями багатьох вітчизняних і закордонних вчених досліджений процес скочування відчепів з гірки, створені його математичні моделі. Необхідно відмітити, що існуючі моделі спрямовані в основному на удосконалення роботи окремих елементів сортувальної гірки та визначення її переробної спроможності. В той же час проблема визначення техніко-експлуатаційних показників роботи гірки як системи досліджена недостатньо, а її вирішення базується на спрощених математичних моделях і вимагає удосконалення.

Однією з основних умов функціонування залізничного транспорту є безумовне забезпечення безпеки руху поїздів та маневрових составів. Вказана задача є досить актуальною і для сортувальних гірок, але нормативна база для оцінки безпеки руху вагонів на спускній частині сортувальних гірок та в сортувальних парках недостатньо вивчена в науково-методичному плані. Сучасні методи аналізу безпеки сортувального процесу пов'язані в основному з оцінкою надійності роботи гірки на підставі аналізу надійності окремих її елементів. Однак безпека сортувального процесу визначається не лише рівнем технічного забезпечення гірки, а і обраними режимами керування рухом відчепів під час їх скочування. Питання безпеки руху досить детально вивчені для умов поїзного руху по магістральних коліях, але безпосередньо використовувати розроблені для їх аналізу методи та моделі в задачах дослідження динамічної взаємодії вагона та залізничної колії на сортувальних гірках неможливо з наступних причин: наявність гальмових уповільнювачів, стрілочних переводів та кривих малого радіусу, різні вимоги до улаштування колій у плані та профілі, відмінність у нормах утримання колій, різний рівень швидкостей та вільний характер скочування вагонів.

На підставі виконаного аналітичного огляду наукових робіт сформульована задача підвищення ефективності та безпеки процесу розформування-формування составів вантажних поїздів за рахунок покращення якості управлінських та проектних рішень, що приймаються на підставі науково-обґрунтованих методів техніко-експлуатаційної оцінки сортувальних гірок.

**В другому розділі** виконано дослідження технічного забезпечення процесу розформування-формування составів поїздів на сортувальних станціях України та характеристик вагонопотоків, що на них переробляються, представлена структура дослідження, визначено основні задачі дослідження, порядок та методи їх розв'язання.

В сучасних умовах на залізничних станціях України експлуатується 49 сортувальних гірок різної потужності, з них 28 гірок обладнані аналоговими та мікропроцесорними системами автоматизації різних елементів сортувального процесу. Завантаження сортувальних гірок України складає 30-50% від їх переробної спроможності. Для регулювання швидкості скочування відчепів на спускній частині використовуються в основному кліщовидно-натискні та кліщовидно-вагові уповільнювачі, а на паркових позиціях – важільно-натискні уповільнювачі та башмачне гальмування. Кількість уповільнювачів старих модифікацій, термін екс-

плуатації яких перевищує 25 років, складає 20%. Аналіз технічного стану колійного розвитку показує, що він в основному знаходиться у 3-му та 4-му станах несправності.

Парк вантажних вагонів в сучасних умовах є зношеним, при цьому біля 80% вагонів вичерпали свій термін експлуатації і мають низьку залишкову вартість.

Для дослідження параметрів вагонопотоків, що переробляються на сортувальних гірках, в дисертації виконано обробку даних архіву АСК ВП УЗ з використанням методів реляційної алгебри та математичної статистики. В результаті цих досліджень отримано параметри розподілу випадкових величин довжини та маси відчепів, виконано аналіз типів вантажів, що перевозяться у вагонах, та досліджено розподіл вагонів за власністю. Результати аналізу розподілу вагонів, що

переробляються на гірках, за власністю представлено на рис. 1. При цьому за період 2007-2009 рр. доля вагонів інвентарного парку Укрзалізниці скоротилася на 6%. Аналіз напрямків реформування залізничного транспорту показує, що ця тенденція буде продовжуватись. Отже, зараз при організації процесу перевезень

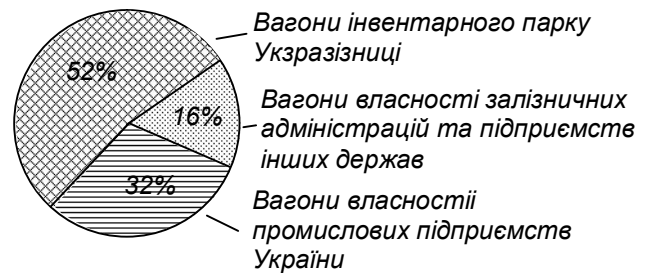


Рис. 1. Розподіл вагонів, що переробляються на гірках, за власниками

вантажів відбувається розділення функцій власника інфраструктури та перевізника, що призводить до підсилення вимог щодо схоронності рухомого складу під час розформування-формування составів поїздів на сортувальних гірках. В той же час в сучасних умовах вимоги ПТЕ щодо встановленої швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях не виконуються і імовірність їх порушення перевищує 0,6.

Таким чином, у сучасних умовах роботи залізничного транспорту України проблема удосконалення технічного забезпечення та технології процесу розформування-формування вантажних поїздів на сортувальних гірках є, як і раніше, актуальною, незважаючи на зміну її цілей і критеріїв. Після різкого спаду обсягів перевезень сортувальні гірки України мають значні резерви переробної спроможності. В той же час технічне забезпечення гірок є фізично і морально застарілим і не забезпечує вимог безпеки та економічності сортувального процесу. Тому актуальною проблемою є підвищення безпеки розпуску составів та зменшення експлуатаційних витрат, що пов'язані з розформуванням-формуванням составів вантажних поїздів.

Сортувальна гірка являє собою складну динамічну стохастичну ергатичну систему. Цілями системи є забезпечення розформування-формування потоку составів поїздів у заданому темпі з мінімальними експлуатаційними витратами та при безумовному дотриманні умов безпеки руху. Наведені цілі є суперечливими. Так, підвищення рівня безпеки може досягатися за рахунок зменшення темпу

розформування составів, за рахунок підвищення вимог до персоналу та якості утримання колії і технічних засобів, за рахунок впровадження і експлуатації дорожніх систем керування розпуском та ін. В цих умовах необхідна розробка науково обґрунтованих методів комплексної оцінки характеристик сортувальних гірок. У відповідності з методологією системного аналізу у другому розділі сформульовано задачі дослідження та обрано порядок і методи їх розв'язання.

**В третьому розділі** розроблено імітаційну модель скочування відчепів з гірки, в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система.

В загальному випадку модель процесу скочування включає модель відчепа та модель маршруту скочування. У зв'язку з тим, що при моделюванні гіркових процесів в задачах оцінки безпеки руху виникає необхідність дослідження сил, що діють у вагоні між окремими його частинами, між окремими вагонами відчепа та у системі вагон-колія, то при розв'язанні таких задач модель відчепа у вигляді нерозтяжного гнучкого стержня є неадекватною і тому відчеп необхідно розглядати як динамічну систему. Для спрощення та прискорення обчислювальних експериментів прийнята дворівнева модель відчепа, що включає одномірну модель відчепа та просторову модель досліджуваного вагона у відчепі.

У одномірній моделі відчеп розглядається як система взаємопов'язаних вагонів, з'єднаних між собою нелінійними зв'язками (рис. 2, а).

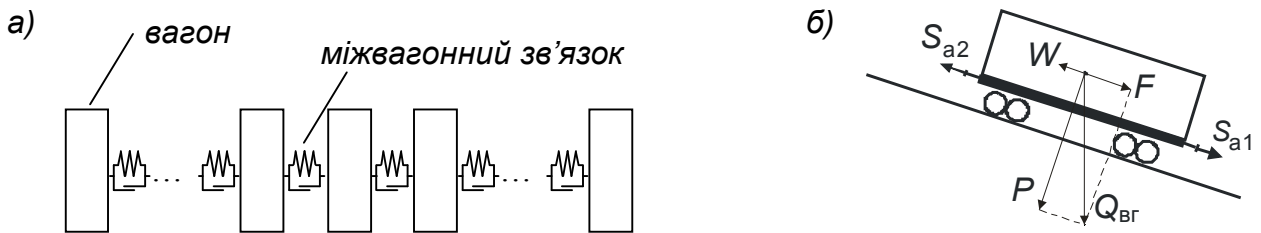


Рис. 2. Одномірна модель відчепа: а) розрахункова схема відчепа; б) сили, що діють на окремий вагон у відчепі

В моделі відчеп представлений структурою

$$c_d = \{V_d, G_b\}, \quad (1)$$

де  $V_d$  – вектор параметрів вагонів відчепа;  $G_b$  – вектор параметрів зв'язків, що відповідають автозчепам між вагонами відчепа.

Параметри кожного вагону  $v_{d,n} \in V_d$ ,  $n = \overline{1, N}$  у одномірній моделі представлені структурою

$$v_{d,n} = \{t_{bg}, A, q_{bg}, w_0, K_{cb}, x_b, v_b\}, \quad (2)$$

де  $t_{bg}$  – тип вагона;  $A$  – вектор міжосьових відстаней, м;  $q_{bg}$  – маса вагона, т;  $w_0$  – основний питомий опір руху вагона, Н/кН;  $K_{cb}$  – коефіцієнт для розрахунку опору середовища та вітру;  $x_b$  – поточна координата першої осі вагона, м;  $v_b$  – поточна швидкість вагона, м/с;  $N$  – загальна кількість вагонів у відчепі.

Міжвагонні з'єднання у відчепі складаються з автозчепів та поглинаючих апаратів. Параметри кожного автозчепу з поглинаючим апаратом  $g_{b,n} \in G_b$ ,  $n = \overline{1, N-1}$  в моделі представлено структурою

$$g_{b,n} = \{v_{d,n}, v_{d,n+1}, t_a, q_p\}, \quad (3)$$

де  $t_a$  – тип пристрою (поглинаючого апарату), що забезпечує з'єднання;  $q_p$  – деформація з'єднання на попередньому кроці.

Зусилля в автозчехах  $S_{a,n}$  та  $S_{a,n+1}$  залежать від величин поздовжньої деформації  $q_x$  на поточному кроці, від характеру роботи (навантаження чи розвантаження), що встановлюється при порівнянні  $q_x$  і  $q_p$ , та конструктивних особливостей поглинаючого апарату, що визначаються його типом  $t_a$ . Для вантажних вагонів найбільш поширеними є пружинно-фрикційні поглинаючі апарати. В якості моделі міжвагонних зв'язків використовується демпфер сухого тертя, характеристиками якого є жорсткість навантаження  $K_n$ , жорсткість розвантаження  $K_p$ , жорсткість конструкції  $K_k$  та робоча хода апарату  $q_p$ , що пов'язують величину поздовжньої деформації  $q_x$  і зусилля в автозчепі  $S_a$ . Зважаючи на те, що поглинаючий апарат вмонтований у конструкцію вагону таким чином, що завжди працює на стискання, а автозчеп має деякий зазор  $\delta_a$ , то графічно характеристика міжвагонного зв'язку може бути представлена у вигляді як показано на рис. 3. Питомі зусилля в автозчепі визначаються як

$$s_a = S_a / q_{вг}.$$

Модель маршруту скочування характеризує план та профіль залізничної колії, по якій рухається відчеп. При цьому, колія у плані розглядається як множина прямолінійних та криволінійних ділянок  $a_k \in \mathbf{A}_k$ ,  $k = \overline{1, K_{\Pi}}$  (тут  $K_{\Pi}$  – загальна кількість ділянок у плані) по маршруту скочування відчепа; поздовжній профіль колії  $\mathbf{I}_{\Pi}$  описується модифікованим кубічним сплайном.

Розрахункова схема сил, що діють на вагон під час скочування з гірки у складі відчепа, зображена на рис. 2, б. На відміну від існуючих моделей скочування, де розглядаються рушійна сила  $F$  (проекція ваги вагона  $Q_{вг}$  на похилу площину) та сила опору руху  $W$ , в ній додатково враховуються сили  $S_{a1}$  та  $S_{a2}$ , які виникають у автозчехах та поглинаючих апаратах вагонів.

Рух відчепа як системи взаємопов'язаних вагонів може бути представлено у вигляді системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \dot{v}_{b,n} = g'(i(x_{b,n}) - w_0 - w_{ck}(x_{b,n}, v_{b,n}) - w_{cb}(v_{b,n}) + s_{a,n} - s_{a,n+1}) \cdot 10^{-3}; \\ \dot{x}_{b,n} = v_{b,n}; \\ s_{a,n} = f(x_{b,n} - x_{b,n+1} - \frac{l_{вг,n} + l_{вг,n+1}}{2}, v_{b,n} - v_{b,n+1}); \\ s_{a,1} = s_{a,N} \equiv 0; \\ n = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $g'$  – прискорення сили тяжіння  $m/c^2$  з урахуванням інерції мас, що обертаються;

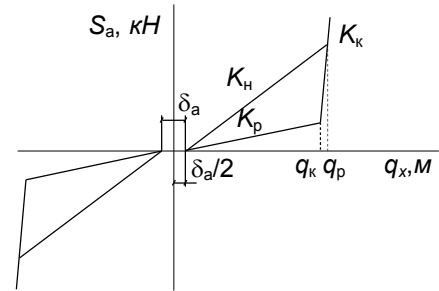


Рис. 3. Характеристика міжвагонного зв'язку

$w_{ск}, w_{св}$  – відповідно, питомі опори руху вагона від стрілок та кривих і від середовища та вітру, Н/кН;  $i$  – миттєвий середній ухил колії під вагоном у точці  $x_b$ , ‰;  $l_{вг}$  – довжина вагона, м.

Для рішення системи рівнянь (4) використовується метод чисельного інтегрування.

Реалізація одномірної моделі скочування відчепа у програмному комплексі «Скатывание одиночного отцепа « $VS$ » дозволяє отримувати протокол моментів заняття і звільнення розділових елементів та протокол зусиль в автозчепах по маршруту скочування. При цьому спостерігається деяка відмінність від результатів моделювання скочування відчепа як нерозтяжного гнучкого стержня, що виникає через стискання та розтягнення відчепа під час гальмування, але вона є незначною і для десятивагонного відчепа складає 0,1 - 0,3 с. Отже в задачах дослідження умов розділення відцепів їх внутрішні динамічні властивості можуть не враховуватись.

Можливість отримання зусиль у міжвагонних з'єднаннях суттєво відрізняє розроблену модель від існуючих моделей скочування відцепів з гірки, тому що вона дає нову інформацію, необхідну для рішення задач, пов'язаних з безпекою скочування відцепів з гірки.

Вантажний вагон у просторовій моделі розглядається як сукупність недеформованих об'єктів  $O$ , що мають інерційні властивості та множину зв'язків  $U_o$ , що об'єднують ці об'єкти у єдину конструкцію

$$v_{\pi} = \{O, U_o\}. \quad (5)$$

Побудова просторової моделі здійснюється на підставі даних одномірної моделі для вагона з найбільшими зусиллями у автозчепах. При цьому, просторові коливання окремих елементів вагону під час руху моделюються за допомогою відповідних диференціальних рівнянь Лагранжа другого порядку.

Просторова модель вагона дозволяє визначати зусилля у елементах його конструкції та у взаємодії вагона з колією, що необхідно для оцінки показників безпеки руху при скочуванні відцепів на сортувальних гірках.

**В четвертому розділі** розроблено методи оцінки показників безпеки процесу регульованого скочування відцепів на сортувальних гірках з використанням представленої у розділі 3 моделі.

Виконані дослідження показали, що величини сил, які діють при вільному скочуванні відцепів в умовах знаходження колії в межах встановлених нормативів, або у третьому та четвертому ступені несправності, недостатньо для того, щоб спричинити втрату стійкості вагона. При знаходженні колії та технічних засобів у стані, що допускає їх експлуатацію, небезпечними випадками, які можуть мати місце на сортувальних гірках при регульованому скочуванні окремого відчепа, є вкочування колеса на рейку або на шину уповільнювача під час гальмування.

Розрахункова схема взаємодії колеса та рейки представлена на рис. 4 (тут  $V, H$  – відповідно, вертикальна та поперечна сила в точці контакту гребеня колеса

та рейки;  $\beta_r$  – кут нахилу гребеня колеса до горизонталі;  $A, B$  – точки контакту колеса і рейки, відповідно, на поверхні кочення та на боковій поверхні гребеню). При цьому процес вкочування стає можливим, якщо сила тертя  $F_t$  буде меншою суми сил, що переміщують центр обертання вниз по рейці

$$F_t < V_K - H_K. \quad (6)$$

Умова стійкості колісної пари від сходу з рейок може бути оцінена за коефіцієнтом стійкості від сходу з рейок (за умовою вкочування)  $K_{ст}$  згідно з «Нормами розрахунку та проектування вагонів»

$$K_{ст} = \frac{\text{tg}\beta_r - \mu_p}{1 + \mu_p \text{tg}\beta_r} \cdot \frac{V}{H} \geq K_{ст}^{доп} \quad (7)$$

де  $\mu_p$  – коефіцієнт тертя;  $K_{ст}^{доп}$  – допустиме значення коефіцієнту стійкості від сходу з рейок.

У випадку скочування одновагонного відчепа вертикальна сила  $V$  формується статичним навантаженням колеса на рейку  $G$  та динамічною добавкою  $D$ , що виникає у процесі руху вагона. Поперечна сила у цьому випадку виникає в процесі поперечних коливань та впливання колісних пар. У випадку скочування багатовагонного відчепа на величину вертикальної сили впливають також проекції поздовжніх сил, що виникають в автозчепках, на вертикальний напрямок. Величина вертикальної проекції визначається різницею висот автозчепів сусідніх вагонів, яка виникає при розташуванні поруч вагонів різного технічного стану, з різним навантаженням та через переміщення автозчепів у centruючому пристрої. Поздовжня сила в автозчепі впливає також на формування поперечної сили. Поперечна проекція виникає при розташуванні вагонів в криволінійних ділянках колії у плані та через поперечне переміщення автозчепів у centruючому пристрої.

Виконані дослідження дозволили отримати аналітичну залежність для оцінки умов вкочування колеса на рейку

$$K_{ст} = \frac{\text{tg}\beta_r - \mu_p}{1 + \mu_p \text{tg}\beta_r} \cdot \frac{k_6 S_{a1} + k_7 S_{a2} + (k_8 K_{двн} + k_9 K_{двнн} + k_{10}) F_{и} + k_{11} K_{двн} + k_{12} K_{двнн} + k_{13}}{S_{a1} + k_1 S_{a2} + k_2 F_{и} + k_3 (K_{двн} + K_{двнн}) + k_4 (F_{и} + F_{в}) (K_{двн} - K_{двнн}) + k_5}, \quad (8)$$

де  $F_{в}$ ,  $F_{и}$  – відповідно, сила вітрового навантаження та відцентрова сила, що діє на кузов вагона при проходженні кривої;  $K_{двн}$ ,  $K_{двнн}$  – відповідно, коефіцієнти вертикальної динаміки на набігаючому та ненабігаючому колесі;  $k_1$ – $k_{13}$  – коефіцієнти, що характеризують конструкційні особливості вагона.

Дослідження цієї залежності показало, що вкочування коліс на рейки можливе лише у вагонів легкої вагової категорії під час гальмування змішаних відчепів з вагонів легкої та важкої вагових категорій.

Для аналізу рівня небезпеки, що має місце при регульованому скочуванні відчепів, необхідно оцінювати не лише величину, а і тривалість дії сил. Виконати подібні розрахунки аналітично не є можливим, тому для аналізу використовува-

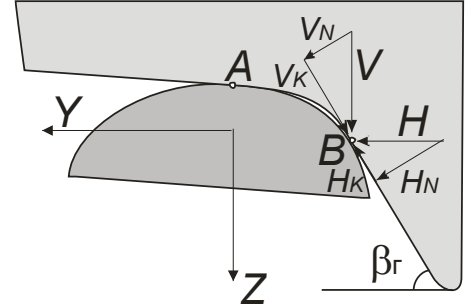


Рис. 4. Розрахункова схема взаємодії колеса та рейки

лась імітаційна модель процесу скочування вагона з гірки у складі відчепа як динамічної системи. В якості прикладу наведено результати моделювання скочування десятивагонного відчепа, що складається з вагонів важкої, легкої та ще восьми вагонів важкої вагової категорії. На рис. 5 представлено графіки зміни коефіцієнта стійкості  $K_{ст}=f(s)$  (тут  $s$  – відстань скочування від вершини гірки) для другого вагона відчепа при гальмуванні першого його вагона четвертим ступенем на другій гальмовій позиції. Нульові значення коефіцієнта стійкості вказують на небезпеку вкочування коліс другого вагона на рейку і необхідність використання менших ступенів гальмування.

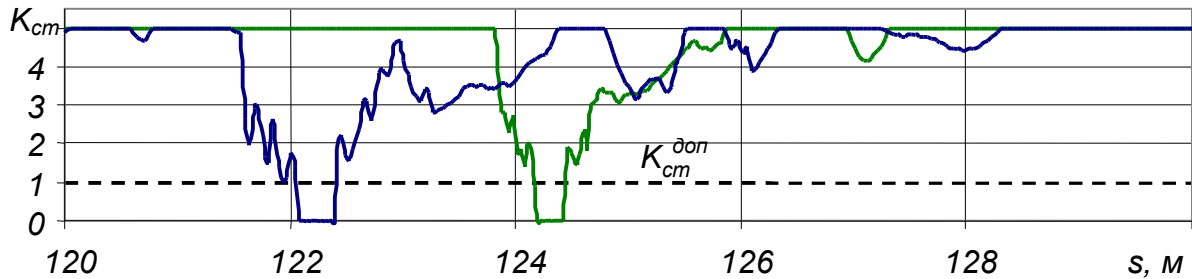


Рис. 5. Графік зміни коефіцієнта стійкості для другого вагона відчепа

Іншим випадком порушення безпеки скочування відцепів з гірки є вкочування коліс на шину уповільнювача під час гальмування. При проходженні уповільнювача на колесо діє навантаження від вагона  $G$  та гальмова сила  $B_г$ . Розрахункова схема взаємодії колеса і уповільнювача представлена на рис. 6. Сучасна методика розрахунку допустимої сили тиску шин уповільнювача на колесо ґрунтується на статичних розрахунках і встановлює залежність між навантаженням від колеса на рейку та силою тиску шин уповільнювача. В той же час результати виконаних досліджень показали, що на вагон можуть діяти також відцентрова сила (при розташуванні уповільнювача безпосередньо за кривою), вітрове навантаження, поздовжні і поперечні сили, що виникають через взаємодію вагонів у відцепі, динамічні сили, що виникають через коливання частин вагона. Наявність поперечних сил викликає перерозподіл навантаження між різними колесами візка. В результаті для оцінки допустимого рівня тиску шин уповільнювача на колесо вагона пропонується використовувати коефіцієнт стійкості від вкочування на шину уповільнювача  $K_{шу}$ , що визначається як

$$K_{шу} = \frac{V_{\min}}{P_{шк}} \cdot \frac{R_n \sqrt{(R_b + R_n)^2 - 4(R_n - y)^2}}{2\mu_{ш}(R_n - y) \sqrt{(R_b + R_n)^2 - 4R_n(R_n - 2y)}} \geq K_{шу}^{\text{доп}}, \quad (9)$$

де  $P_{шк}$  – сила тиску шини уповільнювача на колесо при обраному ступені гальмування;  $K_{шу}^{\text{доп}}$  – допустиме значення коефіцієнту стійкості від вкочування на шину уповільнювача,  $V_{\min}$  – менше з навантажень на ліве та праве колесо колісної пари;

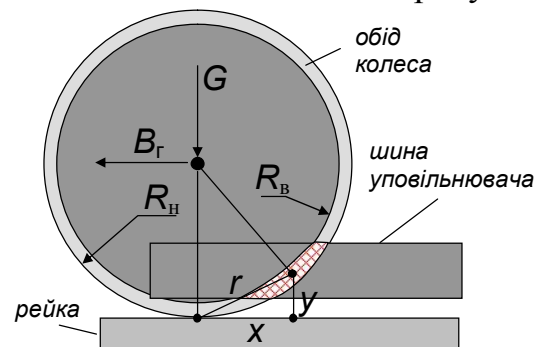


Рис. 6. Розрахункова схема взаємодії колеса та уповільнювача

$\mu_{\text{ш}}$  - коефіцієнт тертя колеса об шину уповільнювача;  $R_{\text{в}}$ ,  $R_{\text{н}}$  – відповідно, внутрішній та зовнішній радіуси обода колеса;  $y$  – відстань від миттєвого центра тяжіння площі тертя шини уповільнювача та колеса до рейки.

Значення  $V_{\text{min}}$  визначаються шляхом імітаційного моделювання руху відчепа. Через те, що величина  $V_{\text{min}}$  змінюється при скочуванні відчепа, то при цьому також змінюється і величина  $K_{\text{шу}}$ . На рис. 7 представлено графіки зміни коефіцієнта стійкості  $K_{\text{шу}}=f(s)$  відчепа з вагонів важкої вагової категорії при розташуванні гальмової позиції на відстані 0,5 м від кривої в несприятливих погодних умовах, а також значення  $K_{\text{шу}}^{\text{доп}}$ , що відповідає нормативній величині тиску шин на колеса вагонів.

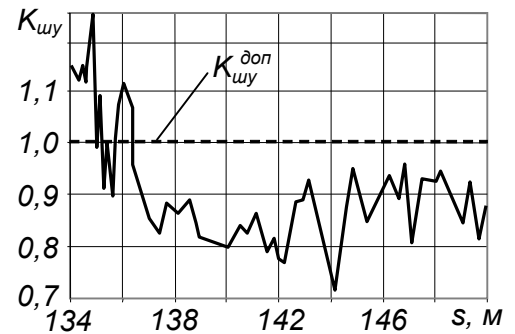


Рис. 7. Графік зміни допустимого тиску шин уповільнювача на колесо

Аналіз результатів обчислювальних експериментів показав, що для забезпечення безпеки сортувального процесу в несприятливих умовах допустиму величину тиску шин на колеса вагонів необхідно зменшувати для одновагонних відчепів на величину до 10%, для багатовагонних – до 25%.

Таким чином, несприятливе розташування елементів плану колійного розвитку, стан залізничної колії, розташування вагонів у відчепі, погодні умови викликають додаткові обмеження допустимого ступеня гальмування їх уповільнювачами. Розроблені методи можуть використовуватись як в автоматизованих системах керування розпуском для вибору безпечних режимів гальмування відчепів, так і при проектуванні гірок для оцінки взаємного розташування гальмових позицій та елементів їх плану і профілю.

**В п'ятому розділі** розроблено методи аналізу динаміки регульованого скочування відчепів в умовах невизначеності інформації про ходові властивості відчепів та умови їх скочування.

Існуючі методи визначення раціональних режимів гальмування базуються на моделюванні скочування розрахункових відчепів з постійними і відомими експериментатору величинами маси відчепа  $Q$ , питомого опору його руху (основного  $w_0$ , стрілок та кривих  $w_{\text{ск}}$ , середовища та вітру  $w_{\text{св}}$ ) та при точній реалізації уповільнювачами заданих швидкостей виходу відчепа з гальмових позицій  $v_{\text{ГП}}$ . Ці методи не дозволяють аналізувати динаміку скочування відчепів з гірки в реальних умовах, коли практично всі фактори, що впливають на умови руху, мають стохастичний характер.

Для дослідження процесу розпуску составів в умовах дії випадкових факторів удосконалено методи моделювання скочування відчепа за рахунок урахування випадкового характеру величин  $Q$ ,  $v_{\text{ГП}}$ ,  $w_0$ ,  $w_{\text{ск}}$  та  $w_{\text{св}}$ . При цьому прийнято, що значення вказаних величин під час скочування є постійними, але невідомими екс-

периментатору. Представлені методи моделювання реалізовано у програмному комплексі «Скатывание одиночного отцепа «VS». Результатами моделювання є сімейство залежностей швидкості  $v(s)$  та часу  $t(s)$  скочування відчепа по маршруту (тут  $s$ -координата першої осі відчепа відносно вершини гірки). Графічне зображення результатів серії із 300 обчислювальних експериментів для статистичної оцінки режимів гальмування представлено на рис. 8. Обробка результатів скочування в точках з заданими координатами  $s$  дозволяє визначати параметри розподілу випадкових величин часу входу та виходу відчепів на розділові елементи, швидкостей входу відчепів в уповільнювачі та їх підходу до вагонів на сортувальних коліях і т.п. За даними статистичної обробки результатів скочування встановлено, що на деякій відстані  $s$  від вершини гірки випадкова величина швидкості відчепа має нормальний, а випадкова величина часу скочування – логнормальний розподіл. При цьому параметри розподілу вказаних випадкових величин суттєво залежать від координати  $s$ . Так, у експерименті, результати якого представлені на рис. 8, середнє квадратичне відхилення часу входу відчепа на третю розділову стрілку складає 0,42 с, а на п'яту – 1,12 с.

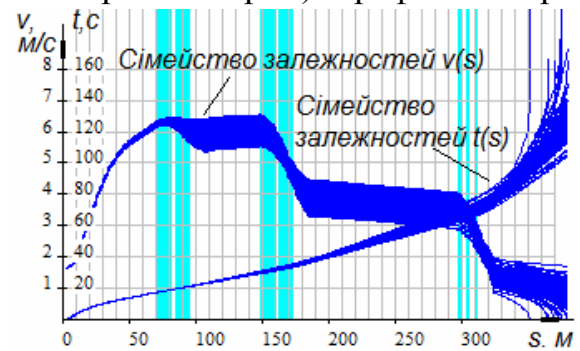


Рис. 8. Статистичне моделювання регульованого скочування відчепа

Для комплексного дослідження впливу різних факторів на середнє квадратичне відхилення часу скочування відчепа  $\sigma_t$  виконано серію факторних експериментів з використанням плану  $2^5$ . При цьому в якості факторів обрано: кількість вагонів у відчепі,  $x_1$ ; математичне очікування маси вагона у відчепі,  $x_2$ ; середнє квадратичне відхилення швидкості виходу відчепа з гальмової позиції,  $x_3$ ; відстань нерегульованого скочування,  $x_4$ ; величина, обернена квадрату заданої швидкості виходу відчепа з гальмової позиції  $1/v_{ГП}^2$ ,  $x_5$ . Після обробки результатів обчислювальних експериментів отримано поліном

$$\sigma_t = 1,1 - 0,21x_1 - 0,22x_2 + 0,44x_3 + 0,79x_4 + 0,64x_5 + 0,33x_3x_4 + 0,27x_3x_5 + 0,55x_4x_5 + 0,22x_3x_4x_5.$$

Аналіз коефіцієнтів наведеного полінома показує, що основними чинниками, які впливають на середнє квадратичне відхилення часу скочування відчепа є відстань нерегульованого скочування та задана швидкість виходу відчепа з гальмової позиції. Таким чином, величина  $\sigma_t$  суттєво залежить від умов скочування відчепа, що повинно бути враховано при виборі режимів його гальмування.

**В шостому розділі** розроблено методи оцінки якості прицільного та інтервального регулювання швидкості скочування відчепів, сформулювало задачу оптимізації режимів гальмування відчепів у стохастичній постановці та розроблено метод її розв'язання.

При розформуванні составів на сортувальних гірках розв'язуються дві взаємопов'язані та частково суперечливі задачі інтервального і прицільного регулювання швидкості скочування відчепів. В якості управляючих параметрів на трьох-

позиційних гірках можуть бути прийняті швидкості виходу відчепів з першої (ВГП) та другої (СГП) гальмових позицій, відповідно,  $v'$  та  $v''$ . При цьому, швидкість виходу відчепа з третьої гальмової позиції (ПГП)  $v'''$  обирається з умови забезпечення вимог прицільного гальмування. Вектор значень  $v = \{v', v''\}$  можна розглядати як точку на площині. Вся множина точок  $v$  утворює область  $\Omega$  можливих швидкостей виходу відчепа з гальмових позицій спускної частини гірки.

Виконані імітаційні експерименти по регульованому скочуванню відчепів показали, що для механізованих сортувальних гірок України, де для реалізації прицільного гальмування використовуються балкові гальмові уповільнювачі, точне рішення задачі прицільного гальмування, яка передбачає докочування відчепів до розрахункової точки з допустимою ПТЕ швидкістю, в стохастичних умовах у більшості випадків реалізувати неможливо. Тому необхідна розробка методів оцінки режимів прицільного регулювання швидкості при відсутності точної інформації про ходові характеристики відчепів і умови їх скочування.

В якості критеріїв для оцінки прицільного регулювання швидкості скочування відчепів запропоновано використовувати: імовірність перевищення встановленої ПТЕ швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях  $p_n$ , імовірність зупинки відчепа в уповільнювачі паркової гальмової позиції  $p_y$ , середню величину вікна, що припадає на один розформований вагон  $\bar{l}_v$ . Всі наведені критерії пов'язані з енергією відчепа в момент його виходу з паркової гальмової позиції і між ними можуть бути встановлені залежності. Для прикладу на рис. 9 наведено взаємозв'язок між величинами  $p_n$  та  $\bar{l}_v$ . При вирішенні задачі критеріального вибору для оцінки якості прицільного регулювання швидкості скочування відчепів використано метод головної компоненти: через те, що величини  $p_n$  та  $p_y$  характеризують дотримання умов безпеки руху і економічно оцінити їх досить складно, то значення цих критеріїв пропонується нормувати на деяких допустимих рівнях, відповідно,  $p_{нд}$  та  $p_{уд}$  і оцінювати якість прицільного гальмування по величині  $\bar{l}_v$ .

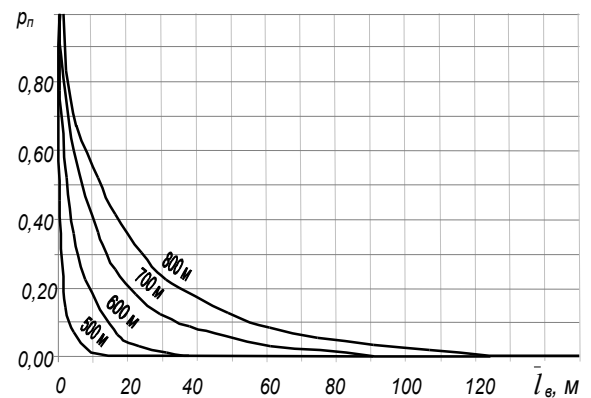


Рис. 9. Залежності між середньою величиною вікна та імовірністю перевищення встановленої ПТЕ швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях при різній відстані до точки прицілювання

Одним із суттєвих факторів, що впливає на умови прицільного гальмування є швидкість виходу відчепа з СГП. При цьому, для кожного значення величини  $v''$  може бути знайдено таке значення  $v'''$ , що забезпечує досягнення найкращих показників прицільного гальмування. На рис. 10. представлено залежності показників якості прицільного регулювання швидкості скочування відчепа від  $v''$ . При цьому, для кожного значення  $v''$  режим гальмування на ПГП обирався з умови

$$\bar{l}_B(v''') \rightarrow \min, \text{ при } p_{\Pi}(v''') \leq p_{\Pi\Delta} \text{ та } p_Y(v''') \leq p_{Y\Delta}. \quad (10)$$

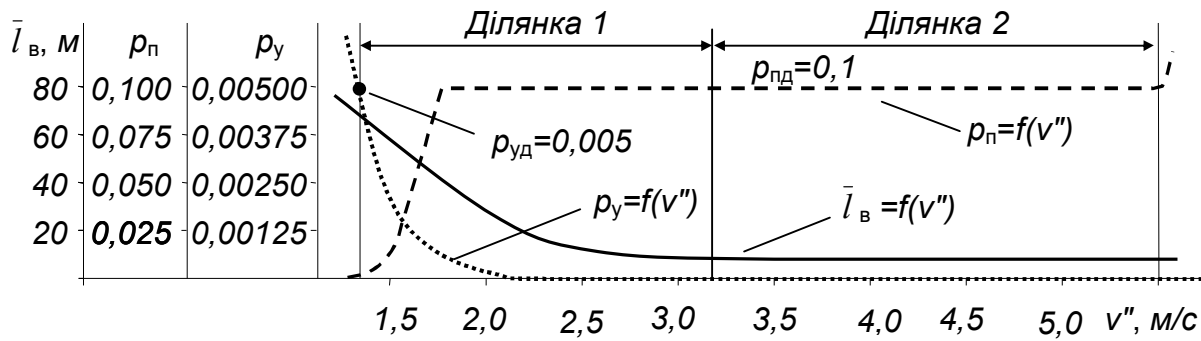


Рис. 10. Залежності показників прицільного гальмування від швидкості виходу відчепа з СГП

Допустимими швидкостями виходу відчепів з СГП за умовами прицільного регулювання швидкості надалі вважаються такі режими, що забезпечують виконання вимог безпеки сортувального процесу. Так, у прикладі, представленому на рис. 10, допустимими є швидкості в діапазоні від 1,35 до 5,5 м/с, при цьому в межах ділянки 1 (діапазон швидкостей 1,35-3,2 м/с) виникають суперечності між умовами інтервального та прицільного гальмування, коли зменшення швидкості руху відчепа по спускній частині гірки, необхідне для збільшення інтервалів на розділових елементах, призводить до збільшення величини вікон на сортувальних коліях. Величина вікна в діапазоні швидкостей, що відповідають ділянці 2, визначається виключно роботою системи прицільного регулювання швидкості відчепа.

Виконані дослідження дозволяють виділити в  $\Omega$  підобласть  $\Omega_{\Pi}$ , в якій виконуються умови прицільного гальмування та забезпечуються допустимі швидкості входу відчепів в уповільнювачі. Приклад області  $\Omega_{\Pi}$  представлено на рис. 11. При цьому мають місце наступні обмеження: 1, 2 та 3 – відповідно, по потужності ВГП, СГП і ПГП та по допустимій величині тиску шин їх уповільнювачів на колеса вагона; 4 – по імовірності зупинки відчепа в уповільнювачі ПГП; 5 – по імовірності перевищення встановленої швидкості входу відчепа на уповільнювач СГП; 6 – по величині прискорення на ділянці між ВГП та СГП.

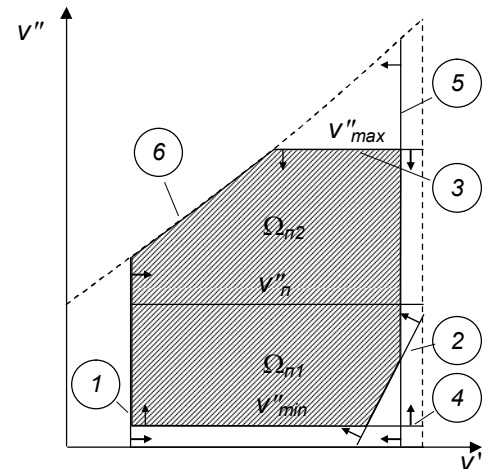


Рис. 11. Конфігурація області  $\Omega_{\Pi}$ .

Область  $\Omega_{\Pi}$  складається з двох підобластей:  $\Omega_{\Pi1}$  – де є суперечності між умовами інтервального та прицільного регулювання швидкості відчепа, та  $\Omega_{\Pi2}$  – де суперечності між умовами інтервального та прицільного регулювання швидкості немає і величина вікон визначається роботою паркової гальмової позиції. В дисертації виконано дослідження факторів, що впливають на розмір та конфігурацію області  $\Omega_{\Pi}$ .

Іншою задачею, що вирішується при гальмуванні відчепів, є забезпечення

розділення суміжних відчепів на розділових елементах.

Величина інтервалу на розділовій стрілці  $s_p$  визначається з виразу

$$\delta t = t_0 + t_2(s_p, v'_2, v''_2) - \tau_1(s_p, v'_1, v''_1), \quad (11)$$

де  $t_0$  – початковий інтервал між відчепами на вершині гірки;  $\tau_1, t_2$  – відповідно, час скочування першого відчепу від моменту відриву до моменту звільнення та другого відчепу до моменту заняття ізольованої ділянки розділової стрілки;  $v'_1, v''_1, v'_2, v''_2$  – відповідно, задані швидкості виходу першого та другого відчепів у розрахунковій парі з ВГП та СГП.

Умова виконання плану розпуску, коли відчепи слідує на колії згідно з призначенням, виглядає як

$$\delta t \geq t_{pe}, \quad (12)$$

де  $t_{pe}$  – час, що необхідний для спрацювання пристроїв гіркової автоматики при переводі стрілки.

При детермінованому підході до розв'язання задачі оптимізації режимів гальмування відчепів в якості критерію оптимальності використовується критерій Вальда

$$\min_{j=1}^{c-1} \delta t_j \rightarrow \max, \quad (13)$$

де  $c$  – кількість відчепів у составі.

При цьому резерви часу, що утворюються на розділових елементах, використовуються для забезпечення розділення відчепів в умовах відхилення фактичного часу заняття і звільнення розділових елементів від розрахункових. Недоліком такого підходу є те, що в ньому не враховуються параметри розподілу випадкових величин часу скочування відчепів. Виконані дослідження показують, що при однаковій величині математичного очікування розділового інтервалу умови розділення відчепів на різних стрілках можуть суттєво відрізнятися. Для прикладу на рис. 12 представлено функції щільності розподілу випадкових величин розділових інтервалів у розрахунковій групі із трьох відчепів, коли розділовими стрілками у першій парі є п'ята, а у другій – третя стрілка по маршруту скочування. При цьому, через більше середнє квадратичне відхилення, імовірність нерозділення відчепів у першій парі вища, ніж у другій. У зв'язку з цим для оцінки режимів інтервального гальмування швидкості скочування відчепів запропоновано використовувати імовірнісний критерій, заснований на критерії Байєса-Лапласа – ризик нерозділення, який представляється виразом

$$r_n = \sum_{j=1}^{c-1} r_j = \sum_{j=1}^{c-1} p_j m_{j+1} \rightarrow \min, \quad (14)$$

де  $r_j$  – ризик нерозділення відчепів у  $j$ -й парі;  $p_j$  – імовірність нерозділення відче-

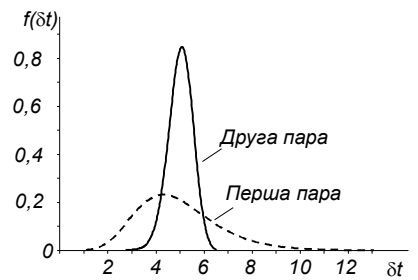


Рис. 12. Функції щільності розподілу випадкових величин розділових інтервалів у різних парах відчепів

пів у  $j$ -й парі;  $m_{j+1}$  – кількість вагонів у другому відцепі кожної пари.

Функціональна залежність між ризиком нерозділення та швидкістю виходу відчепа з гальмових позицій є екстремальною. Для прикладу на рис. 13 представлено залежність  $r_n = f(v'')$  для розрахункової групи з трьох відцепів з другим керованим відцепом.

Допустимими з позиції інтервального регулювання швидкості скочування відцепів є режими, що з заданою імовірністю забезпечують слідування відцепів за призначеннями у відповідності з планом розпуску. При цьому режими гальмування, для яких справедлива умова  $r_n(v) \leq r_d$  (тут  $r_d$  – допустимий ризик нерозділення), утворюють в  $\Omega$  підобласть  $\Omega_{\text{и}}$ , в якій виконуються вимоги інтервального гальмування. Множина режимів  $v''_M(v')$ , таких, що забезпечують мінімальний ризик нерозділення відцепів для кожного значення  $v'$ , утворюють в  $\Omega$  лінію мінімальних ризиків  $\bar{R}$ .

В дисертації розроблено методи виділення в області  $\Omega$  підобласті  $\Omega_{\text{и}}$  та лінії  $\bar{R}$  і виконано дослідження чинників, що впливають на їх конфігурацію. Зокрема встановлено, що напрям зменшення ризику нерозділення вздовж лінії  $\bar{R}$  однозначно визначається в залежності від довжини відчепа та розташування розділових стрілок по маршруту скочування, а мінімальний ризик  $r_{\min}$  відповідає точці перетину лінії  $\bar{R}$  та межі області  $\Omega_{\text{п}}$ , або одній із кутових точок  $\Omega_{\text{п}}$ , якщо ця область не має спільних точок з  $\bar{R}$ . Область допустимих швидкостей виходу відчепа з гальмових позицій  $\Omega_{\text{д}}$  являє собою перетин областей  $\Omega_{\text{п}}$  і

$\Omega_{\text{и}}$ :  $\Omega_{\text{д}} = \Omega_{\text{п}} \cup \Omega_{\text{и}}$ . Приклад поділу області  $\Omega$  на підобласті наведено на рис. 14.

Задача регулювання швидкості скочування середнього відчепа у розрахунковій групі з трьох відцепів полягає у пошуку таких режимів гальмування, що забезпечують досягнення найкращих показників інтервального та прицільного га-

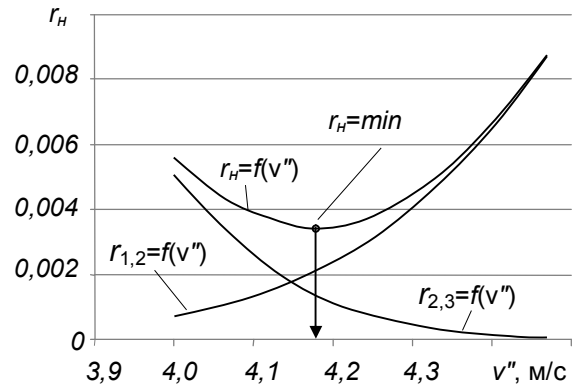


Рис. 13. Залежність ризику нерозділення відцепів від швидкості виходу середнього відчепа з СГП

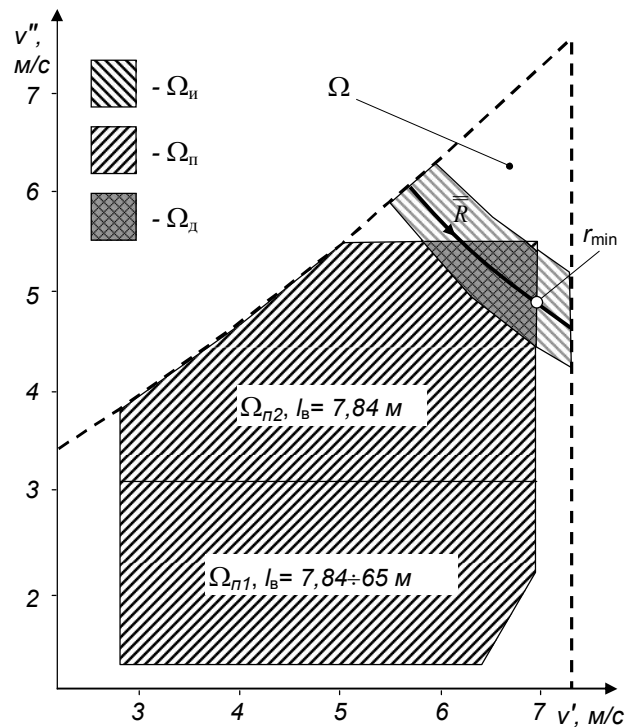


Рис. 14. Поділ області  $\Omega$  на підобласті

льмування при безумовному виконанні показників безпеки руху і формулюється як задача мінімізації критеріїв:

$$\bar{l}_b(v', v'') \rightarrow \min \quad \text{та} \quad r_h(v', v'') \rightarrow \min \quad (15)$$

при обмеженнях

$$p_{\Pi}(v', v'') \leq p_{\Pi d}; \quad p_y(v', v'') \leq p_{y d}; \quad p_b(v', v'') \leq p_{b d}, \quad (16)$$

де  $p_{b d}$  – допустима імовірність перевищення встановленої швидкості входу відчепа на уповільнювач СГП. Виконані в дисертації дослідження дозволили виділити в області  $\Omega_d$  область ефективних (незрівнянних по Парето) режимів гальмування  $\Psi_e$ . Встановлено, що ефективні режими можуть знаходитись лише на лінії мінімальних ризиків  $\bar{R}$  та на межі області  $\Omega_{\Pi}$ . При цьому одному значенню  $v''_e$  не може відповідати два ефективних режими. Вказана особливість задачі дозволяє перейти від двомірної задачі пошуку оптимальних режимів гальмування відчепів  $\mathbf{v}_e = \{v'_e, v''_e\}$  в  $\Omega_{\Pi}$  до одновірної задачі пошуку оптимальних швидкостей виходу відчепів з СГП  $v''_e$  в  $\Psi_e$ .

Існуючі методи вибору режимів гальмування окремих відчепів состава спираються на розв'язання відповідної задачі у детермінованій постановці, що не забезпечує отримання оптимального рішення в умовах дії випадкових факторів. У зв'язку з цим у дисертації сформульовано та розроблено методи розв'язання двокритеріальної задачі оптимізації режимів гальмування відчепів у стохастичній постановці

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^c \bar{l}_b(v''_j) \rightarrow \min, \\ \sum_{j=1}^c r_h(v''_j) \rightarrow \min, \\ \mathbf{v}_j \in \Psi_j, j = 1..c. \end{cases} \quad (17)$$

Для вибору режиму гальмування в  $\Psi$  використано метод лексикографічного упорядкування критеріїв. Кожен режим гальмування  $\mathbf{v} = \{v', v''\}$  характеризується вектором параметрів  $\mathbf{d} = \{\bar{l}_b, r_h\}$ . При цьому прийнято, що  $\mathbf{d}_1 < \mathbf{d}_2$ , якщо  $\bar{l}_{b1} < \bar{l}_{b2}$  або  $\bar{l}_{b1} = \bar{l}_{b2}$  та  $r_{h1} < r_{h2}$ .

Состав, який розформовується, може розглядатися як деяка фізична система, що покроково змінює свій стан, де окремим кроком є скочування одного відчепа. Враховуючи властивості задачі, вона може бути розв'язана методами динамічного програмування. Процес рішення включає етапи умовної та безумовної оптимізації. На першому етапі (умовна оптимізація) для кожного відчепа здійснюється пошук умовно оптимальних керувань  $\mathbf{v}_{1,j}^*$ , що враховують лише стан системи до його скочування. При цьому для першого відчепа безумовно оптимальним є швидкий режим скочування з мінімальним гальмуванням на першій галь-

мовій позиції. Для наступних відчепів здійснюється побудова залежностей  $\mathbf{d}_{1,j}(\mathbf{v}_{1,j}^*) = \min(\mathbf{d}_{1,j}(\mathbf{v}_{1,j-1}^*) + \mathbf{d}_j(v_j''))$ . На другому етапі (безумовна оптимізація) на підставі множини умовно оптимальних рішень для кожного відчепа визначається безумовно оптимальне рішення  $\mathbf{v}_{\text{опт}}$ .

Для перевірки ефективності розробленої методики виконано оптимізацію режимів гальмування при розпуску дослідних составів. Встановлено, що вирішення задачі у стохастичній постановці у порівнянні з рішенням задачі у детермінованій постановці за рахунок перерозподілу інтервалів на розділових елементах дозволяє скоротити кількість недопустимих ризиків нерозділення відчепів на 70-77% без погіршення показників прицільного регулювання швидкості скочування відчепів.

**В цьому розділі** розроблено імітаційну модель сортувального процесу та удосконалено метод техніко-експлуатаційної оцінки сортувальних гірок.

Сортувальна гірка є невід'ємною частиною сортувального комплексу, тому для її комплексної оцінки розроблена модель, що дозволяє імітувати всі елементи процесу розформування-формування составів поїздів. Загальна модель гірки включає модель колійного розвитку, моделі об'єктів рухомого складу, модель системи керування стрілками та уповільнювачами, модель пересування об'єктів, а також інформаційну модель.

Модель системи керування стрілками та модель колійного розвитку формалізовано на основі зважених орієнтованих графів, відповідно  $G_y$  та  $G_k$ . В основу представлення поздовжнього профілю гірки покладена його апроксимація модифікованим кубічним сплайном. Для представлення поздовжнього профілю в моделі дугам орграфа  $G_k$  у відповідність поставлено вектор параметрів

$$\mathbf{Y}_{\text{пр}} = \{K_1, K_2, K_3, l_k\}, \quad (18)$$

де  $K_1, K_2, K_3$  – коефіцієнти сплайну;  $l_k$  – довжина вертикальної кривої в межах колійної ділянки.

Невід'ємним елементом сортувальної гірки є система керування уповільнювачами, що забезпечує вибір режимів гальмування відчепів. Для урахування особливостей конструкції гальмових уповільнювачів на основі об'єктно-орієнтованого аналізу розроблено ієрархічну систему їх моделей, що дозволяє більш детально імітувати процеси регулювання швидкості відчепів та визначати енерговитрати, що пов'язані з роботою гальмових позицій. Параметризація моделей уповільнювачів здійснена на підставі результатів натурних експериментів. Вибір режимів гальмування в моделі здійснюється за алгоритмом роботи конкретної системи керування, чи за методикою, що розроблена у шостому розділі дисертації, якщо алгоритм роботи системи невідомий.

В процесі розформування приймають участь різноманітні об'єкти рухомого складу (состави, що насуваються; відчепа, що скочуються; вагони, що знаходяться на сортувальних коліях та ін.). Для представлення вказаних об'єктів імітаційна

модель процесу розформування містить моделі об'єктів рухомого складу. Елементарною одиницею при цьому є модель вагона, в якій кожен вагон представлено за допомогою структур:

$$v_{\Pi} = (c_{\Gamma}, c_{\chi}, \chi, o, v, w_{\Pi\Pi}, Y) \quad (19)$$

де  $c_{\Gamma}$ ,  $c_{\chi}$  – відповідно, ідентифікатори попереднього та наступного вагонів у відчепі;  $\chi$  – категорія об'єкта (состав, відчеп і т.і.);  $o$  – ідентифікатор відповідного об'єкту в моделі колійного розвитку;  $v$  – швидкість вагона;  $w_{\Pi\Pi}$  – номер сортувальної колії призначення вагона;  $Y$  – вектор параметрів вагона:

$$Y = (t_{\text{вг}}, q_{\text{вг}}, w_0). \quad (20)$$

Кожен тип вагона представлено структурою

$$T = (A, K_{\text{св}}). \quad (21)$$

Моделі состава та відчепів, що скочуються, являють собою двозв'язні списки вагонів, які поєднуються між собою за допомогою параметрів  $c_{\Gamma}$  и  $c_{\chi}$ .

Для імітації пересування состава та відчепів на кожному кроці  $\Delta t$  використовуються рівняння руху, в яких у якості незалежної змінної обрано час. Швидкість руху состава під час розпуску прийнята постійною  $v_p$ . Пересування відчепа на кроці  $\Delta t$  описується диференціальним рівнянням другого порядку

$$s'' = \frac{d^2 s}{dt^2} = g'(i - w_o - w_{\text{ск}} - w_{\text{св}} - w_{\text{т}}) \cdot 10^{-3}, \quad (22)$$

при початкових умовах  $s(t_j) = s_j$  и  $s'(t_j) = v_j$ . Для рішення диференціального рівняння (22) використовується метод Рунге-Кутта четвертого порядку.

Інформаційна модель містить елементи керування, що забезпечують передачу керуючих команд та аналіз результатів моделювання особою, що приймає рішення.

Удосконалена структура моделі дозволяє забезпечити сумісність моделі сортувальної гірки з загальною моделлю функціонування сортувальної станції.

Запропонована модель дозволяє для конкретної гірки, розрахункового вагонопотоку та швидкості розпуску визначати наступні показники функціонування: кількість включень уповільнювачів гальмових позицій  $K_{\text{вкл}}$ ; витрати електроенергії, що пов'язані з гальмуванням  $\Sigma E_{\text{галь}}$ , кВт-год; розгорнута довжина гальмування  $\Sigma D_{\text{тп}}$ , осе-м; загальна довжина вікон між вагонами на сортувальних коліях, що підлягають ліквідації  $\Sigma L_{\text{вк}}$ , м; кількість нерозділень відчепів на стрілочних переводах  $K_{\text{н}}$ ; імовірність перевищення встановленої ПТЕ швидкості підходу відчепів до вагонів до сортувальних коліях  $p_{\text{п}}$ .

Наведені показники фіксуються по всій сукупності составів, що розформовані за період моделювання, та використовуються для визначення економічних показників, що пов'язані з розпуском, за допомогою методу витратних ставок.

Розроблена методика використана для оцінки впливу різних заходів на показники процесу розформування составів серед яких: впровадження розрахункової швидкості підходу відчепів до групи вагонів на сортувальній колії; підвищен-

ня точності реалізації уповільнювачами заданих швидкостей виходу відчепів з гальмових позицій.

Виконаний аналіз натурних листів составів поїздів, що переробляються на гірках, показав, що у 49% вагонів перевозяться вантажі, які є не чуттєвими до підвищеної швидкості співударяння вагонів, а 11% вагонів є порожніми. ПТЕ регламентує швидкість  $v_{ПТЕ}$  підходу відчепів до вагонів, які знаходяться на сортувальних коліях за умови відсутності інформації про вагони, що співударяються. Наявність у базі даних АСКВП УЗ та в базах даних автоматизованих систем керування роботою сортувальних станцій інформації про вагони, які скочуються у складі відчепів та знаходяться на сортувальних коліях, дозволяє у автоматичному режимі встановлювати масу вагона та вантаж, що у ньому перевозиться. В цих умовах допустима швидкість підходу одиночного вагона до групи вагонів на сортувальній колії  $v_{прц}$  може бути визначена з виразу

$$v_{прц} = v_{ПТЕ} \sqrt{Q_{п} / Q_{в}}, \quad (23)$$

де  $Q_{п}$ ,  $Q_{в}$  – відповідно, маса вагона, завантаженого до вантажопідйомності, та фактична маса вагона, що скочується.

Для багатовагонних відчепів швидкість  $v_{прц}$  визначається з умови забезпечення допустимих зусиль у автозчехах та прискорень вантажів у вагонах.

Моделювання розпуску потоку составів показує, що запровадження розрахункової швидкості  $v_{прц}$  дозволяє збільшити площу області  $\Omega_{п2}$ , в першу чергу, для відчепів з порожніх вагонів і зменшити середню величину вікна на 5-7%.

Точність реалізації уповільнювачами заданих швидкостей виходу відчепів з гальмових позицій визначає як величину ризиків нерозділення відчепів на стрілках, так і величину області  $\Omega_{п}$  та характер залежності  $l_{в} = f(v', v'')$  в її межах. Взаємозв'язок між середнім квадратичним відхиленням швидкості виходу відчепів з гальмових позицій та показниками якості прицільного і інтервального гальмування представлено на рис. 15, а та б.

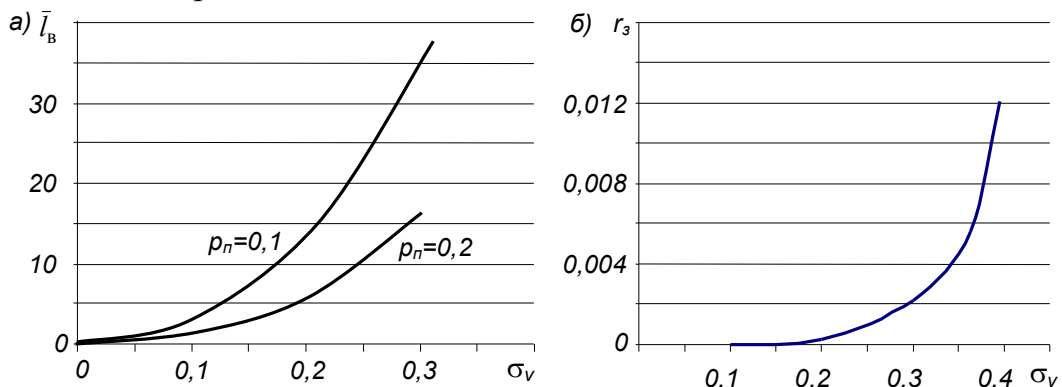


Рис. 15. Вплив точності роботи гальмових позицій на показники керування швидкістю скочування відчепів: а) прицільне гальмування; б) інтервальне гальмування

Досягнення рекомендованих для автоматизованих систем показників функціонування сортувальних гірок вимагає в першу чергу удосконалення роботи системи прицільного регулювання швидкості скочування відчепів. При цьому пови-

нні бути виконані комплексні заходи з визначення точної маси відчепів, забезпечення точності вимірювань основного питомого опору руху відчепа  $\pm 0,3$  Н/кН та зменшення середнього квадратичного відхилення швидкості виходу відчепа з ПГП від заданої до  $\sigma_v < 0,2$  м/с. Задача інтервального регулювання швидкості скочування відчепів може бути розв'язана на підставі статистичних характеристик опору руху відчепів у вагових категоріях при середньому квадратичному відхиленні швидкості виходу відчепа з гальмових позицій спускної частини гірки від заданої  $\sigma_v < 0,3$  м/с.

У додатках наведені дані для розрахунків, результати обчислювальних експериментів, методики випробувань і акти впровадження результатів дослідження.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором результати, які в сукупності вирішують науково-практичну задачу підвищення ефективності процесу розформування-формування составів вантажних поїздів за рахунок покращення якості управлінських та проектних рішень, що приймаються на підставі науково-обґрунтованих методів техніко-експлуатаційної оцінки сортувальних гірок. Виконані в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки та пропозиції:

1. Виконаний аналіз наукових робіт з проблеми підвищення ефективності процесу розформування-формування составів вантажних поїздів показав, що на теперішній час методи оцінки безпеки скочування відчепів з сортувальних гірок відсутні, а методи техніко-експлуатаційної оцінки гірок базуються на розв'язанні задачі вибору режимів гальмування у детермінованій постановці.

2. Дослідження технічного забезпечення сортувальних станцій України та характеристик вагонопотоків, які надходять у розформування, показали, що в сучасних умовах експлуатації завантаження сортувальних гірок складає 30-50%, тому задача збільшення їх переробної спроможності не є актуальною. В той же час технічне забезпечення сортувальних гірок є морально застарілим і фізично зношеним, що не забезпечує вимоги безпеки розформування-формування поїздів та не відповідає світовим аналогам щодо економічності сортувального процесу.

3. Існуюча модель регульованого скочування, в якій відчеп розглядається як гнучкий нерозтяжний стержень, не дозволяє оцінювати показники безпеки руху відчепів на гірках. В дисертації розроблено математичну модель процесу скочування, в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система недеформованих об'єктів та множини зв'язків, що об'єднують ці об'єкти у єдину конструкцію. Запропонована модель дозволяє визначати зусилля між вагонами у відчепах, зусилля у елементах конструкції вагона та його взаємодію з колією, що дає можливість оцінювати показники безпеки скочування відчепів.

4. В якості показників для оцінки безпеки процесу регульованого скочування відчепів на сортувальних гірках можуть використовуватись коефіцієнти стійкості вагона від вкочування колеса на рейку та на уповільнювач. В дисертації роз-

роблено методи оцінки вказаних коефіцієнтів на підставі математичного моделювання скочування відчепів з гірки. Встановлено, що сили, які діють на сортувальних гірках, можуть призводити до втрати стійкості вагонів лише легкої вагової категорії під час їх гальмування уповільнювачами. Несприятливі погодні умови, технічний стан залізничної колії, взаємне розташування елементів плану колійного розвитку та вагонів у відчепі можуть вимагати обмеження сили тиску шин уповільнювачів на колеса до 25% по відношенню до діючих нормативів. Вказані обмеження повинні бути враховані в автоматизованих системах керування процесом розформування составів на сортувальних гірках.

5. Удосконалено методи аналізу динаміки скочування відчепів з сортувальних гірок. При цьому скочування відчепів розглядається як випадковий процес і характеризується параметрами розподілу випадкової величини швидкості та часу скочування відчепів в окремих точках маршруту. Встановлено, що швидкість скочування у деякій точці маршруту являє собою випадкову величину, що розподілена за нормальним, а час – за логнормальним законом. При цьому середнє квадратичне відхилення часу скочування суттєво залежить від відстані скочування та режимів гальмування. У зв'язку з цим умови розділення відчепів при однакових значеннях математичного очікування величини інтервалів можуть суттєво відрізнятися і тому задача вибору режимів гальмування відчепів повинна розв'язуватись у стохастичній постановці.

6. Оцінка якості прицільного та інтервального регулювання швидкості скочування відчепів повинна здійснюватись на підставі комплексу імовірнісних показників: імовірність перевищення встановленої ПТЕ швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях, імовірність зупинки відчепів у гальмових уповільнювачах паркової гальмової позиції, середня величина вікна, що припадає на один розформований вагон, ризик нерозділення відчепів на розділових елементах. При цьому перші два показники характеризують безпеку руху і їх значення повинні бути нормовані.

7. Область допустимих швидкостей виходу відчепів з гальмових позицій являє собою частину області можливих значень їх швидкостей, в якій додатково враховуються обмеження по імовірності перевищення допустимої швидкості входу відчепів на уповільнювачі, обмеження по імовірності перевищення встановленої ПТЕ швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях, обмеження по імовірності зупинки відчепа в уповільнювачі паркової гальмової позиції, обмеження ризику нерозділення відчепів із суміжними відчепами. Область допустимих швидкостей виходу відчепів складається із двох підобластей: підобласті з постійним значенням середньої величини вікна, що припадає на один розформований вагон  $\bar{l}_в$ , та підобласті, де величина  $\bar{l}_в$  залежить від швидкості виходу відчепа з другої гальмової позиції.

8. В області можливих швидкостей виходу відчепа з гальмових позицій може бути виділена лінія мінімальних ризиків нерозділення; при цьому напрям зме-

ншення ризиків вздовж цієї лінії однозначно залежить від розташування стрілок по маршруту скочування та довжини відчепа, а мінімальне значення ризику нерозділення досягається на межі області допустимих швидкостей виходу відчепа з гальмових позицій. Виконані дослідження показали, що пошук оптимальних режимів гальмування можна обмежити множиною ефективних режимів які відповідають лінії мінімальних ризиків і межі області  $\Omega_{\pi}$ . Вказана особливість задачі дозволяє перейти від двомірної задачі пошуку оптимальних швидкостей виходу відчепів з гальмових позицій в області допустимих режимів до одновірної задачі пошуку оптимального режиму у множині ефективних режимів.

9. Формалізована двокритеріальна задача оптимізації режимів гальмування відчепів у стохастичній постановці. При цьому у якості критеріїв розглядаються середня величина вікна, що припадає на один розформований вагон та ризик нерозділення відчепів на розділових елементах. Запропоновано алгоритм пошуку оптимального режиму гальмування на основі методу динамічного програмування. Встановлено, що вирішення задачі у стохастичній постановці у порівнянні з рішенням задачі у детермінованій постановці за рахунок перерозподілу інтервалів на розділових елементах дозволяє скоротити кількість недопустимих ризиків нерозділення відчепів на 70-77% без погіршення показників прицільного регулювання швидкості скочування відчепів.

10. Розроблена імітаційна модель розпуску составів на сортувальній гірці. Загальна модель гірки включає модель системи керування стрілками і уповільнювачами, модель колійного розвитку, моделі об'єктів рухомого складу, модель пересування об'єктів та інформаційну модель. Модель системи керування стрілками та модель колійного розвитку формалізовано на основі зважених орієнтованих графів. В основу представлення поздовжнього профілю гірки покладена його апроксимація модифікованим кубічним сплайном. При цьому дугам графа, що представляє план колійного розвитку поставлено у відповідність вектор кутових коефіцієнтів дотичних, що дозволяє отримувати неперервні по першій похідній профілі маршруту скочування для усіх колій, що співпадають на спільних ділянках. Для моделювання керованого скочування відчепів состава на спускній частині гірки використовуються попередньо отримані режими гальмування кожного відчепа. Розроблена модель дозволяє визначати техніко-експлуатаційні показники процесу розформування по сукупності составів, що розформовані за період моделювання, та розраховувати економічні показники, що пов'язані з розпуском.

11. Сучасні норми швидкості підходу відчепів до вагонів на сортувальних коліях не враховують стан вагонів у відчепі (завантажений чи порожній) та вид вантажу, який у ньому перевозиться. Використання вказаної інформації при виборі режимів гальмування дозволяє скоротити величину вікон у сортувальному парку на 5-7% без погіршення умов безпеки руху.

12. Отримано залежності показників роботи автоматизованої сортувальної гірки від параметрів окремих її підсистем. Досягнення рекомендованих для авто-

матизованих систем показників функціонування сортувальних гірок вимагає впровадження комплексних заходів з визначення точної маси відчепів, забезпечення точності вимірювань основного питомого опору руху відчепа  $\pm 0,3$  Н/кН та зменшення середнього квадратичного відхилення швидкості виходу відчепа від заданої з паркових гальмівних позицій до  $\sigma_v < 0,2$  м/с та з гальмових позицій спускної частини гірки до  $\sigma_v < 0,3$  м/с.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бобровский В.И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках: Монография / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Божко Н.П. Рогов Н.В., Березовый Н.И., Кудряшов А.В. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2010. 260 с.
2. Бобровский В.И. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций: Монография / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Вернигора Р.В., Малашкин В.В. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2010, 156 с.
3. Бобровський В.І. Інтегрована система структурно-параметричних моделей залізничних станцій / Бобровський В.І., Козаченко Д.М. // Удосконалення управління експлуатаційною роботою залізниць, зб. наукових праць УкрДАЗТ, вип. 53. 2003 с. 107-114
4. Бобровский В.И. Расчет максимальных сдвигающих усилий, действующих на подвижной состав при закреплении на станционных путях / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. //Зб. наук. праць КУЕТТ: Серія “Транспортні системи і технології”. - Вип. 1-2, 2003, с. 80-84
5. Бобровский В.И. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках/ Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –№ 3(42). – Харків, 2003, с. 3-8
6. Бобровский В.И. Эргатические модели железнодорожных станций/ Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Вернигора Р.В. //Зб. наук. праць КУЕТТ: Серія “Транспортні системи і технології”. - Вип. 5. – К.: КУЕТТ, 2004. – с. 80-86.
7. Бобровский В.И. Техничко-экономическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Вернигора Р.В. // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 6. – с. 17-21
8. Бобровский В.И. Базова модель колійного розвитку в імітаційних моделях залізничних станцій/ Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Вернигора Р.В. //Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України, зб. наукових праць УкрДАЗТ, вип. 62. 2004 с. 20-25
9. Козаченко Д.М. Аналіз впливу спеціалізації сортувальних колій на показники процесу розформування составів/ Козаченко Д.М., Березовий М.І, Таранець О.І. // Восточно-европейский журнал передовых технологий 6/2(24), 2006, с 7-9
10. Козаченко Д.М. Дослідження параметрів потоків поїздів на залізничних

напрямок/ Козаченко Д.М., Мозолевич Г.Я //Восточно-европейский журнал передовых технологий, №3/5(45), Харків, 2010, с 17-21

11. Козаченко Д.М. Дослідження впливу параметрів відчепів та умов їх скокування на величину інтервалів на розділових стрілках/Козаченко Д.М. Березовий М.І, Коробйова Р.Г. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 12. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. с 78-82

12. Козаченко Д.М. Моделювання роботи сортувальної гірки в умовах невідзначеності параметрів відчепів та характеристик навколишнього середовища/ Козаченко Д.М., Березовий М.І, Таранець О.І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип.. 16. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007., с 73-76

13. Козаченко Д.М. Оптимізація розподілу сортувальних колій між призначеннями плану формування/ Козаченко Д.М. Березовий М.І, Коробйова Р.Г. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 22. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008., с 52-55

14. Козаченко Д.М. Аналіз можливості підвищення точності характеристик відчепів за результатами скокування відчепів/ Козаченко Д.М., Таранець О.І. //Восточно-европейский журнал передовых технологий, №3(33), Харків, 2008, с 68-72

15. Мямлін С.В. Визначення показників безпеки руху вагонів при гальмуванні уповільнювачами/ Мямлін С.В., Козаченко Д.М., Гаркаві Н.Я.// Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 23. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008, с 108-110

16. Козаченко Д.М. Дослідження впливу спеціалізації сортувальних колій на тривалість операцій по їх підготовці до розпуску/ Козаченко Д.М., Вернигора Р.В., Березовий М.І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 24. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008., с 34-37

17. Мямлин С.В. Динамика вагонов в отцепе при скатывании с сортировочной горки/ Мямлин С.В., Козаченко Д.Н. //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Вип. 17 – вид-во ДонІЗТ, 2009, с. 150-155

18. Козаченко Д.М. Модель колійного розвитку для імітаційного моделювання гіркових процесів/ Козаченко Д.М. //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 29 – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009., с 53-57

19. Козаченко Д.М. Модель системи управління пересуванням рухомого складу на сортувальних гірках/ Козаченко Д.М. //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 31. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010., с 46-49

20. Козаченко Д.М. Моделювання скочування відчепа як динамічної системи взаємопов'язаних вагонів/ Козаченко Д.М. //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Вип. 20 – вид-во ДонІЗТ, 2009,с 5-15

21. Козаченко Д.Н. Исследование прицельного регулирования скорости скатывания отцепов в условиях неопределенности информации об их ходовых свойствах/ Козаченко Д.Н., Коробйова Р.Г., Таранець О.І.// Восточно-европейский журнал передовых технологий №6/2(42) 2009, с 45 - 50

22. Бобровський В.І. Моделювання роботи вагонних уповільнювачів в задачах дослідження сортувального процесу / Бобровський В.І., Козаченко Д.М., Коробйова Р.Г. //Залізничний транспорт України № 1, 2010, с 5-8

23. Бобровський В.І. Моделирование процесса скатывания отцепов с сортировочной горки/ Бобровський В.І., Козаченко Д.Н. // 3б. наук. праць ДЕТУТ: Серія “Транспортні системи і технології”. - Вип. 16, 2010, с 20-29

24. Козаченко Д.М. Новий вагонний уповільнювач УВСК українського виробництва/ Козаченко Д.М., Вернигора Р.В., Березовий М.І. Гарбузов А.А.// Залізничний транспорт України № 2, 2010, с 34-38

25. Козаченко Д.М. Дослідження ефективності заходів автоматизації управління швидкістю скочування відцепів на сортувальних гірках/ Козаченко Д.М. //Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, № 5(147), частина 2, 2010, с 276-284

26. Козаченко Д.М. Исследование требований к системам прицельного регулирования скорости скатывания отцепов при автоматизации расформирования составов/ Козаченко Д.М. //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту української державної академії залізничного транспорту. – Вип. 22 – вид-во ДонІЗТ, 2010, с. 5-13

27. Козаченко Д.Н. Исследование условий интервального регулирования скорости скатывания отцепов на автоматизированных горках/ Козаченко Д.Н. //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 34. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010., с 46-50

28. Козаченко Д.Н. Критерий оптимизации режимов торможения отцепов расчетной группы в условиях действия случайных факторов/ Козаченко Д.Н. // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту української державної академії залізничного транспорту. – Вип. 23 – вид-во ДонІЗТ, 2010, с. 14-21

29. Бобровский В.И. Исследование влияния режимов торможения отцепов на условия их разделения на стрелках / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Болвановская Т.В. // *Залізничний транспорт України* № 3, 2011, с 3-6

**Додаткові праці:**

30. Шевченко В.В. Системний економічний підхід до безпеки руху поїздів / Шевченко В.В., Пшінько О.М., Мямлін С.В., Козаченко Д.М. // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – Вип. 26. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009., с 236-238

31. Козаченко Д.М. Дослідження ефективності заходів автоматизації управління швидкістю скочування відцепів на сортувальних гірках/ Козаченко Д.М. // *Вагонний парк*. – Вип. 12 – 2010, 4-8

32. Козаченко Д.М. Дослідження області допустимих режимів гальмування відцепів / Козаченко Д.М. // *Збірник наукових праць ДНУЗТ “Транспортні системи і технології перевезень”*. - 2011, Вип. 1, с. 46-49

33. Пат. №38509 Україна, МПК (2006) B61G 3/00. Зчіпний пристрій рейкового транспорту/Мямлін С.В., Боднар О.С., Недужа Л.О. Козаченко Д.М.: власник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – и 2008 10036; заявл. 04.08.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1

34. Бобровский В.И. Интегрированные модели железнодорожных станций / Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – № 4,5(37). – Харків, 2002, с. 23

35. Козаченко Д.Н. Моделирование сортировочного процесса на горках/ Козаченко Д.Н., Таранец О.И.// *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт, наука, бизнес: проблемы и стратегия развития»*, посв. 130-летию Сверд. ж.д.: сб. научн. Тр. - Екатеринбург: УрГУПС. – 2008. - 290 с.

36. Козаченко Д.М. Техніко-експлуатаційна та техніко-економічна оцінка сортувальних гірок / Козаченко Д.М., Таранец О.І.// *Материалы третьей Международной научно-практической конференции «Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте»*. – К.: ГЭТУТ, 2008 – с 370, 371

37. Козаченко Д.М. Анализ динамики подвижного состава при скатывании с сортировочных горок / . Козаченко Д.М. // *Материалы Международной научно-практической конференции «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте»*. – Мисхор.: ДНУЖТ, 2009 – с 30, 31

38. Мямлин С.В. Моделирование динамики подвижного состава на сортировочных горках/ Мямлин С.В., Козаченко Д.Н. // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса»* - Гомель: БелГУТ, 2008, с 80

39. Козаченко Д.Н. Оценка технико-эксплуатационных параметров нового вагонного замедлителя/ Козаченко Д.Н., Березовый Н.И, Вернигора Р.В., Муха

В.П.//Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. Тези доповідей 69 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ДПТ. - 2009. - С. 76-77

40. Козаченко Д.Н. Совершенствование оценки конструкции и технического оснащения сортировочных горок/ Козаченко Д.Н., Таранец О.И.//Труды 10 научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», Москва, МИИТ, 2009, с. X-21, X-22

41. Козаченко Д.М. Дослідження безпеки скочування відчепів з сортувальної гірки методами моделювання/ Козаченко Д.М. //Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. Тези доповідей 70 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ДПТ. - 2010. - С. 129-130

42. Козаченко Д.М. Вибір режимів гальмування відчепів, що скочуються в умовах невизначеності/ Козаченко Д.М. //Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології / Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції – Київ, ДЕТУТ. – 2011. - с. 187-188

43. Козаченко Д.М. Области допустимих режимів скочування відчепів в умовах невизначеності інформації про їх ходові характеристики / Козаченко Д.М., Коробйова Р.Г. //Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. Тези доповідей 71 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ДПТ. - 2010. - С. 134-135

#### АНОТАЦІЯ

Козаченко Д. М. Розвиток теоретичних основ оцінки техніко-експлуатаційної ефективності та безпеки функціонування сортувальних гірок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2011.

Дисертація присвячена питанням підвищення безпеки та експлуатаційної ефективності процесу розформування-формування составів вантажних поїздів за рахунок покращення якості управлінських та проектних рішень, що приймаються на підставі науково-обґрунтованих методів оцінки сортувальних гірок.

У роботі виконано дослідження технічного забезпечення сортувальних гірок України та вагонопотоків, що на них переробляються. Для дослідження величини сил, що діють між вагонами відчепа, між окремими елементами вагона та у його взаємодії з колією розроблено імітаційну модель, в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система. На основі запропонованої моделі розроблено методи оцінки безпеки регульованого скочування відчепів. Удосконалено методи оцінки динаміки скочування відчепів з гірки за рахунок урахування випадкового характеру їх параметрів та умов їх скочування. Це дозволило досліджувати вплив

режимів гальмування на параметри розподілу випадкових величин швидкості та часу скочування відчепа. Для оцінки якості режимів гальмування розроблено комплекс імовірнісних показників. Сформульована задача вибору режимів гальмування відчепів состава як задача пошуку таких швидкостей їх виходу з гальмових позицій, що забезпечують мінімальну величину вікон на сортувальних коліях та мінімальний ризик нерозділення відчепів на стрілках при заданому рівні безпеки сортувального процесу. Задача формалізована і розв'язана як задача динамічного програмування. Розроблено модель розформування потоку составів. Методами моделювання оцінено ефективність впровадження розрахункової швидкості підходу вагонів до відчепів на сортувальних коліях та підвищення точності реалізації уповільнювачами заданих швидкостей виходу з гальмових позицій.

Результати роботи впроваджені на Придніпровській, Донецькій та Литовській залізницях, при розробці нормативного документа „Правила і норми проектування сортувальних пристроїв на залізницях України” та у навчальному процесі при підготовці спеціалістів і магістрів за спеціальністю «Організація перевезень і управління на залізничному транспорті».

**Ключові слова:** сортувальні станції, сортувальні гірки, розформування составів, режими гальмування, безпека руху.

#### АННОТАЦИЯ

Козаченко Д.Н. Развитие теоретических основ оценки технико-эксплуатационной эффективности и безопасности функционирования сортировочных горок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2011.

Диссертация посвящена вопросам повышения безопасности и эксплуатационной эффективности процесса расформирования-формирования составов грузовых поездов за счет улучшения качества управленческих и проектных решений, которые принимаются на основе научно-обоснованных методов оценки сортировочных горок.

Дана оценка теоретическим и практическим подходам, связанным с оценкой функционирования сортировочных горок. Установлено, что методы оценки технико-эксплуатационной эффективности и безопасности функционирования сортировочных горок требуют совершенствования.

Выполнены исследования технического оснащения и вагонопотоков, которые перерабатываются на сортировочных горках Украины. После резкого спада объемов перевозок сортировочные горки Украины имеют существенные резервы перерабатывающей способности. В то же время их техническое оснащение является физически и морально изношенным и не обеспечивает требований безопасности и экономичности сортировочного процесса. В этой связи тема работы явля-

ется актуальной.

Для оценки показателей безопасности работы горки разработана математическая модель регулируемого скатывания отцепа, в которой отцеп рассматривается как пространственная динамическая система. Указанная модель позволяет исследовать величину сил, действующих между вагонами отцепа, между отдельными элементами конструкции вагона, а также между вагоном и путем. Для оценки показателей безопасности регулируемого скатывания отцепов предложено использовать коэффициенты устойчивости колесной пары от схода с рельсов (по условиям вкатывания) и коэффициент устойчивости от вкатывания колес на шины замедлителей.

Усовершенствованы методы анализа динамики скатывания отцепов с горки путем учета случайного характера их параметров и условий скатывания. Это позволило оценить влияние режимов торможения на параметры распределения случайных величин скорости и времени скатывания отцепов. Для оценки качества торможения отцепов предложено использовать комплекс вероятностных показателей. Так, для оценки прицельного регулирования скорости предложено использовать вероятность превышения установленной ПТЕ скорости подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути, вероятность остановки отцепа в замедлителе парковой тормозной позиции и среднюю величину окна, приходящуюся на один расформированный вагон. Для оценки режимов интервального регулирования скорости скатывания предложено использовать риск неразделения отцепов. В диссертации разработаны методы выделения областей допустимых режимов торможения отцепов замедлителями. Сформулирована в стохастической постановке задача выбора режимов торможения отцепов как задача поиска таких скоростей выхода отцепов из тормозных позиций, которые обеспечивают минимальную величину окон на сортировочных путях и минимальный риск неразделения отцепов при заданном уровне безопасности сортировочного процесса. Задача формализована и решена как задача динамического программирования. Разработана модель расформирования потока составов. Методами моделирования оценена эффективность внедрения расчетной скорости подхода отцепов к вагонам на сортировочных путях и повышения точности работы тормозных позиций.

Результаты работы внедрены на Приднепровской, Донецкой и Литовской железных дорогах, при разработке нормативного документа „Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Украины” и в учебном процессе при подготовке специалистов и магистров по специальности «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте».

**Ключевые слова:** сортировочные станции, сортировочные горки, расформирование составов, режимы торможения, безопасность движения.

## THE SUMMARY

Kozachenko D.M. Development of estimation theory of technical and operational efficiency and safety of sorting humps operation. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Doctor of technical science on speciality 05.22.20 – Maintenance and repair of transport means. - Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2011.

The dissertation is devoted to the reliability improvement and operational efficiency of the process of breaking-up of freight trains at the cost of improvement of management and design decisions, which are made on the basis of scientifically grounded methods of sorting humps evaluation.

The study of technical support of Ukrainian marshaling yards and car traffic volume which should be sorted is carried out in the paper. A simulation model has been developed for studying magnitudes of forces which effect between cuts of cars, between separate elements of a car and at interaction of a car with a track. In this model a cut is regarded as three-dimensional dynamic system. The safety estimation methods for control of the cuts rolling downhill have been developed on the basis of the proposed model. The methods of dynamics estimation of cuts rolling downhill have been improved by tacking into account the random character of their parameters and conditions of their rolling downhill. That helped to study the influence of braking modes on random distribution parameters of speed and time for the car rolling downhill. The complex of probability rates has been developed for estimation braking modes quality. The problem of braking modes of cuts of cars choice has been formulated as a search problem of such speeds of cars leaving braking positions, which would ensure minimum gaps on sorting tracks and minimum risk of fail in uncoupling of cuts on switches at the prescribed safety level of classification process. The problem is formalized and solved as a problem of dynamic programming. The model of breaking-up of the traffic volume of trains has been developed. On base of simulation methods the efficiency of rated speed introduction to cars approaching to cuts of cars on the sorting tracks and of accuracy enhancement of given speeds realization when leaving the braking positions, has been estimated.

The results of the study have been implemented on Pridnieprovskaya Railway, Donetskaya Railway, Lithuanian Railway, in the development of normative document “Regulations and norms of sorting equipment design on Ukrainian railways” and in the educational process for teaching of specialists and masters by speciality “Transportation organization and transport control”.

**Keywords:** marshaling yards, sorting humps, breaking up of trains, braking modes, traffic safety.

КОЗАЧЕНКО ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60x84 1/16. Ум. др. арк. 1,9. Обл.-вид. арк.2,0.

Підписано до друку 12.09.2011 р

Замовлення № 1567 Тираж 100 екз.

Видавництво Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК №1315 від 31.03.03

Адреса видавництва і ділянки оперативної поліграфії:  
Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, 49010.  
[www.diitrvv.dp.ua](http://www.diitrvv.dp.ua)