

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

Козаченко Дмитро Миколайович

УДК 656.212

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

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація
на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук

Науковий консультант:
Бобровський Володимир Ілліч
доктор технічних наук,
професор

Дніпропетровськ – 2011

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК.....	14
1.1. Сучасні напрямки підвищення ефективності функціонування сортувальних гірок.....	14
1.2. Методи моделювання процесу скочування відчепів.....	19
1.3. Проблеми оцінки сортувального процесу на гірках	28
1.4. Проблеми забезпечення безпеки сортувального процесу на гірках..	35
1.5. Висновки по розділу 1	47
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК УКРАЇНИ	49
2.1. Аналіз технічного забезпечення сортувального процесу на залізницях України	49
2.1.1. Характеристика потужності сортувальних пристроїв	49
2.1.2. Пристрої регулювання швидкості скочування відчепів	50
2.1.3. Стан колії гірочних горловин сортувальних парків	53
2.1.4. Профіль спускної частини гірки і сортувальних колій	58
2.2. Аналіз структури парку вантажних вагонів України.....	61
2.2.1. Аналіз структури вагонного парку за власністю	61
2.2.2. Аналіз технічних параметрів вагонів	64
2.3. Аналіз вагонопотоків, що надходять у переробку на сортувальних станціях	66
2.4. Постановка задач дослідження. Структура, послідовність та методи їх проведення.	73
2.5. Висновки по розділу 2	77
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СКОЧУВАННЯ ВІДЧЕПА З ГІРКИ ЯК ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	79
3.1. Постановка задачі побудови математичної моделі скочування, в якій відчеп розглядається як динамічна система	79

3.2. Модель відчепа як динамічної системи	80
3.2.1. Одномірна модель відчепа	80
3.2.2. Просторова модель вагона	82
3.3. Модель маршруту скочування	84
3.4. Моделювання руху відчепу як одномірної системи	87
3.4.1. Розрахунок сил, що діють на вагони відчепа під час скочування з гірки	87
3.4.2. Рішення диференціального рівняння руху в одномірній моделі	89
3.5. Моделювання просторового руху вагона у відчепі, що скочується з гірки	90
3.5.1. Формування вертикальних та поперечних сил у міжвагонних з'єднаннях відчепа	91
3.5.2. Формування вертикальних сил у буксових вузлах при проходженні кривих	93
3.5.3. Формування вертикальних та поперечних сил в місцях контакту колеса та рейки.	96
3.5.4 . Моделювання руху розрахункового вагона.	100
3.6 . Програмна реалізація моделі скочування відчепа з гірки як динамічної системи	107
3.7. Висновки по розділу 3	112
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ РУХУ ПРИ СКОЧУВАННІ ВІДЧЕПІВ З СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК	113
4.1. Постановка задачі дослідження умов забезпечення безпеки руху під час регульованого скочування відчепів з гірки	113
4.2. Умови сходу вагонів з рейок в процесі скочування з гірки	115
4.2.1. Витискання вагона	115
4.2.2. Вкочування колеса на рейку	118
4.3. Аналіз сил, що діють на колісні пари вагонів при скочуванні відчепа з гірки	120

4.3.1. Статичні умови вкочування колеса на рейку	120
4.3.2 . Динамічні умови вкочування колеса на рейку.....	121
4.3.3. Умови вкочування колеса на шини уповільнювачів	123
4.4. Дослідження умов скочування багатовагонних відчепів.....	130
4.5. Визначення показників безпеки руху вагонів на основі моделювання скочування відчепів з гірки	133
4.6. Висновки по розділу 4	136
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СКОЧУВАННЯ ВІДЧЕПІВ НА СОРТУВАЛЬНИХ ГІРКАХ В УМОВАХ ДІЇ ВИПАДКОВИХ ФАКТОРІВ.....	137
5.1. Опір руху вантажних вагонів	137
5.1.1. Основний опір руху вантажних вагонів	137
5.1.2. Опір руху вантажних вагонів від стрілок та кривих.....	138
5.1.3. Опір руху вантажних вагонів від середовища та вітру	138
5.1.4 . Гальмовий опір руху вантажних вагонів.....	141
5.2. Модель скочування відчепа з гірки, що враховує стохастичний характер гіркових процесів	143
5.2.1. Модель відчепа	143
5.2.2. Модель сортувальної гірки	144
5.2.3. Моделювання скочування відчепів	146
5.3. Програмна реалізація моделі скочування одиночних відчепів в умовах невизначеності інформації про їх ходові характеристики та умови скочування.....	147
5.4 . Дослідження впливу випадкових параметрів відчепів на час та швидкість їх руху в межах гіркової горловини.....	149
5.5. Висновки по розділу 5	154
РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ НА УМОВИ ЇХ СКОЧУВАННЯ З СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК	155

6.1 . Проблеми вибору режимів регулювання швидкості скочування відчепів	155
6.2. Оцінка якості прицільного регулювання швидкості скочування відчепів у стохастичних умовах	161
6.3. Імовірнісний критерій оцінки якості інтервального регулювання швидкості скочування відчепів	171
6.4. Дослідження впливу режимів гальмування на якість інтервального регулювання швидкості відчепів	177
6.5. Допустимі режими гальмування відчепів.....	184
6.6. Ефективні режими гальмування відчепів	190
6.7. Оптимізація режимів гальмування відчепів у стохастичних умовах.....	200
6.8. Висновки по розділу 6	206
РОЗДІЛ 7 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК В УМОВАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗФОРМУВАННЯ СОСТАВІВ	209
7.1. Загальна структура моделі сортувального процесу	209
7.2. Модель колійного розвитку сортувальної гірки	209
7.3. Формалізація процесу гальмування відчепа при скочуванні з гірки	217
7.4. Модель системи управління пересуванням рухомого складу	227
7.5. Моделі об'єктів рухомого складу, що приймають участь в процесі розформування составів	232
7.6. Моделювання випадкового потоку відчепів та вагонів на гірках ...	233
7.7. Моделювання переміщення составів та відчепів на гірках	236
7.8. Техніко-експлуатаційна оцінка ефективності функціонування сортувальних гірок на основі імітаційного моделювання.....	237
7.9. Дослідження ефективності заходів з підвищення якості сортувального процесу на гірках	239
7.10. Висновки порозділу 7	253

ВИСНОВКИ	255
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	260
ДОДАТКИ	287
Додаток А. Об'єкти інтелектуальної власності створені в результаті дисертаційного дослідження	288
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	289
Додаток В. Представлення колійного розвитку в моделі скочування ...	296
Додаток Д. Результати обчислювальних експериментів по скочуванню відчепа важкої вагової категорії в стохастичних умовах	298
Додаток Е. Моделювання розділення відчепів у стохастичних умовах	304
Додаток Ж. Апроксимація лінії мінімальних ризиків різними кривими	305
Додаток З. Робоча програма і методика випробувань вагонного уповільнювача УВСК для визначення часу його спрацьовування	306

ВСТУП

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 управління 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 [159] 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 актуальним.

плуатації 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 [187] (розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2006 № 651-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 подвижного 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 состава

вів 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 рівнянь для моделювання процесів руху відчепів на сортувальних гірках як динамічних систем; теорія безпеки руху поїздів, математичне моделювання для оцінки показників безпеки процесу регулюва-

ного 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, математичне 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 оптимізувати вибір режимів гальмування як в умовах експлуатації діючих сортувальних гірок та і при виконанні оцінки якості проектуємих сортувальних гірок.

6) Удосконалено метод техніко-економічної оцінки функціонування сортувальних гірок на основі математичного моделювання процесу розформування складів, що, на відміну від існуючих, враховує параметри технічного забезпечення процесу розформування складів, функціонування системи управління 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» (свідectво про державну реєстрацію авторських прав на твір № 30170, див. Додаток А).

Результати роботи використані: для оцінки безпеки процесу розформування складів 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. Ла-

заряна. Відповідні акти впровадження результатів дослідження наведені у Додатку Б до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Всі результати теоретичних та експериментальних досліджень, що наведені у роботі, отримані автором самостійно. Статті [83, 84, 86, 78, 82, 95] опубліковані без співавторів. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає у наступному: в монографії [21] автором удосконалено модель скочування відчепів та розроблено модель розпуску потоку составів; в монографії [17] та в статті [29] розроблено методи автоматизованого формування моделей колійного розвитку; в [25] виконано дослідження величини сил, що діють на рухомий склад; в [16, 27, 26] виконано декомпозицію загальної моделі станції та розроблено моделі об'єктів рухомого складу; в [28] розроблено модель заняття колій рухомим складом; в [72, 81, 88] виконано статистичні дослідження параметрів вагонопотоків; в [76, 85, 73, 77] розроблено методи оцінки динаміки скочування відчепів в умовах дії випадкових факторів; в [134, 131] створено модель, в якій відчеп розглядається як динамічна система, та розроблено методи оцінки безпеки регульованого скочування вагонів; в [30, 19] розроблено систему моделей гальмових уповільнювачів; в статті [87] автору належить методика випробування уповільнювача; в статті [15] 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 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті» (Київ, ДЕТУТ, 2008); 5 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 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, БелГУТ, 2008); 10 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.