

Ростислав Дьомін¹, Юрій Дьомін^{2*}, Ганна Черняк³, Володимир Ноженко⁴

¹ В.о. директора, Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2283-8360>

² Професор, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2851>

³ Старший науковий співробітник, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1297-8212>

⁴ Проректор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-4958>

* Автор, відповідальний за листування: domin1520.1435mm@gmail.com

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО РОЗСЛІДУВАННЯ СХОДЖЕННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З РЕЙОК

В статті представлено засади метода оперативного розслідування сходження рухомого складу з рейок. Цей метод призначено для виявлення найбільш суттєвих механічних причин транспортних подій з тим, щоб на підставі отриманих даних знаходити напрямки подальшого удосконалення вимог безпеки руху щодо стану утримання вантажних вагонів і колії. Розроблений метод встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху поїздів, та виявляє значущість технічних чинників, які спровокували певну подію. За цим методом оперативне розслідування сходження рухомого складу з рейок ґрунтується на розробці адекватних комп'ютерних моделей динаміки вагонів у складі поїздів. При цьому при детально відображаються всі особливості вагона, який зійшов з рейок першим. Представлений метод ґрунтується на засадах факторного аналізу, де інтервали варіювання чинників події представлені в натуральних одиницях вимірювання. При цьому оцінювання показників безпеки за кожним дослідом плану експерименту також здійснюється з врахуванням їх розмірності. Внаслідок цього побудована функція множинної регресії за обраним показником безпеки руху дозволяє не тільки визначити значущість чинника події сходження, але й встановити рівень чинників, при перевищенні яких порушуються критерії безпеки руху, тобто визначити границі області з прийнятним рівнем безпеки руху.

Ключові слова: рухомий склад, сходження з рейок, комп'ютерне моделювання, динамічні показники безпеки руху.

Вступ. Транспортні події на залізницях, що пов'язані з трошею поїздів, залежать від множини причин як об'єктивного, так і суб'єктивного характеру. Рівень експлуатаційної безпеки рейкових екіпажів у механічному сенсі визначається головним чином запасом їхньої стійкості від сходження з рейок, що залежить від показників динамічної взаємодії ходових частин і колії. Умови безпеки руху поїздів переважно залежать від конструкційних характеристик і технічного стану ходових частин

рухомого складу та колійної структури. Відповідні чинники набувають все більшої ваги з об'єктивним підвищенням вимог до якості перевезень пасажирів і вантажів.

Як відомо, більшість транспортних подій пов'язана з випадками сходжень з рейок вантажних вагонів. Стан вагонного парку свідчить про відсутність проривних наукоємних технічних рішень щодо конструкцій вагонів та технологій їх експлуатації. Так звані інноваційні рішення спрямовані виключно на модернізацію існуючих проектів. Зволікання з технічним переозброєнням залізниць за рахунок поповнення транспортними засобами нової генерації стає однією з провідних причин поточного програшу залізничного транспорту в конкуренції з автомобільним.

Встановлення механічних причин сходження рухомого складу з рейок є достатньо складним завданням з огляду на значну кількість чинників, що сприяли сходженню, й неповноту інформації, яка характеризує різноманітні причини або їх збіг стосовно певного випадку сходу. Під час службового розслідування встановлюється вся можлива інформація стосовно сходження, й далі вона використовується в якості вихідної для з'ясування того, які ж саме чинники обумовили досліджувану транспортну подію. При цьому чинниками причин сходження можуть бути обставини, характеристики або параметри, які відносяться до рухомого складу, рейкової колії, режиму руху тощо.

В окремих випадках розслідування сходжень рухомого складу з рейок залишаються не з'ясованими причини, що спровокували процеси втрати контакту між колесом і рейкою, тоді як були виконані вимоги з безпеки руху за всіма нормативними документами. В цих випадках нелегко з'ясувати однозначну причину сходу, виявити серед декількох ймовірних чинників найбільш суттєвий у від'ємному сенсі, тобто такий, за відсутності якого сходження не сталося б. Також важливо з'ясувати найбільш суттєву причину сходження рухомого складу з рейок у випадку, коли одночасно порушені вимоги нормативних документів з безпеки руху за кількома факторами.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Безпека залізничного транспорту як ключова проблема включає широкий спектр складових, серед яких чільне місце належить питанням динаміки руху транспортних засобів [1-5]. В механічному сенсі рівень експлуатаційної безпеки рейкових екіпажів головним чином визначається запасом їхньої стійкості в рейковій колії [6-9]. Через це в галузі механіки рухомого складу роль науково-дослідних робіт з вивчення перебігу динамічних процесів, що впливають на умови розвитку аварійних ситуацій пов'язаних зі сходженнями з рейок рухомого складу, залишається гостро актуальною на всіх етапах розвитку залізничного транспорту [10-14].

Важливим підходом щодо встановлення причинно-наслідкового зв'язку між чинниками подій і сходженнями рухомого складу з рейок є відтворення динамічних процесів, які супроводжували подію. Отримати достовірні оцінки показників безпеки руху за різних експлуатаційних умов і параметрів, які характеризують технічний стан рухомого складу й колії, дозволяє комп'ютерне моделювання динаміки рухомого складу. Тому найбільш перспективним в цьому відношенні виявляється технологія комп'ютерного моделювання, зорієнтована на математичну оцінку ризиків сходження рухомого складу з рейок, яку розроблено в межах загальної розрахунково-експериментальної концепції [15].

Аналіз досліджень динаміки і безпеки руху рейкових транспортних засобів дає підстави для твердження, що проблемними напрямками розвитку методів оцінки ризиків сходження рухомого складу з рейок є: оперативне встановлення ймовірних чинників сходження; оцінювання ризику сходження за характеристиками технічного стану ходових частин рухомого складу та колії. На відміну від оперативного встановлення причин сходження рухомого складу з рейок оцінювання ризиків сходження виявляється завданням з

декількома критеріями безпеки руху. В якості ризику сходження прийнята інтегрована імовірнісна міра, пов'язана з умовами порушення будь-якого з критеріїв безпеки на множині типових експлуатаційних режимів. Теоретичну основу, спільну для обох напрямків, складають достатньо розроблені на даний час методи обчислювальної механіки, які втілилися в сучасному програмному забезпеченні, призначеному для моделювання динаміки рухомого складу [16].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є представлення метода створюваного для оперативного розслідування сходжень рухомого складу з рейок. Завдання дослідження полягає у розвитку прикладного напрямку розробленого метода.

Матеріали та методи дослідження. Оперативне розслідування сходжень рухомого складу з рейок ґрунтується на комплексному аналізі показників безпеки й залученні відповідного математичного апарату, що надає змогу встановити значущість або вагомість кожного з чинників. Зокрема застосовуються методи обчислювальної механіки, теорія планування експерименту, факторний аналіз, теорія ймовірностей, прийняття рішень та штучного інтелекту.

Загальна характеристика розроблюваного метода. Метод оперативного розслідування сходження рухомого складу з рейок (далі – метод ОРС) призначено для виявлення серед можливих механічних причин транспортних подій найсуттєвіших, щоб на підставі отриманих даних знаходити напрямки подальшого удосконалення вимог безпеки руху щодо стану утримання вантажних вагонів і колії й умов їх раціональної експлуатації щодо забезпечення прийняттого рівня безпеки руху. Метод ОРС встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху вантажних вагонів, що зійшли з рейок, та виявляє значущість технічних чинників, які спровокували певну подію.

Комп'ютерні моделі динаміки рухомого складу, розроблювані за методом ОРС обумовлюють певні відмінності у порівнянні з моделями динаміки рухомого складу, що розроблюються за іншим призначенням, наприклад, з метою вибору раціональних параметрів підвищення або прогнозування рівня навантаженості кузова й ходових частин. Загальним при розробці комп'ютерних моделей динаміки за різними призначеннями є використання підходу системи твердих тіл та застосування спеціалізованого програмного забезпечення.

Динамічні моделі рухомого складу, що розроблюються з метою дослідження сходжень з рейок, містять принципові відмінності від моделей іншого призначення. В першу чергу, вони мають відображати не тільки конструкційні особливості рухомого складу, що досліджується, а й враховувати усі ймовірні чинники, що провокують сходження, зокрема, такі, що відображають технічний стан рухомого складу й колії. При побудові моделей динаміки за формалізмом системи твердих тіл, відбивається структура рухомого складу й параметри. При цьому варіювати чинниками можливо тільки за рахунок належної параметризації моделі, залишаючи незмінною її структуру. Отже моделі динаміки рухомого складу, котрі призначено для дослідження сходжень, мають враховувати значно більший обсяг інформації, щоб адекватно відобразити подію.

Динамічна комп'ютерна модель може бути розроблена з різним ступенем деталізації, що відбивається на межах області її застосування. Ступінь деталізації моделей динаміки окремих одиниць залізничного рухомого складу або поїзда в цілому також безпосередньо залежить від обставин події сходження, що в різних випадках відрізняються.

Проведені дослідження щодо розслідування сходжень вантажних вагонів з рейок виявили зв'язаність цих подій не тільки з конструкційними, а й з експлуатаційними особливостями вагонів. Тому комп'ютерні моделі динаміки, що залучаються для розслідування сходжень, мають надавати можливість врахування експлуатаційного зносу деталей та вузлів і забезпечувати варіювання цими параметрами.

З використанням таких комп'ютерних моделей проводиться дослідження динамічних процесів, які супроводжували рух того чи іншого екіпажу на ділянці сходження. Тому належить визначати всі показники, що характеризують безпеку руху. При цьому особливої уваги потребує відображення взаємодії коліс з рейками, що обумовлює необхідність модельного опису робочих поверхонь коліс і рейок.

Оперативне розслідування сходження рухомого складу з рейок, в першу чергу, ґрунтуються на розробці адекватних комп'ютерних моделей динаміки вагонів або поїзда. Застосування підходу підсистем щодо розробки комп'ютерних моделей динаміки, а саме, створення базових моделей вантажних вагонів розповсюджених типів, надає можливість проведення комп'ютерного моделювання динаміки не тільки окремого вагона, а й поїзда в цілому. При цьому для дослідження сходження доцільно більш детально відображати всі особливості вагона, який зійшов з рейок першим.

Таким чином, в моделі поїзда, вагони якого зійшли з рейок, зберігаються основні експлуатаційні особливості як поїзда, так і окремих вагонів. При цьому забезпечується можливість кількісно оцінювання величини динамічних показників безпеки руху вантажних вагонів, серед яких особливе місце займають показники силової взаємодії коліс з рейками, що не піддаються безпосередньому вимірюванню. Крім того, за рахунок використання різної ступені деталізації моделей досягається раціональне співвідношення між складністю загальної моделі динаміки поїзда й обсягом інформації, яка є необхідною при встановленні причин сходження.

Метод ОРС ґрунтується на засадах факторного аналізу, де інтервали варіювання чинників події представлені в натуральних одиницях вимірювання. При цьому оцінювання показників безпеки за кожним дослідом плану експерименту також здійснюється з врахуванням їх розмірності. Внаслідок цього побудована за результатами методу ОРС функція множинної регресії за обраним показником безпеки руху дозволяє не тільки визначити значущість чинника події сходження, але й встановити рівень чинників, при перевищенні яких порушуються критерії безпеки руху, тобто визначити границі області з прийнятним рівнем безпеки руху.

Загальна процедура методу ОРС полягає в побудові функції множинної регресії від певних факторів, де в якості незалежних змінних (факторів) виступають чинники, що супроводжували подію сходження рухомого складу з рейок. В якості залежної змінної розглядається показник безпеки руху, й результати, за якими здійснюється побудова функціональної залежності, отримуються на підставі проведення комп'ютерного експерименту шляхом використання певної математичної моделі динаміки рухомого складу. Структурну схему методу ОРС приведено на рис. 1.

Теоретичне обґрунтування методу ОРЗ полягає в застосуванні положень теорії планування експерименту та факторного аналізу. В математичних термінах метод ОРЗ формулюється як вибір факторів експерименту, встановлення їх рівнів та інтервалів варіювання, побудова плану експерименту й проведення згідно розробленого плану дослідів з визначенням відгуків системи на зміну факторів та отримання рівнянь регресії, коефіцієнти яких характеризують вплив факторів на відгуки системи.

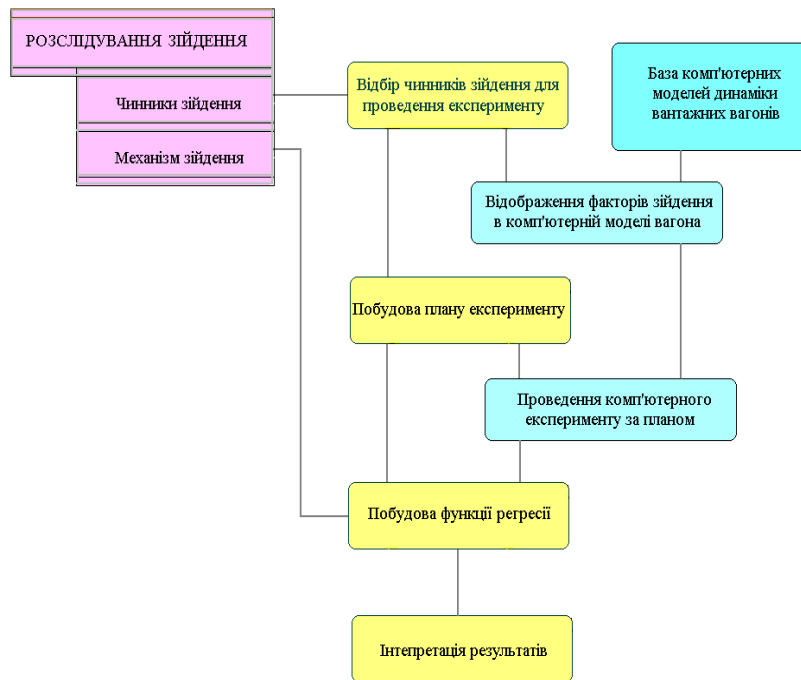


Рис. 1. Структурна схема методу ОРС

Формування множини чинників. Першим етапом методу ОРС є встановлення множини ймовірних чинників сходження $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, за якими в подальшому формується план і проводиться комп'ютерний експеримент. В межах використання методу ОРС усі обставини, характеристики й параметри події сходження умовно поділяються на три групи чинників:

«сталі», до яких віднесено особливості конструкції вагонів й устрій колії за планом і профілем на ділянці сходження;

«квазі-сталі», до яких віднесено чинники, що в цілому відбивають експлуатаційні параметри й характеристики, змінні в різних подіях сходжень, зокрема, геометричні розміри деталей та вузлів ходових частин вагонів, які мають розкид значень в широких межах внаслідок технологічних допусків та експлуатаційного зношування;

стохастичні, стосовно яких інформація взагалі відсутня.

Такий поділ чинників проведено з огляду на значну кількість чинників події сходження, а також недостатність інформації стосовно окремих з них. Крім того, розробка комп'ютерних моделей динаміки рухомого складу, за якими визначаються показники безпеки руху під час комп'ютерного експерименту, не є тривіальним завданням. Метод системи твердих тіл, за яким наразі проводиться моделювання динаміки рухомого складу, враховує структуру вагонів або локомотивів і відбиває її в розроблюваній комп'ютерній моделі. Водночас, не розроблено підходів, що дозволяють варіювати структурою системи, тоді як параметричне варіювання в моделях динаміки не викликає ускладнень. Отже, ще на етапі розробки комп'ютерної моделі динаміки рухомого складу мають бути враховані конструкційні особливості й забезпечена можливість відбиття в моделі всіх чинників, за якими буде в подальшому проводитися комп'ютерний експеримент, а саме чинників події сходження.

За чинниками події сходження, віднесених до «сталих», формування варіантів плану комп'ютерного експерименту не здійснюється, їх значення визначаються в комп'ютерній моделі динаміки вагона одноразово і не змінюються на протязі всього комп'ютерного експерименту. Формування множини ймовірних чинників події сходження $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, за якими проводиться комп'ютерний експеримент, виконується за чинниками, що віднесено до «квазі-сталих».

При формуванні множини чинників F для проведення комп'ютерного експерименту щодо технічного стану вантажного вагона, що зійшов з рейок першим, за методом ОРС рекомендується включати:

радіуси коліс вагона $r_j, (j = \overline{1,8})$;

просідання пружин ресорних комплектів $\Delta h_j, (j = \overline{1,4})$;

зазори в ковзунах $\Delta zkl_j, (j = \overline{1,4})$;

знос в підп'ятникових вузлах в поздовжньому wr_j і поперечному напрямках $wg_j, (j = \overline{1,2})$;

зазори в буксових прорізах в поздовжньому напрямку $w_bj, (j = \overline{1,16})$;

завищення клинів $kl_j, (j = \overline{1,8})$.

Прийнята кількість факторів K залежить від обставин певної події сходження й може мінятися в широких межах. При цьому потрібно враховувати те, що загальна кількість варіантів розрахунків, необхідних для проведення комп'ютерного експерименту, експоненціально залежить від K . Отже, при формуванні множини чинників F належить приймати заходи щодо обґрунтованого обмеження кількості чинників, обираючи їх за принципом «необхідності й достатності».

Практичне використання методу ОРЗ включає встановлення рівнів та інтервалів I_k кожного чинника, включеного до переліку F . Теоретично для кожного з відібраних чинників можливо обрати декілька рівнів l , наприклад 2, 3 або й більше. Але виходячи з того, що збільшення кількості рівнів приводить до збільшення кількості дослідних варіантів, а також доцільніше встановлювати однакове число рівнів за всіма факторами, рекомендується для оперативного розслідування сходження використовувати мінімальне число рівнів $l = 2$.

Інтервал варіювання I_k й основний (нульовий рівень) за кожним фактором визначаються як

$$I_k = \frac{f_{k \max} - f_{k \min}}{2}, \quad (1)$$

$$f_{0k} = \frac{f_{k \max} + f_{k \min}}{2}, \quad (2)$$

де $f_{k \min}$ і $f_{k \max}$ – це мінімальне (рівень 1) й максимальне (рівень 2) значення факторів.

Крім того, для подальшого спрощення розрахунків замість реальних (натурних) рівнів f_k використовуються нормовані значення чинників, що здійснюється за допомогою перетворення:

$$f_k = \frac{\tilde{f}_k - f_{k0}}{I_k}, \quad (3)$$

де \tilde{f}_k – натуральне значення фактора; I_k – інтервал варіювання; f_{k0} – основний рівень; f_k – нормоване значення.

В результаті цього перетворення кожний фактор f_k приймає на границях варіювання значення $f_k = \pm 1$, а на основному рівні – $f_k = 0$.

Спосіб організації плану проведення експерименту. На підставі одного розрахунку (далі дослід) на підставі комп'ютерного моделювання з прийнятним ступенем точності кількісно обчислюються значення показників безпеки руху вантажного вагона, що рухався з певною швидкістю V_c на ділянці сходу L_c .

Як показали проведені дослідження, для здійснення комп'ютерного експерименту з визначення впливу чинників на сходження вантажних вагонів за методом ОРЗ достатньо прийняти загальний шлях вагона $L_c = 300$ м. При цьому мають також бути відтворені всі особливості колії щодо характеристик й геометрії профілів рейок та стану утримання на відрізьку L_c . Щоб відобразити стан утримання колії на підставі даних колієвимірювального вагона за розробленим алгоритмом формуються нерівності рейок з лівого і правого боку в горизонтальному й вертикальному напрямках. При цьому принципове значення має «синхронізація» нерівностей за ділянкою сходу і місцем події сходження.

Виходячи з цілі дослідження й значної кількості необхідних розрахункових варіантів, які виникають при математичному опису завдання розслідування сходження, перебирання факторів з множини $F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ має бути впорядкованим і ґрунтуватися на теорії планування експериментів, щоб забезпечити отримання максимальної кількості інформації при проведенні найменшої кількості дослідів.

Прийняття рішення щодо плану експерименту покладається на дослідника. Основними вимогами, що висуваються до плану експерименту, є їх ортогональність і рототабельність. В ортогональному плані виконується умова парної ортогональності стовпчиків матриці планування. Використання рототабельного плану забезпечує для будь-якого напрямку від центру експерименту рівнозначність точності оцінювання функції відгуку на рівних відстанях від центру експерименту.

За екстремальними значеннями показників безпеки руху, що визначені на ділянці сходження за кожним дослідом, здійснюється їх опрацювання щодо побудови функції множинної регресії від факторів за методом найменших квадратів. Рівняння множинної регресії обрано з врахуванням головних лінійних ефектів факторів і їх взаємодії не вище другого порядку у вигляді:

$$y = Y(f_1, f_2, \dots, f_K) = b_0 + b_1 f_1 + \dots + b_K f_K + b_{1,1} f_1 f_1 + b_{1,2} f_1 f_2 + \dots + b_{K,K} f_K f_K, \quad (4)$$

де b_0 – вільний член рівняння; b_k ($k = \overline{1, K}$) – головний (лінійний) ефект k -го фактору; b_{k_1, k_2} ($k_1 = \overline{1, M}, k_2 = \overline{1, M}$) – ефекти взаємодії факторів і квадратичні ефекти.

Шукані коефіцієнти b_0, b_k, b_{k_1, k_2} рівняння (4) визначаються в результаті розв'язку системи рівнянь такого вигляду:

$$y_i = b_0 + b_1 f_{1i} + \dots + b_K f_{Ki} + b_{1,1} f_{1i} f_{1i} + b_{1,2} f_{1i} f_{2i} + \dots + b_{K,K} f_{Ki} f_{Ki}, \quad (i = \overline{1, N}), \quad (5)$$

де f_{ki} – значення k -го фактору при проведенні i -го дослід; y_i – екстремальні значення показника безпеки руху, що визначені на ділянці події сходження.

Зазначене завдання вирішується відповідно принципу максимальної правдоподібності, що забезпечує обчислення коефіцієнтів b_0, b_k, b_{k_1, k_2} за методом найменших квадратів [10]. При цьому мінімізується функція $\Phi(b_0, b_1, \dots, b_{K, K})$, яка сформована за принципом

$$\Phi(b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_0, b_1, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K})]^2 \quad (6)$$

Таким чином ця задача зводиться до системи рівнянь, що отримуються як перші похідні від функції Φ за кожним параметром $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b_{K, K}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Після запису системи рівнянь (7) з врахування (6) отримуємо систему лінійних рівнянь щодо визначення параметрів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_0}(f, b_1, b_2, \dots, b_{K, K}) = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_1}(f, b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_m}(f, b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (8) відносно параметрів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$, знаходимо всі коефіцієнти, а отже й конкретний вигляд шуканої функції регресії. Для обчислення коефіцієнтів застосовано числовий метод Ньютона-Гаусса, за яким розроблено комп'ютерну програму в системі Mathcad, що була протестована при обробці даних комп'ютерного експерименту щодо можливості сходження напіввагона в порожньому стані.

Встановлено, що включення в функцію регресії (5) додаткових членів, які враховують взаємодію факторів вище другого порядку, переускладнює модель регресії і не надає додаткової інформації щодо оцінювання впливу чинників події сходження на показники безпеки руху, зокрема, на коефіцієнт запасу стійкості колеса проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки k_{cc} [17].

В результаті розрахунку коефіцієнтів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$ визначається аналітичний опис функціонального зв'язку показників безпеки руху з чинниками динамічної системи за результатами проведеного експерименту, що дозволяє оцінювати вплив цих чинників на рівень показників. Таким чином, коефіцієнти $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$ характеризують внесок кожного фактора й їх взаємодії в значення

показника безпеки руху вагона на ділянці сходження. Процес переносу початку координат в центр простору факторів з координатами дуже важливий при обробці даних будь-яких експериментів, що описуються моделлю у вигляді гіперплощини, оскільки дозволяє отримати усереднене значення для b_0 .

Функція відгуку. Принциповим етапом використання методу ОРЗ є з'ясування, за яким з показників безпеки руху слід аналізувати вплив чинників на подію сходження. За допомогою комп'ютерних моделей динаміки вагонів на підставі моделювання проводиться дослідження силової взаємодії вагона з колією. Вихідні величини, що отримуються за кожним дослідним варіантом, включають повний спектр унормованих показників безпеки руху й динамічних якостей вагона [17].

З аналізу матеріалів розслідувань транспортних інцидентів виходить, що найбільш поширеним механізмом сходження вантажних вагонів з рейок є перекочування колеса через головку рейки. Тому при розробці методу ОРС враховано, що для вантажних вагонів основним показником безпеки руху є коефіцієнта запасу стійкості проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки k_{cc} , який залежить від кута нахилу до горизонту твірної конусоподібної поверхні гребеня колеса, коефіцієнта тертя ковзання поверхонь колеса і рейки, що взаємодіють, та відношення вертикальної і горизонтальної складових сил взаємодії колеса з рейкою, що діють одночасно [17].

В методі ОРС на підставі рівня коефіцієнта стійкості k_{cc} формуються функції відгуку, що відображають схильність або потенційну можливість сходження вантажного вагона з рейок. В якості допоміжного показника безпеки, за яким також формується функція відгуку, характеризуючи подію сходження рухомого складу з рейок, розглядається комбінований показник безпеки $K_{\delta\delta}$ колісної пари, який дозволяє адекватно оцінити процес повного вкочування колеса на головку рейки і є більш чутливим до розпізнавання події сходження [18]. Суть критерію за комбінованим показником $K_{\delta\delta}$ полягає в тому, що процес вкочування поділено на дві фази: до критичної точки і вище критичної точки, де за критичну точку на профілі гребеня прийнята перша точка контакту в процесі вкочування з найбільшим кутом нахилу утворюючої гребеня. Впродовж другої фази продовження вкочування колеса на рейку від критичної точки пропонується використовувати безпосередньо величину підйому колеса z над головою рейки для оцінювання безпеки сходження, починаючи з положення, при якому гребневий контакт виявився в критичній точці. Застосування нормування одиниці відстані максимальної висоти підйому за вертикаллю від критичного положення колеса до його повного вкочування на головку рейки перетворює цей комбінований показник безпеки при продовженні вкочування в неперервний і такий, що зменшується до 0 при виході гребеня на вершину головки рейки.

Обираючи показники безпеки руху відповідно інших типових механізмів сходження рухомого складу з рейок, запропонований метод також дозволяє будувати функції відгуку від визначених чинників події, зокрема для коефіцієнтів запасу стійкості за умови витискання k_{ce} й коефіцієнтів запасу стійкості від перекидання k_{cn} в разі прикладення до вагона поздовжніх сил, рамних сил H_p або бокових сил H_b . Для цього на ділянці безпосереднього сходження оцінювання виконується за вказаними вихідними величинами, причому з врахування того, що силові показники мають оцінюватися за максимальними значеннями, на відміну від коефіцієнтів, що оцінюються за мінімальними значеннями.

Особливий інтерес при удосконаленні запропонованого метода складають випадки сходження, коли механізм сходу не виявлено. В такому разі можливо застосовувати функції відгуку за сукупністю показників, що поєднує часткові показники безпеки

руху за різними типовими механізмами сходження на підставі врахування їх відносної значущості або проводити пошук суттєвих чинників з залученням методів векторної оптимізації. При цьому складності обумовлює те, що критерієм сходу за одними показниками є мінімальні значення, тоді як для інших – максимальні значення.

Аналіз результатів та інтерпретація функції регресії. За методом ОРС аналіз результатів виконується на підставі побудованої функції множинної регресії (5), що дозволяє визначити взаємозалежність між показником безпеки, що аналізується, й чинниками події сходу, серед тих, що відібрані до множини факторів F . Рівняння регресії трактується як рівняння поверхні в багатофакторному просторі. У випадку розгляду в якості функції відгуку коефіцієнта запасу стійкості проти сходу з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки, що пропонується за методом ОРС, шукане рішення складають координати із значеннями факторів впадини цієї поверхні. Оскільки кількість чинників, що відбираються для проведення комп'ютерного експерименту щодо виявлення найсуттєвіших чинників події сходження, включає значну кількість факторів K ($K > 2$), то відображення результатів у вигляді поверхні можливо здійснити тільки за двома факторами, при фіксуванні інших.

Інтерпретація результатів за методом ОРС включає оцінку величини й напрямку впливу окремих факторів та їх взаємодії, а також співставлення впливу сукупності факторів. Коефіцієнти рівняння регресії надають інформацію про вагу впливу окремих чинників на рівень коефіцієнтів запасу стійкості k_{cc} .

Для прикладу розглянуто результати комп'ютерного експерименту за шістьма факторами $K = 6$ стосовно оцінки стійкості руху напіввагона на прямій ділянці колії із задовільним станом утримання. В якості факторів були вибрані: коефіцієнт тертя ковзання в п'ятникових вузлах fp ; зноси в поздовжньому напрямку в п'ятникових вузлах wp (м); коефіцієнт тертя в ковзунах fs ; завищення клинів kl (м); зноси в поздовжньому напрямку буксових вузлів $wb1$ (м) і $wb2$ (м) першого і другого візків відповідно. Для кожного з відібраних факторів було визначено два або три рівні (табл. 1).

Таблиця 1. Рівні факторів

Фактор	fp	wp	fs	kl	$wb1$	$wb2$
Розмірність		м		м	м	м
Рівень 1	0,1	0	0,1	0	0	0
Рівень 2	0,4	0,005	0,4	0,015	0,004	0,004
Рівень 3					0,008	0,008

За методом ОРС рекомендується аналіз й інтерпретацію результатів проводити на підставі карт Парето. Ці діаграми показують зміну у відсотках очікуваного середнього значення функції відгуку на верхніх та нижніх рівнях кожного з факторів. Чинники або причини втрати якості приводяться в спадному порядку значущості. На рис. 2 і 3 наведено карти Парето, що отримані в межах застосування методу ОРС щодо коефіцієнта запасу стійкості k_{cc} напіввагона при швидкостях руху 60 і 80 км/год.

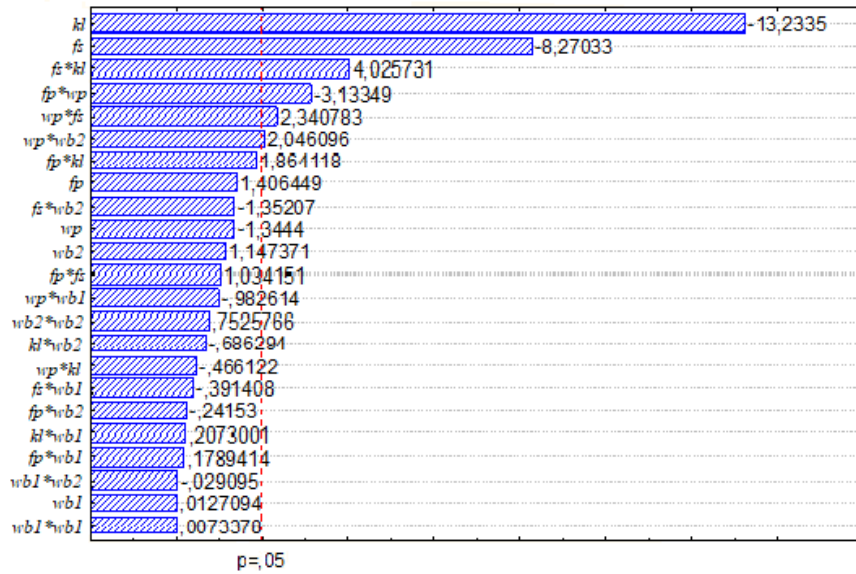


Рис. 2. Оцінка ефекту при 60 км/год

Подана на рис. 2 карта Парето дозволяє встановити, що при швидкості 60 км/год визначальний вплив на коефіцієнт запасу стійкості від сходжень здійснюють непрацюючі клини чи збільшене тертя в п'ятникових вузлах (до 0,4) або обидва ці фактори разом.

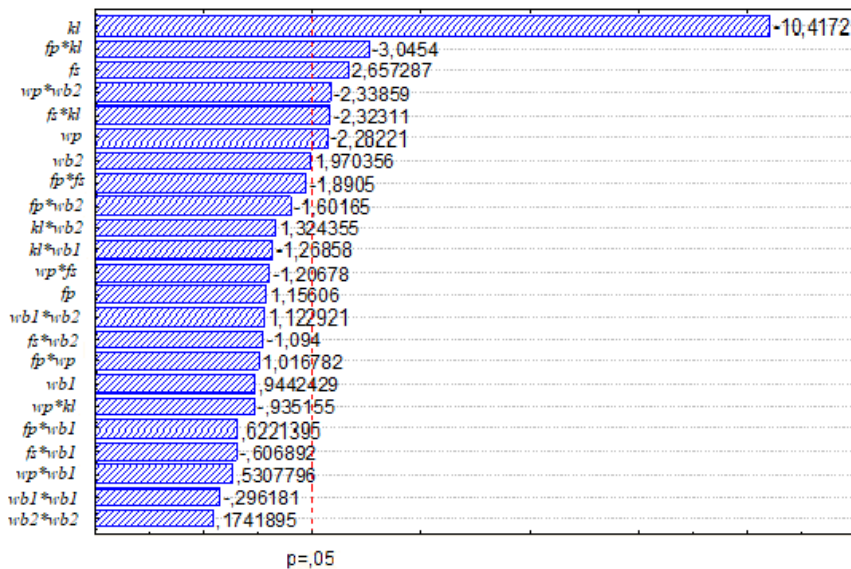


Рис. 3. Оцінка ефекту при 80 км/год

Як видно з рис. 3, головними факторами щодо зменшення запасу стійкості від сходжень колеса з рейки для порожнього напіввагона при швидкості руху 80 км/год стають непрацюючі клини, збільшені коефіцієнти тертя ковзання в п'ятникових вузлах разом зі збільшеними коефіцієнтами тертя в ковзунах, зноси в поздовжньому напрямку в п'ятникових вузлах та сполучення цих факторів.

Однаковий вплив чинників на рівень запасу стійкості рухомого складу проти сходження з рейок, зустрічається досить рідко, частіше причиною події є наявність декількох значущих в негативному сенсі чинників. За принципом Парето стверджується таке: вплив

факторів на втрату якості досить погано розподілений, невелике число можливих причин, що погіршують стан, відповідають за більшість виникаючих проблем. Отже, карти Парето допомагають визначити, на що саме необхідно звернути увагу з ціллю підвищення безпеки руху рейкових транспортних засобів.

Висновки. Метод оперативного розслідування сходження (ОРС) розроблено з метою виявлення найбільш суттєвих механічних чинників сходження рухомого складу з рейок. Цей метод встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху поїздів та забезпечує виявлення значущих механічних чинників, які спровокували певну подію сходження.

Метод ОРС рекомендується до використання у випадках, коли причина сходження за матеріалами розслідування транспортної події не є очевидною або однозначною. Використання методу гарантує отримання об'єктивної кількісної інформації щодо показників безпеки руху на ділянці сходження одиниці рухомого складу й виявлення функціональних та стохастичних залежностей між показниками безпеки руху й певними чинниками, що супроводжували транспортну подію.

Відповідно методу ОРС за чинниками події будується множинна регресійна залежність між мінімальними значеннями коефіцієнта запасу стійкості проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки, що оцінюється за кожним комп'ютерним дослідом на ділянці безпосереднього сходження й відображають схильність або потенційну можливість сходження певної одиниці рухомого складу. Використання цього методу розповсюджується на виявлення чинників події сходження різних одиниць рухомого складу за умови розробки адекватних комп'ютерних моделей їх динаміки з врахуванням конструкційних особливостей та технічного стану ходових частин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Garg V.K., Dukkipati R.V. Dynamics of Railway Vehicle Systems. Academic Press, 1984. 407 p.
2. Wickens A.H. Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability. Lisse, the Netherlands: Swets & Zeitlinger B.V., 2003. 286 p.
3. Dusza M. The study of track gauge influence on lateral stability of 4-axle rail vehicle model. // Archives of Transport. 2014. 30(2). Pp. 7-20.
4. Kardas-Cinal E. Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. // Archives of Transport. 2013. 31(3). Pp. 37-45.
5. Burdzik R., Nowak B., Rozmus J., Słowiński P., Pankiewicz J. Safety in the railway industry. // Archives of Transport. 2017. 44(4). Pp. 15-24.
6. Fan Y-T., Wu W-F. Stability analysis and derailment evaluation of rail vehicles. // Int. J. Heavy Vehicle Systems. 2006. 13(3). Pp.194-211.
7. Molatefi H. On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it. // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2016. 54(2). Pp. 541-550.
8. Opala M. Study of the derailment safety index Y/Q of the low-floor tram bogies with different types of guidance of independently rotating wheels. // Archives of Transport. 2016. 38(2). Pp. 39-47.
9. Domin R., Domin Iu., Cherniak G., Mostovych A., Konstantidi V., Gryndei P. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways. // Archives of Transport. 2016. 40(4). Pp. 79-91.
10. Wilson N., Fries R., Haigermoser A., Mrang M., Evans J., Orlava A. Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance tests: a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods. // Journal of Vehicle System Dynamics. 2011. 49. Pp. 1113-1157.
11. Iwnicki S., Stichel S., Orlova A., Hecht M. Dynamics of railway freight vehicles. // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2015. 53(7). Pp. 1-39.
12. Saviz M.R. Dynamic, stability and safety analysis of wagons on md52 bogies with modified suspension springs. // International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE). 2015. 7(4). Pp. 75-85.
13. Malcolm C. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio. // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2016. 54(5). Pp. 568-584.

14. Domin R., Domin Yu., Cherniak G. Estimation of stability of flat cars with various types of running gear against derailment. // *Problemy kolejnictwa*. 2019. 63(185). Pp. 119-124.
15. Domin R. *Mechanical Safety of Railway Vehicles*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 133 p.
16. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software. // *Rail vehicle dynamics and associated problems*. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. Pp. 13-58.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 354 с.
18. Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Показатель для оценки безопасности схода подвижного состава путем вкатывания колеса на головку рельса // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2010. №5(147). С. 64-71.

REFERENCES

1. Garg, V.K., & Dukkipati, R.V. (1984). *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. Academic Press, 407 p.
2. Wickens, A.H. (2003). *Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability*. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, the Netherlands, 286 p.
3. Dusza, M. (2014). The study of track gauge influence on lateral stability of 4-axle rail vehicle model. *Archives of Transport*, 30(2), pp. 7-20.
4. Kardas-Cinal, E. (2013). Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. *Archives of Transport*, 31(3), pp. 37-45.
5. Burdzik, R., Nowak, B., Rozmus, J., Słowiński, P., Pankiewicz, J. (2017). Safety in the railway industry. *Archives of Transport*, 44(4), pp. 15-24.
6. Fan, Y-T., & Wu, W-F. (2006). Stability analysis and derailment evaluation of rail vehicles. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, 13(3), pp.194-211.
7. Molatefi, H. (2016). On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(2), pp. 541-550.
8. Opala, M. (2016). Study of the derailment safety index Y/Q of the low-floor tram bogies with different types of guidance of independently rotating wheels. *Archives of Transport*, 38(2), pp. 39-47.
9. Domin, R., Domin, Iu., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., Gryndei, P. (2016). Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways. *Archives of Transport*, 40(4), pp. 79-91.
10. Wilson, N., Fries, R., Haigermoser, A., Mrang, M., Evans, J., Orlova, A. (2011). Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance tests: a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods. *Journal of Vehicle System Dynamics*, 49, pp. 1113-1157.
11. Iwnicki, S., Stichel, S., Orlova, A., Hecht, M. (2015). Dynamics of railway freight vehicles. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 53(7), pp. 1-39.
12. Saviz, M.R. (2015). Dynamic, stability and safety analysis of wagons on md52 bogies with modified suspension springs. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*, 7(4), pp. 75-85.
13. Malcolm, C. (2016). Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 54(5), pp. 568-584.
14. Domin, R., Domin, Yu., Cherniak, G. (2019). Estimation of stability of flat cars with various types of running gear against derailment. *Problemy kolejnictwa*, 63(185), pp. 119-124.
15. Domin R. (2017). *Mechanical Safety of Railway Vehicles*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 133 p.
16. Pogorelov, D.Yu. (2005). Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software. *Rail vehicle dynamics and associated problems*. Gliwice: Silesian University of Technology, pp. 13-58.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов зрелезныкх дорог МПС колеи1520 мм (несамохдныкх) [Norms for the calculation and design of railroad cars of the Ministry of Railways of gauge 1520 mm (not self-propelled)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZHT, 1996, 154 [in Russian].
18. Pogorelov D.Yu. & Simonov V.A. (2010). Pokazatel' dlya otsenki bezopasnosti skhoda podvzhnogo sostava putem vkatyvaniya kolesa na golovku rel'sa [Indicator for assessing the safety of rolling stock derailment by rolling a wheel onto the rail head]. *Vіsник Shkhidnoukr. nats. un-tu ім. V. Dallya : nauk. zhurnal*, № 5 (147), pp. 40-46.

Rostyslav Domin¹, Yurii Domin², Ganna Chernyak³, Volodymyr Nozhenko⁴

¹ Acting Director, Branch "Research and Design and Technological Institute of Railway Transport" JSC "Ukrzaliznytsia", st. I. Fedorova, 39, Kyiv, 03038, Ukraine

² Professor, Department of Railway, Road Transport and Hoisting and Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

³ Senior Research Fellow, Department of Railway, Road Transport and Hoisting and Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

⁴ Vice-Rector, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

METHOD OF OPERATIONAL INVESTIGATION OF ROLLING STOCK DERAILMENT

The article presents the principles of the method of operational investigation of rolling stock derailment. This method is intended to identify the most significant mechanical reasons for transport accidents in order to find directions to further improving the safety requirements for the state of maintenance of freight cars and tracks on the basis of the data. The developed method establishes a general methodological order of conducting computer simulation of the dynamics of rolling stock of multivariate studies on calculating the safety indicators of train's motion, and shows the significance of technical factors that provoked a certain event. By this method, the operational investigation of rolling stock derailment is based on the development of adequate computer models of dynamics of cars in trains. In this case, in detail, all the features of the car, which descended from the rails, are first. The presented method is based on the principles of factor analysis, where the intervals of varying events are presented in natural units of measurement. In this case, the assessment of security indicators for each research of the experiment plan is also carried out taking into account their dimension. As a result, the function of multiple regressions on the chosen indicator of motion safety allows not only to determine the significance of the factor of the ascent, but also to establish the level of factors, with exceeding the criteria for motion safety, that is, to determine the boundaries of the region with an acceptable level of motion safety.

Keywords: rolling stock, derailment, computer simulation, dynamic of motion safety indicators.