

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет
Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут
вагонобудування»

САФРОНОВ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ



УДК 629.4.077:463.3

**РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТА
ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ ПАСАЖИРСЬКИХ ТА
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Київ -2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному підприємстві „Український науково-дослідний інститут вагобудування” (м.Кременчук), Національному транспортному університеті (м. Київ) Міністерства освіти і науки України

Опоненти:

доктор технічних наук, професор
Капіца Михайло Іванович,
Український державний університет
науки і технологій, директор
«Дніпровського інституту інфра-
структури і транспорту».

доктор технічних наук, професор
Равлюк Василь Григорович,
Український державний університет
залізничного транспорту, професор
кафедри інженерії вагонів та якості
продукції.

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Віктор Петрович
Національний транспортний
університет, Київський інститут
залізничного транспорту, завідувач
кафедри «Електромеханіка та
рухомий склад залізниць»

Захист відбудеться „27” серпня 2025 р. о 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.820.01 при Національному транспортному університеті за адресою; 03049, м. Київ, вул. Кирилівська, 9 в ауд. 208.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагобудування» за адресою : 39621, Полтавська обл., м. Кременчук, вул. І.Приходька 33.

Реферат розісланий „22” липня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.820.01
к.т.н., доц.

 Розалія ЩЕРБИНА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Стійка робота залізничного транспорту багато в чому визначається технічним рівнем вагонного парку. Тому важливим є завданням зі створення вагонів нового покоління в яких закладаються досконаліші вузли та деталі, їх використання дозволить суттєво підвищити показники безпеки руху, створення таких вагонів сприяє покращенню споживчих та експлуатаційних характеристик, удосконаленню системи ремонту та технічного обслуговування вагонного парку.

На сучасному етапі, розвиток залізничного транспорту, спрямований на збільшення осьових навантажень і швидкостей руху поїздів, що забезпечує конкурентне перевезення пасажирів і вантажів, створення транспортних коридорів та ставить нові завдання щодо покращення динамічних та міцнісних якостей конструкції, надійності та ефективності гальмівних систем вагонів, які є одним з найважливіших чинників забезпечення безпеки руху поїздів. Подальший розвиток вантажних та пасажирських вагонів в одну з основних висуває завдання вдосконалення методів розрахункових та експериментальних досліджень гальмівної ефективності (величини гальмівного шляху при екстреному пневматичному гальмуванні з максимальною (конструкційною) швидкістю на початку гальмування). В умовах обмеження експериментальних досліджень задовольнятися лише оцінкою гальмівного шляху одиночного вагона, в сучасних реаліях вже є недостатнім. Тому основною метою гальмівних випробувань вагона має стати не лише визначення його гальмівного шляху при різних швидкостях на початку гальмування, але й оцінка здатності вагона забезпечити гальмівну ефективність поїзда як на ділянках шляху без ухилу (далі майданчик), так і на нормованих спусках, а також оцінка основних параметрів процесу гальмування, що впливають на гальмівну ефективність.

Актуальність теми. Однією із важливих складових умов безперебійної, надійної та економічно-ефективної роботи залізничного транспорту є технічний рівень парку наявного рухомого складу, тому питання створення вагонів нового покоління, які мають покращені техніко-економічні споживчі та експлуатаційні характеристики необхідно визнавати такими, що мають надважливе значення.

Подальший розвиток світового вагонобудування в напрямку підвищення швидкостей руху, осьових навантажень в одні із основних висуває задачі зі створення, в першу чергу, методів розрахункових та експериментальних досліджень гальмівної ефективності, на основі яких можливо проектувати та будувати надійний та безпечний сучасний рухомий склад, оскільки важливим фактором по забезпеченню безпеки руху є саме гальмівна система. В цих умовах обмеження досліджень тільки оцінкою гальмівного шляху одиночного вагона є недостатнім. Тому основною метою дослідження гальмівної ефективності рухомого складу повинно стати не тільки визначення гальмівного шляху одиночного вагона при різних швидкостях гальмування, але і оцінка здатності вагона забезпечувати гальмівну ефективність поїзда на рівних ділянках шляху і на нормованих уклонах, а також дозволяти оцінити основні параметри процесу гальмування, які безпосередньо впливають на гальмівну ефективність.

Із наведеного можна зробити висновок що для подальшого розвитку гальмівних систем та підвищення гальмівної ефективності рухомого складу

необхідно приймати нові, більш поглиблені методи дослідження та аналізу процесів гальмування. Такі дослідження неможливо провести без перевірки конструкторських та технічних рішень в експериментальних умовах на натурних зразках та потребують більш досконалих способів та методів з оцінки гальмівної ефективності як безпосередньо рухомого складу, так і складових гальмівних систем.

Особливу увагу необхідно приділити математичним методам обробки та аналізу даних, в тому числі встановленню емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варійованими характеристикам, встановленню критеріїв та встановленню довірчих інтервалів, що неможливо провести без комп'ютерного моделювання.

Вищенаведене підтверджує що подальший розвиток наукових основ щодо підвищення ефективності гальмівних систем рухомого складу залізниць є актуальною та важливою науково-прикладною проблемою результати розв'язання якої будуть мати важливе значення для вітчизняного машинобудівного комплексу та залізничного транспорту України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційна робота виконана згідно з Законом України "Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні"; Транспортною стратегією України на період до 2030 року, схвалену розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р; Стратегією розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року схвалену розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р.

Дослідження за темою дисертації здійснювались в рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт: "Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик напіввагона моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020 на відповідність критеріям іноваційності, визначених технічною радою Укрзалізниці від 30.09.2015 р." (0220U101984), "Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагона платформи для великотоннажних контейнерів" (0220U101986), "Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метрополітену моделей 81-7036, 817037. Визначення гальмівних характеристик" (0212U005369), "Науково – експериментальні дослідження технічних характеристик міжрегіонального поїзда локомотивної тяги (МПЛТ). Гальмівні випробування." (0212U005360).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є вирішення науково-прикладної проблеми - розвитку теоретичних положень, та методологічних основ підвищення гальмівної ефективності рухомого складу залізниць, за рахунок удосконалення процесів функціонування гальмівних систем розширеною оцінкою параметрів гальмівного процесу, зменшення витрат на проектування та впровадження як нових гальмівних систем і їх складових, так і інноваційних пасажирських та вантажних вагонів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз існуючих конструктивних рішень, що застосовуються в гальмівних системах пасажирських та вантажних вагонів;

- дослідження впливу недоліків існуючих гальмівних систем на гальмівну ефективність та експлуатаційні якості вагонів;
- здійснити аналіз існуючих методів та підходів до розрахунку та визначення параметрів гальмівної ефективності рухомого складу;
- визначити фактори які безпосередньо найбільше впливають на гальмівну ефективність рухомого складу під час гальмування;
- дослідити фактори що впливають на величину дійсної сили натиснення колодок при гальмуванні;
- дослідити особливості реалізації тиску в гальмівних циліндрах;
- дослідити вплив коефіцієнту тертя та фрикційних властивостей композиційної гальмівної колодки на гальмівну ефективність рухомого складу при стендових та натурних випробувань рухомого складу;
- дослідити температурний вплив на коефіцієнт тертя композиційної гальмівної колодки під час гальмування рухомого складу;
- визначити розрахункові залежності фактичного коефіцієнта тертя за результатами експериментальних досліджень;
- встановити функціональні залежності між вхідними параметрами для математичного та комп'ютерного моделювання ;
- визначити закономірності та зв'язки між варіюємими параметрами, та побудувати алгоритми методології розрахункових досліджень одиниць рухомого складу із застосуванням моделювання;
- вдосконалити методологію експериментальних досліджень гальмівних систем рухомого складу;
- розробити практичні прийоми застосування методів моделювання при дослідження гальмівної ефективності одиниць рухомого складу.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування гальмівних систем вантажних та пасажирських вагонів.

Предмет дослідження – фактори та параметри що впливають на гальмівну ефективність пасажирських та вантажних вагонів, та методи їх оцінки.

Методи дослідження – в роботі використані методи математичної статистики, теорії ймовірності, методи математичного моделювання, методи комп'ютерного моделювання, сучасні методи експериментальних досліджень рухомого складу залізниць при випробуваннях дослідних зразків вагонів, методи математичного планування експерименту, математичні статистичні обчислювальні методи обробки числового матеріалу та побудови емпіричних залежностей випадкових величин.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій обумовлені адекватністю математичних моделей, що базуються на фундаментальних положеннях класичних наукових підходів і підтверджуються стандартними процедурами перевірки результатів досліджень на всіх етапах роботи та задовільною збіжністю теоретичних та експериментальних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в вирішенні наукової проблеми розвитку наукових основ методології теоретичних та

експериментальних досліджень гальмівної ефективності рухомого складу залізниць, зокрема вперше розроблено та запропоновано:

- метод статистичного оцінювання коефіцієнтів тертя гальмівної колодки за результатами випробувань на інерційних стендах, що дозволяє, на відміну від існуючих методів, проводити розширений аналіз фрикційних властивостей гальмівних колодок та враховувати імовірність потрапляння миттєвого значення коефіцієнта тертя в допустимі інтервали та імовірність пошкодження колісних пар через перевищення допустимих значень коефіцієнтів тертя;
- методологію теоретичних розрахункових досліджень гальмівної ефективності, яка на відміну від існуючих підходів, значно розширює кількість параметрів для обчислення гальмівного процесу, що дозволяє виконати поглиблений аналіз гальмівної ефективності існуючих та перспективних систем гальмування вагонів.

Удосконалені:

- математичні моделі гальмівного процесу вантажних вагонів з композиційними та з чавунними гальмівними колодками, шляхом врахування таких основних характеристик гальмівного процесу як функціональні залежності зміни відносної сили гальмівного натиснення, що дозволяє врахувати особливості зміни гальмівного коефіцієнту від часу гальмування;
- математичні моделі гальмівного процесу пасажирських вагонів з композиційними та з чавунними гальмівними колодками та дисковим гальмом шляхом врахування таких основних характеристик гальмівного процесу як функціональні залежності зміни відносної сили гальмівного натиснення, що дозволяє врахувати особливості зміни гальмівного коефіцієнту від часу гальмування.

Набули подальшого розвитку:

- метод експериментального дослідження гальмівних характеристик під час ходових гальмівних випробувань, шляхом вдосконалення технології проведення експериментальних досліджень та удосконалення апаратно - програмного вимірювального комплексу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- визначення дійсних значень гальмівних шляхів пасажирських або вантажних вагонів;
- визначення фактичних значень гальмівних коефіцієнтів, коефіцієнтів зчеплення колеса з рейкою та питомих гальмівних сил;
- визначення динаміки зміни швидкості, сповільнення, питомих гальмівних сил, коефіцієнтів тертя, гальмівного шляху, від часу гальмування;
- здійснення перерахунку дійсних гальмівних шляхів вагона на гальмівні шляхи поїзда як на площадці так і нормованих спусках у заданому діапазоні швидкостей на початку гальмування;
- здійснення оцінки виникнення юзової ситуації для різних швидкостей руху;

- здійснення перерахунку розрахункових гальмівних коефіцієнтів композиційних колодок на чавунні колодки та навпаки;
- визначення величин фактичних розрахункових гальмівних коефіцієнтів та питомих гальмівних сил за значеннями гальмівних шляхів;
- вдосконалено програмний комплекс призначений для реєстрації різних за своєю природою параметрів гальмівного процесу;
- вдосконалено технологію проведення ходових гальмівних випробувань вантажних та пасажирських вагонів
- скорочення часу та зменшення витрат на проведення експериментальних досліджень з визначення гальмівної ефективності.

Результати проведених досліджень і матеріали дисертаційної роботи впроваджені на підприємствах: ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» при проектуванні та розрахунку параметрів гальм пасажирських та вантажних вагонів, державному підприємстві «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» при проведенні експериментальних досліджень гальмівної ефективності та розрахунку гальмівної ефективності вагонів, ТОВ «ДМЗ Карпати» при проектуванні та розрахунку параметрів гальм вантажних вагонів. АТ «Дніпровський завод з ремонту та будівництва пасажирських вагонів» при проектуванні та розрахунку параметрів гальм пасажирських та вантажних вагонів.

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені у додатках дисертації.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримані особисто автором, автор самостійно сформулював завдання досліджень, наукові положення, провів теоретичні та брав участь в постановці та проведенні експериментальних досліджень, здійснював первинну обробку отриманих експериментальних даних. Наукові публікації [3], [8], [10], [11], [13], [14], [18], [41], [46], [47], [48], [49] написані без співавторів. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному:

[19], [20], [27], [28], [30], [37], [38], [39], [50], [52], [54] – узагальнення експериментальних даних, отримання залежностей та розроблення методики статистичного оцінювання коефіцієнта тертя за результатами гальмівних випробувань. [7], [12], [15], [16], [21], [32], [34], [35], [36], [44] – розробка методології теоретичних розрахункових досліджень щодо отримання фактичних значень гальмівних коефіцієнтів, сповільнення вагона під час гальмування, в тому числі під час електродинамічного гальмування, перерахування гальмівного шляху вагона на гальмівний шлях поїзда з урахуванням уклонів, заданої кількості вагонів, та наростання гальмівної сили за складом поїзда, дійсних сил натиснення під час гальмування, температури нагріву пари тертя під час гальмування та динаміки їх зміни. [1], [2], [5], [33] – організація, планування та проведення експериментальних досліджень, отримання та первинна обробка, аналіз та систематизація отриманих даних. [9], [15], [22], [23], [24], [25], [26], [29], [31], [40], [42], [43], [45], [51], [53] – розроблення математичних моделей та визначення функціональних залежностей фактичних номінальних сил натискання гальмівної колодки на колісні пари від часу гальмування, основного

питомого опору руху, величини нормованих спусків, осьового навантаження вагонів. [12], [16], [17], [40], - участь в розробці та вдосконаленні програмного комплексу реєстрації різних за своєю природою параметрів гальмівного процесу, вдосконалення технології проведення ходових гальмівних випробувань вантажних та пасажирських вагонів, та подальшого розвитку методу експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Матеріали результатів дисертації доповідались, обговорювались та отримали схвалення на 20 міжнародних науково-технічних конференціях:

- 72, 74, 75, 80 міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 2012, 2014, 2015, 2020 рр. (Україна м. Дніпро);

- V міжнародна науково-практична конференція "Проблеми і перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології", 2011 р. (Україна, м. Київ);

- міжнародна партнерська конференція «Проблеми тягового рухомого складу: шляхи вирішення через взаємодію державного та приватного секторів», 2010 р. (Україна, м. Севастополь);

- 73 міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн, 2011 р. (Україна, м. Харків);

- IV міжнародна партнерська конференція "Проблеми рухомого складу: шляхи вирішення через взаємодію державного та приватного секторів ", 2013 р. (Україна, м. Ялта);

- міжнародна науково-практична конференція «Вагони нового покоління – із ХХ в ХХІ сторіччя», 2013 р. (Україна, м. Харків);

- Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine : International scientific and practical conference, 2018 p. (Poland, Wloclawek);

- IX міжнародна залізнична конференція UARAIL & PARTNERS "Інфраструктура та рухомий склад." 2019 р. (Україна, м. Львів);

- IX міжнародна науково-практична конференція «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» , 2019 р. (Україна, м. Одеса);

- I та II міжнародних науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки та техніки в умовах інтеграції України в Європейський науково-виробничий простір», , 2019, 2022 рр. (Україна, м. Кременчук);

- VII міжнародній науково-практичній конференції, 2020 р. (Україна, м. Харків);

- the 2nd International scientific and practical conference «Innovative development of science and education»: Athens 26-28 April, 2020 (Greece, Athens);

- VIII International scientific and practical conference «Dynamics of the development of world science», Vancouver, 15–17 April 2020. (Canada, Vancouver);

- The 3rd international scientific and practical conference «Eurasians scientific congress». Barcelona, 22-24 march 2020 p. (Spain, Barcelona);
- The 5th International scientific and practical conference “Priority directions of science development”, Львів. 2-3 березня 2020 р. (Україна, Львів);
- The 6th International scientific and practical conference “Scientific achievements of modern society”, Liverpool, 5-7 february 2020. (United Kingdom, Liverpool).

Публікації. Положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 54 наукових працях, 20 з яких - наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації, та 34 - наукові праці які додатково відображають результати дисертації.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг дисертації складає 348 сторінок, у тому числі основний текст дисертації на 302 сторінках, 111 таблиць, 185 рисунків, список використаних джерел складає 204 найменувань на 29 сторінках та 16 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наводиться обґрунтування обраної теми, її актуальність, показано зв'язок роботи з Державними та галузевими програмами, формулюється мета і завдання досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, зазначаються об'єкт та предмет дослідження. Наведено дані про впровадження результатів роботи, особистий внесок автора та публікації.

У першому розділі наводиться огляд наукових публікацій за темою дисертації, проведено аналіз наукових основ методології теоретичних та експериментальних досліджень гальмівних систем, проаналізовані існуючі гальмівні системи, що застосовуються в вантажних та пасажирських вагонах та їх конструктивні особливості. Поняття «гальмівна ефективність» не має кількісного виміру, а довжина гальмівного шляху, що при цьому розуміється, неоднозначна, оскільки залежить від безлічі факторів - швидкості гальмування, ухилу, типу гальмівних колодок, сили натискання і т.д. Непрямі показники гальмівної ефективності: розрахунковий гальмівний коефіцієнт і питома гальмівна сила – орієнтовані на оцінку лише максимальних гальмівних параметрів не враховуючи динаміки зміни і дають лише наближену характеристику досконалості гальмівних пристроїв. У зв'язку з цим, з урахуванням сучасних вимог, виникає потреба оцінки гальмівної системи вагонів за більш широким переліком показників, що можливо з застосуванням комп'ютерного моделювання на основі математичних моделей, що відображають найбільш повно процес гальмування та його особливості.

Перспективи збільшення швидкостей руху поїздів та їх вантажопідємності потребують подальшого вдосконалення гальмівних засобів рухомого складу. При підвищенні ефективності гальмування з використанням нових, більш досконалих гальмівних матеріалів, при виборі параметрів гальмівної системи і режимів її роботи необхідно враховувати недоліки та переваги існуючих систем та сформулювати перспективні вимоги до нових.

В створення, розробку та вдосконалення гальмівних систем рухомого складу впродовж довгого часу вносили та продовжують вносити колективи провідних наукових установ та вищих начальних закладів України та зарубіжних країн: Державний економіко технологічний університет транспорту, Український державний університет науки і технологій (Дніпропетровський національний університет імені акад. В. Лазаряна), Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Український державний університет залізничного транспорту, Інституту залізничного транспорту (м. Рига), Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» та інших наукових установ та вищих навчальних закладах. Також значний вклад в розвиток внесли трудові колективи вітчизняних та іноземних промислових виробничих підприємств: ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», ПАТ «Дніпровагонмаш», ТОВ ДМЗ «Карпати», ПАТ «Азовмаш», ТОВ «Білоцерківський завод «Трібо», а також передові підприємства транспортного машинобудування зарубіжних країн - Knorr-Bremse GmbH, Westinghouse Air Brake Technologies (Wabtec Corporation), Dellner Frimatrail Frenoplast S.A. та інші.

Теоретичні основи розрахунків гальмівної ефективності, та проектування гальмівних систем та приладів, вантажних та пасажирських вагонів розвивались завдяки роботам А. М. Бабаєва, М. М. Бабаєва, О. Б. Бабаніна, Є. П. Блохіна, Г. І. Богомазова, І. Д. Борзилова, Т. В. Бутько, Ю. Я. Водяннікова, Е. І. Галаєва, В. Ф. Головка, О. Л. Голубенка, А. П. Горбенка, М. І. Горбунова, В. Л. Горобця, О. М. Горобченка, С. Г. Грищенко, В. Д. Дановича, Ю. М. Дацуна, Д. В. Дмитрієва, А. В. Донченка, Ю. В. Дьоміна, Р. Ю. Дьоміна, Ю. Є. Калабухіна, М. І. Капіці, М. Б. Кельріха, О. М. Коптовця, М. В. Коренівського, М. Л. Коротенка, А. П. Кіницької, В. А. Лазаряна, А. О. Ловської, Д. В. Ломотька, В. Л. Мазура, Л. А. Манашкіна, І. Е. Мартинова, В. Г. Маслієва, Є. Р. Можейко, В. І. Мойсеєнка, В. І. Мороза, Л. А. Мурадяна, С. В. Мямліна, С. І. Нечволода, О. М. Огара, Ю. І. Осеніна, С. В. Панченка, А. В. Прохорченка, А. Л. Пуларія, В. Г. Равлюка, О. М. Савчука, В. М. Самсонкіна, С. Ю. Сапронової, В. М. Старченка, Е. Д. Тартаковського, В. П. Ткаченка, О. В. Устенка, В. Ф. Ушкалова, А. П. Фалендиша, О. В. Фоміна, М. В. Хвороста, Н. Б. Чернецької-Білецької, В. В. Шевченка, та ін.

Таким чином, аналіз попередніх досліджень, переваг та недоліків існуючих гальмівних систем, а також методів та способів оцінки гальмівної ефективності рухомого складу дозволив визначити мету і задачі даної роботи, які сформульовані вище.

У другому розділі проведені дослідження факторів які мають вплив на гальмівну ефективність рухомого складу. При заданому осьовому навантаженні, основним параметром, що визначає гальмівну ефективність вагонів, є дійсна сила натиснення колодки на колесо при гальмуванні, а також коефіцієнт тертя гальмівної колодки та колеса. Величина дійсної сили натиснення в основному залежить від передаточного числа гальмівної важільної передачі, виходу штока гальмівного циліндра і тиску, що реалізується в гальмівному циліндрі при

гальмуванні. Також на величину дійсної сили натиснення колодок впливають такі фактори як зношування гальмівних колодок, та нерівномірний розподіл зусиль між гальмівними колодками. Оцінку впливу зазначених факторів здійснювали на основі експериментальних досліджень:

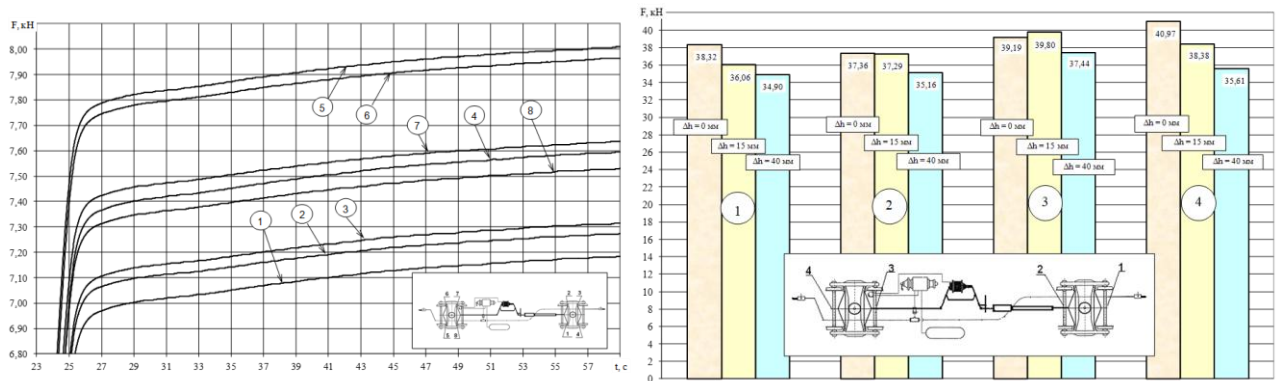


Рисунок 1 а) - Діаграми зміни сил натиснення; б) - дійсні сили натиснення залежно від зносу гальмівних колодок

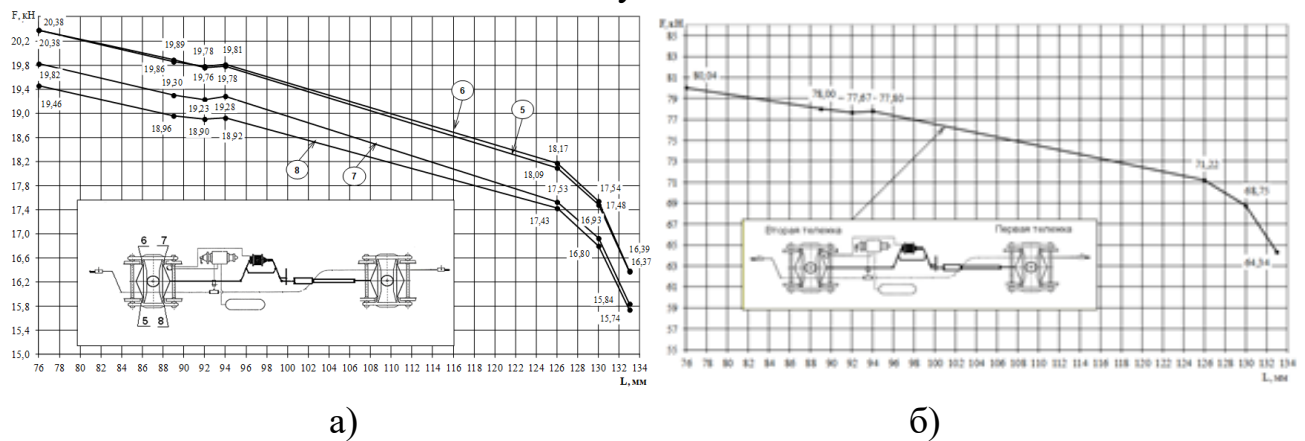


Рисунок 2 Залежність дійсної сили натиснення колодок на колеса від виходу штоку (а-значення при різних виходах штоку, б- сумарні дійсні сили)

Отримані результати досліджень дозволяють спрогнозувати гальмівну ефективність вагона залежно від зносу колодок та величини виходу штоку гальмівного циліндра.

Також проводились дослідження щодо реалізації тиску в гальмівних циліндрах в залежності від завантаженості вагона в стаціонарних та поїзних умовах.

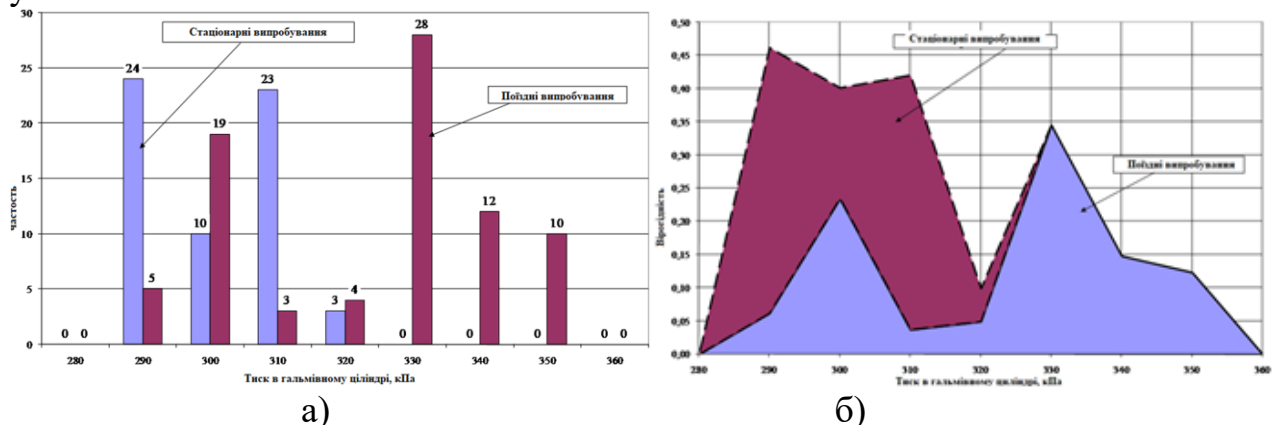


Рисунок 3 – а) Гістограма розподілу тиску в гальмівному циліндрі б) - Емпіричний розподіл ймовірності величини тиску в гальмівному циліндрі

Отримані результати піддавались статистичній обробці та показали характер зміни тиску в гальмівних циліндрах, та певні особливості щодо реалізації тиску в гальмівних циліндрах при стаціонарних умовах та в умовах руху.

Оскільки, однією з основних характеристик що визначає гальмівну ефективність є коефіцієнт тертя, який реалізується між колодкою та колесом (диском та накладкою) при гальмуванні, тому для отримання більш повної картини щодо факторів впливу на гальмівну ефективність рухомого складу проведені дослідження фрикційних властивостей колодки. Досліджена динаміка зміни коефіцієнта тертя в залежності від сили натиснення та осевого навантаження, що в подальшому піддавалось статистичній обробці. Результати розрахунків показали, що максимальна ймовірність появи пошкоджень колісних пар становить 0,053 (рисунок 4), тобто зі ста вагонів, що експлуатуються на досліджуваних композиційних колодках, п'ять вагонів мають ймовірність отримати повзуни на колісних парах, обумовлені коефіцієнтом тертя гальмівної колодки.

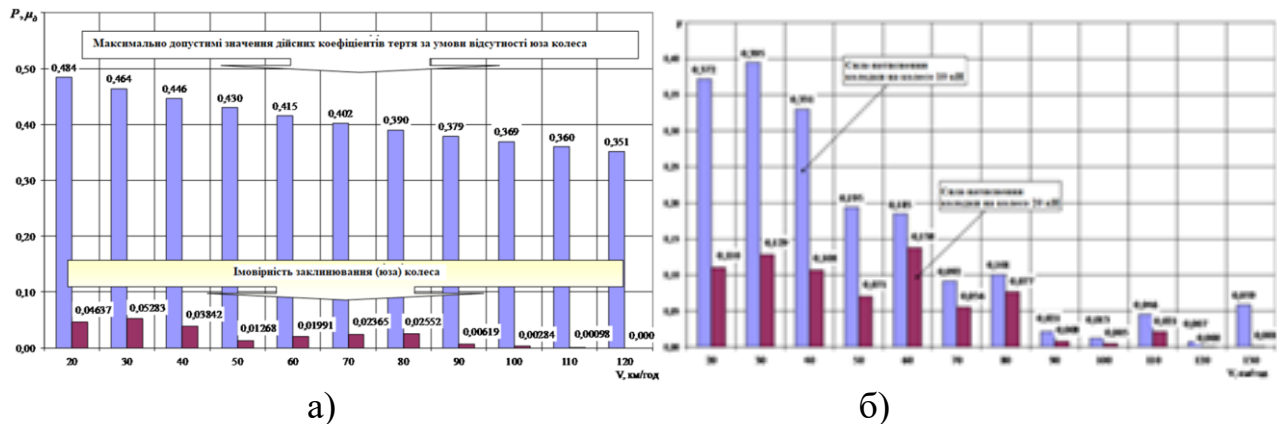
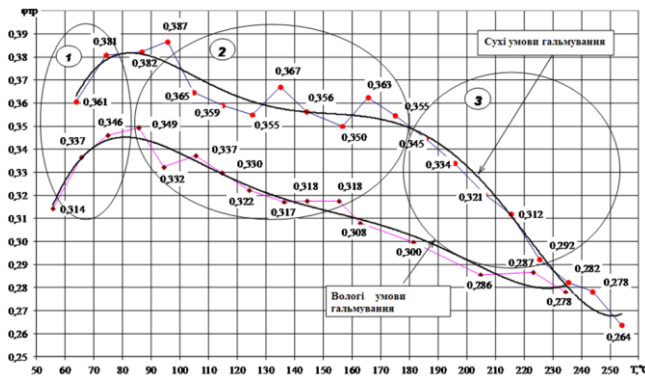


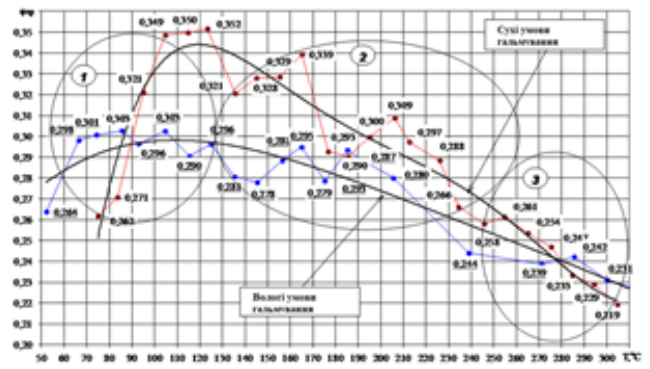
Рисунок 4 – а) - ймовірність появи повзунів на колісних парах та гранично допустимі значення дійсних коефіцієнтів тертя за умовою недопущення юза; б) - ймовірність перевищення коефіцієнтів тертя нормованих максимальних значень

Проведені дослідження та викладена методика на основі застосування методів математичної статистики дозволяє проводити глибший аналіз фрикційних властивостей гальмівних колодок рухомого складу.

Відомо що на коефіцієнт тертя колодки безпосередньо впливає температурні режими роботи пари тертя, а дослідження закономірностей зміни коефіцієнта тертя від температури на натурних зразках у реальних умовах експлуатації пов'язане із значними труднощами, тому загальні закономірності та характер залежності коефіцієнта тертя від температури визначають також на інерційних стендах Експериментальні данні щодо зміни коефіцієнта тертя від зростання температури приведені на рисунку 5.



а)



б)

Рисунок 5 - Зміна коефіцієнта тертя зі зростанням температури на поверхні колеса при силі натиснення колодки на колесо а)- 10 Кн; б)-20 кН

В результаті досліджень було встановлено закономірності та особливості залежності коефіцієнта тертя від температури, що будуть використані в подальшій роботі.

Водночас інерційні стенди не враховують усіх особливостей процесів гальмування за реальних умов експлуатації. Тому виникає необхідність провести додаткові дослідження та скорегувати отримані під час стендових випробувань данні дослідження, та скорегувати їх з урахуванням фактичних значень гальмівного шляху та швидкості, зареєстрованих у процесі ходових гальмівних випробувань в реальних умовах експлуатації.

Отримані розрахунково - експериментальним методом залежності фактичних значень коефіцієнтів тертя та температури нагріву колодки та колеса дозволяють визначати температурні показники з урахуванням фактичних значень гальмівного шляху та швидкості, що дозволяє отримати більш точну оцінку параметрів, та в подальшому використовувати їх для моделювання.

Третій розділ присвячено математичному та комп'ютерному моделюванню процесів гальмування вантажного вагона

Загальну схему процесу комп'ютерного математичного моделювання представлено на рисунку 6.



Рисунок 6 - Загальна схема процесу комп'ютерного математичного моделювання

За основу математичного моделювання гальмівного процесу приймається широко відоме диференціальне рівняння, що описує гальмування вагона як єдиної маси:

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot \{1000 \cdot b_{\text{уд}} + w_{\text{ox}}(v) + i_c\} \quad (1)$$

При цьому складові рівняння можуть бути визначені за загальновідомими класичними формулами:

$$w_{\text{ox}} = 0,7 + \frac{3 + 0,09 \cdot V + 0,002 \cdot V^2}{q_0} \quad (2) \quad b_{\text{кол}} = \delta_p \cdot \varphi_{\text{кр}} \quad (3)$$

$$\delta_p = \frac{K_p \cdot m}{T + Q} \quad (4) \quad K_p = 1,22 \cdot K \frac{K + 20}{4K + 20} \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{кр}} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \quad (6) \quad K = \frac{1}{m} \cdot (F_{\text{ц}} \cdot p_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{ц}} - K_{\text{np}} - K_{\text{ap}}) \cdot n \cdot \eta_{\text{pn}} \quad (7)$$

Відповідно до досліджень про які зазначено в розділі 2 наростання гальмівної сили в часі відбувається пропорційно наростанню тиску в гальмівному циліндрі при гальмуванні, тоді математичну модель додається функція $F(\delta, t)$, що враховує особливість зміна гальмівного коефіцієнта від часу.

$$F(b(t)) = \beta(K_i / K_{\text{max}}, t) \cdot \delta_p(p_{\text{ц}} = p_{\text{ц, max}}) \quad (8)$$

Аналіз діаграм наповнення гальмівних циліндрів стисненим повітрям при гальмуванні показує, що натиснення колодок на колеса відбувається із затримкою на час t_0 , обумовлене як інерційністю початку підвищення тиску в гальмівному циліндрі від моменту зниження тиску в гальмівній магістралі, так подолання сили стиснення відпускної пружини. У зв'язку з цим процес гальмування може бути представлений трьома характерними періодами: 1-періодом гальмування під впливом зовнішніх сил опору руху, 2 - періодом гальмування, обумовленого наростанням гальмівної сили від нуля до максимального значення, 3 - періодом гальмування під дією постійної гальмівної сили. Функціональна залежність $\beta(K_i / K_{\text{max}}, t)$ визначається за результатами стаціонарних гальмівних випробувань за записаними значеннями зміни тиску в гальмівних циліндрах при реалізації гальмування (розділ 2), відповідно до особливості зміни сили натиснення накладок (колодок) ця функція запишеться у вигляді:

$$\beta(K_i / K_{\text{max}}, t) = (0 \cdot H(t_1 - t) + H(t - t_1) \cdot H(t_2 - t) \cdot \theta(K_i / K_{\text{max}}, t) + H(t - t_2)) \quad (9)$$

Процес зростання гальмівної сили вагона може представлятися у вигляді безперервної функції, що інтегрується в квадратурах або кусково-лінійної функцією від часу, а також задаватися у вигляді таблиці з часовим кроком зміни тиску рівним 0,05 с:

$$\left. \begin{aligned} f_{i,1} &= 0 && \text{при } t < t_1; \\ f_{i,2} &= F_2(K_i / K_{\text{ном}}) && \text{при } t_1 \leq t < t_2; \\ f_{i,3} &= 1 && \text{при } t \geq t_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Відповідно до викладеного математичні моделі гальмування вантажного вагона можуть бути представлені у вигляді:

для вагона з композиційними колодками:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta_p(p_u = p_{u,ном}) \cdot 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{m}{T + Q} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(v) + i_c \right\}, \quad (11)$$

для вагону з чавунними колодками:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta_p(p_u = p_{u,ном}) \cdot 0,27 \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100} \cdot \frac{m}{T + Q} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(v) + i_c \right\}, \quad (12)$$

Диференціальні рівняння руху (11)-(12) представляють прості диференціальні рівняння і належать до класу завдань Коші. З усього різноманіття чисельного розв'язання задач Коші найпоширенішим є метод Рунге-Кутти, заснований на обчисленні наближеного рішення y_{i+1} у вузлі $x_{i+1} = x_i + h$ у вигляді лінійної комбінації з постійними коефіцієнтами:

$$y_{i+1} = y_i + p_{q1} \cdot k_1(h) + p_{q2} \cdot k_2(h) + \dots + p_{qq} \cdot k_q(h), \quad (13)$$

Диференціальне рівняння у методі Рунге - Кутти наводиться до системи диференціальних рівнянь першого порядку, причому класичним варіантом запису методу Рунге - Кутти 4-го порядку є така схема:

$$k_{1i} = h \cdot f(x_i, y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ni}) \quad (14)$$

$$k_{2i} = h \cdot f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_{1i} + \frac{k_{1i}}{2}, \dots, y_{ni} + \frac{k_{1i}}{2}\right) \quad (15)$$

$$k_{3i} = h \cdot f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_{1i} + \frac{k_{2i}}{2}, \dots, y_{ni} + \frac{k_{2i}}{2}\right) \quad (16)$$

$$k_{4i} = h \cdot f\left(x_i + h, y_{1i} + k_{3i}, \dots, y_{ni} + k_{3i}\right) \quad (17)$$

$$y_{ji+1} = y_{ji} + \frac{1}{6} \cdot (k_{1i} + 2 \cdot k_{2i} + 2 \cdot k_{3i} + k_{4i}) \quad (18)$$

$$x_{i+1} = x_i + h \quad (19)$$

Приведення диференціального рівняння другого порядку до системи диференціальних рівнянь першого методу Рунге - Кутти проводиться шляхом введення додаткових аргументів:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} = f(t, y_1, y_2) \end{cases} \quad (20)$$

Початковими умовами на вирішення системи рівнянь є: $y_1(t=0) = 0$; $\frac{dy_1}{dt}(t=0) = V_0$, де V_0 - швидкість початку гальмування. Блок схема розв'язання диференціального рівняння методом Рунге-Кутти 4 порядку представлена на рисунку 7.

Подальша обробка даних зводиться до систематизації всіх значень, класифікації, аналізу основною метою якого є встановлення функціональних залежностей між вихідними параметрами. Результати експериментів повинні бути зведені в легкочитані форми запису - таблиці, графіки, формули, що дозволяють швидко зіставляти та аналізувати отримані результати.

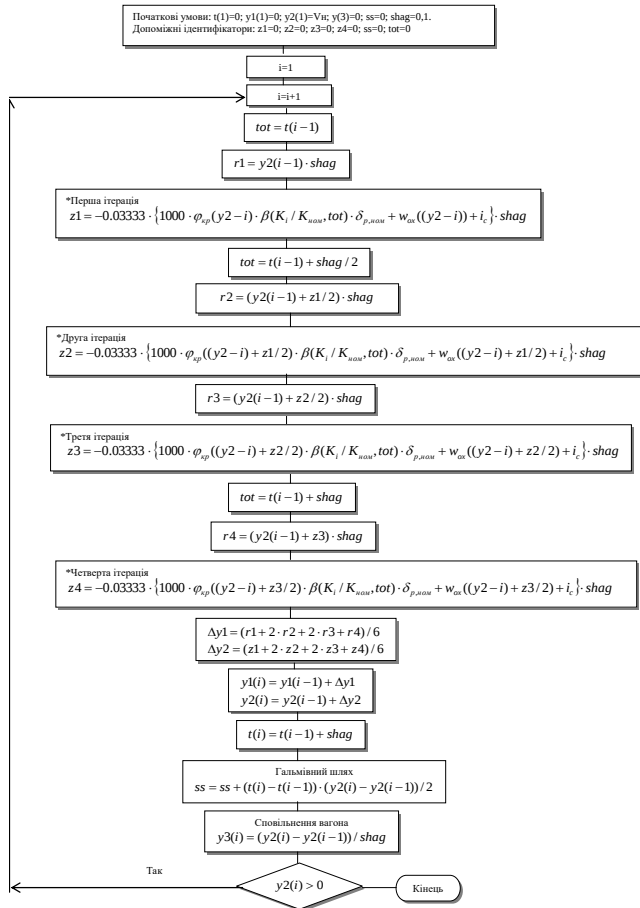


Рисунок 7 Блок схема розв'язання диференціального рівняння методом Рунге-Кутти

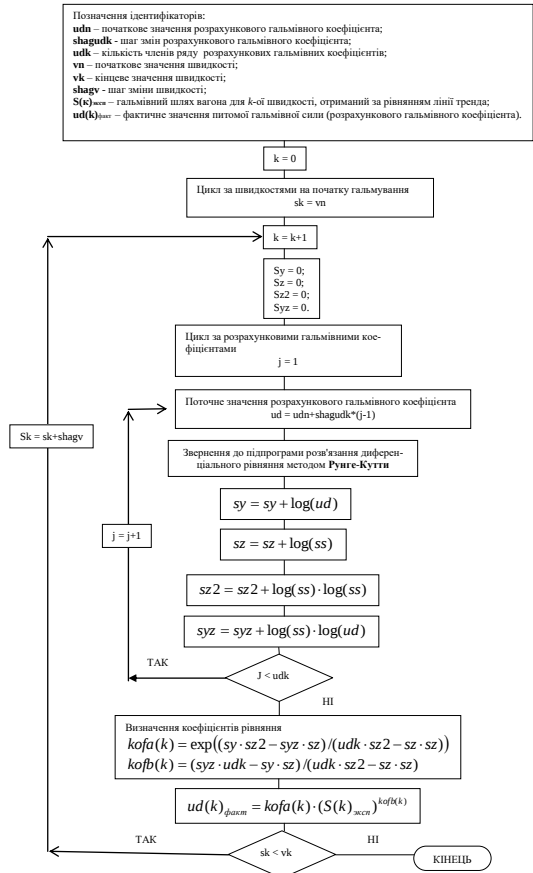


Рисунок 8 Блок схема визначення фактичного значення розрахункового гальмівного коефіцієнта

На основі статистичних методів визначається рівняння лінії тренду, що відображає аналітичну залежність гальмівного шляху вагона (S) від швидкості (V) на початку гальмування ($S = F(V)$).

Накопичений досвід ходових гальмівних випробувань одиниць рухомого складу залізниць свідчить, що модель гальмівного шляху може бути представлена поліноміальною залежністю від швидкості на початку гальмування:

$$S = \sum_{k=1}^m a_k \cdot V^k \quad (21)$$

Вибір моделі гальмівного шляху проводиться за мінімальним значенням коефіцієнта детермінації та залишкової дисперсії.

$$S = \sum_{k=1}^m a_k \cdot V^k + u \quad (22)$$

Рівняння (22) визначає залежність фактичних значень фактора S для фактичних значень незалежної змінної V . Розрахункові значення $\hat{S}$ описуються рівнянням:

$$\hat{S} = \sum_{k=1}^m \hat{a}_k \cdot V^k \quad (23)$$

Щоб рівняння (23) адекватно описувала фактичну залежність S від V необхідно визначити такі параметри a_k , у яких відхилення фактичних значень S від розрахункових $\hat{S}$ були мінімальними. У цьому випадку мінімізації піддається сума квадратів відхилень (залишків):

$$\left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \right\} = \min, \text{ де } u = S - \hat{S}. \quad (24)$$

Для визначення коефіцієнтів $\hat{a}_k$ рівняння (23) використовується метод максимальної правдоподібності (метод найменших квадратів).

Аналіз експериментальних досліджень гальмівної ефективності вантажних вагонів свідчить, що для адекватного відображення гальмівного шляху достатньо обмежитися квадратичною ступеневою залежністю.

Система роздільних рівнянь визначається виразом:

$$U = \sum_{i=1}^n (S_i - (a_2 \cdot V_i^2 + a_1 \cdot V_i))^2 \quad (25)$$

Визначаючи приватні похідні функції (25) за коефіцієнтами a_i і прирівнюючи їх нулю, отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dU}{da_2} = \sum_{i=1}^n (S_i - (a_2 V_i^2 + a_1 V_i)) \cdot V_i^2 = 0 \\ \frac{dU}{da_1} = \sum_{i=1}^n (S_i - (a_2 V_i^2 + a_1 V_i)) \cdot V_i = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_2 \sum_i V_i^4 + a_1 \sum_i V_i^3 = \sum_i S_i V_i^2 \\ a_2 \sum_i V_i^3 + a_1 \sum_i V_i^2 = \sum_i S_i V_i \end{cases} \quad (26)$$

Вирішуючі задану систему рівнянь знайдемо коефіцієнти:

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i^2 \sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n S_i V_i \sum_{i=1}^n V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i^4 \sum_{i=1}^n V_i^2 - (\sum_{i=1}^n V_i^3)^2} \quad a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i \sum_{i=1}^n V_i^4 - \sum_{i=1}^n S_i V_i^2 \sum_{i=1}^n V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i^4 \sum_{i=1}^n V_i^2 - (\sum_{i=1}^n V_i^3)^2} \quad (27)$$

Математичні залежності між розрахунковим гальмівним коефіцієнтом та величиною гальмівного шляху описується ступеневою залежністю виду:

$$A = c \cdot B^d \quad (28)$$

де коефіцієнти c та d підлягають визначенню методом найменших квадратів, для цього формула шляхом логарифмування правої та лівої частин наводиться до вигляду:

$$\ln(A) - \ln(c) - d \cdot \ln(B) = 0 \quad (29)$$

Після введення позначень $y = \ln(A)$; $A = \ln(c)$; $B = d$; $z = \ln(B)$, формула перетворюється до лінійному вигляду $y = A + B \cdot z$. З урахуванням зазначених перетворень, що дозволяє рівнянню набути вигляду:

$$U = \sum_{i=1}^n (y_i - (A + B \cdot z))^2 \quad (30)$$

де n – число інтервалів.

Після диференціювання рівняння (30) за невідомими коефіцієнтами A і B виходить система рівнянь:

$$\begin{cases} A \cdot n + \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ A \sum_{i=1}^n z_i + B \sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{cases}, \quad (31)$$

В результаті розв'язання системи рівнянь (31) коефіцієнти рівняння (28), з урахуванням введених позначень, визначаються за формулами:

$$c = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(A) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(B))^2 - \sum_{i=1}^n \ln(B) \cdot \ln(A) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(B)}{n \cdot (\sum_{i=1}^n \ln(B))^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(B))^2} \right), \quad (32)$$

$$d = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(B) \cdot \ln(A) - \sum_{i=1}^n \ln(B) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(A)}{n \cdot (\sum_{i=1}^n \ln(B))^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(B))^2}, \quad (33)$$

Коефіцієнти рівняння (28) залежать від швидкості початку гальмування (V_0), при цьому функціональні залежності параметрів запишуться у вигляді:

розрахунковий гальмівний коефіцієнт –

$$\delta_p = c(V_0) \cdot S(V_0)^{d(V_0)} \quad (34)$$

гальмівний шлях –

$$S(V_0) = c(V_0) \cdot \delta_p(V_0)^{d(V_0)} \quad (35)$$

Для реалізації алгоритмів і розв'язання диференціальних рівнянь було розроблено пакет прикладних програм для ЕОМ, написаних мовою VBA (Visual Basic for Application) в середовищі Excel :

Такий вибір зумовлений відносною простотою сприйняття та відсутності значного досвіду у програмування як для розробників так і для користувачів.

Кожній досліджуваній моделі вантажного вагона відповідає робоча книга, при цьому вихідні дані та результати розрахунків записуються на робочі аркуші електронних таблиць Excel, що дозволяє при необхідності використовувати математичні та статистичні функції Excel.

Пакет складається з восьми модулів (макросів - підпрограм), кожному модулю відповідає лист робочої книги Excel, до якої заносяться результати розрахунку:

- 1 Модуль «А» для визначення фактичних розрахункових гальмівних коефіцієнтів за зареєстрованими значеннями гальмівних колій у результаті ходових гальмівних випробувань;
- 2 Модуль «Б» для визначення гальмівного шляху одиночного вагона;
- 3 Модуль "В" для визначення динаміки зміни швидкості від початку гальмування до повної зупинки;

- 4 Модуль "Г" для визначення уповільнення вагона від початку гальмування до повної зупинки;
- 5 Модуль «Д» для визначення фактичного коефіцієнта тертя та питомої гальмівної сили вагона від початку гальмування до повної зупинки;
- 6 Модуль «Е» для визначення гальмівного шляху у перерахунку на поїзд на майданчику залежно від бази вагона, кількості вагонів у складі поїзда та швидкості поширення гальмівної хвилі;
- 7 Модуль «Ж» для визначення гальмівного шляху у перерахунку на поїзд на спуску 6 ‰ залежно від бази вагона, кількості вагонів у складі поїзда та швидкості поширення гальмівної хвилі;
- 8 Модуль «І» для визначення гальмівного шляху у перерахунку на поїзд на спуску 10 ‰ залежно від бази вагона, кількості вагонів у складі поїзда та швидкості поширення гальмівної хвилі.

Всі модулі працюють незалежно один від одного, причому для обчислення параметра гальмівного процесу використовують фактичні значення гальмівних коефіцієнтів отриманих в модулі «А», що дозволяє проводити додаткові дослідження з динаміки зміни параметра, що цікавить, залежно від розрахункового коефіцієнта, який може бути заданий (змінений) в робочій книжки модуля «А» з наступним запуском виконання відповідного модуля.

У четвертому розділі наведені дослідження присвячені математичному та комп'ютерному моделюванню процесів гальмування пасажирського вагона.

За основу математичного моделювання гальмівного процесу пасажирського вагона аналогічно до розділу 3 приймається диференціальне рівняння, що описує гальмування вагона як єдиної маси (1).

Математичне моделювання для пасажирських вагонів з колодковим гальмом є аналогічним з описаним в розділі 3 та вирішувати які можливо згідно з залежностями за формулами (1) – (20).

Відповідно до викладеного математичне моделювання для пасажирських вагонів з колодковим гальмом та дисковими гальмами можуть бути представлені:

- для пасажирського вагона з композиційними колодками:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta_p(p_u = p_{u,ном}) \cdot 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{m}{T + Q} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(v) + i_c \right\} \quad (36)$$

- для пасажирського вагона з чавунними колодками:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta_p(p_u = p_{u,ном}) \cdot 0,27 \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100} \cdot \frac{m}{T + Q} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(v) + i_c \right\} \quad (37)$$

- для пасажирського вагона з дисковим гальмом:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta(p_u = p_{u,ном})_{прив} \cdot \varphi_{тр} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(v) + i_c \right\} \quad (38)$$

Диференціальні рівняння руху (36)-(38) представляють прості диференціальні рівняння і належать до класу завдань Коші. З усього різноманіття чисельного розв'язання задач Коші найпоширенішим є метод Рунге-Кутти. Блок схема рішення диференціального рівняння методом Рунге-Кутти 4 порядку представлені на рисунку 9 (а – для колодкового; б – для дискового гальм). Диференційне рівняння за методом Рунге-Кутти сводиться до системи

диференціальних рівнянь першого порядку. Приведення диференціального рівняння другого порядку до системи диференціальних рівнянь першого здійснюється за формулою (20)

Початковими умовами на вирішення системи рівнянь є:
 $y_1(t=0) = 0$; $\frac{dy_1}{dt}(t=0) = V_0$, де V_0 - швидкість початку гальмування.

Блок схема рішення диференціального рівняння методом Рунге-Кутти 4 порядку представлені на рисунку 9 (як часовий крок прийнято значення shag = 0,1 с) відповідно а) для колодкового та б) дискового гальм.

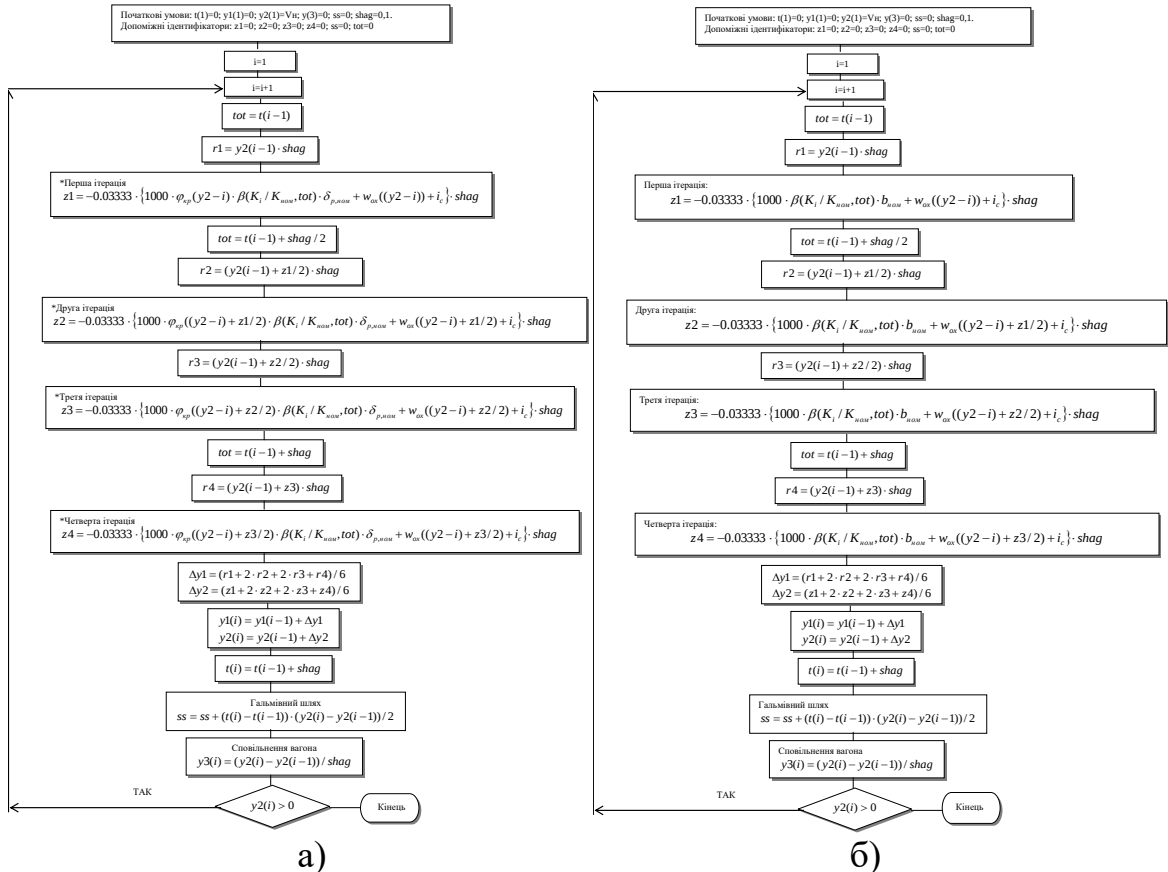


Рисунок 9. Блок схема розв'язання диференціального рівняння методом Рунге-Кутти а) – для колод колодкового гальма; б) - для дискового гальма пасажирського вагона

Аналогічно до розділу 3 обробка даних зводиться до систематизації всіх значень, класифікації, аналізу, та для пасажирських вагонів з колодковою гальмівною системою функціональні залежності будуть аналогічними з тими що зазначені в п. 3.1. дисертації

Для дискового гальма пасажирського вагона відмінність в математичних залежностях лиш в тому що питому гальмівну силу для дискового гальма, приведено до поверхні катання колеса ($b_{прив}$), а у колодкового визначається розрахунковим гальмівним коефіцієнтом (δ_p) але залежності цих величин із величиною гальмівного шляху описуємо ступеневою залежністю (28).

Ступенева залежність обумовлена тим, що гальмівний шлях і параметри, що визначають його величину (гальмівні коефіцієнти, питомі гальмівні сили,

коефіцієнти тертя, коефіцієнти зчеплення колеса з рейкою та ін.) знаходяться у зворотній залежності один до одного.

Подальші перетворення дозволяють для пасажирського вагона записати наступні функціональні залежності:

- для розрахункових гальмівних коефіцієнтів (колодкове гальмо):

$$\delta_p = c(V_0) \cdot S(V_0)^{d(V_0)} \quad (39)$$

- гальмівний шлях (колодкове гальмо) за формулою:

$$S(V_0) = c(V_0) \cdot \delta_p(V_0)^{d(V_0)} \quad (40)$$

- питому гальмівну силу (дискове гальмо) за формулою:

$$b_{прив} = c(V_0) \cdot S(V_0)^{d(V_0)} \quad (41)$$

- гальмівний шлях (дискове гальмо)

$$S(V_0) = c(V_0) \cdot b_{прив}(V_0)^{d(V_0)} \quad (42)$$

Методом комп'ютерного моделювання шляхом розв'язання диференціального рівняння (36)-(38) на ЕОМ визначається масив значень гальмівних шляхів для заданого діапазону значень розрахункових гальмівних коефіцієнтів або питомих гальмівних сил при фіксованій величині початкової швидкості гальмування, та визначають коефіцієнти рівнянь для пасажирського вагона за формулами (39)-(42).

Для визначення коефіцієнтів рівняння (41) знаходимо дискретний ряд значень питомих гальмівних сил з кроком Δb або розрахункових гальмівних коефіцієнтів з кроком $\Delta \delta$ і діапазон зміни швидкості від мінімальної до максимальної з кроком ΔV . Для кожного значення в заданому діапазоні зміни питомої гальмівної сили та швидкості на початку гальмування визначаються гальмівні шляхи, які є вихідними даними для визначення коефіцієнтів рівнянь (41), (42). Блок-схема обчислень представлена на рисунку 10.

Аналогічно як в 3 розділі для реалізації алгоритмів і розв'язання диференціальних рівнянь для пасажирських вагонів було розроблено пакет прикладних програм для ЕОМ, написаних мовою VBA (Visual Basic for Application) серед Excel :

- колодкове гальмо з композиційними колодками;
- колодкове гальмо з чавунними колодками;
- дискове гальмо.

Кожній програмі відповідає робоча книга, при цьому вихідні дані та результати розрахунків записуються на робочі аркуші електронних таблиць Excel, що дозволяє при необхідності використовувати математичні та статистичні функції Excel.

Пакет складається з восьми модулів (підпрограм), кожному модулю відповідає лист робочої книги Excel, до якої заносяться результати розрахунку. Назва та операції щодо розрахунку аналогічні тим що описані в розділі 3.

Похибка визначення дійсних гальмівних шляхів з використанням універсальних формул як композиційних, так і чавунних колодок, не перевищує 0,5 %, - рисунок 12.

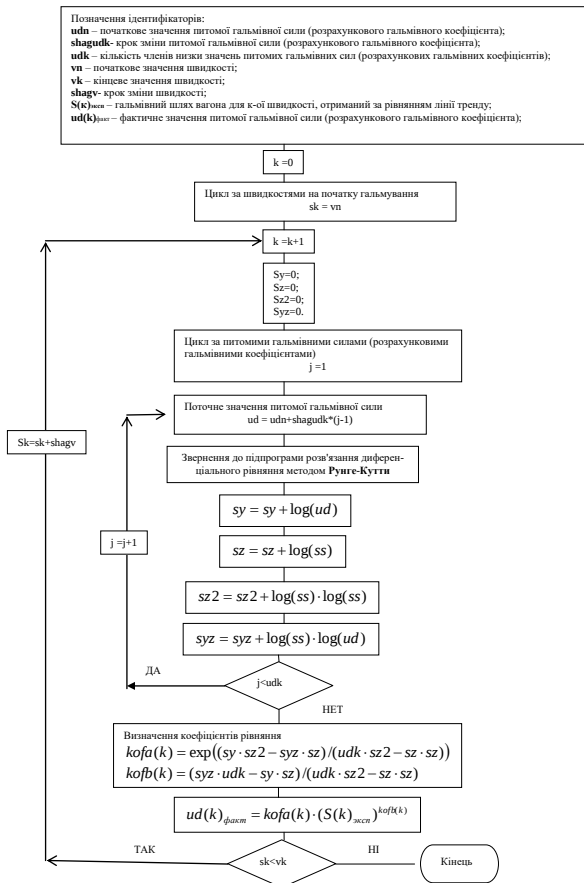


Рисунок 10 Блок схема визначення фактичного значення питомої гальмівної сили (розрахункового гальмівного коефіцієнта)

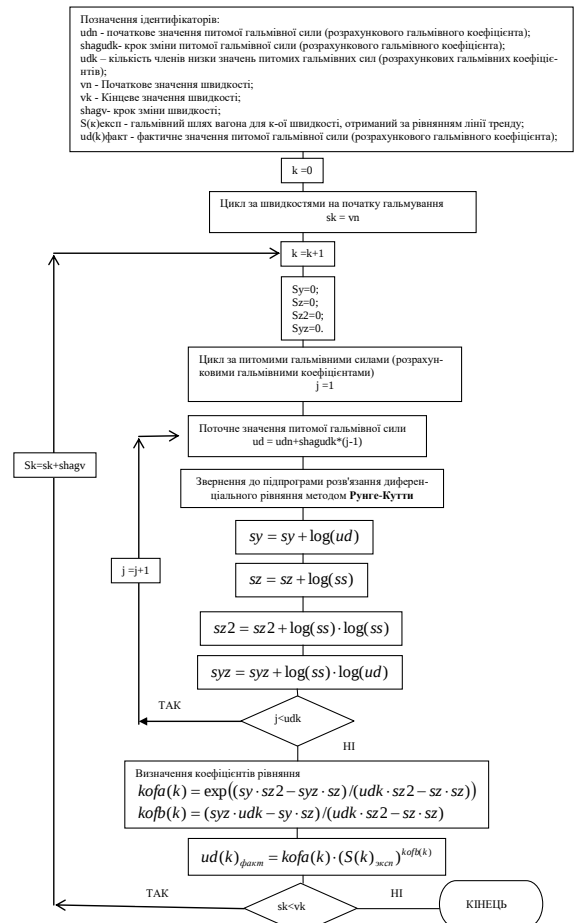


Рисунок 11 Блок схема визначення динаміки зміни питомої гальмівної сили у процесі гальмування пасажирського поїзда.

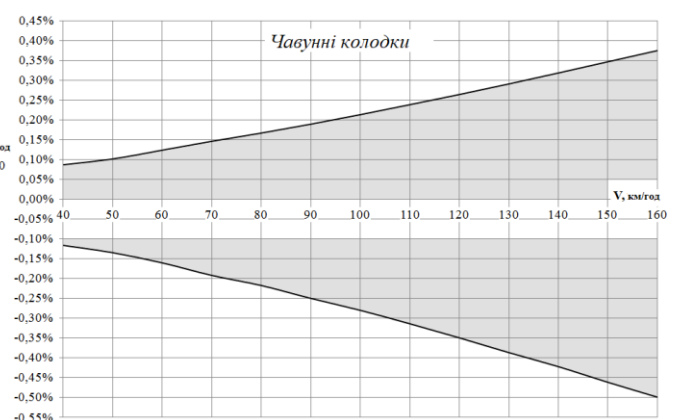
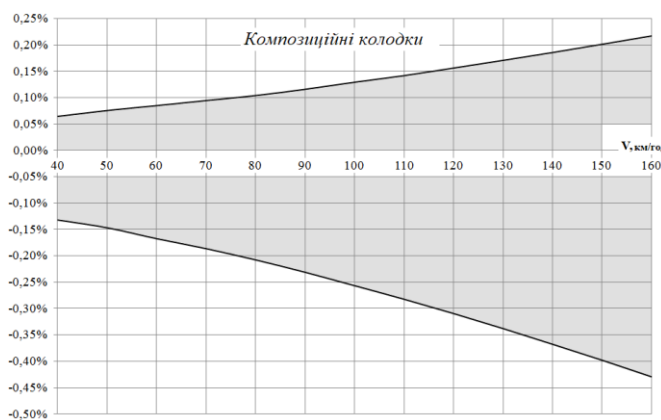


Рисунок 12- Похибка (%) під час визначення дійсного гальмівного шляху вагона

Для ілюстрації запропонованих алгоритмів відповідно до заданих параметрів проведені розрахункові дослідження гальмівної ефективності пасажирських вагонів з чавунними та композиційними колодками, а також для

вагону з дисковим гальмом, а також проілюстрована задача з визначення параметрів гальмівної системи при заданому значенні гальмівного шляху.

У п'ятому розділі приведена методологія експериментальних досліджень гальмівних систем рухомого складу. При проектуванні та виборі основних раціональних параметрів та характеристик нової конструкції одиниць рухомого складу залізниць паралельно з розрахунковими проводяться експериментальні дослідження в лабораторіях на моделях, макетах, натурних вузлах та дослідних зразках вагонів. Найбільш повна та достовірна інформація про технічні характеристики та властивості вагона може бути отримана в процесі випробувань натурального зразка на експлуатаційних ділянках залізничної колії різного стану або на спеціально пристосованих для цих цілей випробувальних полігонах. Остаточна оцінка гальмівної ефективності вагона здійснюється за результатами гальмівних ходових випробувань. Найбільш перспективною є автоматизація проведення випробувань, яка дозволяє звести до мінімуму кількість помилок, викликаних людським фактором, підвищити точність обчислень та скоротити час на проведення випробувань. В розділі приведені вдосконалені технологічні процеси проведення стаціонарних та ходових гальмівних випробувань, та описаний вдосконалений апаратно-програмний вимірjuвальний комплекс для визначення та оцінки гальмівної ефективності одиниць рухомого складу.

У шостому розділі наведені апробаційні приклади практичного застосування методів моделювання на реальних дослідних об'єктах, показані можливості запропонованих розрахункових моделей, та способи їх застосування на різних етапах досліджень гальмівної ефективності одиниць рухомого складу, а також при проектуванні нових перспективних одиниць рухомого складу. Також проведені розрахункові порівняльні дослідження за запропонованими моделями та правилами що діють в країнах Євросоюзу, на прикладі пасажирського вагона, обладнаного дисковою гальмівною системою. Розраховані гальмівні шляхи за методом європейського виробника гальмівного обладнання, що широко використовується на вітчизняних пасажирських вагонах, та згідно приведених моделей мають задовільну збіжність (різниця між результатами не перевищує 4%). Різниця у величинах гальмівних шляхів зумовлена принципово різними алгоритмами визначення гальмівного шляху пасажирського поїзда. У запропонованій методології за універсальними формулами гальмівний шлях визначається шляхом інтегрування диференціального рівняння руху, за методикою Кнопт - Bremse - за початковою швидкістю та сповільненням вагона. Крім того, в методології враховується питома сповільнювальна сила і основний питомий опір руху поїзда, на відміну від іноземної, де додатковий опір враховується масами, що обертаються, які додаються до маси вагона.

Також оскільки залізниці України мають ширину колії 1520 мм, не менш важливо тримати фокус та аналізувати нормативні вимоги до гальмівної ефективності в країнах простору 1520 мм. Так у 2018 році був прийнятий міждержавний стандарт ГОСТ 34434-2018, в якому викладено нові технічні вимоги та правила розрахунку для вантажних вагонів з осьовим навантаженням

від 23,5 до 30 тс та швидкостями руху до 160 км/год включно, в розділі застосовуючи розроблені автором моделі визначено параметри гальмівних систем, що відповідають діючим вимогам міждержавних стандартів колії 1520 мм.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором результати, які у сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему розвитку теоретичних положень, методологічних основ і практичних засобів з дослідження параметрів гальмівних систем та визначення гальмівної ефективності одиниць рухомого складу залізниць.

Виконані в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки та сформулювати такі пропозиції:

- 1 В дисертаційній роботі запропоновано методологію розрахункових та експериментальних досліджень гальмівної ефективності пасажирських та вантажних вагонів, яка базується на реалізації інформаційної моделі у вигляді диференціального рівняння руху вагона при гальмуванні та дослідження цієї моделі методами комп'ютерного моделювання процесів гальмування ;
- 2 Вдосконалено математичні моделі, що враховують такі основні характеристики вагона та гальмівної системи як: осьове навантаження вагона, фактичні функціональні залежності наповнення гальмівного циліндра стисненим повітрям від часу гальмування, а також сил натискання колодок; фактичні номінальні сили натискання колодок на колісні пари; основний питомий опір руху; величини нормованих спусків;
- 3 Як основна функціональна залежність між параметрами гальмування використовується ступенева залежність, такий вибір обумовлений тим, що параметри, що відображають гальмівну ефективність знаходяться у зворотній залежності по відношенню один до одного (гальмівний шлях і гальмівний коефіцієнт, гальмівний шлях і коефіцієнт тертя, гальмівний шлях і питома гальмівна сила), залежність гальмівного шляху від швидкості початку гальмування апроксимується квадратичною функцією;
- 4 В основу методології розрахункових та експериментальних досліджень покладено універсальні формули ступеневих залежностей параметрів гальмування, коефіцієнти яких визначаються статистичними методами з використанням масиву значень параметрів, отриманих методом комп'ютерного моделювання в заданих діапазонах дискретного ряду гальмівних коефіцієнтів (питомих гальмівних сил) і швидкостей;
- 5 Для реалізація алгоритмів і розв'язання диференціальних рівнянь розробили пакет прикладних програм для ЕОМ, написаних мовою VBA (Visual Basic for Application) у середовищі Excel . Кожен пакет складається з окремих модулів, кожному модулю відповідає окремий аркуш робочої книги Excel , в якому записуються результати розрахунку та будуються діаграми зміни параметра від часу гальмування;

- 6 Методологія теоретичних розрахункових досліджень дозволяє вирішувати такі завдання як:
- визначення дійсних значень гальмівної колії вантажного вагона на майданчику та нормованих спусках;
 - перерахунок дійсних гальмівних колій на гальмівну колію вантажного поїзда на майданчику та нормованих спусках;
 - перерахунок розрахункових гальмівних коефіцієнтів композиційних колодок на чавунні колодки;
 - перерахунок розрахункових гальмівних коефіцієнтів чавунних колодок на композиційні колодки;
 - за результатами значень гальмівних шляхів, отриманих при ходових гальмівних випробуваннях, визначаються фактичні величини розрахункових гальмівних коефіцієнтів для колодкових гальм та питомі гальмівні сили;
- 7 Представлена методологія значно розширює кількість параметрів гальмівного процесу, які використовуються для аналізу гальмівної ефективності вантажного вагона за результатами гальмівних ходових випробувань, до яких відносяться:
- фактичні значення гальмівних коефіцієнтів та питомих гальмівних сил у заданому діапазоні швидкостей на початку гальмування;
 - динаміка зміна швидкості гальмування вантажного вагона від часу гальмування;
 - динаміка зміна гальмівного шляху вантажного вагона від часу гальмування;
 - перерахунок гальмівної колії вантажного вагона на гальмівну колію поїзда на майданчику та нормованих спуску (- 6 ‰ та – 10 ‰) при заданій кількості вагонів у складі поїзда та швидкості поширення гальмівної хвилі з урахуванням наростання гальмівної сили за складом поїзда;
 - дійсні значення коефіцієнтів тертя колодок;
 - фактичні значення коефіцієнтів зчеплення колеса та рейки, що дозволяє оцінити виникнення юзової ситуації для різних швидкостей руху вагона;
 - динаміка уповільнення вантажного вагона у процесі гальмування;
 - динаміка зміни питомих гальмівних сил вантажного вагона у процесі гальмування;
 - динаміка зміни коефіцієнта тертя у процесі гальмування;
 - дійсні сили натискання колодок на колеса під час гальмування;
 - температура нагрівання колеса під час гальмування.
- 8 Описаний програмний комплекс, призначений для реєстрації різних за своєю фізичною природою параметрів (обороти колеса, тиск у гальмівному циліндрі, температура дисків і т.д.), який дозволяє підвищити автоматизацію проведення випробувань, точність обчислень, скоротити час на проведення випробувань, а також звести до мінімуму кількість помилок, спричинених людським фактором.

Таким чином в дисертаційній роботі запропоновано нові підходи до методології розрахункових та експериментальних досліджень гальм та

гальмівної ефективності вантажних вагонів, що базується на використанні комп'ютерного моделювання, в основі якого використовується диференціальне рівняння руху вагона як єдиної маси. Як вихідні дані математичної моделі використовуються результати стаціонарних і ходових гальмівних випробувань, що дозволяє врахувати реальні характеристики гальма та умови випробувань. Рішення диференціальних рівнянь проводиться у часовій області з кроком 0,1 с., що дозволяє досить точно простежити зміну параметрів гальмівного процесу за період від початку гальмування до зупинки вагона. Наведено практичну реалізацію алгоритму дослідження гальмівних систем вантажних вагонів та його апробацію на численних прикладах дослідження гальмівної ефективності натурних зразків. В дисертації запропоновано низку нових методик: методику статистичного оцінювання коефіцієнтів тертя за результатами випробувань на інерційних стендах; вдосконалені технологія проведення ходових гальмівних випробувань вагонів та апаратно-програмний комплекс для запису різних за своєю фізичною природою сигналів у єдиному режимі часу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- 1 Martynov I. I., Gerlici J., Trufanova A. V., Safronov O. M., Kravchenko K. V. Methodology for maintaining the dynamic characteristics of passenger cars // Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. – 2023. – Vol. 25, No. 2. – P. B95–B102. – DOI: 10.26552/com.C.2023.027.
- 2 Martynov I. I., Trufanova A. V., Shovkun V. V., Petukhov V. M., Safronov O. M. Evaluation of ride qualities of passenger cars // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2684. – Article ID: 020009. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120323>.
- 3 Сафронов О. М. Концепція оцінки гальмівної ефективності вантажних поїздів за результатами експериментальних досліджень в розрізі вимог ГОСТ 34434-2018 (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2021. Вип. 23. С. 140-163. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-140-163>
- 4 Сафронов О. М., Сулим А. О., Водянніков Ю. Я., Макєєва О. Г. Швидкісний вантажний поїзд для перевезення контейнерів зі швидкістю 200 км/год. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2021. Вип. 22. С.70-84. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-22-70-84>
- 5 Fedosov-Nikonov D. V., Sulym A. O., Ilchyshyn V. V., Safronov O. M., Kelrikh M. B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 985, No. 1. – Article ID: 012029. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>.
- 6 Fomin O., Lovska A., Safronov O., Soroka O. Study of the dynamic loading of the load-bearing structure of a flat wagon during transportation by sea // EUREKA: Physics and Engineering. – 2020. – No. 6. – P. 41–49. – DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001512>.
- 7 Sulym A., Lomonos A., Bialobrzheskyi O., Safronov O., Khozia P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the

- electric stock // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – No. 3. – P. 59–66. – DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
- 8 Сафронов О. М. Розрахункові дослідження гальмівної ефективності вантажних вагонів за правилами ГОСТ 34434-2018 з застосуванням універсальних формул (переклад р.м.). Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, серія «Транспортні системи і технології». 2020. № 35. С. 121–134. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-13>
 - 9 Сафронов О. М., та ін. Аналіз гальмівної ефективності електропоїзда на відповідність критерію недопущення юза колісних пар і температури нагріву диска (переклад р.м.). Modern science – moderní věda. – 2019. – № 3. – С. 144–154. – URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=43838>.
 - 10 Сафронов О. М. Гальмівні шляхи високошвидкісного електропоїзда ЕКР1 при швидкості 200 км/год та несприятливих умовах гальмування (переклад р.м.). Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, серія «Транспортні системи і технології». 2019. № 33. С. 227–240. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-1-18>
 - 11 Сафронов О. М. Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, серія «Транспортні системи і технології». 2018. № 32. С. 61–75. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-2-61-75>
 - 12 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я., Макеева О. Г. Гальмівна ефективність вантажних вагонів. Методологія розрахункових та експериментальних досліджень з використанням математичних моделей та комп'ютерного моделювання: монографія. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2018. 173 с. (переклад р.м.) URL: https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2025/02/Do-druku-24.10.18_compressed-1.pdf;
 - 13 Сафронов О. М. Методологія розрахункових досліджень гальмівної ефективності пасажирських вагонів з колодковим гальмом, що базується на вирішенні диференційного рівняння руху під час гальмування в часовій області (переклад р.м.). Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту, серія «Транспортні системи і технології». 2016. № 29. С. 13–27. URL: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/64/57>
 - 14 Сафронов О. М. Алгоритм визначення фактичного значення розрахункового коефіцієнта сили натиснення гальмівних колодок за результатами поїзних гальмівних випробувань вантажних вагонів (переклад р.м.). Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2015. № 157. С. 131–139. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2020/06/tht_157_bud-mat_1.pdf
 - 15 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Свистун С. М. Розрахунково-експериментальний метод визначення характеристик процесів гальмування пасажирських та вантажних вагонів (переклад р.м.). Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту, серія

- «Транспортні системи і технології». 2013. № 22. С. 85–96. URL: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/issue/view/20/19>
- 16 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Макеева О. Г. Методологія розрахункових та експериментальних досліджень гальмівної ефективності пасажирських вагонів із застосуванням математичних моделей і комп'ютерного моделювання (переклад р.м.): монографія. Кременчук : ДП «УкрНДІВ», 2017. 288 с. URL: http://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/1.-tytulnyj-lyst_anotatsyya.pdf
 - 17 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я., Макеева О. Г. Програмний комплекс для визначення гальмівної ефективності вантажних поїздів за правилами ГОСТ 34434-2018. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2020. № 21. С. 107–119. DOI: 10.47675/2304-6309.2020.21.107-119, URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/107-119.pdf>
 - 18 Сафронов О. М. Гальмівна ефективність поїзда метро з дисковими гальмами при юзовій ситуації BRAKE (переклад р.м.). Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту, присвячений 60-ти річчю кафедри «Вагони». 2013. № 139. С. 204–212. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2020/06/tht_139.pdf
 - 19 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Шелейко Т. В. Вплив температури на коефіцієнт тертя композиційної колодки (переклад р.м.). Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2012. Вип. № 5 (176), частина 1. – С. 50-55. URL: <https://journals.snu.edu.ua/index.php/app/issue/archive>
 - 20 Водянніков Ю. Я., Шелейко Т. В., Сафронов О. М. Порівняльний аналіз процесів гальмування пасажирських вагонів з колодковими і дисковими гальмами (переклад р.м.). Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. 2010. № 5 (147). С. 135–141.
Наукові праці які додатково відображають результати дисертації:
 - 21 Сафронов О. М., Макеева Е. Г. Методика визначення фактичного значення питомої гальмівної сили (розрахункового гальмівного коефіцієнта) пасажирського вагона за результатами поїзних гальмівних випробувань. (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2016. Вип. 13. С. 4–9. URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Metodyka-opredeleniya-faktycheskogo-znacheniya-udelnoj-tormoznoj-sily-raschetnogo-trmoznogo-koefytsyenta-pasazhyrskogo-vagona-po-rezultatam-poezdnyh-tormoznyh-yspytanyj.pdf>
 - 22 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Свистун С. М. Вплив часу наповнення гальмівного циліндра стисненим повітрям на гальмівну ефективність пасажирського вагона (переклад р.м.). Залізничний транспорт України. 2014. № 5. С. 3–8.
 - 23 Водянніков Ю.Я. та ін. Аналіз гальмівних випробувань електропоїзда із застосуванням математичних моделей (переклад р.м.). Залізничний транспорт України. 2013. № 5/6. С. 29–39.
 - 24 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Макеева О. Г. Вибір характеристик кліщових механізмів для високошвидкісних пасажирських вагонів (переклад

- р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2012. Вип. 6. С. 33–49. URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Vybor-haraktery-styk-kleshhevyh-mehanyzmov-dlya-vysokoskorostnyh-passazhyrskyh-vagonov.pdf>
- 25 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Свистун С. М., Жихарцев К. Л. Оцінка гальмівної ефективності пасажирського поїзда з дисковим гальмом на відповідність нормативним вимогам із використанням номограм (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2012. Вип. 7. С. 44–53. URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Otsenka-tormoznoj-effektivnosti-passazhyrskogo-poezda-s-dyskovymy-tormozamy-na-sootvetstvie-normatyvnyam-trebovaniyam-s-yspolzovaniem-nomogramm.pdf>
 - 26 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Гречко А. В. До питання о нормативних вимогах до гальмівної ефективності пасажирських поїздів для швидкості більше 160 км/год (переклад р.м.). Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2011. № 129. С. 64–75.
 - 27 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Гречко А. В. Особливості процесів гальмування пасажирських вагонів з колодковим і дисковим гальмом (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2011. Вип. 4-5. С. 39–47. URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Osobennosty-protsesov-tormozheniya-passazhyrskyh-vagonov-s-kolodochnym-y-dyskovym-tormozamy..pdf>
 - 28 Водянніков Ю. Я., Шелейко Т. В., Сафронов О. М. Визначення фрикційних характеристик дискового гальма пасажирського вагона при стендових випробуваннях (переклад р.м.). Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. 2010. № 1(143). С. 46–49.
 - 29 Водянніков Ю. Я., Кіницька Г. П., Яланський М. І., Сафронов О. М. Методика визначення гальмівної ефективності пасажирського вагона зі змішаними гальмівними (композиційними та чавунними) колодками. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2009. Вип. 1. С. 75-79. URL: https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/metodyka-vyznachennya-galmivnoyi-efektyvnosti-pasazhyrskogo-vagona-zi-zmishanymy-galmivnymy-kompozytsijnymy-ta-chavunnymy-kolodka_compressed-1.pdf
 - 30 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Яланський М. І., Пятаков О. О. Експериментальні дослідження з визначення величини коефіцієнта тертя. Журнал «Вагонний парк». 2009. Вип. № 9-10. С. 16-17.
 - 31 Сафронов О. М., Яланський М.І., Макеева О.Г. Дослідження гальмівної ефективності напіввагона на візках 18-9817 (ICG Motion Control). Журнал «Вагонний парк». 2009. № 2-4. С. 36–39.
 - 32 Водянніков Ю. Я., Яланський М.І., Сафронов О. М. Оцінка гальмівного шляху вантажних поїздів на основі аналітичних залежностей із застосуванням програми «excel». Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2009. Вип. 1. С. 36–48. URL: https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Otsinka-galmivnogo-shlyahu-vantazhnyh-poyizdiv-na-osnovi-analitychnyh-zalezhnostej-zastosuvannya-programy-EXCEL_compressed_compressed-szhatyj.pdf

- 33 Патент на корисну модель №104546 кл. В61Н 7/00 Дискове гальмо залізничного транспортного засобу / Дьомін Р.Ю., Горбунов М.І., Дьомін Ю.В., Просвірова О.В., Черняк Г.Ю., Ковтанець М.В., Сафронов О.М., Кравченко К.О., Кравченко К.О., Гусєв О.Ю.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – и 2015 06631; заявл. 06.07.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. – 3 с.
- 34 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111917 Літературний твір наукового характеру «Методологія оцінки міцності вантажного вагона за коефіцієнтом запаса міцності за призначений строк експлуатації» (переклад р.м.) / Сафронов О.М., Водянніков Ю.Я., Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О., Речкалов В.С.; заявник і власник ДП «УкрНДІВ»; дата реєстрації 18 лютого 2022 р.
- 35 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111918 Літературний твір наукового характеру «Методологія оцінки гальмівної ефективності кар'єрних поїздів» (переклад р.м.) / Сафронов О.М., Водянніков Ю.Я., Сулим А.О., Хозя П.О., Єськов Д.І., Кукін С.В.; заявник і власник ДП «УкрНДІВ»; дата реєстрації 18 лютого 2022 р.
- 36 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111919 Літературний твір наукового характеру «Алгоритм визначення гальмівної ефективності залізничних поїздів промислового транспорту» / Сафронов О.М., Водянніков Ю.Я., Макеєва О.Г., Єськов Д.І.; заявник і власник ДП «УкрНДІВ»; дата реєстрації 18 лютого 2022 р.
- 37 Сафронов О.М., Водянніков Ю. Я., Макеєва О.Г. Дослідження температури нагріву гальмівного диска пасажирського вагона під час гальмувань в процесі руху поїзда. «Актуальні проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки та техніки в умовах інтеграції України в Європейський науково-виробничий простір» Матеріали II міжнар. науково-практ. конф., м. Кременчук, 9 черв. 2022 р. С. 68-69
- 38 Сафронов О.М., Водянніков Ю.Я. Вплив температури на коефіцієнт тертя композиційної колодки (переклад р.м.). The 3rd international scientific and practical conference “Eurasians scientific congress». Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 22-24 бер. 2020 р. С. 161-167. URL: <https://sci-conf.com.ua>
- 39 Safronov O. M., Vodiannykov Yu. Ya., Makeieva O. G. Determination of the actual contact force coefficient of composite brake pads and the braking distance by universal equations. Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. 2020. Pp. 145-149. URL: <http://sci-conf.com.ua>.
- 40 Хозя П.О. та інші. Проблемні питання експлуатації пасажирських поїздів при наявності в його складі вантажних вагонів (переклад р.м.). The 3rd international scientific and practical conference “Eurasians scientific congress». Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 22-24 бер. 2020 р. С. 176-181 URL: <https://sci-conf.com.ua>
- 41 Сафронов О. М. Основні методологічні положення експериментальних досліджень гальмівної системи вагонів метрополітену з дисковими гальмами. The 5th International scientific and practical conference “Priority directions of

- science development”, Львів. 2-3 бер. 2020 р. С. 227-231. URL: <https://sci-conf.com.ua>
- 42 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я. Визначення характеристик гальмівного процесу одиниць рухомого складу залізниць з використанням комп’ютерного моделювання (переклад р.м.). The 6th International scientific and practical conference “Scientific achievements of modern society”, м. Liverpool, 5–7 лют. 2020 р. 2020. С. 1180–1187.
 - 43 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я., Сулим А. О. Алгоритм оптимізації параметрів гальмівних систем вагонів з колодковими і дисковими гальмами. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» : Матеріали 80 міжнар. науково-практ. конф., м. Дніпро. 2020. С. 38–39. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/c0a9f444-897c-4f62-a10b-a87e250b221b>
 - 44 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я. Аналіз критеріальних оцінок гальмівної ефективності вантажних вагонів за ГОСТ 34434-18. Science, society, education: topical issues and development prospects : Матеріали VII Международная научно-практическая конференция, м. Харків, 7–9 черв. 2020 р. С. 391–397. URL: <https://sci-conf.com.ua>.
 - 45 Сафронов О. М., Водянніков Ю. Я., Макеева О. Г. Моделювання юзової ситуації та оцінка ефективності протियюзових пристроїв (переклад р.м.). Innovative development of science and education : Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. Athens, 2020. С. 173–179. URL: <http://sci-conf.com.ua>.
 - 46 Сафронов О. М. Створення та впровадження в Україні сучасного моторвагонного складу залізниць для здійснення швидкісних перевезень пасажирів. Збірник наукових праць. IX Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» : Тези доп., м. Одеса, 22–24 трав. 2019 р. С. 92–94.
 - 47 Сафронов О. М. Створення та впровадження в Україні сучасного моторвагонного складу залізниць для здійснення швидкісних перевезень пасажирів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту . Тези доповідей II Всеукраїнської конференції «Вагони нового покоління: із XX в XXI сторіччя». 2019. № 184. С. 47–48.
 - 48 Сафронов О. М. Створення та впровадження в Україні сучасного моторвагонного складу залізниць для здійснення швидкісних перевезень пасажирів. Інфраструктура та рухомий склад. IX Міжнародна залізнична конференція UARAIL & PARTNERS : Тези доп. Львів, 2019. С. 74–75.
 - 49 Сафронов О. М. Оцінка фрикційних властивостей композиційних гальмівних колодок на відповідність нормативним вимогам до гальмівної ефективності вантажних вагонів (переклад р.м.). Prospects for the development of technical sciences in ev countries and ukraine : International scientific and practical conference, м. Wloclawek, 21–22 грудня 2018 р. С. 69–73.
 - 50 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Шелейко Т. В. Методика визначення гальмівного шляху пасажирського поїзда при недостатньому коефіцієнті зчеплення колеса з рейкою (переклад р.м.). Проблеми та перспективи

- розвитку залізничного транспорту : Матеріали 75 Міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпропетровськ, 14–15 травня 2015 р. С. 156.
- 51 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Свистун С. М. Вплив часу наповнення гальмівного циліндра стиснутим повітрям на гальмівну ефективність пасажирського вагона (переклад р.м.). Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : Матеріали 74 Міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпропетровськ., 15–16 травня 2014 р. С. 37–38.
 - 52 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Шелейко Т. В. Вплив температури на коефіцієнт тертя композиційної колодки (переклад р.м.). Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Вагони нового покоління – із ХХ в ХХІ сторіччя», м. Харків, 16–18 жовтня 2013 р. С. 299–300.
 - 53 Водянніков Ю. Я., Сафронов О. М., Гречко А. В. До питання нормативних вимог до гальмівної ефективності пасажирських поїздів для швидкості руху більше 160 км/год. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : Матеріали 72 Міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпропетровськ, 19–20 квітня 2012 р. (переклад р.м.) С. 68–69.
 - 54 Водянніков Ю. Я., Шелейко Т. В., Сафронов О. М. Дослідження процесів гальмування пасажирських вагонів з колодковими та дисковими гальмами. Проблеми і перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології : тези V Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 24–25 березня 2011 р. С. 28.

АНОТАЦІЯ

Сафронов О.М. Розвиток методології досліджень характеристик та ефективності гальмівних систем пасажирських та вантажних вагонів – рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів. – Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», Національний транспортний університет, Київ, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої та актуальної науково-прикладної проблеми щодо подальшого розвитку розрахунково-теоретичних положень, методологічних засад та практичних засобів досліджень гальмівної ефективності та гальмівних систем рухомого складу залізниць, визначення емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варійованими параметрами математичного та комп'ютерного моделювання, зменшення витрат на проектування та впровадження як нових гальмівних систем і їх складових, так і інноваційних пасажирських та вантажних вагонів.

В роботі запропоновано методологію розрахункових та експериментальних досліджень, що базується на комп'ютерному моделюванні процесів гальмування на основі реалізації інформаційної моделі у вигляді диференційного рівняння руху вагона під час гальмування. Вдосконалено математичні моделі для гальмівних систем вантажних вагонів з композиційними

та чавунними гальмівними колодками, а також для гальмівних систем пасажирських вагонів з композиційними, чавунними колодками та дисковою гальмівною системою, які враховують основні характеристики вагона та гальмівної системи. В основу методології розрахункових досліджень закладені універсальні формули ступеневих залежностей параметрів гальмування. Описані алгоритми розв'язання диференціальних рівнянь реалізованих у вигляді пакетів прикладних програм для ЕОМ, написаних мовою VBA (Visual Basic for Application) у середовищі Excel. Представлена методологія значно розширює кількість параметрів гальмівного процесу, які використовуються для аналізу гальмівної ефективності вантажних вагонів за результатами гальмівних ходових випробувань: фактичні значення гальмівних коефіцієнтів і питомих гальмівних сил; дійсні значення коефіцієнтів тертя колодок; фактичні значення коефіцієнтів зчеплення колеса та рейки при гальмуванні; гальмівні шляхи вантажних та пасажирських поїздів на майданчику та нормованих спусках (- 6 ‰ та - 10 ‰) для заданої кількості вагонів у складі поїзда з урахуванням наростання гальмівної сили за складом поїзда; сповільнення вагонів та поїзда у процесі гальмування, а також їх середні значення. Вдосконалена методика експериментальних досліджень одиниць рухомого складу. Робота ґрунтується на проведених розрахункових та експериментальних дослідженнях на зразках рухомого складу, які на сьогоднішній день знаходяться в експлуатації.

Подальший розвиток наукових основ щодо підвищення ефективності гальмівних систем рухомого складу залізниць є актуальною та важливою науково-прикладною проблемою результати розв'язання якої будуть мати важливе значення для вітчизняного машинобудівного комплексу та залізничного транспорту України.

Ключові слова: вантажний вагон, гальмівний шлях, гальмівна ефективність, дійсний коефіцієнт сили натиснення, екстрене гальмування, експериментальне дослідження, пасажирський вагон, питома гальмівна сила, моделювання.

SUMMARY

Safronov O. M. Development of a methodology for researching the characteristics and efficiency of passenger and freight car braking systems - Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree in Engineering, specialty 05.22.07 - Rolling stock of railways and train traction - State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", National transport university, Kyiv, 2025.

The thesis deals to solve an important and relevant applied research problem of further development of calculation and theoretical provisions, methodological principles and practical means of studying braking efficiency and braking systems of railway rolling stock, determining empirical dependencies, approximating the relationships between the varied parameters of mathematical and computer modeling, reducing the cost of designing and implementing both new braking systems and their components, as well as innovative passenger and freight cars.

The paper proposes a methodology for computational and experimental research based on computer modeling of braking processes through the implementation of an information model in the form of a differential equation of a railway vehicle motion during braking. The mathematical models for braking systems of freight cars with composite and cast iron brake shoes, as well as for braking systems of passenger cars with composite, cast iron shoes and disc brake system with the main characteristics of the railcar and braking system considered, have been improved. The methodology of computational studies is developed on the basis of universal formulas for step dependencies of braking parameters. The described algorithms for solving differential equations are implemented in the form of computer application packages written in VBA (Visual Basic for Application) in the Excel environment. The presented methodology significantly expands the number of braking process parameters used to analyze the braking efficiency of freight cars based on the results of brake running tests: actual values of braking coefficients and specific braking forces; actual values of brake shoes friction coefficients; actual values of wheel and rail adhesion coefficients during braking; braking distances of freight and passenger trains on the level grade and standardized slopes (- 6 ‰ and - 10 ‰) for a given number of vehicles in the train, taking into account the increase in braking force by train formation; deceleration of railcars and train during braking, as well as their average values. The methodology for experimental studies of railway vehicles has been elaborated. The paper focuses on the computational and experimental studies carried out on specimens of railway vehicles that are currently in operation.

Further development of the research framework for improving the efficiency of braking systems of railway rolling stock is an urgent and important applied research problem, the results of which will be particularly beneficial for the national machine-building sector and railway transport of Ukraine.

Keywords: freight car, braking distance, braking efficiency, real coefficient of pressing force, emergency braking, experimental study, passenger car, specific braking force, modeling.

САФРОНОВ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 629.4.077:463.3

**РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТА
ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ ПАСАЖИРСЬКИХ ТА
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 09.07.2025 р. Обсяг 1,5 друк. арк.
Формат 60×84 1/16. Тираж 100 примірників. Папір офсетний.
Замовлення № 11/24.

Надруковано згідно з оригіналом автора

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5515 від 30.08.2015 р.
Видавництво ДП «УкрНДІВ»
39621 м. Кременчук, вул. І. Приходька, 33
Тел. (05366) 6-10-36