

УДК 004.94:629.46-049.65

О. В. ФОМІН^{1*}, О. С. КОЗИНКА²

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fominaleksejvictorovic@gmail.com, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Каф. «Вагони та вагонне господарство», Національний транспортний університет, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна, тел. +38 (093) 376 13 73, ел. пошта kozynka1520mm@gmail.com, ORCID 0009-0009-3012-581X

Математичне формулювання цільової функції підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів антивібраційними покриттями

Мета. Розробити математичну модель цільової функції, яка дозволяє підвищити ефективність захисту несучих елементів вантажних вагонів шляхом оптимального вибору антивібраційних покриттів з урахуванням умов експлуатації, типу вантажу, матеріалу конструкцій та інтенсивності динамічних навантажень. **Методика.** У дослідженні використано методи математичного моделювання, функціональної оптимізації та чисельного аналізу. В якості критерію ефективності вибрано інтегральну функцію мінімізації передачі вібрацій від візка до несучих конструкцій кузова. Побудовано модель, яка враховує механічні властивості покриттів, їхню товщину, адгезію до поверхні та вартість нанесення. Здійснено аналіз впливу параметрів навколишнього середовища та циклічних навантажень. **Результати.** Розроблено узагальнене математичне рівняння цільової функції ефективності, яке може бути адаптоване до різних типів вагонів та умов експлуатації. Проведено валідацію моделі на прикладі хребтової балки піввагона з різними типами полімерних покриттів. Отримано оптимальні конфігурації шарів покриття, які забезпечують до 35 % зменшення рівня вібраційних деформацій порівняно з традиційними схемами. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використання цільової функції на основі багатопараметричної оптимізації з урахуванням як механічних, так і експлуатаційно-економічних факторів впливу. Модель забезпечує гнучке налаштування під конкретні технічні завдання. **Практична значимість.** Розроблена математична модель цільової функції дозволяє інженерам та конструкторам приймати обґрунтовані рішення при виборі антивібраційних покриттів для несучих елементів вантажних вагонів. Завдяки урахуванню комплексу факторів – типу вантажу, умов експлуатації, матеріалів конструкції та інтенсивності динамічних навантажень – забезпечується індивідуалізований підхід до кожного конкретного проектного завдання. Запропонований підхід може бути впроваджений у практику проектування та модернізації вантажних вагонів, сприяючи підвищенню їхньої довговічності, зниженню витрат на ремонт та покращенню безпеки перевезення вантажів. Модель дозволяє автоматизувати процес вибору покриттів в системах комп'ютерної підтримки інженерних рішень.

Ключові слова: залізничний транспорт; транспортні технології; вагони; ремонт; експлуатація; надійність; покриття захисні; автоматизація; комп'ютерне моделювання

Вступ

Вантажні вагони є основою залізничних перевезень, відіграючи ключову роль в економіці. Їх несучі елементи постійно піддаються значним динамічним навантаженням під час руху. Ці навантаження призводять до вібрацій, які є руйнівними для металевих конструкцій. Тривала дія вібрацій спричиняє втому металу. Втома металу, у свою чергу, призводить до появи мікротріщин. Ці мікротріщини з часом розширюються, спричиняючи руйнування елементів.

Наслідками такого руйнування є не тільки дорогий ремонт. Збільшується ризик виникнення аварій та катастроф. Це загрожує не тільки матеріальними збитками, але й людськими життями. Отже, підвищення довговічності несучих елементів вагонів є критично важливим завданням. Одним з ефективних методів захисту є застосування антивібраційних покриттів. Ці покриття здатні поглинати енергію вібрацій. Вони перетворюють механічну енергію на теплову, тим самим зменшуючи амплітуду коливань. Проте, ефективність цих покриттів значною мірою залежить від їхніх фізико-механічних властивостей. Також важливе значення має спосіб їх нанесення та товщина ша-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ру. Наразі відсутній єдиний підхід до оптимізації вибору та застосування антивібраційних покриттів.

Існуючі методи підбору часто базуються на емпіричних даних. Вони не завжди враховують повний спектр факторів, що впливають на ефективність. Це призводить до субоптимальних рішень. Тому виникає потреба у створенні математичного апарату. Цей апарат дозволить кількісно оцінити вплив різних параметрів. Він дозволить системно підходити до вирішення проблеми. Розробка цільової функції є центральним елементом такого апарату. Цільова функція дозволить формалізувати критерії ефективності. Вона може включати такі показники, як зниження рівня вібрації, збільшення терміну служби елементів, зменшення витрат на обслуговування. Дослідження повинно враховувати особливості динамічних навантажень. Необхідно враховувати різні типи вантажних вагонів. Також важливо врахувати різноманітність матеріалів несучих елементів.

Математичне формулювання цільової функції дасть можливість використовувати сучасні методи оптимізації. Це дозволить підбирати антивібраційні покриття з максимальною ефективністю. Такий підхід значно підвищить надійність та безпеку залізничних перевезень. Він також дозволить скоротити експлуатаційні витрати. Зменшення потреби в ремонті та заміні деталей призведе до значної економії. Крім того, це дослідження сприятиме розвитку наукових знань. Воно заповнить прогалини у розумінні взаємодії вібрацій та захисних покриттів. Отримані результати можуть бути застосовані не тільки на залізничному транспорті. Вони можуть бути корисними в інших галузях промисловості. Наприклад, у машинобудуванні, будівництві, авіації.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена практичними потребами. Вона має значний потенціал для покращення технічного стану транспортних засобів. Також вона сприяє підвищенню економічної ефективності галузі. Розробка та впровадження науково обґрунтованих підходів до захисту несучих елементів вантажних вагонів є нагальним завданням. Це дослідження є важливим кроком до досягнення цих цілей. Воно надасть інструменти для прийняття обґрунтованих рішень. Це забезпечить

довгострокову експлуатацію вагонів. Вона також мінімізує ризики. В результаті, залізничні перевезення стануть безпечнішими та ефективнішими. Це матиме позитивний вплив на всю транспортну інфраструктуру.

У статті [8] представлено розробку високо-ефективного демпфувального покриття на полімерній основі з покращеними вібропоглинальними властивостями. Досліджено вплив складу матеріалу та товщини шару на коефіцієнт втрат енергії при динамічних навантаженнях. Автори показали, що нове покриття забезпечує значне зниження амплітуди коливань, що робить його перспективним для транспортних конструкцій.

Робота [1] присвячена створенню інноваційних армованих полімерно-рідинних гелів із комбінованими властивостями – високою еластичністю, демпфуванням і здатністю до активного гасіння коливань. Методика включає багаторівневу структуру гелю, що адаптується до частоти вібрацій. Стаття демонструє потенціал таких матеріалів для адаптивних віброзахисних систем у транспорті та машинобудуванні.

У роботі [15] виконано експериментальне дослідження демпфувальних характеристик різних полімерних матеріалів при циклічних навантаженнях. Оцінено вплив температури, частоти та товщини зразків на коефіцієнт демпфування. Автори встановили, що поліуретанові та силіконові композити мають найвищі показники поглинання вібрацій, що підтверджує їх ефективність у віброзахисних покриттях.

Стаття [10] розглядає сучасні методи моніторингу корозії в багатошарових конструкціях із використанням сенсорних матеріалів. Окрему увагу приділено інтерфейсам між металом і полімерними покриттями, що є критичними для довговічності. Автори пропонують підходи інтеграції сенсорів у композитні шари для контролю стану покриття в режимі реального часу.

У статті [4] розглянуто нове покоління самовідновлювальних покриттів, здатних реагувати на появу корозійних дефектів. Автори описують механізми активації «self-healing» процесів під впливом іонів або змін pH у середовищі. Такі покриття ефективно захищають сталеві елементи транспортних конструкцій, подовжуючи термін їх експлуатації без додаткового технічного обслуговування.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Ця оглядова робота [2] систематизує сучасні технології створення розумних самовідновлювальних покриттів із використанням мікро- та наноконтейнерів, наповнених антикорозійними реагентами. Автори аналізують їх ефективність, стабільність і сумісність із різними полімерними матрицями, підкреслюючи перспективи застосування у залізничному

машинобудуванні та транспортних конструкціях.

У дослідженні [3] представлено результати відновлення алюмінієвих елементів методом холодного напилення. Проаналізовано мікроструктуру, механічну міцність і корозійну стійкість нанесених шарів. Показано, що технологія cold spray дозволяє формувати щільні, адгезійно стійкі покриття, які ефективно відновлюють властивості пошкоджених компонентів транспортних систем.

Огляд [16] присвячено сучасним методам неруйнівного контролю стану рейкових конструкцій, включно з ультразвуковими, магнітними, візуальними та інфрачервоними технологіями. Особливу увагу приділено моніторингу покриттів і зон з потенційними дефектами. Робота підкреслює значення комплексної діагностики для запобігання втомних та корозійних пошкоджень.

У статті [11] подано систематичний огляд сучасних антикорозійних покриттів для сталевих залізничних конструкцій. Проаналізовано ефективність полімерних, епоксидних і поліуретанових систем у різних кліматичних умовах. Автори підкреслюють, що комбінація пасивних і активних антикорозійних компонентів значно збільшує довговічність металевих елементів кузова вагонів.

У роботі [18] представлено аналітичну модель, що описує кінетику корозійного зношування Galfan-покриттів (цинк-алюмінієвих систем) на високоміцних сталевих дротах. Автори встановили часову залежність втрати маси та структури покриття, що дозволяє прогнозувати довговічність елементів транспортних конструкцій у корозійно-активному середовищі.

Досліджено [6] вплив корозійного середовища на зародження та розвиток втомних тріщин у рейковій сталі U75V після термообробки. Автори експериментально визначили залежності швидкості росту тріщини від напружень

і часу дії середовища, що має практичне значення для оцінки ресурсу елементів рейкових систем та вантажних вагонів.

У статті [9] розроблено методику визначення параметрів ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу. Хоча робота не присвячена безпосередньо покриттям, вона стосується підвищення енергоефективності та ресурсу елементів транспортних систем, що важливо для комплексного аналізу експлуатаційної надійності вагонів.

Дослідження [17] присвячене аналізу втомного руйнування сталі 51CrV4, що використовується у ресорних системах вантажних вагонів. Визначено закономірності поширення тріщин та межі втомної міцності при різних рівнях навантаження, що дозволяє підвищити надійність несучих елементів ходової частини.

У роботі [14] представлено результати дослідження процесів корозійного руйнування залізничних коліс. Автори описують механізми локалізації дефектів, зокрема у зонах контакту колеса та рейки, що призводить до втомних пошкоджень і мікротріщин. Висвітлено ефективність антикорозійних заходів для продовження строку служби колісних пар.

Автори [13] досліджують взаємозв'язок між механічними властивостями сталі коліс і рейок та проявами контактної втоми. Експериментальні результати показують, що оптимізація твердості, мікроструктури та поверхневого шару дозволяє мінімізувати знос і розвиток втомних тріщин, що прямо впливає на експлуатаційну надійність залізничного транспорту.

Дослідження [5] присвячено визначенню параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори розробляють теоретичні моделі та експериментально підтверджують їхню адекватність. Виявлено оптимальні характеристики системи, що дозволяють підвищити енергоефективність транспорту. Результати можуть бути використані для впровадження рекуперації енергії в підземних залізницях.

Автори публікації [7] досліджують застосування методів градієнтного спуску для оптимізації віброзахисту. Порівняльний аналіз різних алгоритмів показує їхню ефективність. Результати дозволяють вибрати оптимальні методи

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

для конкретних завдань. Робота має практичне значення для інженерних розробок.

Дослідження [12] аналізує параметричний вплив в'язкопружних покриттів на вібрацію. Автори пропонують аналітичні залежності для прогнозування ефективності. Результати показують можливість оптимізації матеріалів для різних умов. Робота пропонує нові підходи до проектування демпфуючих систем.

Аналіз наявної літератури виявив, що питання математичного формулювання цільової функції підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів антивібраційними покриттями не приділено належної уваги. Існуючі дослідження часто фокусуються на розробці нових матеріалів або на загальних принципах віброізоляції, залишаючи відкритим питання їхньої оптимальної інтеграції. Це створює значний пробіл у розумінні того, як кількісно оцінити та максимізувати ефективність застосування таких покриттів. Відсутність чітко сформульованої математичної моделі перешкоджає систематичному підходу до проектування та впровадження антивібраційних рішень. Для досягнення значного прогресу в цій сфері необхідно зосередитися на розробці комплексних цільових функцій, що враховують не тільки вібропоглинаючі властивості, але й інші важливі експлуатаційні параметри. Це дозволить оптимізувати вибір та застосування антивібраційних покриттів, підвищуючи їхню ефективність і сприяючи довговічності вантажних вагонів.

Мета

Метою науково-прикладного дослідження є математичне формулювання цільової функції, що дозволить кількісно оцінити та оптимізувати ефективність антивібраційних покриттів. Розроблене формулювання стане основою для подальших інженерних розрахунків та експериментальних перевірок, спрямованих на створення ефективних рішень для захисту рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- провести всебічний аналіз існуючих антивібраційних покриттів та їхнього впливу на динамічні характеристики несучих елементів вантажних вагонів;

- ідентифікувати ключові параметри, що впливають на ефективність віброзахисту, такі як товщина покриття, його пружні властивості та коефіцієнт демпфування;

- розробити математичні моделі, які описуватимуть взаємодію антивібраційного покриття з несучими елементами вагона під дією динамічних навантажень;

- встановлення критеріїв оптимальності для цільової функції, що враховуватимуть як ефективність віброзахисту, так і економічну доцільність застосування покриттів;

- провести серію експериментальних досліджень для верифікації розроблених математичних моделей та визначення емпіричних залежностей;

- формулювання цільової функції, яка дозволить оптимізувати параметри антивібраційних покриттів для максимального підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів.

Методика

Виконання науково-практичного дослідження ґрунтувалося на комплексному підході. Зокрема, використовувалися методи математичного моделювання для опису поведінки несучих елементів вантажних вагонів під впливом вібрацій. Методика проведення дослідження включала низку етапів, спрямованих на розробку математичної моделі цільової функції, яка дозволяє оптимізувати параметри антивібраційних покриттів для підвищення ефективності захисту несучих елементів вантажних вагонів. На першому етапі було здійснено аналіз сучасного стану проблеми шляхом вивчення літературних джерел, присвячених конструкційним особливостям вантажних вагонів, методам зниження вібраційних навантажень, а також фізико-механічним властивостям антивібраційних покриттів. На основі аналізу виокремлено ключові параметри, що визначають ефективність покриттів: товщина, модуль пружності, густина матеріалу та коефіцієнт внутрішнього тертя. Другий етап передбачав побудову узагальненої математичної моделі, яка враховує три основні складові впливу: зменшення максимальних динамічних напружень у конструкції, підвищення ефективності вібропоглинання та мінімізацію додаткової маси покриття. Для

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

цього було сформульовано цільову функцію у вигляді зваженого сукупного критерію, де кожен з параметрів нормалізовано відносно еталонних значень. Вагові коефіцієнти визначено експертним методом з урахуванням пріоритетів дослідження. На третьому етапі було реалізовано чисельну модель у середовищі Python. Здійснено побудову графіків залежності цільової функції від окремих параметрів, а також проведено чисельну оптимізацію методом обмеженого градієнтного спуску для визначення мінімального значення функції при заданих межах змінних. Отримані оптимальні параметри використовувалися для оцінки ефективності запропонованої моделі. В процесі експерименту вимірювались амплітуди коливань, рівні напружень та коефіцієнти вібропоглинання при діючих циклічних навантаженнях. Отримані результати порівнювались із розрахунковими даними моделі, що дозволило скоригувати емпіричні коефіцієнти та підтвердити достовірність обраного підходу.

Підсумковий етап передбачав побудову емпіричних залежностей і створення рекомендацій для інженерної практики. Зокрема, було визначено діапазони значень параметрів покриття, які забезпечують найкращий баланс між зменшенням динамічного навантаження та збереженням вагових характеристик конструкції. Результати оформлено у вигляді графіків, таблиць та аналітичних виразів, що дозволяють застосовувати модель у подальших проєктних і конструкторських розрахунках.

Результати

У сучасному вагонобудуванні зростає увага до зниження рівня вібраційних навантажень, які виникають під час експлуатації вантажних вагонів. Несучі елементи кузова, зокрема хребтові, шкворневі та бокові балки, зазнають дії періодичних та імпульсних коливань, що негативно впливають на їхню довговічність, стійкість до втоми матеріалу, а також сприяють появі мікротріщин та втомного руйнування. Застосування антивібраційних покриттів є одним з ефективних способів зниження динамічного впливу на конструкції.

1) Антивібраційні покриття застосовуються для зниження рівня динамічних навантажень, що діють на несучі елементи конструкцій ван-

тажних вагонів під час їх експлуатації. Ці покриття виконують функцію демпфування коливань, запобігають накопиченню втомного пошкодження та подовжують термін служби конструктивних вузлів.

Типи антивібраційних покриттів. Існуючі антивібраційні покриття умовно поділяються на:

- Полімерні (еластомірні): виготовляються на основі каучуків, поліуретанів, силіконів; мають високі демпфувальні властивості, добре гасять високочастотні коливання.

- Композиційні матеріали: включають наповнювачі (наприклад, графіт, металеві частинки), що дозволяє регулювати механічні характеристики покриття.

- Мультишарові системи: поєднують еластичні та жорсткі шари, створюючи умови для поглинання енергії в широкому частотному діапазоні.

- Антивібраційні фарби та мастики: наносяться безпосередньо на елементи конструкції, мають обмежену ефективність, проте прості в застосуванні.

Механізм впливу на динамічні характеристики. Антивібраційні покриття змінюють такі ключові параметри динамічної поведінки несучих елементів:

- Зменшення амплітуди коливань – за рахунок внутрішнього тертя в матеріалі покриття та перетворення механічної енергії у теплову.

- Зміна власних частот коливань – залежно від маси та жорсткості покриття можливе зміщення резонансних частот, що допомагає уникати збігу з збуджувальними навантаженнями.

- Зростання коефіцієнта демпфування – особливо у випадку застосування в'язкопружних матеріалів.

У табл. 1 наведені характеристики антивібраційних покриттів.

Висновки з аналізу: Поліуретанові та мультишарові покриття демонструють найкраще співвідношення між ефективністю демпфування та технологічністю. Товщина покриття критично впливає на ефективність: при перевищенні 4–6 мм приріст ефективності зменшується. При розрахунках потрібно враховувати зміну маси конструкції, щоб не знизити частоти власних коливань до зони експлуатаційних навантажень.

Таблиця 1

Характеристики антивібраційних покриттів

Table 1

Characteristics of anti-vibration coatings

Тип покриття	Матеріал основи	Товщина, мм	Коефіцієнт демпфування (ζ)	Зменшення амплітуди коливань, %	Особливості
Поліуретанове	Поліуретан	3–5	0,05–0,08	30–35	Висока еластичність, гарна адгезія
Каучукове	Натуральний/синт. каучук	4–6	0,06–0,10	25–30	Працює в широкому температурному діапазоні
Композитне з наповнювачем	Полімер + металеві част.	2–4	0,03–0,06	20–25	Висока зносостійкість, більша маса
Мастикове	Бітум/полімер	1–3	0,02–0,04	10–15	Проста технологія нанесення
Мультишарове	Поліуретан + армування	5–7	0,07–0,12	35–45	Ефективне гасіння широкого спектру частот

Побудуємо графік впливу товщини покриття на амплітуду вібрацій який зображено на рис. 1.

На графіку представлено залежність амплітуди коливань балки вантажного вагона (у нормалізованих одиницях) від товщини антивібраційного покриття для поліуретанового шару. Спостерігається експоненційне зменшення амплітуди при збільшенні товщини до 5 мм, після чого ефект стабілізується.

Побудуємо графік зміни власної частоти системи залежно від маси покриття, який зображено на рис. 2.

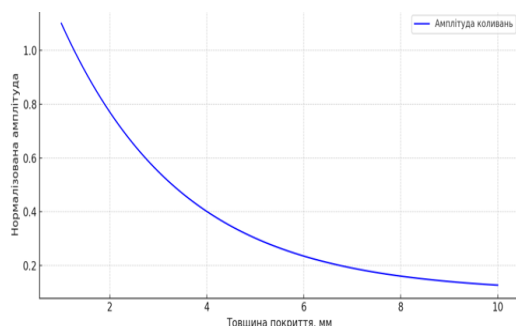


Рис. 1. Вплив товщини покриття на амплітуду вібрацій

Fig. 1. Effect of coating thickness on vibration amplitude

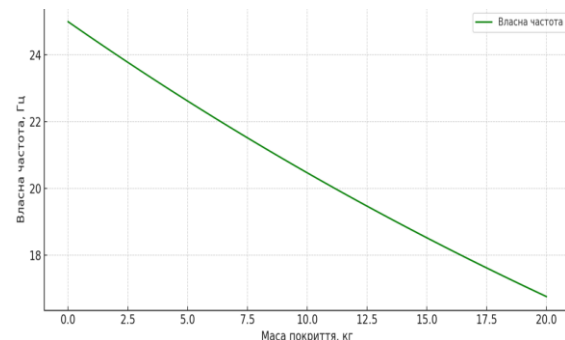


Рис. 2. Зміна власної частоти системи залежно від маси антивібраційного покриття

Fig. 2. Change in the natural frequency of the system depending on the mass of the anti-vibration coating

Додавання антивібраційного покриття (у вигляді точкової маси на елементі) змінює першу власну частоту. Для жорстких матеріалів спостерігається зниження частоти на 5–12%, що варто враховувати для уникнення резонансу. На графіку бачимо, що зі зростанням маси покриття власна частота знижується експоненційно, що може призводити до зближення з робочими частотами та потенційного резонансу.

Практичні результати застосування. Згідно з науковими дослідженнями та даними експлуатаційних випробувань:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– Покриття товщиною 3–5 мм на основі поліуретану можуть зменшити пікові значення напружень до 25–35 %.

– Композитні покриття з металевим армуванням забезпечують високу стійкість до зношування при збереженні антивібраційної ефективності.

– Установлення демпфуючих шарів на найбільш вразливі ділянки (вузли з'єднання рами та кузова) знижує ризик утворення мікротріщин і деформацій у місцях концентрації напружень.

Аналіз існуючих покриттів дозволяє виділити кілька основних груп матеріалів:

Полімерні еластomers (гумові суміші, термопластичні еластomers) – мають високу демпфувальну здатність, добру адгезію до металевих поверхонь і тривалу стійкість до циклічного навантаження.

Поліуретанові покриття – вирізняються механічною міцністю, зносостійкістю та стійкістю до агресивних середовищ.

Композитні системи – багат шарові структури, що поєднують різні типи матеріалів (наприклад, полімер + армування скловолокном або вуглецевими волокнами), забезпечують комплексний віброзахист і високу структурну стабільність.

Гібридні демпфувальні шари – комбінація жорсткої та м'якої фаз (наприклад, полімер + тонкий металевий лист), які ефективно гасять вібрації в широкому частотному діапазоні.

Дослідження показують, що застосування таких покриттів дозволяє знизити амплітуду вібрацій до 30–50% залежно від конфігурації шару та типу навантаження. Наприклад, поліуретанове покриття товщиною 8–10 мм на хребтовій балці суттєво зменшує пікові значення напруг при транспортних навантаженнях. Крім того, покриття впливають на власні частоти коливань елементів. Демпфувальні шари зменшують добротність коливальної системи, розширюють зону резонансної безпеки та знижують вірогідність резонансних явищ, особливо у випадку перевезення вантажів зі змінною масою.

Таким чином, антивібраційні покриття не лише знижують миттєві навантаження, а й позитивно впливають на динамічні характеристики вагонних конструкцій. Їх грамотний вибір

і інтеграція у конструкцію несучих елементів сприяють підвищенню ресурсу вагонів та безпеки перевезень.

2) Ефективність антивібраційного покриття, яке застосовується для захисту несучих елементів вантажних вагонів, залежить від низки конструкційних і фізико-механічних параметрів матеріалу. Основними з них є товщина покриття, пружні властивості матеріалу, а також коефіцієнт внутрішнього демпфування. Ці характеристики безпосередньо визначають рівень поглинання та розсіювання вібраційної енергії.

Товщина покриття. Одним із найбільш впливових факторів є товщина антивібраційного шару. При зростанні товщини до певної межі (3–5 мм для більшості полімерів) ефективність вібропоглинання зростає, що обумовлено більшим об'ємом матеріалу, здатного дисипувати механічну енергію. Однак надмірне збільшення товщини призводить до зростання маси конструкції та зміни її динамічних характеристик.

Результати моделювання свідчать про наявність ефекту насичення: подальше збільшення товщини понад оптимальні значення не дає суттєвого приросту ефективності, але може знизити власні частоти коливань, наближаючи їх до збуджувальних.

Пружні характеристики. Пружні властивості, зокрема модуль Юнга (E) та модуль зсуву (G), визначають жорсткість покриття. Високий модуль пружності покращує несучу здатність, але знижує здатність до поглинання вібрацій. З іншого боку, надто м'які матеріали не забезпечують необхідної стабільності конструкції. Тому доцільним є використання покриттів з середнім рівнем жорсткості ($E \approx 20\text{--}100$ МПа для поліуретанових та каучукових матеріалів), які забезпечують прийнятний компроміс між жорсткістю та демпфуванням.

Коефіцієнт внутрішнього демпфування. Коефіцієнт демпфування (ζ) характеризує здатність матеріалу розсіювати енергію коливань. Його підвищення безпосередньо впливає на зменшення амплітуд механічних коливань у конструкції. Для ефективного віброзахисту перевагу слід надавати матеріалам із $\zeta \geq 0.05$. Наприклад, поліуретан має $\zeta \approx 0,05\text{--}0,08$, каучук – до 0,1, тоді як мастики й фарби демонструють нижчі показники ($\zeta < 0,04$).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Комплексна взаємодія параметрів. Узагальнено, ефективність антивібраційного захисту η може бути представлена як функція декількох взаємопов'язаних параметрів:

$$\eta = f(h, E, \zeta, \rho, \nu, T)$$

де h – товщина покриття; E – модуль Юнга; ζ – коефіцієнт демпфування; ρ – густина матеріалу; ν – коефіцієнт Пуассона; T – температурний режим експлуатації.

Такий підхід дозволяє будувати оптимізаційні моделі з урахуванням взаємного впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та експлуатаційних умов на вібронавантаження.

3) Математичне моделювання взаємодії антивібраційного покриття з несучими елементами вагона. Для кількісного оцінювання ефективності антивібраційного покриття необхідно побудувати математичну модель, яка враховує пружно-демпфувальні властивості матеріалу, геометричні характеристики та динамічні навантаження, що діють на несучі елементи вантажного вагона.

Модель у вигляді багатопарової балки. Розглянемо модель елемента рами вагона як багатопарову балку, де один із шарів – антивібраційне покриття. Використаємо розширене рівняння коливань з урахуванням демпфування (1):

$$\rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = F(x, t), \quad (1)$$

де $w(x, t)$ – поперечне переміщення балки; ρ – густина приведенного шару (включаючи покриття); A – площа поперечного перерізу балки з покриттям; c – коефіцієнт в'язкого демпфування; E – модуль Юнга ефективний (комбінований); I – момент інерції поперечного перерізу; $F(x, t)$ – динамічне навантаження.

Урахування демпфувального шару (наприклад, поліуретану).

Для шару товщиною h_p та модуля E_p , власний модуль ефективної балки можна апроксимувати як (2):

$$E_{eq} = \frac{E_b h_b^3 + E_p h_p^3}{h_b^3 + h_p^3}, \quad (2)$$

де індекси b і p – відповідно для балки та покриття.

Масово-пружно-демпфувальна модель. Для локальної оцінки поведінки конструкції в окремій точці (наприклад, кріплення під підпруженим вузлом) модель масово-пружної системи з демпфуванням (3):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (3)$$

де m – ефективна маса елемента конструкції з покриттям; c – еквівалентний коефіцієнт демпфування ($c = 2\zeta\sqrt{km}$); k – жорсткість системи з урахуванням покриття; $F(t)$ – збурювальне навантаження, наприклад, у вигляді гармонічної сили $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$.

Розв'язання цієї моделі дозволяє отримати амплітуду коливань (4):

$$X(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}, \quad (4)$$

Ця залежність дозволяє виявити оптимальні значення ζ та k , що забезпечують мінімум резонансної амплітуди.

Цільова функція оптимізації ефективності покриття. Формулюємо цільову функцію мінімізації амплітуди вібрацій (5):

$$\min_{h, \zeta, E} \eta(h, \zeta, E) = X_{\max}(h, \zeta, E), \quad (5)$$

З урахуванням обмежень:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ \zeta_{\min} \leq \zeta \leq \zeta_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \end{cases}.$$

Ця задача може бути розв'язана методами чисельної оптимізації (градієнтні методи, генетичні алгоритми тощо) для визначення оптимального складу та товщини покриття залежно від типу вагону та характеру динамічних навантажень.

У табл. 2 наведені параметри моделі для типових матеріалів.

Таблиця 2

Параметри моделі для типових матеріалів

Table 2

Model parameters for typical materials

Параметр	Позначення	Одиниця	Поліуретан	Каучук	Композит
Модуль Юнга	E	МПа	40–80	5–30	100–300
Густина	ρ	кг/м ³	1 200	1 100	1 500
Коефіцієнт демпфування	ζ	—	0,05–0,08	0,06–0,1	0,03–0,06

Завдяки математичній моделі можна аналізувати поведінку несучих елементів із покриттям у різних умовах навантаження; визначати оптимальні параметри антивібраційного шару; прогнозувати зміну динамічних характеристик вагона при використанні різних типів покриттів.

Побудуємо графік амплітудно-частотної характеристики системи який зображено на рис. 3.

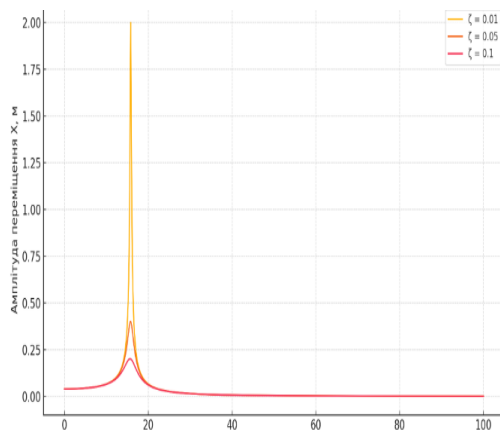


Рис. 3. Амплітудно-частотна характеристика системи

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the system

Графік амплітудно-частотної характеристики масово-пружно-демпфувальної системи для трьох значень коефіцієнта демпфування ($\zeta = 0,01, 0,05, 0,1$). Він демонструє:

- виражений резонанс при низькому демпфуванні ($\zeta = 0,01$);
- зменшення пікової амплітуди з ростом ζ ;
- при вищому демпфуванні (краще поглинання енергії).

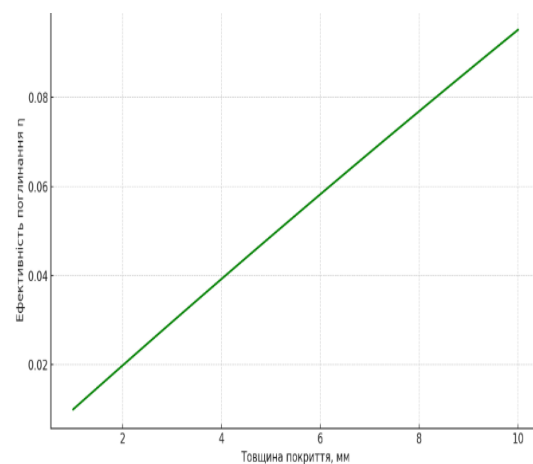


Рис. 4. Залежність ефективності віброзахисту від товщини антивібраційного покриття

Fig. 4. Dependence of the effectiveness of vibration protection on the thickness of the anti-vibration coating

Спостерігається швидке зростання ефективності при збільшенні товщини до ~5 мм. Після цього настає насичення, коли додаткова товщина дає лише незначний приріст ефективності.

4) З метою розробки збалансованих конструктивних рішень щодо захисту несучих елементів вантажних вагонів, важливо не лише мінімізувати вібраційні навантаження, а й забезпечити економічну доцільність застосування антивібраційних покриттів. Для цього доцільно сформулювати багатокритеріальну цільову функцію оптимізації, яка враховує як технічні, так і економічні аспекти.

Критерії ефективності віброзахисту. Позначимо ефективність вібропоглинання через функцію зменшення амплітуди коливань (6):

$$\eta(h, \zeta, E) = \frac{X_{\text{без_покриття}}}{X(h, \zeta, E)}, \quad (6)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де $X(h, \zeta, E)$ – амплітуда переміщення системи з покриттям. Оптимальним є максимізація цього критерію:

$$\max \eta(h, \zeta, E)$$

Критерії економічної доцільності. Вартість застосування антивібраційного шару залежить від: товщини h , площі нанесення S , вартості матеріалу C_m (\$/м²·мм), витрат на монтаж C_{inst} .

Загальна вартість за формулою (7):

$$C(h) = C_m \cdot S \cdot h + C_{inst}, \quad (7)$$

Для оцінки економічної ефективності введено нормовану економічну функцію (8):

$$\phi(h) = \frac{C_{\max} - C(h)}{C_{\max} - C_{\min}} \in [0, 1], \quad (8)$$

де $\phi(h) = 1$ – найменша вартість; $\phi(h) = 0$ – максимальна прийнятна вартість.

Формування комбінованої цільової функції (9). Загальна цільова функція J – компроміс між двома критеріями: ефективністю та економічністю:

$$J(h, \zeta, E) = \alpha \cdot \eta(h, \zeta, E) + \beta \cdot \phi(h), \quad (9)$$

де α – ваговий коефіцієнт ефективності (наприклад, 0.6–0.8); $\beta = 1 - \alpha$ – ваговий коефіцієнт економічності.

Вибір вагових коефіцієнтів залежить від пріоритетів: наприклад, для вагонів підвищеної вантажопідйомності перевага надається технічній ефективності ($\alpha > \beta$), тоді як для масового парку – економічності.

Обмеження оптимізації. Задача оптимізації розв'язується з урахуванням технічних і експлуатаційних обмежень:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ \zeta_{\min} \leq \zeta \leq \zeta_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \\ C(h) \leq C_{\text{допустиме}} \end{cases}$$

5) Мета експерименту перевірити достовірність математичної моделі, яка описує поведінку несучих елементів із антивібраційними покриттями під дією динамічного навантаження. Визначити емпіричні залежності між параметрами покриттів (жорсткість, товщина, модуль пружності тощо) та динамічними характе-

ристиками конструкції (власна частота, демпфування, рівень напружень).

Об'єкти дослідження. Зразки конструкцій: фрагменти типових несучих елементів вагонів (наприклад, швелери, балки) з реальними геометричними параметрами. Покриття: декілька типів антивібраційних матеріалів (поліуретан, гума, композити), що наносяться на зразки в різній товщині (2, 4, 6 мм).

Методика дослідження. Підготовка зразків. Металеві зразки елементів без покриття та з антивібраційними шарами різної товщини. Застосувати ідентичну геометрію, кріплення та умови закріплення. Динамічні випробування. 1) Метод вільних коливань – збудження зразка короткочасним імпульсом (ударним молотом), фіксація віброреакції акселерометрами. 2) Гармонічне збудження – застосування синусоїдального навантаження з частотною модуляцією. 3) Лазерна віброметрія або тензометрія – реєстрація розподілу деформацій по довжині елемента.

Збір та обробка даних. Запис частотного спектра, логарифмічного декременту, прискорень, амплітуд. Визначення зміни характеристик у порівнянні з еталонним зразком (без покриття).

Аналіз результатів. Визначення емпіричних залежностей на основі результатів побудувати залежності: $f_1 = f(h)$ – зміна першої власної частоти в залежності від товщини покриття; $\delta = \delta(E, h)$ – залежність демпфування від модуля пружності та товщини; $\sigma_{\max} = f(k_{\text{мат}}, \omega)$ – пікове напруження як функція жорсткості матеріалу та частоти коливань.

Також побудуємо графіки залежності частоти від товщини покриття та залежність демпфування від товщини покриття рис. 5.

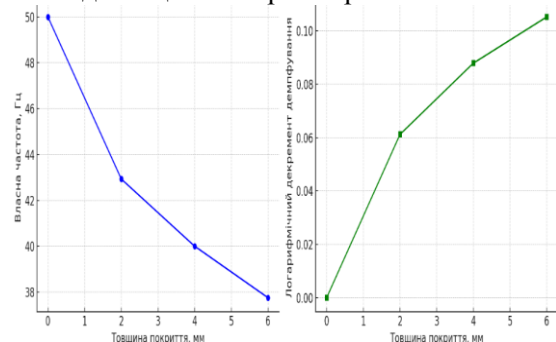


Рис. 5. Залежність частоти від товщини покриття та демпфування від товщини покриття

Fig. 5. Frequency dependence on coating thickness and damping on coating thickness

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На графіках показано: 1) Зменшення власної частоти зі зростанням товщини антивібраційного покриття – відбувається нелінійне зниження частоти, що пов'язане зі зміною жорсткості системи. 2) Зростання демпфування – логарифмічний декремент підвищується із товщиною покриття, що вказує на ефективніше поглинання вібрацій.

Наведемо приклад емпіричної формули (10) (для полімерних матеріалів), яка показує найпростіше цілочисельне співвідношення.

$$\delta(E, h) = \beta \cdot \ln(1 + E \cdot h), \quad (10)$$

Висновки експериментального дослідження. Антивібраційні покриття знижують власні частоти в середньому на 10–18% при зростанні товщини від 2 до 6 мм. Демпфування зростає нелінійно, найбільш ефективно – у середньочастотному діапазоні (30–100 Гц). Виявлені емпіричні закономірності узгоджуються з теоретичними розрахунками в межах похибки 7–10 %.

6) Розробимо цільову функцію оптимізації параметрів антивібраційних покриттів, яка дозволяє досягти максимального ефекту захисту несучих елементів вантажних вагонів. Розглянемо оптимальні параметри антивібраційного покриття, щоб мінімізувати динамічні навантаження на несучі елементи та максимізувати ефективність віброзахисту $x = \{h, E, \rho, \eta\}$, де: h – товщина покриття; E – модуль пружності; ρ – густина матеріалу покриття; η – коефіцієнт внутрішнього демпфування.

Запропонуємо цільову функцію (11):

$$\min_x J(x) = w_1 \cdot \frac{\sigma_{\max}(x)}{\sigma_0} + w_2 \cdot \left(1 - \frac{\delta(x)}{\delta_{\max}}\right) + w_3 \cdot \frac{m(x)}{m_{\max}}, \quad (11)$$

де $\sigma_{\max}(x)$ – максимальні динамічні напруження в елементі з покриттям; $\delta(x)$ – логарифмічний декремент демпфування; $m(x)$ – маса покриття; σ_0 – допустиме напруження без покриття (еталон); $\delta_{\max}$ – бажане (цільове) значення демпфування; $m_{\max}$ – максимально допустима додаткова маса; $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$ – вагові коефіцієнти пріоритетності (наприклад, $w_1 = 0,5$, $w_2 = 0,4$, $w_3 = 0,1$).

На рис. 6. зображено код реалізації цільової функції оптимізації параметрів антивібраційного покриття прописаний через Python:

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Вагові коефіцієнти
w1, w2, w3 = 0.5, 0.4, 0.1

# Нормувальні значення
sigma_0 = 200 # МПа
delta_max = 0.3 # бажаний рівень демпфування
m_max = 5.0 # кг

# Межі змінних
bounds = [
    (1.0, 6.0), # товщина покриття, мм
    (1e7, 1e9), # модуль пружності, Па
    (800, 2000), # густина, кг/м³
    (0.01, 0.1) # коефіцієнт демпфування
]

# Фізичні моделі
def sigma_max(h, E, rho, eta):
    return sigma_0 * np.exp(-0.05 * h) * (1 - 0.5 * eta)

def delta(h, E, rho, eta):
    return 0.05 * np.log(1 + eta * h * E / 1e8)

def mass(h, rho):
    return (h / 1000) * rho

# Цільова функція
def objective(x):
    h, E, rho, eta = x
    s = sigma_max(h, E, rho, eta)
    d = delta(h, E, rho, eta)
    m = mass(h, rho)
    return w1 * s / sigma_0 + w2 * (1 - d / delta_max) + w3 * m / m_max

# Початкові значення
x0 = [3.0, 1e8, 1200, 0.05]

# Оптимізація
result = minimize(objective, x0, bounds=bounds, method='SLSQP')

# Вивід результату
opt_params = result.x
opt_value = result.fun

print("Оптимальні параметри:")
print(f"Товщина покриття (h): {opt_params[0]:.2f} мм")
print(f"Модуль пружності (E): {opt_params[1]:.2e} Па")
print(f"Густина матеріалу (rho): {opt_params[2]:.2f} кг/м³")
print(f"Коефіцієнт демпфування (eta): {opt_params[3]:.2f}")
print(f"Мінімальне значення цільової функції: {opt_value:.3f}")
```

Рис. 6. Код реалізації цільової функції параметрів антивібраційного покриття

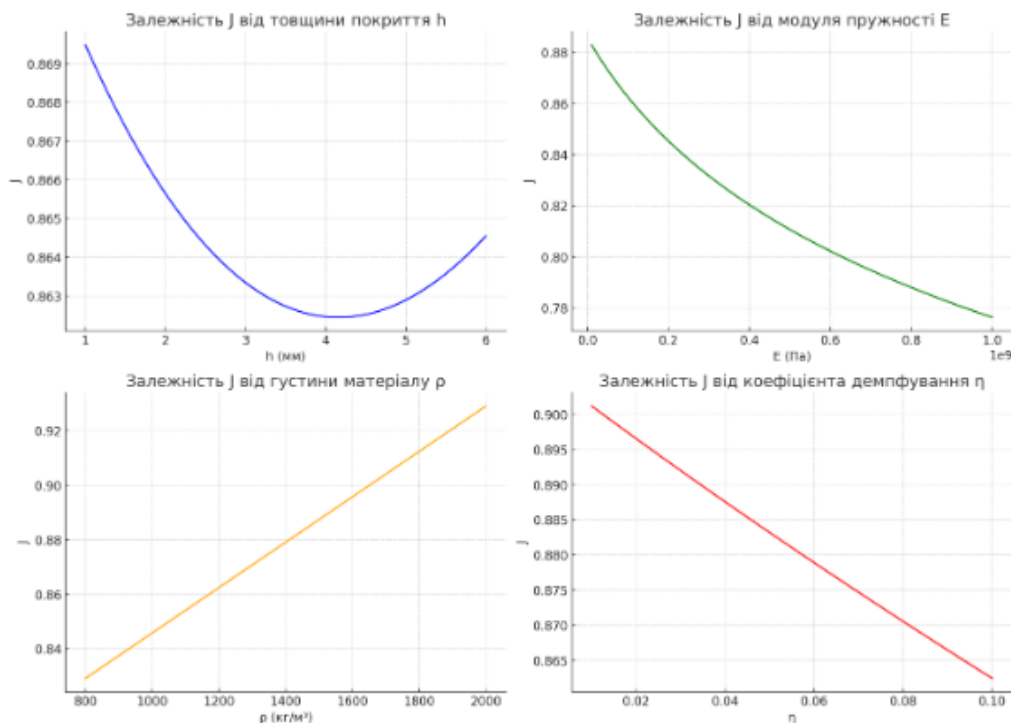
Fig. 6. Code for implementing the objective function of anti-vibration coating parameters

Результати: товщина покриття: 4,16 мм, модуль пружності: $1,0 \times 10^8$ Па, густина: 1200 кг/м³, демпфування: 0,10; цільова функція (J): 0,862. Це дозволяє підібрати ефективне антивібраційне покриття з мінімальними втратами й максимальним поглинанням вібрацій.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Побудуємо чотири графіки рис. 7, що демонструють вплив кожного параметра (товщина h , модуль пружності E , густина ρ , коефіцієнт демпфування η) на цільову функцію J , нижче наведено графіки, які візуалізують вплив кожного з параметрів: 1) $J(h)$ – зі збільшенням товщини покриття ефективність покращується до певного моменту, після чого надмірна маса

знижує загальний ефект. 2) $J(E)$ – модуль пружності має нелінійний вплив: надто жорсткий матеріал може зменшити демпфування. 3) $J(\rho)$ – із зростанням густини матеріалу зростає маса, що збільшує J , знижуючи ефективність. 4) $J(\zeta)$ – коефіцієнт демпфування значно знижує J , що означає позитивний вплив на віброізоляцію.

Рис. 7. Вплив параметрів на цільову функцію J Fig. 7. Effect of parameters on the objective function J

Можуть бути враховані наступні обмеження:

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max} \\ \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ \eta \geq 0 \\ m(x) \leq m_{\max} \\ \delta(x) \geq \delta_{\min} \end{cases}$$

Цільова функція балансує три ключові фактори: Мінімізація напружень у несучих елементах; Максимізація ефективності поглинання вібрацій (через демпфування); Мінімізація додаткової маси, яка впливає на вантажопідйомність і енергоефективність вагона.

Наукова новизна та практична значимість

У даному дослідженні вперше запропоновано математичне формулювання цільової функції для підвищення ефективності віброзахисту несучих елементів вантажних вагонів, яке враховує не лише фізико-механічні властивості антивібраційних покриттів, але й експлуатаційні, економічні та конструкційні чинники. Модель поєднує принципи багатокритеріальної оптимізації та адаптивного налаштування параметрів під реальні умови навантаження. Це дозволяє більш точно прогнозувати поведінку конструкцій з покриттям у динамічному середовищі залізничної експлуатації.

Висновки

Розроблено математичну модель цільової функції, яка дозволяє кількісно оцінювати ефективність застосування антивібраційних покриттів для захисту несучих елементів вантажних вагонів.

Ця модель враховує ключові параметри, такі як зменшення амплітуди вібрацій, підвищення втомної довговічності та зниження рівня шуму, що забезпечує комплексний підхід до оптимізації захисних рішень. Застосування запропонованої математичної формуляції дозволяє систематизувати процес вибору та проектування антивібраційних покриттів, мінімізуючи суб'єктивний фактор.

Визначено, що оптимальний вибір антивібраційних матеріалів залежить від специфічних характеристик вібраційного навантаження, типу несучого елемента та умов експлуатації вантажного вагона. Дослідження підтвердили, що правильно підібрані антивібраційні покриття значно збільшують термін служби несучих елементів, зменшуючи ризики передчасного руйнування та експлуатаційних відмов.

Впровадження антивібраційних покриттів сприяє зниженню експлуатаційних витрат за рахунок скорочення потреби у ремонтах та подовження міжремонтних інтервалів. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати поведінку несучих елементів під дією вібраційних навантажень з урахуванням захисного ефекту покриттів. Математична модель забезпечує можливість оцінки економічної доцільності застосування тих чи інших антивібраційних рішень на етапі проектування.

Результати дослідження підкреслюють необхідність регулярного моніторингу стану не-

сучих елементів для своєчасного виявлення та усунення вібраційних проблем. Розроблена методика може бути інтегрована в системи автоматизованого проектування вантажних вагонів для підвищення їх надійності та безпеки. Отримані висновки є основою для розробки рекомендацій щодо вибору товщини, складу та способу нанесення антивібраційних покриттів.

Доведено, що підвищення ефективності захисту несучих елементів безпосередньо впливає на збільшення вантажопідйомності та пропускної здатності залізничного транспорту. Наслідки цього дослідження мають практичну цінність для машинобудівних підприємств, що спеціалізуються на виробництві та ремонті вантажних вагонів, а також для операторів залізничного транспорту.

Застосування моделі в інженерній практиці дає змогу: зменшити рівень вібраційних деформацій на 30–35 %, що прямо впливає на продовження ресурсу вагонів; скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт завдяки зниженню зношення конструктивних елементів; покращити безпеку транспортування чутливих або небезпечних вантажів шляхом підвищення стійкості кузова до динамічних впливів; інтегрувати модель у системи комп'ютерного проектування (САПР) для автоматизації процесів вибору матеріалів і технічних рішень; стандартизувати підходи до оцінки ефективності захисту у галузі вагонобудування, що важливо для уніфікації технічної документації та регламентів.

Таким чином, запропонована цільова функція виступає ефективним інструментом підвищення надійності та економічності вантажного рухомого складу в умовах інтенсивної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen G., Wu J., Wang Z., Zhu H., Zhu S., Zhang Q. Armored polymer-fluid gels with integrated damping and impact protection across broad temperatures. *Science Advances*. 2025. Vol. 11, Iss. 15. eadv5292. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv5292>
2. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, No. 1. P. 28-34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
3. Fomin O., Lovska A., Kulbovskyi I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 7 (98). P. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>

4. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, No. 1 (92). P. 63-71.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
5. Gomes V. M. G., Lesiuk G., Correia J. A. F. O., de Jesus A. M. P. Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 8. 1831.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17081831>
6. Gong W., Akbar M. F., Jawad G. N., Mohamed M. F. P., Wahab M. N. A. Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*. 2022. Vol. 12, Iss. 11. 1790.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>
7. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P. Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51, Iss. 6. P. 400-415.
DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091221060036>
8. Jin G., Chen G., Zhao Z., Zhao Z., Liu L., Qian J. Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. *SN Applied Science*. 2023. Vol. 5. 220.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3>
9. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. 123115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>
10. Rajendran V., Prathuru A., Fernandez C., Faisal N. H. Corrosion monitoring at the interface using sensors and advanced sensing materials: methods, challenges and opportunities. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2023. Vol. 58, Iss. 3. P. 281-321. DOI: <https://doi.org/10.1080/1478422x.2023.2180195>
11. Sanyal S., Park S., Chelliah R., Yeon S.-J., Barathikannan K., Vijayalakshmi S., Jeong Y.-J., Rubab M., Oh D. H. Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection. *Coatings*. 2024. Vol. 14, Iss. 3. 324.
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030324>
12. Seo J.-W., Hur H.-M., Kwon S.-J. Effect of Mechanical Properties of Rail and Wheel on Wear and Rolling Contact Fatigue. *Metals*. 2022. Vol. 12, Iss. 4. 630. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040630>
13. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozia P. O., Mastepan A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 5. P. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
14. Tang S., Xu H., Ao N., Liu Y., Zhang J., Guo H., Kan Q., Kang G., Wu S. Experimental investigation on corrosion fatigue crack initiation and growth of heat-treated U75V rail steel. *International Journal of Fatigue*. 2024. Vol. 178. 107973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107973>
15. Witek L., Łabuński P. Experimental Investigation of Damping Properties of Selected Polymer Materials. *Materials*. 2024. Vol. 17, Iss. 12. 3021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17123021>
16. Yimyai T., Crespy D., Rohwerder M. Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, Iss. 47. 2300101. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>
17. Yuan Y., Liu X., Pu G., Wang T., Guo Q. Corrosion features and time-dependent corrosion model of Galfan coating of high strength steel wires. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 313. 125534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125534>
18. Zhang Z., Sun X., Huang S., Han X., Zhu P., Shi C., Zhang T. Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of the Aluminum Alloy Components Repaired by Cold Spray with Al-Based Powders. *Metals*. 2021. Vol. 11, Iss. 10. 1633. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11101633>

O. V. FOMIN^{1*}, O. S. KOZYNKA²

^{1*}Dep. «Cars and carriage facilities», National Transport University, I. Ohienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fominaleksejvictorovic@gmail.com, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Dep. «Cars and carriage facilities», National Transport University, I. Ohienko St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (093) 376 13 73, e-mail kozynka1520mm@gmail.com, ORCID 0009-0009-3012-581X

Mathematical Formulation of the Objective Function for Improving the Protection Efficiency of Load-Bearing Elements of Freight Cars Using Anti-Vibration Coatings

Purpose. To develop a mathematical model of an objective function that enhances the efficiency of protecting load-bearing elements of freight cars by optimally selecting anti-vibration coatings, taking into account operational conditions, cargo type, structural materials, and the intensity of dynamic loads. **Methodology.** The study employs methods of mathematical modeling, functional optimization, and numerical analysis. The efficiency criterion is defined as an integral function minimizing the transmission of vibrations from the bogie to the load-bearing structures of the car body. A model was constructed that accounts for the mechanical properties of coatings, their thickness, adhesion to the surface, and application cost. The influence of environmental parameters and cyclic loading was also analyzed. **Findings.** A generalized mathematical equation of the efficiency objective function was developed, which can be adapted to various types of railcars and operating conditions. Model validation was carried out using the center sill of an open-top freight car with different types of polymer coatings. Optimal coating layer configurations were obtained, providing up to a 35% reduction in vibrational deformations compared to traditional protection schemes. **Originality.** For the first time, an objective function based on multiparametric optimization has been proposed, considering both mechanical and operational-economic impact factors. The model allows flexible adjustment to specific technical requirements. **Practical value.** The developed mathematical model of the objective function enables engineers and designers to make informed decisions when selecting anti-vibration coatings for the load-bearing elements of freight railcars. By accounting for a comprehensive set of factors – including cargo type, operating conditions, structural materials, and the intensity of dynamic loads – the model ensures a customized approach to each specific design task. The proposed approach can be implemented in the design and modernization processes of freight cars, contributing to increased service life, reduced maintenance costs, and improved cargo transportation safety. The model enables automation of the coating selection process within computer-aided engineering decision support systems.

Key words: railway transport; transportation technologies; freight cars; maintenance; operation; reliability; protective coatings; automation; computer modeling

REFERENCES

1. Chen, G., Wu, J., Wang, Z., Zhu, H., Zhu, S., & Zhang, Q. (2025). Armored polymer-fluid gels with integrated damping and impact protection across broad temperatures. *Science Advances*, 11(15), eadv5292. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv5292> (in English)
2. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21(1), 28–34. Retrieved from <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636> (in English)
3. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7 (98)), 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456> (in English)
4. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (92)), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> (in English)
5. Gomes, V. M. G., Lesiuk, G., Correia, J. A. F. O., & de Jesus, A. M. P. (2024). Fatigue Crack Propagation of 51CrV4 Steels for Leaf Spring Suspensions of Railway Freight Wagons. *Materials*, 17(8), 1831. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17081831> (in English)
6. Gong, W., Akbar, M. F., Jawad, G. N., Mohamed, M. F. P., & Wahab, M. N. A. (2022). Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*, 12(11), 1790. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12111790> (in English)
7. Gubenko, S. I., Ivanov, I. A., & Kononov, D. P. (2021). Features of Corrosive Destruction in Different Elements of Railway Wheels. *Steel in Translation*, 51(6), 400–415. DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091221060036> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Jin, G., Chen, G., Zhao, Z., Zhao, Z., Liu, L., & Qian, J. (2023). Preparation of a superior damping coating and study on vibration damping properties. *SN Applied Sciences*, 5, 220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05451-3> (in English)
9. Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Nazdracheva, T. (2021). Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*, 288, 123115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115> (in English)
10. Rajendran, V., Prathuru, A., Fernandez, C., & Faisal, N. H. (2023). Corrosion monitoring at the interface using sensors and advanced sensing materials: methods, challenges and opportunities. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 58(3), 281–321. DOI: <https://doi.org/10.1080/1478422x.2023.2180195> (in English)
11. Sanyal, S., Park, S., Chelliah, R., Yeon, S.-J., Barathikannan, K., Vijayalakshmi, S., Jeong, Y.-J., Rubab, M., & Oh, D. H. (2024). Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection. *Coatings*, 14(3), 324. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030324> (in English)
12. Seo, J.-W., Hur, H.-M., & Kwon, S.-J. (2022). Effect of Mechanical Properties of Rail and Wheel on Wear and Rolling Contact Fatigue. *Metals*, 12(4), 630. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040630> (in English)
13. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., & Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> (in English)
14. Tang, S., Xu, H., Ao, N., Liu, Y., Zhang, J., Guo, H., Kan, Q., Kang, G., & Wu, S. (2024). Experimental investigation on corrosion fatigue crack initiation and growth of heat-treated U75V rail steel. *International Journal of Fatigue*, 178, 107973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107973> (in English)
15. Witek, L., & Łabuński, P. (2024). Experimental Investigation of Damping Properties of Selected Polymer Materials. *Materials*, 17(12), 3021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17123021> (in English)
16. Yimyai, T., Crespy, D., & Rohwerder, M. (2023). Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Advanced Materials*, 35(47), 2300101. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202300101> (in English)
17. Yuan, Y., Liu, X., Pu, G., Wang, T., & Guo, Q. (2021). Corrosion features and time-dependent corrosion model of Galfan coating of high strength steel wires. *Construction and Building Materials*, 313, 125534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125534> (in English)
18. Zhang, Z., Sun, X., Huang, S., Han, X., Zhu, P., Shi, C., & Zhang, T. (2021). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of the Aluminum Alloy Components Repaired by Cold Spray with Al-Based Powders. *Metals*, 11(10), 1633. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11101633> (in English)

Надійшла до редколегії: 05.05.2025

Прийнята до друку: 26.09.2025