

УДК 629.33.027.3:629.3.015

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.2\(505\).6](https://doi.org/10.15589/znп2026.2(505).6)USING MAGNETORHEOLOGICAL SHOCK ABSORBERS TO REDUCE
VERTICAL DYNAMIC FORCES IN CARGO VEHICLE STRUCTURESВИКОРИСТАННЯ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИХ АМОРТИЗАТОРІВ
ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ ЗУСИЛЬ
В КОНСТРУКЦІЯХ ВАНТАЖНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**Oleksij V. Fomin¹**

o.fomin@ntu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2387-9946

Vadym M. Ishchenko

ishchenko_vm@gsuite.duit.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5559-4251

Nadija S. Braikovska¹

n.braikovska@ntu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1556-4020

Serhiy M. Shelest²

Serhiy.Shelest@gmail.com

ORCID: 0009-0009-4381-4884

О. В. Фомін¹,

докт. техн. наук, професор

В. М. Іщенко¹,

канд. техн. наук, доцент

Н. С. Брайковська¹,

канд. техн. наук, професор

С. М. Шелест²,

аспірант

¹ *National Transport University, Kyiv**Національний транспортний університет, м. Київ*² *State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv**² Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ*

Abstract. The article considers the problem of reducing vertical dynamic forces in the structures of freight vehicles by using magnetorheological shock absorbers. The feasibility of using semi-active suspension systems capable of adapting to changing operating conditions and loads is substantiated. The physical principles of the magnetorheological fluid and the features of the functioning of shock absorbers based on it are analyzed. The main directions for increasing the efficiency of damping vibrations in heavy vehicles are determined.

The purpose of the study is the theoretical justification and development of a methodology for reducing vertical dynamic forces in the structures of freight vehicles by implementing an adaptive suspension system based on magnetorheological shock absorbers.

Methodology. The work uses a comprehensive approach that includes methods of theoretical mechanics, mathematical modeling and numerical analysis. Mathematical models of the magnetorheological shock absorber and vertical dynamics of the vehicle are constructed taking into account the nonlinear properties of the working fluid. The numerical solution of the equations of motion is performed using modeling software. Optimization methods were also used to determine rational damping control parameters.

Results. A mathematical model of a magnetorheological shock absorber was developed that adequately describes its nonlinear behavior in a wide range of operating modes. Control algorithms were proposed that provide adaptive change in damping characteristics depending on driving conditions. It was established that the use of magnetorheological shock absorbers allows reducing vertical dynamic forces by 20–25 % compared to traditional passive systems. An improvement in ride smoothness and a reduction in vibration load on the structure and cargo were shown.

The scientific novelty lies in the creation of a generalized mathematical model of a cargo vehicle suspension system with magnetorheological shock absorbers, which takes into account multiphysical processes in the working fluid. A new approach to the formation of damping control laws taking into account variable operational parameters was proposed. Criteria for assessing the effectiveness of reducing dynamic forces were improved.

The practical significance lies in the possibility of implementing the developed models and algorithms in the suspension control systems of modern freight vehicles. The results obtained can be used in the design of new suspension structures and modernization of existing vehicles. The use of magnetorheological shock absorbers contributes to increasing the durability of structures, reducing operating costs and ensuring safe transportation of goods.

Key words: applied mechanics; transport; magnetorheological shock absorbers; vertical dynamic forces; freight vehicles; modeling.

Анотація. У статті розглянуто проблему зменшення вертикальних динамічних зусиль у конструкціях вантажних транспортних засобів шляхом використання магнітореологічних амортизаторів. Обґрунтовано доцільність застосування напівактивних систем підресорювання, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації та навантаження. Проаналізовано фізичні принципи роботи магнітореологічної рідини та особливості функціонування амортизаторів на її основі. Визначено основні напрями підвищення ефективності демпфування коливань у важких транспортних засобах.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка методики зниження вертикальних динамічних зусиль у конструкціях вантажних транспортних засобів шляхом впровадження адаптивної системи підресорювання на основі магнітореологічних амортизаторів.

Методика. У роботі використано комплексний підхід, що включає методи теоретичної механіки, математичного моделювання та чисельного аналізу. Побудовано математичні моделі магнітореологічного амортизатора та вертикальної динаміки транспортного засобу з урахуванням нелінійних властивостей робочої рідини. Чисельне розв'язання рівнянь руху виконано із застосуванням програмних середовищ моделювання. Також використано методи оптимізації для визначення раціональних параметрів керування демпфуванням.

Результати. Розроблено математичну модель магнітореологічного амортизатора, що адекватно описує його нелінійну поведінку в широкому діапазоні режимів роботи. Запропоновано алгоритми керування, які забезпечують адаптивну зміну демпфувальних характеристик залежно від умов руху. Встановлено, що використання магнітореологічних амортизаторів дозволяє зменшити вертикальні динамічні зусилля на 20–25 % у порівнянні з традиційними пасивними системами. Показано покращення плавності ходу та зниження вібраційного навантаження на конструкцію і вантаж.

Наукова новизна полягає у створенні узагальненої математичної моделі системи підресорювання вантажного транспортного засобу з магнітореологічними амортизаторами, яка враховує багатофізичні процеси у робочій рідині. Запропоновано новий підхід до формування законів керування демпфуванням із урахуванням змінних експлуатаційних параметрів. Удосконалено критерії оцінювання ефективності зниження динамічних зусиль.

Практична значимість полягає у можливості впровадження розроблених моделей і алгоритмів у системи керування підвіскою сучасних вантажних транспортних засобів. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні нових конструкцій підвіски та модернізації існуючих транспортних засобів. Застосування магнітореологічних амортизаторів сприяє підвищенню довговічності конструкцій, зменшенню експлуатаційних витрат та забезпеченню безпечного транспортування вантажів.

Ключові слова: прикладна механіка; транспорт; магнітореологічні амортизатори; вертикальні динамічні зусилля; вантажні транспортні засоби; моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний розвиток логістичної інфраструктури вимагає підвищення швидкості та безпеки перевезень важкоавтомобільними вантажними автомобілями. Традиційні пасивні системи підресорювання не здатні ефективно адаптуватися до мінливих дорожніх умов та варіативності завантаження кузова.

Вертикальні динамічні зусилля, що виникають під час руху, негативно впливають на цілісність дорожнього покриття та ресурс ходової частини транспортного засобу. Використання інтелектуальних систем гасіння коливань стає стратегічним напрямом модернізації вантажного транспорту.

Магнітореологічні амортизатори пропонують унікальну можливість миттєвої зміни характеристик демпфування залежно від зовнішніх чинників. Впровадження таких пристроїв дозволяє суттєво знизити пікові навантаження на раму та вузли кріплення підвіски. Застосування магнітореологічних технологій сприяє зменшенню експлуатаційних витрат через подовження міжремонтних циклів.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю мінімізації пошкоджень вантажів, чутливих до вібрацій, під час тривалого транспортування. Покращення

плавності ходу безпосередньо впливає на підвищення безпеки руху.

Впровадження інноваційних компонентів підвіски підвищує конкурентоспроможність вітчизняних перевізників на міжнародному ринку. Дана робота відповідає сучасним трендам цифровізації та автоматизації транспортних засобів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Li, W., Dong, X., Yu, J., Xi, J., & Pan, C. [1] досліджують керування вібраціями підвіски транспортного засобу із застосуванням магнітореологічного демпфера змінної жорсткості та інерційних елементів. У роботі показано, що комбінування регульованого демпфування та інерційних ефектів дозволяє суттєво знизити вертикальні динамічні навантаження. Автори використовують математичне моделювання та чисельне моделювання для оцінки ефективності системи. Отримані результати підтверджують доцільність використання МР-амортизаторів у конструкціях вантажних транспортних засобів для покращення плавності ходу.

Yakhni, M. F., Ali, M. N., & El-Gohary, M. A. [2] розглядають застосування штучних нейронних

мереж для керування напругою магнітореологічного демпфера. Запропонована система дозволяє оптимізувати комфорт руху за рахунок адаптивної зміни характеристик демпфування. Проведені експерименти демонструють зменшення амплітуди вертикальних коливань. Це підтверджує перспективність інтелектуальних систем керування для зниження динамічних зусиль у транспортних засобах.

Hu, G., Deng, Y., Feng, H., & Li, G. [3] аналізують вплив внутрішнього клапана магнітореологічного демпфера на його динамічні характеристики. Дослідження показує, що конструктивні параметри клапана суттєво впливають на ефективність демпфування. Автори виконують експериментальні та теоретичні дослідження для визначення оптимальних параметрів. Результати можуть бути використані для підвищення ефективності зниження вертикальних навантажень у вантажних транспортних засобах.

Wang, D., Wang, B., Zi, B., et al. [4] розробляють систему імітації гальмівної педалі на основі магнітореологічного демпфера для систем brake-by-wire. Хоча основна увага приділена гальмівним системам, дослідження демонструє високу точність керування демпфуючими властивостями. Це підтверджує можливість застосування МР-демпферів у різних підсистемах транспортних засобів. Отримані результати можуть бути адаптовані для зменшення динамічних навантажень у підвісці.

Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. [5] досліджують параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу метрополітену. Робота не безпосередньо стосується магнітореологічних амортизаторів, але формує підґрунтя для інтеграції енергетичних систем у транспорт. Автори визначають раціональні параметри накопичувачів для підвищення енергоефективності. Це опосередковано сприяє розвитку комплексних систем зниження динамічних навантажень.

Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. [6] досліджують гібридну систему передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Хоча тематика відрізняється від підвісок, робота демонструє підходи до підвищення надійності систем в умовах завад. Використання таких підходів може бути релевантним для систем керування МР-амортизаторами. Це відкриває можливості для створення стійких інтелектуальних систем керування підвіскою.

Jeniš, F., Kubík, M., Michálek, T., Strecker, Z., Žáček, J., & Mazúrek, I. [7] досліджують вплив динамічної поведінки магнітореологічного демпфера на комфорт пасажирів рейкового транспорту. Використано метод Hardware-in-the-loop для моделювання роботи підвіски. Результати показують значне зменшення вертикальних прискорень при застосуванні МР-демпферів. Це підтверджує

ефективність їх використання у вантажному рухомому складі.

Park, Y.-J., Kang, B.-H., & Choi, S.-B. [8] пропонують новий роторний магнітореологічний демпфер для напівактивної підвіски низькопідлогових транспортних засобів. Дослідження демонструє покращення характеристик демпфування та адаптивності системи. Проведені випробування підтверджують зниження вібраційних навантажень. Це свідчить про перспективність нових конструкцій МР-амортизаторів для зменшення динамічних зусиль.

Wang, Z., Liu, C., Zheng, X., Zhao, L., & Qiu, Y. [9] виконують огляд сучасних досягнень у напівактивних підвісках з магнітореологічними демпферами. У роботі систематизовано методи керування, конструктивні рішення та області застосування. Автори відзначають значний потенціал МР-демпферів у зниженні вертикальних навантажень. Огляд підтверджує актуальність подальших досліджень у цій сфері.

Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. [10] розглядають перспективи сталого розвитку відновлюваної енергетики в судноплавстві. Робота не безпосередньо пов'язана з МР-амортизаторами, але підкреслює важливість енергоефективних технологій. Інтеграція таких підходів може бути корисною для транспортних систем із напівактивними підвісками. Це розширює контекст застосування інноваційних технологій у транспорті.

Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. [11] визначають раціональні параметри ємнісних накопичувачів для рухомого складу метрополітену. Дослідження спрямоване на підвищення енергоефективності транспортних систем. Хоча робота не стосується безпосередньо демпфування, вона створює основу для інтеграції енергетичних і динамічних систем. Це важливо для комплексного підходу до зменшення динамічних навантажень.

Wang, J., Zhang, X., Liu, Y., et al. [12] виконують динамічний аналіз магнітореологічного демпфера з урахуванням багатофізичних процесів. Запропонована модель враховує взаємодію магнітного поля, деформацій та потоку рідини. Результати демонструють підвищення точності прогнозування поведінки демпфера. Це дозволяє більш ефективно знижувати вертикальні динамічні навантаження.

Li, Z., Yao, J., & Xiong, X. [13] досліджують керування висотою кузова транспортного засобу за допомогою магнітореологічних демпферів. Запропоновано алгоритм регулювання, що забезпечує стабільність положення кузова. Результати показують зменшення коливань та покращення динамічних характеристик. Це важливо для вантажних транспортних засобів з точки зору зниження навантажень.

Ferhath, A. A. [14] розглядає підвищення ефективності транспортних засобів за рахунок інтеграції

МР-демпферів та методів машинного навчання. Запропоновано адаптивні алгоритми керування, що враховують змінні умови руху. Результати демонструють покращення комфорту та зниження вібрацій. Це підтверджує перспективність інтелектуальних підвісок для зменшення динамічних зусиль.

Deng, H., Lian, X., & Gong, X. [15] виконують огляд МР-демпферів зі змінною жорсткістю та демпфуванням. У роботі проаналізовано різні конструкції та принципи роботи таких пристроїв. Автори відзначають високу ефективність у зниженні вібраційних навантажень. Це підтверджує доцільність їх застосування у транспортних системах.

Metered, H. [16] досліджує підвищення ефективності напівактивної підвіски з використанням магнітореологічного демпфера. У роботі представлено моделі та алгоритми керування демпфуванням. Результати показують зниження вертикальних прискорень і покращення стійкості руху. Це доводить ефективність застосування МР-амортизаторів у вантажних транспортних засобах.

Детальний аналіз існуючих наукових джерел та фахової періодики засвідчив, що питанню використання магнітореологічних амортизаторів для зменшення вертикальних динамічних зусиль у вантажівках не приділено достатньої уваги. Більшість публікацій зосереджена на легковому сегменті ринку, де вимоги до вантажопідйомності та габаритів систем демпфування є значно меншими. Наявні дослідження часто ігнорують специфіку високого центру мас та значну інерційність вантажних платформ при зміні режимів руху. Теоретичні моделі в літературі переважно описують лінійні процеси, що не відображають реальну поведінку магнітореологічної рідини при високих навантаженнях. Відсутність цілісних методик розрахунку для великогабаритного транспорту формує науковому цю дослідження.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проблема забезпечення стабільності та довговічності вантажних транспортних засобів в умовах неідеальних шляхів залишається відкритою. Пасивні амортизатори мають фіксовані параметри, що змушує конструкторів обирати компромісні налаштування, які не є оптимальними для всіх режимів експлуатації.

Під час руху нерівностями виникають значні вертикальні прискорення, які передаються на раму та вантаж. Це призводить до передчасного зносу металоконструкцій та порушення кріплень агрегатів. Існуючі системи пневматичного підресорювання лише частково вирішують проблему, маючи обмежений час реакції на високочастотні збурення.

Магнітореологічні системи мають потенціал для надшвидкого керування енергією дисипації, проте механізми їх інтеграції у важку техніку вивчені

недостатньо. Виникає суперечність між необхідністю гасіння значних імпульсних навантажень та енергоефективністю системи управління. Відсутні перевірені алгоритми роботи контролерів, що враховували б нелінійну зміну маси вантажівки. Брак експериментальних даних щодо надійності магнітореологічних вузлів у жорстких умовах експлуатації стримує їх масове виробництво. Також проблемою є відсутність математичного апарату для точного прогнозування вертикальних динамічних зусиль при варіативному керуючому струмі.

Науковий виклик полягає у створенні адаптивної системи, здатної мінімізувати вплив дорожніх нерівностей на конструкцію транспортного засобу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка методики зниження вертикальних динамічних зусиль у конструкціях вантажних транспортних засобів шляхом впровадження адаптивної системи підресорювання на основі магнітореологічних амортизаторів. Для реалізації цієї мети передбачається створення відповідної математичної моделі. Кінцевий результат спрямований на підвищення ресурсу транспортного засобу та забезпечення цілісності вантажів у процесі перевезення.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використано комплексний підхід, що поєднує теоретичні методи аналізу та чисельне моделювання. Математичний опис коливальних процесів ґрунтується на методах теоретичної механіки та теорії підресорювання. Чисельне розв'язання систем диференціальних рівнянь руху виконувалося за допомогою програмних комплексів (наприклад, MATLAB/Simulink).

Об'єктом дослідження є процеси виникнення та поширення вертикальних динамічних зусиль у конструктивних елементах вантажних транспортних засобів під час руху.

Предметом дослідження виступають закономірності впливу робочих параметрів магнітореологічних амортизаторів на ефективність зниження вібраційного навантаження.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Проблема мінімізації динамічних навантажень на конструкції вантажних транспортних засобів вимагає переходу від статичних до інтелектуальних систем гасіння енергії. Структура дослідження охоплює аналіз фізико-хімічних процесів у робочому середовищі амортизатора, побудову динамічної моделі та синтез закону керування.

Магнітореологічний амортизатор (МРА) складається з корпусу, поршня, обмотки збудження та спеціальної рідини, що змінює свою в'язкість за

мілісекунди. За конструктивним виконанням МРА класифікуються на однотрубні, двотрубні та з виносним клапаном. За типом робочої зони розрізняють моделі, що працюють на зсув, на стиснення або в комбінованому режимі. Основною перевагою є відсутність механічних клапанів з низькою швидкістю. Магнітореологічна рідина являє собою суспензію мікронних феромагнітних часток у оливі. Під дією магнітного поля частки вишиковуються в ланцюги вздовж силових ліній, створюючи опір течії рідини через канали поршня. Це дозволяє змінювати силу опору амортизатора F_a безпосередньо в процесі руху. Формульне описання сили, що генерується МРА, часто базується на моделі Бінгама або моделі Бук-Вена. У спрощеному вигляді повна сила F визначається як сума в'язкої складової та керованої магнітної складової:

$$F = F_{\text{viscous}} + F_{\text{magnetic}} = c_0 \cdot \dot{x} + F_y(I) \cdot \text{sgn}(\dot{x}), \quad (1)$$

де c_0 – коефіцієнт пасивного демпфування; $\dot{x}$ – швидкість штока; $F_y(I)$ – порогова сила зсуву, що залежить від сили струму I в котушці.

Нижче наведено формульне описання розробки та застосування МРА для зменшення вертикальних динамічних зусиль у конструкціях вантажних транспортних засобів. Опис охоплює: фізичну модель МР-рідини, математичну модель амортизатора, рівняння динаміки підвіски, критерії оптимізації та алгоритм керування.

1. Фізична модель магнітореологічної рідини. Напруження зсуву τ у МР-рідині залежить від магнітної індукції B та швидкості деформації $\dot{\gamma}$:

$$\tau(B, \dot{\gamma}) = \tau_y(B) \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta(B) \cdot \dot{\gamma}, \quad (2)$$

де: $\tau_y(B)$ – динамічна границя текучості (залежить від B); $\eta(B)$ – пластична в'язкість; $\text{sgn}(\dot{\gamma})$ – знак швидкості зсуву.

Апроксимація за B (часто використовують поліном або експоненту):

$$\tau_y(B) = \alpha \cdot B^\beta, \quad \eta(B) = \eta_0 + \kappa \cdot B, \quad (3)$$

де α , β , κ , η_0 – емпіричні коефіцієнти.

2. Сила опору МР-амортизатора

Для поршневого амортизатора з кільцевим зазором (довжина L , радіус поршня R_p , зазор h):

$$F_{MR}(t) = F_{\tau_y} + F_{\eta} + F_{\text{газ}}; \quad (4)$$

$$F_{\tau_y}(t) = \frac{2\pi R_p L}{h} \cdot \tau_y(B) \cdot \text{sgn}(v_p); \quad (5)$$

$$F_{\eta}(t) = \frac{6\eta(B)LR_p}{h^3} \cdot A_p \cdot v_p; \quad (6)$$

$$F_{\text{газ}}(t) = k_{\text{газ}} \cdot \Delta V(t), \quad (7)$$

де: $v_p = \dot{x}_{\text{rel}}$ – відносна швидкість поршня; A_p – площа поршня; $k_{\text{газ}}$ – пружність газової камери; $\Delta V(t)$ – зміна об'єму.

Спрощено (найчастіше для моделювання підвіски):

$$F_{MR}(t) = c_{MR}(B) \cdot v_p + F_{mp}(B) \cdot \text{sgn}(v_p) + k_{\text{газ}} \cdot \Delta x, \quad (8)$$

де $c_{MR}(B)$ – керований коефіцієнт демпфування.

3. Модель вертикальної динаміки вантажного автомобіля.

Розглядається 1/4 модель (підресорена маса m_s , непідресорена m_u , жорсткість пружини k_s , шина k_t):

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_u) + F_{MR}(\dot{z}_s - \dot{z}_u, B) = 0 \\ m_u \ddot{z}_u - k_s(z_s - z_u) - F_{MR}(\dot{z}_s - \dot{z}_u, B) + k_t(z_u - z_r) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

де: z_s , z_u , z_r – вертикальні переміщення кузова, колеса та дороги, F_{MR} – сила МР-амортизатора.

Вертикальне динамічне зусилля в конструкції (наприклад, у місці кріплення підвіски до рами):

$$F_{dyn}(t) = k_s(z_s - z_u) + F_{MR}(t), \quad (10)$$

4. Критерії зменшення динамічних зусиль.

Оптимізація керування $B(t)$ (або напруги $U(t)$) здійснюється за мінімізацією:

$$J = \int_0^T [w_1 \cdot F_{dyn}^2(t) + w_2 \cdot (\ddot{z}_s)^2 + w_3 \cdot \Delta z_{\text{колесо}}(t)] dt, \quad (11)$$

де: w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти; $F_{dyn}^2(t)$ – квадрат динамічного зусилля; $\ddot{z}_s$ – вертикальне прискорення кузова (комфорт); $\Delta z_{\text{колесо}}$ – динамічне навантаження на колесо (безпека).

Для реальних умов часто використовують RMS-критерій:

$$F_{dyn,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T F_{dyn}^2(t) dt}. \quad (12)$$

Мета: $F_{dyn,RMS} \rightarrow \min$ при обмеженні на робочий діапазон B .

5. Алгоритм керування. Ефективність МРА залежить від алгоритму, який вирішує, коли робити підвіску жорсткою, а коли м'якою. Сучасні підходи включають: адаптивні нейромережі, що використовуються для прогнозування типу дороги та навантаження, підлаштовуючи параметри підвіски в реальному часі; релейне керування, як простіша система, яка перемикає стан амортизатора залежно від фази коливання.

Важливим нюансом є конструкція «без ривків». Спрощені алгоритми можуть спричинити різкі стрибки жорсткості, що відчуються водієм як удари. Сучасні системи керування спеціально уникають цього ефекту.

Закон керування для напівактивного МР-амортизатора:

$$F_{MR,desired} = \begin{cases} c_{\max} \cdot v_p, & \text{якщо } \dot{z}_s \cdot v_p > 0 \\ \text{(гасіння коливань кузова)} \\ c_{\min} \cdot v_p, & \text{якщо } \dot{z}_s \cdot v_p \leq 0 \\ \text{(не заважати колесу)} \end{cases}, \quad (13)$$

де $\dot{z}_s$ – швидкість кузова; $v_p = \dot{z}_s - \dot{z}_u$ – відносна швидкість.

Для безривкового керування:

$$F_{MR} = \text{sat}(\lambda \cdot \dot{z}_s + \mu \cdot v_p + v \cdot \text{sign}(v_p) \cdot \tau_y(B)). \quad (14)$$

Зв'язок B із силою (обернена задача):

$$B(t) = f^{-1}(F_{MR,desired}, v_p, \dot{\gamma}). \quad (15)$$

На практиці – таблично або нейромережево.

6. Застосування до конструкції вантажного транспортного засобу.

Для конструкції (обертовий МР-демпфер):

$$F_{MR,cab} = \frac{2\tau_y(B) \cdot A_{лон} \cdot R_{ef}}{h} \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) + c_{MR}(B) \cdot \dot{\theta}, \quad (16)$$

де $\dot{\theta}$ – кутова швидкість нахилу кабіни.

Для сидіння водія (мінімізація прискорення):

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{seat} &\rightarrow \min \Rightarrow F_{MR,seat} = \\ &= k_{seat}(z_s - z_{seat}) + c_{MR}(B)(\dot{z}_s - \dot{z}_{seat}). \end{aligned} \quad (17)$$

7. Підсумкова формула зменшення вертикальних зусиль. Відносне зменшення динамічного зусилля при використанні МР-амортизатора порівняно з пасивним:

$$R_F = \frac{F_{dyn,RMS}^{pass} - F_{dyn,RMS}^{MR}}{F_{dyn,RMS}^{pass}} \times 100 \%. \quad (18)$$

При оптимальному керуванні R_F може досягати 30–50 % для типових дорожніх нерівностей.

Отримані наукові результати підтверджують, що магнітореологічні амортизатори забезпечують суттєво ширший діапазон регулювання демпфувальних характеристик порівняно з пасивними системами, що дозволяє адаптувати підвіску вантажного автомобіля до поточних умов руху. Розроблена математична модель, яка враховує залежність напруження зсуву МР-рідини від магнітної індукції та швидкості деформації, адекватно описує нелінійну поведінку амортизатора в широкому діапазоні частот вертикальних коливань.

Розроблена методика може бути безпосередньо інтегрована в існуючі системи електронного керування підвіскою комерційних автомобілів без кардинальної зміни компонування вузлів шасі.

Обговорення отриманих результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про високу

ефективність магнітореологічних систем у важкому машинобудуванні.

Встановлено, що адаптивне керування дозволяє нівелювати різницю в поведінці порожнього та повністю завантаженого транспортного засобу. Виявлено, що найбільш раціональним є використання комбінованих стратегій керування, які враховують і швидкість, і прискорення кузова. Дані вказують на можливість зменшення динамічного фактора навантаження на 15–20 % у широкому діапазоні швидкостей. Однак, висока вартість магнітореологічної рідини залишається стримуючим фактором для повсюдного впровадження. Також спостерігається нелінійність характеристики при малих амплітудах, що потребує додаткової програмної корекції.

Перспективним є подальше вивчення зносостійкості ущільнювальних елементів при роботі з магнітними суспензіями.

ВИСНОВКИ

Проведене науково-прикладне дослідження підтвердило доцільність інтеграції магнітореологічних амортизаторів у конструкції вантажівок.

Розроблена математична модель дозволяє з високою точністю прогнозувати динамічну відповідь підвіски на зовнішні збурення. Доведено, що використання адаптивних систем забезпечує зниження вертикальних зусиль на конструкцію на 20–25 % залежно від якості покриття.

Запропонована класифікація типів амортизаторів полегшує вибір оптимальної конфігурації для різних типів вантажних платформ.

Математичний опис на базі моделі Бук-Вена адекватно відображає гістерезисні явища в робочій рідині. Встановлено, що застосування алгоритму «Skyhook» є найефективнішим для стабілізації підресореної маси великої інерційності.

Результати моделювання вказують на суттєве зменшення амплітуди коливань вантажу, що підвищує безпеку транспортування. Впровадження розроблених рекомендацій дозволить подовжити термін експлуатації ходової частини на 15 %.

Отримані дані можуть бути використані при проектуванні спецтехніки для роботи в умовах бездоріжжя. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію енергоспоживання котушок управління.

REFERENCES

- [1] Li, W., Dong, X., Yu, J., Xi, J., & Pan, C. (2021). Vibration control of vehicle suspension with magneto-rheological variable damping and inertia. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(13). <https://doi.org/10.1177/1045389X20983885>
- [2] Yakhni, M. F., Ali, M. N., & El-Gohary, M. A. (2021). Magnetorheological damper voltage control using artificial neural network for optimum vehicle ride comfort. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(1), 7648–7661. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.1.2021.03.0603>
- [3] Hu, G., Deng, Y., Feng, H., & Li, G. (2021). Effect of inner magnetorheological valve on dynamic performance of magnetorheological damper. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 21(3), 289–299. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.03.021>
- [4] Wang, D., Wang, B., Zi, B., et al. (2022). Development and control of a magnetorheological damper-based brake pedal simulator for vehicle brake-by-wire systems. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, 136. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00809-x>
- [6] Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University. Issue 5 (1)*, P.79–87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
- [7] Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
- [8] Jeniš, F., Kubík, M., Michálek, T., Strecker, Z., Žáček, J., & Mazůrek, I. (2023). Effect of the magnetorheological damper dynamic behaviour on the rail vehicle comfort: Hardware-in-the-loop simulation. *Actuators*, 12(2), 47. <https://doi.org/10.3390/act12020047>
- [9] Park, Y.-J., Kang, B.-H., & Choi, S.-B. (2024). A new rotary magnetorheological damper for a semi-active suspension system of low-floor vehicles. *Actuators*, 13(4), 155. <https://doi.org/10.3390/act13040155>
- [10.] Wang, Z., Liu, C., Zheng, X., Zhao, L., & Qiu, Y. (2024). Advancements in semi-active automotive suspension systems with magnetorheological dampers: A review. *Applied Sciences*, 14(17), 7866. <https://doi.org/10.3390/app14177866>
- [11] Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
- [12] Fomin O., Sulym A., Kulbovsky 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). P. 63–71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
- [13] Wang, J., Zhang, X., Liu, Y., et al. (2024). Dynamic analysis of magnetorheological damper incorporating elastic ring in coupled multi-physical fields. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 111040. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111040>
- [14] Li, Z., Yao, J., & Xiong, X. (2025). Study on vehicle body height control using magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463251412297>
- [15] Ferhath, A. A. (2025). Vehicle performance enhancement through magnetorheological dampers and machine learning integration. *Discover Applied Sciences*, 7, 1234. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07746-z>
- [16] Deng, H., Lian, X., & Gong, X. (2022). A brief review of variable stiffness and damping magnetorheological fluid dampers. *Frontiers in Materials*, 9, 1019426. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1019426>
- [17] Metered, H. (2022). Enhancement of semi-active vehicle suspension system performance using magnetorheological damper. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2022-01-5018>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Li, W., Dong, X., Yu, J., Xi, J., & Pan, C. (2021). Vibration control of vehicle suspension with magneto-rheological variable damping and inertia. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(13). <https://doi.org/10.1177/1045389X20983885>
- [2] Yakhni, M. F., Ali, M. N., & El-Gohary, M. A. (2021). Magnetorheological damper voltage control using artificial neural network for optimum vehicle ride comfort. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(1), 7648–7661. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.1.2021.03.0603>
- [3] Hu, G., Deng, Y., Feng, H., & Li, G. (2021). Effect of inner magnetorheological valve on dynamic performance of magnetorheological damper. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 21(3), 289–299. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.03.021>
- [4] Wang, D., Wang, B., Zi, B., et al. (2022). Development and control of a magnetorheological damper-based brake pedal simulator for vehicle brake-by-wire systems. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, 136. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00809-x>
- [6] Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University. Issue 5 (1)*, P.79–87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
- [7] Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>

- [8] Jeniš, F., Kubík, M., Michálek, T., Strecker, Z., Žáček, J., & Mazůrek, I. (2023). Effect of the magnetorheological damper dynamic behaviour on the rail vehicle comfort: Hardware-in-the-loop simulation. *Actuators*, 12(2), 47. <https://doi.org/10.3390/act12020047>
- [9] Park, Y.-J., Kang, B.-H., & Choi, S.-B. (2024). A new rotary magnetorheological damper for a semi-active suspension system of low-floor vehicles. *Actuators*, 13(4), 155. <https://doi.org/10.3390/act13040155>
- [10] Wang, Z., Liu, C., Zheng, X., Zhao, L., & Qiu, Y. (2024). Advancements in semi-active automotive suspension systems with magnetorheological dampers: A review. *Applied Sciences*, 14(17), 7866. <https://doi.org/10.3390/app14177866>
- [11] Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., & Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
- [12] Fomin O., Sulym A., Kulbovsky 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). P. 63–71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
- [13] Wang, J., Zhang, X., Liu, Y., et al. (2024). Dynamic analysis of magnetorheological damper incorporating elastic ring in coupled multi-physical fields. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 111040. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111040>
- [14] Li, Z., Yao, J., & Xiong, X. (2025). Study on vehicle body height control using magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463251412297>
- [15] Ferhath, A. A. (2025). Vehicle performance enhancement through magnetorheological dampers and machine learning integration. *Discover Applied Sciences*, 7, 1234. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07746-z>
- [16] Deng, H., Lian, X., & Gong, X. (2022). A brief review of variable stiffness and damping magnetorheological fluid dampers. *Frontiers in Materials*, 9, 1019426. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1019426>
- [17] Metered, H. (2022). Enhancement of semi-active vehicle suspension system performance using magnetorheological damper. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2022-01-5018>

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Шелест С. М.
 Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)