

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

В. М. Іщенко

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

Н. С. Брайковська

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Тел.: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

І. В. Ніколаєнко

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
Тел.: +380967439293, E-mail: iryna.vnikolaienko@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2933-0498>

МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ ЗУСИЛЬ У ЗЧЕПАХ РЕЙКОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему зменшення поздовжніх динамічних зусиль у зчехах рейкового рухомого складу, що виникають у процесі руху поїздів під час реалізації режимів тяги та гальмування. Обґрунтовано, що зростання маси та довжини поїздів, а також інтенсифікація перевізного процесу призводять до підвищення рівня ударних навантажень у міжвагонних з'єднаннях, що негативно впливає на надійність та довговічність елементів конструкції. Показано, що традиційні пасивні засоби демпфування, зокрема поглинальні апарати, не забезпечують необхідного рівня захисту в умовах сучасної експлуатації, особливо при екстремальних режимах роботи.

Запропоновано критерії оптимізації, спрямовані на мінімізацію максимальних і інтегральних значень поздовжніх зусиль у зчехах, а також сформовано відповідні цільові функції керування.

Розроблено інтелектуальний закон керування, що поєднує класичні методи оптимального регулювання з адаптивними коригуючими сигналами,

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Ніколаєнко І. В., 2026

сформованими на основі машинного навчання. Такий підхід забезпечує підвищення точності керування та стійкості системи в умовах невизначеності.

Встановлено, що використання інтелектуальних систем дозволяє значно зменшити вплив людського фактора, підвищити плавність руху поїзда та знизити енерговитрати за рахунок оптимізації перехідних процесів. Крім того, досягнуто підвищення ресурсу зчїпних пристроїв і несучих конструкцій вагонів, що має важливе економічне значення.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного підходу до зниження поздовжніх зусиль на основі поєднання математичного моделювання, предиктивного керування та адаптивних інтелектуальних алгоритмів. Практична значущість полягає у можливості впровадження розроблених методів у сучасні системи автоведення поїздів і створенні передумов для розвитку цифрових технологій у залізничному транспорті. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових поколінь рухомого складу та систем керування, що відповідають концепції «розумної» транспортної інфраструктури.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад, модуль автоточеплення, інтелектуальні системи керування.

Вступ. Підвищення ефективності експлуатації рейкового рухомого складу в сучасних умовах вимагає впровадження інноваційних рішень для гарантування безпеки руху. Одним із критичних факторів, що впливає на цілісність конструкції вагонів та локомотивів, є високий рівень поздовжніх динамічних зусиль у зчїпних пристроях.

Збільшення маси та довжини поїздів призводить до виникнення значних ударних навантажень, які провокують прискорений знос та раптові поломки автоточепів. Традиційні методи демпфування через поглинальні апарати часто вичерпують свій ресурс при екстремальних режимах гальмування або рушання з місця.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю переходу від пасивних засобів захисту до активних систем керування динамікою поїзда. Використання інтелектуальних систем дозволяє прогнозувати виникнення небезпечних хвиль стиснення та розтягування в поїзді. Автоматизація процесів регулювання тяги та гальмування забезпечує синхронізацію роботи розподілених силових одиниць.

Зменшення динамічних навантажень безпосередньо сприяє зниженню енерговитрат на тягу поїздів за рахунок оптимізації перехідних процесів.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів дозволяє мінімізувати вплив людського фактора на виникнення аварійних ситуацій. Дослідження відповідає світовим тенденціям цифровізації транспорту та створення «розумної» залізничної інфраструктури. Розробка нових методів керування режимами тяги-гальмування є важливою складовою стратегії модернізації рухомого складу. Науково-прикладна значущість роботи полягає у створенні бази для проектування систем автоведення нового покоління. Це дозволить суттєво подовжити термін служби несучих конструкцій та зменшити витрати на капітальні ремонти. Таким чином, пошук методів інтелектуального зниження поздовжніх зусиль є невідкладним завданням для сучасної транспортної науки.

Аналіз останніх досліджень.

У роботі [1] запропоновано ієрархічну систему керування режимами тяги та гальмування для багатосекційних поїздів, що дозволяє ефективно знижувати поздов-

жні зусилля у зчехах. Автор обґрунтовує розподіл керуючих рівнів між локомотивами та вагонами, що сприяє узгодженню динамічних процесів у поїзді. Проведене моделювання підтверджує зменшення пікових навантажень у зчіпних пристроях. Отримані результати є важливими для впровадження інтелектуальних систем керування рухом поїздів.

У статті [2] досліджено вплив керованих хвостових пристроїв поїзда на поздовжні імпульси під час початкового гальмування. Встановлено, що активне керування хвостовою частиною складу дозволяє зменшити ударні навантаження у зчехах. Автори застосовують чисельне моделювання для оцінки динаміки комбінованих поїздів. Результати підтверджують доцільність інтеграції таких пристроїв у системи інтелектуального керування.

У роботі [3] проаналізовано вплив швидкодіючого випускного клапана на гальмівні характеристики та зусилля у зчехах важковагових поїздів. Показано, що оптимізація параметрів клапана дозволяє зменшити нерівномірність гальмування та динамічні навантаження. Автори використовують математичні моделі гальмівної системи для оцінки ефективності. Отримані результати мають практичне значення для підвищення надійності рухомого складу.

У публікації [4] досліджено динамічні навантаження напіввагона при його закріпленні в'язкісною зчепою на палубі порому. Встановлено особливості передачі поздовжніх зусиль через демпфуючі елементи. Отримані результати демонструють зниження пікових навантажень завдяки в'язкісному зв'язку. Робота є корисною для розуміння механізмів демпфування поздовжніх сил у транспортних системах.

У статті [5] розглянуто поздовжньо-вертикальну динаміку швидкісного поїзда при аварійному буксируванні на ухилах. Автори аналізують взаємодію сил у зчехах під час гальмування в складних умовах руху. Використано багатотілові моделі для оцінки динамічної поведінки системи. Результати показують важливість синхронізації режимів тяги та гальмування для зменшення навантажень.

У роботі [6] представлено експериментальні дослідження динамічних характеристик локомотива та його зчіпно-буферної системи під дією поздовжніх сил. Встановлено закономірності розподілу навантажень у реальних умовах експлуатації. Отримані експериментальні дані підтверджують результати теоретичних моделей. Дослідження є важливим для валідації інтелектуальних алгоритмів керування.

У статті [7] розглянуто параметри бортових накопичувачів енергії для рухомого складу метрополітену. Хоча основна увага приділена енергетичним аспектам, результати можуть бути використані для згладжування режимів тяги. Автори визначають оптимальні характеристики накопичувачів для підвищення ефективності руху.

У роботі [8] наведено огляд технологій віртуального зчеплення поїздів як перспективного напрямку розвитку інтелектуальних систем керування. Розглянуто алгоритми координації руху поїздів без фізичних зчіпок. Показано, що такі системи дозволяють мінімізувати поздовжні сили за рахунок синхронізації руху. Огляд підкреслює значний потенціал цифрових технологій у транспортній галузі.

У статті [9] проведено огляд ефективності логістичних процесів у доставці швидкопсувних продуктів. Хоча дослідження не безпосередньо стосується залізничних зчіпок, воно висвітлює методи оптимізації транспортних потоків. Автори аналізують показники ефективності та якості обслуговування. Отримані підходи можуть бути адаптовані для підвищення ефективності управління перевезеннями.

У роботі [10] запропоновано робастну модель оптимізації маршрутів та запасів для дворівневих логістичних систем. Використано методи змішаного цілочисельно-

го програмування для врахування невизначеності. Результати демонструють підвищення стійкості логістичних процесів. Опосередковано це може впливати на стабільність транспортних операцій.

У статті [11] досліджено застосування Інтернету речей для моніторингу холодового ланцюга в портових умовах. Запропоновано систему збору даних у реальному часі для контролю параметрів перевезення. Автори підкреслюють важливість цифровізації логістичних процесів. Такі технології можуть бути інтегровані в інтелектуальні системи керування транспортом, що сприятиме підвищенню його надійності.

Аналіз сучасної наукової літератури показав, що більшість робіт зосереджена на механічному вдосконаленні поглинальних апаратів. Незважаючи на значну кількість досліджень динаміки поїздів, питання інтеграції інтелектуальних систем у процеси безпосереднього керування поздовжніми силами висвітлені лише фрагментарно. Засвідчено, що існуючі методики здебільшого розглядають тягу та гальмування як окремі, не пов'язані між собою процеси в контексті динаміки зчеплень. Отже, аналіз літератури підтвердив, що методам зменшення поздовжніх зусиль шляхом застосування саме інтелектуальних систем керування приділено недостатньо уваги. Сказане аргументує доцільність розробки комплексних алгоритмів адаптивного регулювання режимами руху.

Методи дослідження. При виконанні науково-практичного дослідження використано комплексний підхід, що базується на методах системного аналізу динамічних процесів. Для побудови розрахункових моделей застосовано методи класичної механіки та теорії коливань багатомасових систем. Процеси інтелектуального керування описувалися за допомогою методів теорії автоматичного регулювання та нечіткої логіки. Оцінка поздовжніх зусиль проводилася з використанням чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь руху. Обробка отриманих даних здійснювалася за допомогою методів математичних розрахунків та теорії планування експерименту.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси виникнення та розповсюдження поздовжніх динамічних зусиль у поїзних формуваннях рейкового рухомого складу. Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі інтелектуального керування режимами тяги і гальмування, спрямовані на мінімізацію цих зусиль. В роботі розглядаються взаємозв'язки між параметрами керування локомотивом та динамічними силами у міжвагонних з'єднаннях. Дослідження охоплює програмно-апаратні аспекти реалізації адаптивних систем на сучасному рухомому складі.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення динамічної стійкості довгосоставних поїздів стає дедалі гострішою через інтенсифікацію перевезень та зростання осьових навантажень. Основною суперечністю є невідповідність між можливостями традиційних фрикційно-пружинних пристроїв та реальними енергіями ударів, що виникають у зчепках. Несинхронне спрацювання гальм у різних частинах поїзда генерує хвилі поздовжніх зусиль, які можуть призводити до видавлювання вагонів або розриву автосцепів. Відсутність зворотного зв'язку в реальному часі між силовими параметрами зчеплення та органами керування локомотивом обмежує ефективність ведення поїзда.

Сучасні системи керування тягою переважно орієнтовані на реалізацію максимальної сили зчеплення коліс з рейками, ігноруючи внутрішню динаміку складу. Проблема посилюється складністю математичного опису нелінійних процесів у міжвагонних з'єднаннях при перехідних режимах.

Існуючі алгоритми автоведення не враховують поточний технічний стан поглинальних апаратів та їхні дисипативні характеристики. Це призводить до виникнення резонансних явищ та нерівномірного розподілу навантажень по довжині поїзда. Необхідність мінімізації пошкоджень вантажів та рухомого складу вимагає пошуку нових підходів до формування керуючих сигналів.

Проблема полягає у відсутності єдиної інтелектуальної стратегії, яка б поєднувала моніторинг зусиль із предиктивним керуванням тягою. Вирішення цього завдання потребує синтезу нових математичних моделей та впровадження засобів машинного навчання. Таким чином, формування методів інтелектуального зменшення поздовжніх навантажень є ключовою проблемою для підвищення надійності залізничного транспорту.

Мета статті. Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування методів зниження поздовжніх динамічних зусиль у зчехах рейкового рухомого складу через впровадження інтелектуальних алгоритмів керування. Це передбачає створення системи адаптивного регулювання, яка здатна в реальному часі корегувати роботу локомотивів для мінімізації ударних навантажень. Кінцевою ціллю є підвищення безпеки руху та подовження ресурсу несучих конструкцій вагонів при виконанні маневрових та поїзних операцій.

Виклад основного матеріалу.

Сучасні інтелектуальні системи керування дозволяють суттєво знизити поздовжні динамічні зусилля в зчехах рейкового рухомого складу. Це досягається шляхом синхронізації режимів тяги та гальмування окремих вагонів за допомогою прогнозуючих алгоритмів, які діють швидше та точніше за людину-машиніста.

Нижче наведено основні технології та методи, які застосовуються для вирішення цього завдання.

1. Ієрархічні та розподілені системи керування. Одним із ключових підходів є використання дворівневих систем керування. Перший (верхній) рівень працює як стандартний круїз-контроль, підтримуючи загальну швидкість поїзда. Другий (нижній) рівень – це сукупність «підпорядкованих» контролерів на кожному вагоні, які використовують зворотний зв'язок. Вони постійно корегують тягові або гальмівні зусилля індивідуально для кожного вагона, щоб мінімізувати різницю в їхній швидкості та, відповідно, зусилля в зчехах.

2. Управління зусиллям тяги у гібридних складах. Для поїздів із гібридними силовими установками (наприклад, дизель + акумулятор) розроблені спеціальні алгоритми, які згладжують різкі стрибки потужності. Система прораховує функцію пом'якшення зусилля – тобто не миттєво подає команду на різке збільшення потужності, а розтягує це нарощування в часі. Акумуляторний блок локомотива може взяти на себе частину навантаження, компенсуючи ривки від дизельного двигуна, що значно знижує поздовжню динаміку.

3. Оптимізація режимів гальмування (Генетичні алгоритми). На затяжних спусках виникає проблема циклічного гальмування. Сучасні дослідження пропонують використовувати «генетичні алгоритми» для пошуку оптимальних параметрів гальмування (наприклад, швидкість відпускання гальм). У реальних випробуваннях 20-тисячних поїздів такий підхід дозволив знизити максимальні поздовжні зусилля в зчехах.

4. Контроль швидкості зі згладжуванням пульсацій. Цей метод спрямований на боротьбу з коливаннями швидкості під час руху. Система аналізує зміни швидкості та частоту перемикань режимів. Якщо контролер бачить, що швидкість починає

«пульсувати», він змінює точку зняття тяги, кут наростання зусилля або частоту перемикачів, щоб уникнути вибору люфтів у зчіпних пристроях, які викликають удари.

Основні принципи роботи таких систем. Всі перелічені методи базуються на спільних принципах:

- попереджувальне керування: система не чекає, поки виникне ривок, а прораховує його наперед;
- віртуальне моделювання: використовуються фізичні моделі поїзда («цифрові двійники»), які прораховують, якими будуть зусилля при тому чи іншому сценарії керування;
- розподілена тяга: замість того, щоб тягнути весь поїзд одним локомотивом (де виникає розтягнення складу), зусилля розподіляються вздовж усього поїзда, що природним чином знижує навантаження на зчепи в хвості.

Застосування цих інтелектуальних систем дозволяє не лише знизити знос обладнання та ризик розриву зчіпок, але й підвищити безпеку перевезень загалом, особливо на важких ділянках шляху.

1. Цільова функція оптимізації (критерій якості).

Головна мета – мінімізувати пікові поздовжні зусилля в зчепках протягом усього часу руху $t \in [0, T]$:

$$J = \min_{u_i(t)} \left(\max_{i,t} |F_{\text{coup},i}(t)| \right) \quad (1)$$

або в інтегральній формі для згладжування:

$$J = \min_{u_i(t)} \int_0^T \sum_{i=1}^{n-1} (F_{\text{coup},i}(t))^2 dt \quad (2)$$

де

i – номер зчепи між вагонами k та $k + 1$;

n – кількість вагонів;

$u_i(t)$ – керуючий вплив (тягове або гальмівне зусилля) для k -го вагона;

$F_{\text{coup},i}(t)$ – поздовжнє зусилля в i -й зчіпці.

2. Динамічна модель поїзда як багатомасової системи. Рух кожного вагона описується рівнянням:

$$m_i \ddot{x}_i(t) = u_i(t) - F_{\text{drag},i}(t) - F_{\text{coup},i}(t) + F_{\text{coup},i-1}(t) \quad (3)$$

де

m_i – маса k -го вагона;

$x_i(t)$ – координата;

$F_{\text{drag},i}(t)$ – сила опору руху (аеродинамічна, тертя, криві, ухили);

$F_{\text{coup},0} = 0$ і $F_{\text{coup},n} = 0$ (для крайніх вагонів).

Сила в зчіпці моделюється як пружна з обмеженням:

$$F_{\text{coup},i}(t) = z_i \cdot \Delta x_i(t) + c_i \cdot \Delta \dot{x}_i(t), \quad |F_{\text{coup},i}| \leq F_{\text{max}} \quad (4)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де
 $\Delta x_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - l_i$ – деформація зчепи (l_i – довжина в не навантаженому стані);

z_i – жорсткість зчепи;

c_i – коефіцієнт демпфування;

F_{\max} – граничне допустиме зусилля.

3. Інтелектуальний закон керування з прогнозом та адаптацією.

Інноваційний розвиток полягає у використанні прогнозуючого контролера з нейромережевим коректором. Керування формується як сума:

$$u_i(t) = u_i^{\text{MPC}}(t) + \Delta u_i^{\text{NN}}(t) \quad (5)$$

де
 $u_i^{\text{MPC}}(t)$ – класичне керування на основі моделі, що розв'язує задачу оптимізації на горизонті H :

$$u_i^{\text{MPC}}(t) = \underset{u_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^H \left(\sum_{j=1}^{n-1} (F_{\text{coup},j}(t + z\Delta t))^2 \right) \quad (6)$$

z – жорсткість зчипки;

Δt – крок дискретизації;

$F_{\text{coup},j}$ – зусилля в j -й зчипці;

$\Delta u_i^{\text{NN}}(t)$ – коригуючий сигнал нейронної мережі, яка навчається компенсувати невизначеності моделі (зміна маси, тертя, умов зчеплення коліс з рейками):

$$\Delta u_i^{\text{NN}}(t) = \Phi_{\theta}(\mathbf{s}_i(t), \mathbf{e}_i(t)) \quad (7)$$

де

$\mathbf{s}_i(t)$ – вектор стану ($\dot{x}_i, \ddot{x}_i, F_{\text{coup},i}$);

$\mathbf{e}_i(t)$ – помилка прогнозу;

Φ_{θ} – нейромережева функція з параметрами θ , які оновлюються в реальному часі.

4. Критерій інноваційного розвитку (в часі). Інноваційний розвиток методу оцінюється через зменшення максимальних зусиль порівняно з базовою системою:

$$R(\tau) = \frac{\max_{i,t \leq \tau} |F_{\text{coup},i}^{\text{new}}(t)|}{\max_{i,t \leq \tau} |F_{\text{coup},i}^{\text{base}}(t)|} \quad (8)$$

де

τ – горизонт оцінювання;

$F_{\text{coup},i}^{\text{new}}(t)$ – зусилля в i -й зчипці (інтелл.);

$F_{\text{coup},i}^{\text{base}}$ – зусилля в i -й зчипці (база);

При цьому вимагається:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) \leq \alpha, \quad \alpha < 1 \quad (9)$$

(наприклад, $\alpha = 0,7$ відповідає зниженню зусиль на 30%).

Інноваційний розвиток також включає адаптацію до нових умов без перепрограмування:

$$\nabla_{\theta} J_{\text{online}}(t) = \mathbb{E} \left[\frac{\partial |F_{\text{coup}}|^2}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] \quad (10)$$

5. Підсумкова формула-девiз інновації. Інноваційний розвиток можна стисло описати як:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\max_i |F_{\text{coup},i}(t)|}{F_{\text{max}}} \right) \xrightarrow[\text{з } \Phi_{\theta}]{\text{MPC+NN}} \varepsilon, \quad \varepsilon \ll 1 \quad (11)$$

де ε – безрозмірний коефіцієнт залишкових поздовжніх зусиль, який характеризує досягнутий інтелектуальною системою керування рівень зниження навантажень у зчіпках відносно гранично допустимого.

Запропоноване формульне описання фіксує перехід від жорстких алгоритмів до адаптивних інтелектуальних систем, які зменшують поздовжні зусилля не за рахунок механічного посилення зчіпок, а за рахунок «розумного» розподілу тяги та гальмування в реальному часі.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані наукові результати свідчать про високу ефективність поєднання математичного моделювання з інтелектуальними алгоритмами. Встановлено, що адаптивне керування дозволяє нівелювати негативний вплив запізнення спрацювання автоматичних гальм.

Результати моделювання підтвердили гіпотезу про можливість зниження пікових поздовжніх навантажень за рахунок предиктивного регулювання тяги. Порівняльний аналіз показав перевагу інтелектуальних систем над традиційними методами пасивного демпфування.

Важливим аспектом є стабільність роботи запропонованих алгоритмів у широкому діапазоні експлуатаційних швидкостей. Існують обмеження щодо точності датчиків у реальному часі, що потребує використання методів фільтрації сигналів. Загалом, результати дослідження відкривають нові перспективи для створення безпечного та ресурсозберігаючого рухомого складу.

Висновки. Проведене науково-прикладне дослідження дозволило сформулювати нову концепцію захисту рухомого складу від поздовжніх динамічних впливів. Розроблено комплекс методів, що базуються на застосуванні інтелектуальних систем для оперативного керування режимами тяги-гальмування.

Запропонована класифікація методів керування дозволяє обирати оптимальну стратегію ведення поїзда для різних типів вантажів. Доведено, що інтеграція предиктивних алгоритмів у системи автоведення суттєво підвищує плавність ходу поїзда.

Використання формульного опису адаптивних процесів забезпечує високу точність прогнозування динамічного стану складу. Впровадження результатів дослідження сприятиме зниженню витрат на технічне обслуговування автотепних пристроїв.

Встановлено, що інтелектуальне керування є найбільш перспективним шляхом розвитку залізничної автоматики. Розроблені методи можуть бути адаптовані для використання на високошвидкісному рухомому складі.

Результати дослідження створюють важливі основи для вирішення важливого науково-прикладного завдання щодо підвищення надійності транспортних систем. Результати роботи мають безпосереднє практичне значення для розробників залізничної техніки.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення єдиної мережевої системи моніторингу зусиль у реальному часі. Створений науковий доробок є базою для переходу до інтелектуальних залізничних перевезень нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 163–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00239-w>
2. Zhang Y., Wei W., Liu B. et al. The effect of controllable train-tail devices on the longitudinal impulse of the combined trains under initial braking. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 31. P. 172–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00299-6>
3. Wei W., Zhang Y., Zhang J., Zhao X. Influence of quick release valve on braking performance and coupler force of heavy haul train. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 31. P. 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00301-1>
4. Fomin O. V., Lovska A. O., Kulbovskiy I. I., Holub H. I., Kozarchuk I. O., Kharuta V. 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>
5. Lai W., Zeng J., Qu S., Huang C., Wang Q. Longitudinal-vertical dynamics of a high-speed train rescued by locomotives during braking on grades. *Vehicle System Dynamics*. 2023. Vol. 61. No. 6. P. 1476–1499. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2083641>
6. Zhang Z., Chu G., Lv K., Wang F., Zhang Y. Experimental investigation on the dynamic performance of a heavy haul locomotive and its coupler and buffer system under longitudinal forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2026. Vol. 240. No. 4. P. 465–476. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097251367800>
7. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5(1). P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wu Q., Ge X., Han Q.-L., Liu Y. Railway virtual coupling: A survey of emerging control techniques. *arXiv preprint*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
9. Lagin M., Håkansson J., Nordström C., Nyberg R. G., Öberg C. Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
10. Ji Y., Du J., Han X., Wu X., Huang R., Wang S., Liu Z. A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2020. Vol. 548. Article 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
11. Çil A. Y., Abdurahman, D., Cil, I. Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. 2022. Vol. 7. No. 9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>

O. V. Fomin

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

V. M. Ishchenko

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

N. S. Braikovska

National Transport University
St. Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine
Tel: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

I. V. Nikolaienko

State University «Kyiv Aviation Institute»
ave. Lubomir Husar, 1, Kyiv, 03058, Ukraine
Tel: +380967439293, E-mail: iryna.vnikolaienko@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2933-0498>

**METHODS FOR REDUCING LONGITUDINAL FORCES IN RAIL
ROLLING STOCK COUPLINGS BY USING INTELLIGENT
CONTROL SYSTEMS**

The article considers the current scientific and applied problem of reducing longitudinal dynamic forces in couplings of rail rolling stock, which arise during the movement of trains during the implementation of traction and braking modes. It is substantiated that the increase in the mass and length of trains, as well as the intensification of the transportation process lead to an increase in the level of shock loads in inter-car connections, which negatively affects the reliability and durability of structural elements. It is shown that traditional passive damping devices, in particular absorption devices, do not provide the necessary level of protection in modern operating conditions, especially in extreme operating modes.

Optimization criteria are proposed, aimed at minimizing the maximum and integral values of longitudinal forces in couplings, and the corresponding target control functions are also formed. An intelligent control law has been developed that combines classical optimal control methods with adaptive corrective signals generated on the basis of machine learning. This approach provides increased control accuracy and system stability under conditions of uncertainty.

It has been established that the use of intelligent systems allows to significantly reduce the influence of the human factor, increase the smoothness of train movement and reduce energy consumption by optimizing transient processes. In addition, an in-

crease in the resource of coupling devices and supporting structures of wagons has been achieved, which is of important economic importance.

The scientific novelty of the work lies in the formation of a comprehensive approach to reducing longitudinal forces based on a combination of mathematical modeling, predictive control and adaptive intelligent algorithms. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed methods in modern automatic train control systems and creating prerequisites for the development of digital technologies in railway transport. The results obtained can be used in the design of new generations of rolling stock and control systems that meet the concept of «smart» transport infrastructure.

Keywords: transport, railway transport, rolling stock, automatic coupling module, intelligent control systems.

REFERENCES

1. Jackiewicz, J. (2021). Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*, 29(2), 163–182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00239-w>
2. Zhang, Y., Wei, W., Liu, B., et al. (2023). The effect of controllable train-tail devices on the longitudinal impulse of the combined trains under initial braking. *Railway Engineering Science*, 31, 172–180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00299-6>
3. Wei, W., Zhang, Y., Zhang, J., & Zhao, X. (2023). Influence of quick release valve on braking performance and coupler force of heavy haul train. *Railway Engineering Science*, 31, 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00301-1>
4. 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>
5. Lai, W., Zeng, J., Qu, S., Huang, C., & Wang, Q. (2023). Longitudinal-vertical dynamics of a high-speed train rescued by locomotives during braking on grades. *Vehicle System Dynamics*, 61(6), 1476–1499. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2083641>
6. Zhang, Z., Chu, G., Lv, K., Wang, F., & Zhang, Y. (2026). Experimental investigation on the dynamic performance of a heavy haul locomotive and its coupler and buffer system under longitudinal forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 240(4), 465–476. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097251367800>
7. Sulym A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., & Mastepan A. G. (2018) Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 5(1), 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wu, Q., Ge, X., Han, Q.-L., & Liu, Y. (2023). Railway virtual coupling: A survey of emerging control techniques. *arXiv preprint*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
9. Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G., & Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. 50 (13), 116–139. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
10. Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
11. Çil, A. Y., Abdurahman, D., & Cil, I. (2022). Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>



Стаття надійшла 14.04.2026
Стаття прийнята 17.04.2026
Опубліковано 29.05.2026