

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.4.018

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344983

**ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УНІВЕРСАЛЬНОГО
ВАНТАЖНОГО ВАГОНА МОБІЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ**

- Фомін О.В.** *д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>, e-mail: fomin1985@ukr.net;*
- Прокопенко П.М.** *PhD (Залізничний транспорт), начальник управління інжинірингу, філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-6590>, e-mail: prokopenko1520mm@gmail.com;*
- Климаш А.О.** *канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>, e-mail: klimash@snu.edu.ua;*
- Кузьменко С.В.** *канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-9864>, e-mail: kuzmenko@snu.edu.ua*

Дане дослідження спрямоване на розвиток підходів та інструментів для експериментального аналізу показників міцності та якості руху нових вантажних вагонів з метою допуску їх до експлуатації на коліях загального користування. Це передбачає оновлення теоретичних принципів, методів тестування та обладнання, зокрема заміну вагонів-лабораторій на мобільні цифрові вимірювальні системи. Також в роботі запропоновано оцінку показників якості руху (коефіцієнт запасу стійкості, коефіцієнти вертикальної динаміки) за допомогою вимірювання напружень в диску колеса колісної пари вантажного вагона. У роботі використано методику вимірювання сил між колесом та рейкою шляхом фіксації деформацій у ключових зонах з метою подальшої оцінки показників якості руху вагона в умовах експлуатації. Паралельно обґрунтовано необхідність модернізації програмних та методичних рішень для оцінки динамічних характеристик нового та модернізованого рухомого складу, який зараз будується Українськими вагонобудівними заводами. Обґрунтовано доцільність заміни вагонів-лабораторій на компактні мобільні комплекси, що підвищить оперативність та достовірність випробувань. Встановлено зони впливу вертикальних та бічних навантажень на напруження в диску колеса вантажного вагона. Запропонована оптимізована схема розміщення тензодатчиків для точного визначення сил колеса-рейки. В роботі сформульовані універсальні технічні вимоги до мобільних вимірювальних систем, призначених для експлуатаційного контролю якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації та під час виконання робіт з допуску нових вагонів на колії загального користування. Запропонована система успішно випробувана в реальних умовах експлуатації вантажного вагона. Отримані результати дозволяють чітко визначити технічні параметри для створення мобільних діагностичних комплексів. Ці дані мають вагоме значення при проектуванні систем моніторингу для залізничного транспорту, орієнтованих на оцінку безпеки шляхом постійного контролю стану конструкцій та динаміки руху. Їх реалізація безпосередньо сприятиме зниженню ризику аварій на залізницях.

Ключові слова: випробування, вантажний вагон, міцність, безпека руху, мобільна система, залізничний транспорт.

Постановка проблеми

Концепція безпеки руху на залізничному транспорті базується на комплексі організаційних та технічних дій. Їхня основна мета – запобігання аваріям та підтримка належного стану всіх елементів інфраструктури, включаючи колію, рухомий склад, спеціалізоване обладнання та механізми. Експлуатація складних технічних систем, зокрема рухомого складу, нерідко супроводжується відмовами. До ключових причин таких відмов належать: порушення технології виробництва окремих вузлів або систем; вплив екстремальних робочих умов; некоректне використання систем з

порушенням регламентованих вимог; природні процеси старіння та зношування компонентів.

Прогрес у сфері вимірювальних технологій та інформаційних систем відкриває нові перспективи. Це стосується реалізації сучасних інструментально-програмних комплексів, спрямованих на об'єктивну оцінку рівня безпеки та якості руху поїздів та розроблення превентивних заходів для мінімізації ризику аварійних ситуацій.

У зв'язку з вищезазначеним, вдосконалення методології, інструментарію та програмного забезпечення для експериментального визначення ключових показників безпеки та якості руху вантажних вагонів

набуває критичної актуальності. Це є пріоритетним напрямком для підвищення надійності залізничних перевезень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження [1] присвячено методиці визначення сил колесо-рейка для пасажирських вагонів шляхом реєстрації деформацій коліс у контрольних точках. Автори не розглядають застосування цього підходу до вантажних вагонів.

У роботі [2] аналізуються сучасні вимірювальні комплекси для оцінки динаміки рухомого складу на основі рамних сил. Робота не охоплює паралельний моніторинг показників у різних зонах вагона.

Праця [3] досліджує критерії взаємодії пантографа з контактною мережею, аналіз причин порушень струмознімання та розроблено експериментальний комплекс для оцінки параметрів струмоприймачів. Питання вимірювання інших параметрів безпеки (наприклад, запасу стійкості) не висвітлено.

В роботі [4] автори аналізують динаміку системи колесо-рейка та знос коліс вантажних вагонів і вагонів метро. Вплив зносу на безпеку руху не досліджувався.

В [5] запропоновано інноваційний метод діагностики (Hunting Coefficient), заснований на аналізі поперечних коливань колісних пар. Можливість використання методу при прийманні нової техніки не описана.

У статті [6] розроблено алгоритм зворотного визначення сил взаємодії (коефіцієнт сходу) з використанням сліпого розділення сигналів (BSS) та аналізу незалежних компонент (ICA). Валідація на моделі колеса MCE підтвердила точність (<5%) для вантажних вагонів.

У праці [7] виконано моделювання динаміки вагона з візком Y25 (порожнього/завантаженого) у кривих різних радіусів на різних швидкостях. Параметри взаємодії колеса з рейкою не оцінювалися.

Авторами у роботі [8] порівняно динамічні характеристики трьох типів вантажних візків на прямій ділянці (40-120 км/год). Відчутних відмінностей не виявлено. Запропоновано оптимізацію підвіски для покращення динаміки. Методика порівняння не наведена.

В праці [9] описано систему реального часу для моніторингу швидкості, ваги, осей поїзда та розрахунку статичного навантаження на вісь з використанням оптичних датчиків.

В [10] досліджено застосування сендвіч-панелей у кузовах для зниження навантажень. Напруження нижчі на 3.5% від традиційних конструкцій. Вплив на динамічні показники не аналізувався.

В роботі [11] запропоновано модифікацію вагона-хопера (поділ кузова на секції) для мультивантажних перевезень. Міцність підтверджена методом кінцевих елементів. Динамічні характеристики модифікованої конструкції не досліджені.

У статті [12] досліджено вплив бокового зміщення візків напіввагона на динаміку та взаємодію з

колесом. Встановлено залежності від кута повороту кузова, швидкості руху та кривизни колії.

Авторами у роботі [13] розроблено методику оцінки причин втрати стійкості вантажних вагонів. Комп'ютерне моделювання виявило критичний вплив зносу клинів гасників коливань на стійкість порожніх вагонів.

В праці [14] побудовано нелінійну модель демпфування (114 ступенів свободи) для вантажних вагонів з урахуванням геометрії клинів, умов ковзання та контакту. Сили колесо-рейка розраховані за алгоритмом FASTSIM. Експериментальні методи оцінки безпеки не описані.

Авторами у роботі [15] запропоновано концепцію системи підвищення безпеки переїздів на основі аналізу вібраційних хвиль та автономного виявлення руху.

В роботі [16] проведено комп'ютерне моделювання умов сходу з рейок та впливу технічного стану гасників на безпеку пасажирських вагонів.

У статті [17] досліджено вплив типу рухомого складу та швидкості на динаміку та взаємодію з колесом за допомогою моделювання просторових варіацій зчеплення п'яти вагонів. Проблеми експлуатаційного моніторингу не розглянуті.

В праці [18] експериментально визначено спектр напружень у листових ресорах вантажних вагонів, що корелює з навантаженням на колісні пари (данні з тензодатчиків). Вплив на динаміку руху не досліджувався.

В роботі [19] порівняно динаміку вагонів із різними типами демпфування (сухе тертя / в'язке гасіння). Вплив типу демпфера на запас стійкості колісної пари не аналізувався.

У статті [20] розроблено імітаційну модель позовжних сил у змішаних вантажних поїздах під час сортування під дощем. Оцінка динамічних показників окремих вагонів не здійснювалась.

Мета статті

Метою статті є висвітлення результатів роботи з розробки загальних вимог до мобільного програмно-апаратного комплексу для вимірювань та оцінки показників якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації, а також проведення випробувань нового універсального вантажного вагона за допомогою цієї системи.

Дана робота виконана з метою дослідження можливості впровадження мобільних систем діагностики в існуючий рухомий склад та оцінку роботи таких систем в умовах експлуатації.

Мобільний програмно-апаратний комплекс повинен включати в себе такі технічні і функціональні особливості:

- реалізація мобільного підходу – система забезпечує можливість збору даних безпосередньо в польових умовах, що зменшує потребу у використанні стаціонарного обладнання;

- інтеграція IoT-технологій – комплекс може використовувати датчики IoT для бездротової передачі даних у реальному часі на сервер для подальшої обробки;

- комплексний аналіз даних – поєднання кількох типів даних (вібраційний аналіз, механічні напруження тощо) в одній системі для більш точного діагностування;

- автономність і енергоефективність – система може бути обладнана автономними джерелами живлення, що дозволяє її використовувати в будь-яких умовах.

Виклад основного матеріалу

Спеціалізоване програмно-математичне забезпечення було розроблене для реєстрації та аналітичної оцінки динамічних показників руху залізничного рухомого складу в експлуатаційних умовах. Обробка експериментальних даних здійснюється у програмному середовищі LabView, де інтегровані спеціалізовані алгоритми для аналізу результатів динамічних випробувань.

Функціональне призначення ПЗ зводиться до: виявлення кореляційних залежностей між коливальними процесами в несучій конструкції рухомого складу; ідентифікації характерних частот взаємодії конструктивних елементів; кількісної оцінки інтенсивності цих взаємодій.

Для реалізації цих завдань застосовуються методи кореляційного аналізу та спектрального аналізу, що виконуються окремо для різних структурних компонентів. Вимірювальні дані, отримані під час моніторингу, структуровані у вигляді багатовимірного часового ряду. Кожен вимірювальний канал генерує окремий одновимірний часовий ряд, що формує рядок цієї багатовимірної структури.

Структура програмного комплексу (рис. 1) базується на модульному принципі та включає п'ять ключових програмних модулів. Кожен модуль відповідає за строго визначений етап обробки вхідних даних.

Запропоноване рішення дає можливість виконувати поглиблений аналіз динамічних показників дослідного рухомого складу, забезпечуючи покращення точності оцінювання його стану.

Одна з стандартних функцій LabView, які застосовуються для аналізу даних випробувань, – цифрова фільтрація сигналів. Цифровий фільтр це будь-яка цифрова система, яка згідно заданого оператора $y(n) = F\{\tilde{x}(n)\}$ здійснює перетворення на її вході первинного сигналу $\tilde{x}(n) = x(n) + \xi(n)$ – цифрового сигналу $x(n)$ або його параметрів $\xi(n)$.

Під час оцінки показників динаміки та міцності, використовується фільтр Баттерворта. Функція передачі фільтра-прототипу Баттерворта (Butterworth filter) наведена нижче

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (1)$$

де ω_0 – частота зрізу (для фільтра-прототипу вона дорівнює 1 рад/с), n – порядок фільтра. Коефіцієнт передачі на нульовій частоті дорівнює 1, а на частоті зрізу незалежно від порядку фільтра становить $1/\sqrt{2} \approx 0,707 \approx 3\text{дБ}$. При $\omega \rightarrow \infty$ амплітудно-частотна характеристика наближається до нуля. Амплітудно-частотна характеристика фільтра Баттерворта є максимально плоскою при $\omega = 0$ та $\omega = \infty$. В цілому амплітудно-частотна характеристика рівномірно спадає від одиниці до нуля при зміні частоти від нуля до нескінченності.



Рис. 1 – Структура програмного забезпечення

Для забезпечення безпеки руху використовується важливий критерій – коефіцієнт запасу стійкості ($k_{\text{ст}}$) колісної пари. Його основна функція – оцінити стійкість колісної пари проти сходження з рейок у разі вкочування гребеня колеса на головку рейки. Прогнозування загрози сходу здійснюється шляхом перевірки значення $k_{\text{ст}}$. Розрахунок $k_{\text{ст}}$ виконується за формулою (2) при найбільш небезпечних сполученнях горизонтальних (P_0) та вертикальних (P_B) сил, прикладених до колісної пари:

$$k_{\text{ст}} = \frac{tg\beta - f_{TP}}{1 + f_{TP} \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_B}{P_0} \geq [k_{\text{ст}}], \quad (2)$$

де β – кут нахилу до горизонту твірної конусоподібної поверхні гребеня колеса; f_{TP} – коефіцієнт тертя ковзання поверхонь коліс і рейок, що взаємодіють; P_B –

вертикальна складова сил, що діють від коліс на рейки; P_6 – горизонтальна складова сил взаємодії колеса з рейкою, яка діє одночасно з силою P_B .

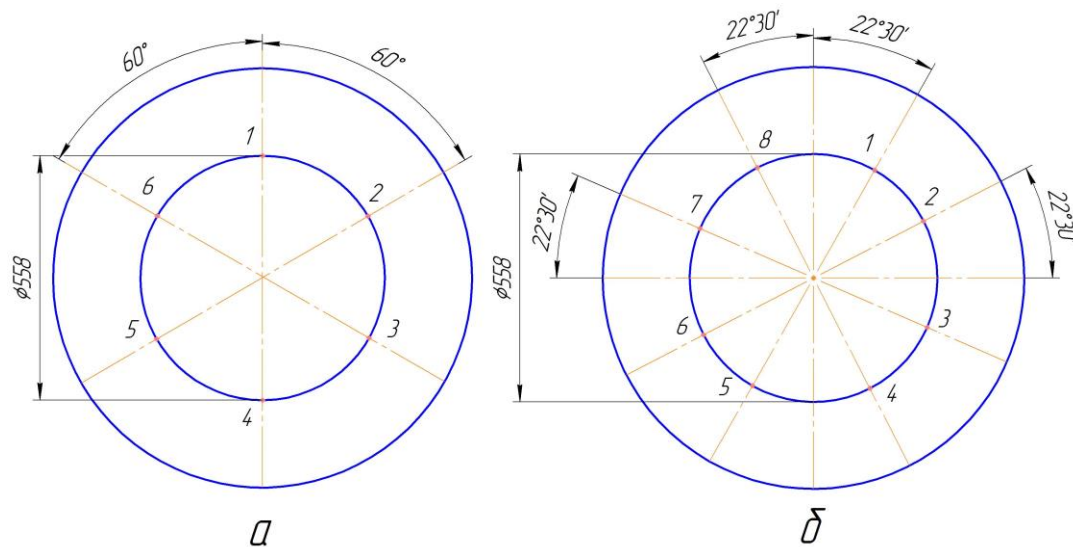


Рис. 2 – Схема розміщення тензорезисторів для вимірювання деформацій: а – від вертикального навантаження; б – від бокового навантаження

Визначення зон деформаційної чутливості диска колеса. Розташування тензорезисторів на диску колісної пари та їх підключення до вимірювальної схеми мають забезпечувати:

- достатню чутливість до вимірюваної сили;
- мінімізацію впливу сил інших напрямків.

Для окремої реєстрації сил, що діють на колісну пару, необхідно вибрати такі ділянки диска, де кожен тензорезистор реагує лише на навантаження певного напрямку. Чутливі зони були визначені шляхом аналізу напружено-деформованого стану колісної пари за допомогою методу кінцевих елементів.

На рис. 2 показано уточнені місця розміщення точок вимірювання на диску колеса, які найбільш чутливі до вертикального та бокового навантажень, згідно з результатами розрахунків.

На підставі експериментальних даних було виявлено зони максимальних напружень на диску колеса, що виникають під дією бокових (горизонтальних) та вертикальних навантажень. Ці результати дали змогу розробити оптимальну схему розміщення тензорезисторів на дисках коліс для точного визначення величини вертикального та бокового навантажень, які діють на колісні пари.

Для калібрування тензометричних систем на колесах використовуються спеціалізовані пристрої, які моделюють бокове навантаження у зоні, максимально наближеній до контакту колеса з рейкою, та забезпечують прикладання вертикального навантаження.

Апаратна частина системи контролю включає:

- первинні датчики (тензорезистори, низькочастотні акселерометри, датчики переміщень);

- GPS-приймач для позиціонування;
- аналогові лінії передачі даних (екрановані 6-жильні кабелі, стійкі до мастил, з робочою напругою до 10 В);

- підсистеми збору та обробки даних.

Кабельні компоненти зберігають свої властивості в діапазоні температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$ та відповідають 2-му класу гнучкості.

Функціональні можливості мобільної системи:

- оцінка міцності та безпеки руху в режимі реального часу;
- автономні вимірювання фізичних параметрів (деформації, прискорення, переміщення) з подальшою статистичною обробкою;
- аналіз впливу швидкості руху на контрольовані параметри з використанням GPS-даних.

Система призначена для:

- динамічної діагностики рухомого складу;
- оцінки навантажень на ходові частини;
- контролю якості виконаного ремонту;
- визначення залишкового ресурсу несівних конструкцій;
- проведення експлуатаційних випробувань.

Застосування мобільної системи в умовах експлуатації. Для натурних випробувань було обрано універсальний багатофункціональний вагон моделі 10-8006-У, призначений для перевезення тарно-штучних, зернових та інших вантажів широкої номенклатури, що потребують захисту від атмосферних опадів. Даний вагон зпроектовано та збудовано філією «Панютинський вагоноремонтний завод» АТ «Укрзалізниця» (рис. 3).



Рис. 3. – Універсальний багатофункціональний вагон моделі 10-8006-У

Для дослідження динамічних навантажень на несучі конструкції вагона було встановлено тензометричні датчики двох типів: на елементах кузова для вимірювання напружень та на дисках колісних пар для оцінки стійкості руху. Згідно з розробленою схемою розміщення (рис. 2), тензорезистори на колесах дозволяють реєструвати критичні значення коефіцієнта запасу стійкості. Доповнює систему моніторингу набір акселерометрів, встановлених як на підресорених, так і на жорстких елементах ходової частини.

Мобільна система збору даних інтегрує показання всіх датчиків через спеціалізовані кабельні мережі. Для обґрунтування вибору точок моніторингу попередньо виконано комплекс розрахунків міцності згідно з вимогами ДСТУ 7598, доповнений комп'ютерним моделюванням у програмному середовищі SolidWorks Simulation. Результати цих досліджень візуалізовані на рис. 4 та 5, де чітко ідентифіковані зони максимальних напружень несучої конструкції зерновоза та оптимальні місця розміщення вимірювальних датчиків.

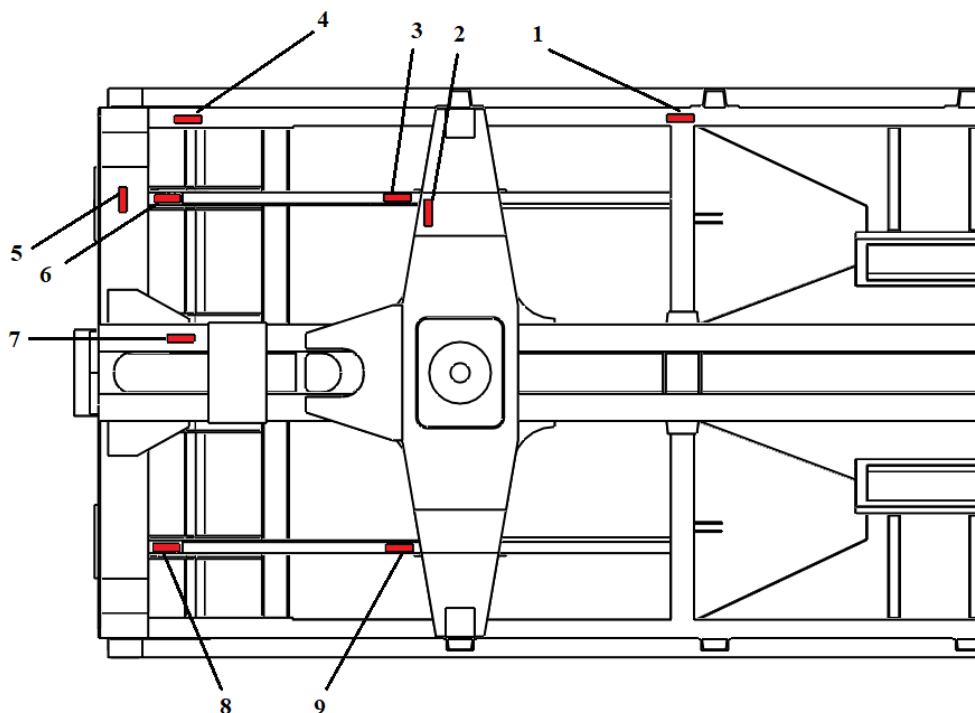


Рис. 4 – Місця встановлення тензорезисторів

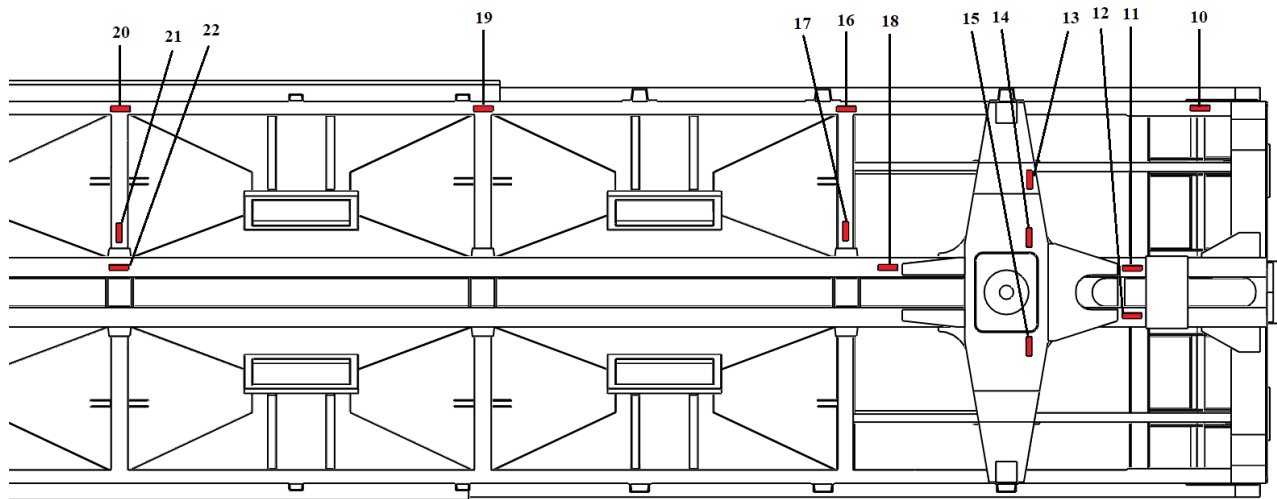


Рис. 5 – Місця встановлення тензорезисторів

Дослідному універсальному багатофункціональному вагону моделі 10-8006-У проведено ходові міцнісні та динамічним випробуванням у завантаженому стані. Метою досліджень було визначення ключових показників безпеки та якості руху, зокрема:

динамічних напружень, коефіцієнта запасу стійкості та прискорень елементів вагона. Вимірювання проводилися за допомогою мобільної системи в умовах реальної експлуатації. Отримані результати представлені в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Результати визначення динамічних напружень (ходові міцнісні випробування)

Показник	Нормативне значення, МПа	Фактичне значення, МПа
Динамічні напруження:		
Канал 1		
Канал 2		41,8
Канал 3		14,3
Канал 4		6,4
Канал 5		1,7
Канал 6		5,7
Канал 7		11,1
Канал 8		16,7
Канал 9	для сталі S355 319,5	20,4
Канал 10	Згідно ДСТУ 7598	11,8
Канал 11		7,8
Канал 12	для сталі 09Г2С	14,3
Канал 13	310,5 Згідно ДСТУ	23,8
Канал 14	7598	19,8
Канал 15		3,3
Канал 16		13,9
Канал 17		4,0
Канал 18		15,4
Канал 19		32,4
Канал 20		21,4
Канал 21		34,2
Канал 22		20,8
		27,1

Таблиця 2

Результати визначення показників якості руху (ходові динамічні випробування)

Показник	Нормативне значення	Параметри при швидкості, км\год				
		40	60	80	100	120
Коеф. верт. динаміки кузова, не більше	Відмінно 0,20 Добре 0,35 Задовільно 0,40 Допустимо 0,65	0,11	0,15	0,20	0,25	0,3
Коеф. верт. динаміки необресореної рами візка, не більше	Відмінно 0,50 Добре 0,70 Задовільно 0,80 Допустимо 0,85	0,2	0,22	0,30	0,33	0,37
Коеф. гориз. динаміки кузова, не більше	Відмінно 0,20 Добре 0,25 Задовільно 0,30 Допустимо 0,38	0,07	0,08	0,07	0,09	0,11
Коеф. запасу стійкості колеса від сходу з рейок, не менше	1,3	2,5	2,2	2,2	2,3	2,0

Висновки

Запропоновано програмно-математичний апарат для визначення показників якості та безпеки руху, що забезпечує вимірювання з розширеною невизначеністю 2,1% (при максимально допустимих 5%) за допомогою мобільних систем під час експлуатації. Це досягається завдяки використанню високоточних акселерометрів для вимірювання віброприскорень та сучасного реєструючого обладнання.

Визначено області залежності виникнення напружень на диску стандартного вагонного колеса під впливом вертикального та горизонтального силового навантаження. Запропоновано схему розташування тензорезисторів, яка дозволяє визначати контактні сили взаємодії коліс і рейок. Це забезпечує можливість безпосереднього оцінювання фактичного запасу стійкості колісних пар проти сходу з рейок.

3. Запропоновано загальні вимоги до мобільної системи для визначення показників якості та безпеки руху вантажних вагонів в умовах експлуатації. Ця система дозволяє виконувати контроль показників якості та безпеки руху дослідного рухомого складу в умовах експлуатації без залучення вагонів-лабораторій.

5. Проведено ходові динамічні та ходові міцнісні випробування універсального багатофункціонального вагона моделі 10-8006-У. Вимірювання дослідних показників якості та безпеки руху проведено за допомогою розробленого мобільного програмно-апаратного комплексу для вимірювань та оцінки показників якості руху вантажних вагонів в умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел

[1] Fomin O., Prokopenko P. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2024. Vol. 26 (3). Pp. 155-166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>.

[2] Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems / O. Fomin et al. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 516-522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.073>.

[3] Study of the basic criteria of the pantograph and overhead line interaction in operating conditions / O. Fomin et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 19, Article 101336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101336>.

[4] The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons / P.A. de Paula Pacheco et al. *Railway Engineering Science*. 2024. Vol. 32(3). Pp. 307-323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00334-8>.

[5] A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system / Q. Wang et al. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2024. Vol. 227, Article 114274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114274>.

[6] Bižić M., Petrović D. Algorithm for inverse determination of derailment coefficient by using instrumented wheelsets. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2022. Vol. 29(5). Pp. 503-517. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2022.10054032>.

[7] Calculation of basic indicators of running safety on the example of a freight wagon with the Y25 bogie / Dižo J., Blatnický M., Molnár D., Falendys A. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2022. Vol. 24(3). Pp. 259-266. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B259-B266>.

[8] Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin et al. *Transport*. 2015. Vol. 30(1). Pp. 88-92. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>.

[9] Design and development of wagon load monitoring system using fibre Bragg grating sensor / M. Suchandana et al. *Optical Fiber Technology*. 2025. Vol. 90.

- Article 104149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2025.104149>.
- [10] A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls / Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Dizo J. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.011>.
- [11] The Current State and Trends in the Development of Non-Contact Temperature Monitoring of the Railway Rolling Stock Elements / V. Bezlutsky et al. *Transport Means : Proceedings of the 28th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, 2-4 October 2024*. Pp. 1008-1013. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P1008-1013>.
- [12] Shvets A. Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*. 2021. Vol. 6(1). Pp. 45-58.
- [13] Analysis of the conditions for the exhaustion of the stability margin in the rail track of freight cars with three-piece bogies / Domin Y., Domin R., Cherniak G., Nozhenko V. *Archives of Transport*. 2021. Vol. 57(1). Pp. 119-129. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.8042>.
- [14] Hazrati Ashtiani I., Rakheja S., Ahmed A.K.W. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021. Vol. 231(8). Pp. 877-891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095>.
- [15] Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice / V. Bezlutsky et al. *Transport Means : Proceedings of the 28th International Scientific Conference, Kaunas, Lithuania, 2-4 October 2024*. Pp. 581-586. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586>.
- [16] Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways / R. Domin et al. *Archives of Transport*. 2016. Vol. 40(4). Pp. 15-27. DOI: <https://doi.org/10.5604/08669546.1225459>.
- [17] Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track / A. Shvets et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985 (1). Article 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
- [18] Experiments for a fatigue damage analysis applied in leaf spring suspensions of freight wagons / V.M.G. Gomes et al. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. Pp. 561-567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.119>.
- [19] Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping / R. Melnik et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (22). Article 10624. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210624>.
- [20] Effects of mixed marshalling modes on longitudinal freight train dynamics / Liangliang Y., Shihui L., Maohao F., Chen W. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2024. Vol. 237 (8). Pp. 1060-1071. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097231151477>.

RESEARCH OF THE STRENGTH AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A UNIVERSAL FREIGHT WAGON USING A MOBILE SYSTEM

Fomin O.V.	D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2387-9946 , e-mail: fomin1985@ukr.net ;
Prokopenko P.M.	PhD (Railway transport), head of the engineering department, Branch «Scientific-Research and Design and Technological Institute of Railway Transport» of JSC «Ukrainian Railways», Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1631-6590 , e-mail: prokopenko1520mm@gmail.com ;
Klymash A.O.	PhD (Engineering), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4055-1195 , e-mail: klimash@snu.edu.ua ;
Kuzmenko S.V.	PhD (Engineering), associate professor, East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0871-9864 , e-mail: kuzmenko@snu.edu.ua

This study is dedicated to advancing methodological approaches and instrumentation for the experimental analysis of structural integrity and running quality indicators pertaining to newly manufactured freight wagons, with the ultimate goal of certifying their operational suitability on public railway networks. This necessitates a comprehensive update of foundational theoretical principles, established testing methodologies, and measurement equipment. A central proposal involves the strategic replacement of dedicated laboratory wagons with advanced mobile digital measurement systems. Furthermore, the work introduces a novel approach for evaluating critical running quality metrics - specifically, the

stability margin coefficient and vertical dynamics coefficients - achieved through the precise measurement of stress distributions within the wheel disc of a freight wagon's wheel set. The research employs an empirical methodology focused on quantifying wheel-rail interaction forces. This is accomplished by capturing and analyzing deformation patterns within critical structural zones of the wheel, enabling the subsequent assessment of wagon running quality performance under actual service conditions. Additionally, the work rigorously substantiates the imperative need for modernizing both software (SW) and methodological solutions. This modernization is essential for accurately evaluating the dynamic characteristics of both newly constructed and modernized rolling stock, currently being produced by Ukrainian wagon manufacturing facilities. The research provides robust justification for the operational and technical feasibility of transitioning from traditional laboratory wagons to sophisticated, compact mobile diagnostic complexes. This transition is demonstrated to significantly enhance both the operational efficiency (responsiveness) and the reliability (accuracy) of testing procedures. Critical zones within the wheel disc susceptible to stress generation under the influence of vertical (normal) and lateral (horizontal) force loadings have been definitively identified and mapped. An optimized, scientifically validated scheme for the strategic placement of strain gauges (tensometric sensors) is proposed to ensure high-fidelity determination of wheel-rail contact forces. The study culminates in the formulation of universal, comprehensive technical specifications and requirements for mobile measurement systems. These systems are specifically engineered for the operational monitoring of freight wagon running quality during active revenue service, as well as during critical commissioning and acceptance testing phases required for authorizing new wagons onto public infrastructure. The proposed integrated measurement system has undergone successful field-testing and validation under real-world operational conditions simulating typical freight wagon usage. The empirical results and specifications obtained enable the precise definition of core technical parameters necessary for the development and deployment of effective mobile diagnostic complexes. These data sets hold considerable weight and are fundamentally important in the engineering design process of advanced monitoring systems destined for railway transport applications. Such systems are intrinsically oriented towards rigorous safety assessment, achieved through the continuous, real-time monitoring of structural health (condition) and dynamic running behaviour. The practical implementation of the proposed methodologies and systems is projected to directly and materially contribute to the reduction of accident risks across railway networks, thereby enhancing overall operational safety.

Keywords: testing, freight wagon, strength, running safety, mobile system, railway transport.

References

- [1] O. Fomin, and P. Prokopenko, "Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails," *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, vol. 26(3), pp. 155-166, 2024. doi: 10.26552/com.C.2024.030.
- [2] O. Fomin, P. Prokopenko, Y. Medvediev, and L. Degtyareva, "Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems," *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 516-522, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.04.073.
- [3] O. Fomin, P. Prokopenko, S. Kara, V. Píštěk, and P. Kučera, "Study of the basic criteria of the pantograph and overhead line interaction in operating conditions," *Results in Engineering*, vol. 19, article 101336, 2023. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101336.
- [4] P.A. Paula Pacheco et al., "The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons," *Railway Engineering Science*, vol. 32(3), pp. 307-323, 2024. doi: 10.1007/s40534-024-00334-8.
- [5] Q. Wang, D. Li, J. Zeng, X. Peng, L. Wei, and W. Du, "A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 227, article 114274, 2024. doi: 10.1016/j.measurement.2024.114274.
- [6] M. Bižić, and D. Petrović, "Algorithm for inverse determination of derailment coefficient by using instrumented wheelset," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 29(5), pp. 503-517, 2022. doi: 10.1504/IJHVS.2022.10054032.
- [7] J. Dižo, M. Blatnický, D. Molnár, and A. Falendysh, "Calculation of basic indicators of running safety on the example of a freight wagon with the Y25 bogie," *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, vol. 24(3), pp. 259-266, 2022. doi: 10.26552/com.C.2022.3.B259-B266.
- [8] S. Myamlin, L. Lingaitis, S. Dailydka, G. Vaičiūnas, M. Bogdevičius, and G. Bureika, "Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie," *Transport*, vol. 30(1), pp. 88-92, 2015. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
- [9] M. Suchandana, S. Preeta, A. Abdullah, A. Tahani, and U. Anup, "Design and development of wagon load monitoring system using fibre Bragg grating sensor," *Optical Fiber Technology*, vol. 90, article 104149, 2025. doi: 10.1016/j.yofte.2025.104149.
- [10] J. Gerlici, A. Lovska, G. Vatulia, and J. Dizoo, "A study of the transverse loading of an open wagon body with sandwich-panel walls," *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 66-73, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.04.011.
- [11] V. Bezlutsky, O. Pipchenko, Ie. Medvediev, O. Padchenko, A. Lytvynenko, and S. Sova, "The Current State and Trends in the Development of Non-Contact Temperature Monitoring of the Railway Rolling Stock

- Elements,” in *Proc. of the 28th Int. Sci. Conf. «Transport Means»*, Kaunas, Lithuania, Oct. 2-4, 2024, pp. 1008-101. doi: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P1008-1013.
- [12] A. Shvets, “Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie,” *Advanced Mathematical Models and Applications*, vol. 6(1), pp. 45-58, 2021.
- [13] Y. Domin, R. Domin, G. Cherniak, and V. Nozhenko, “Analysis of the conditions for the exhaustion of the stability margin in the rail track of freight cars with three-piece bogies,” *Archives of Transport*, vol. 57(1), pp. 119-129, 2021. doi: 10.5604/01.3001.0014.8042.
- [14] I. Hazrati Ashtiani, S. Rakheja, and A.K.W. Ahmed, “Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231(8), pp. 877-891, 2017. doi: 10.1177/0954409716647095.
- [15] V. Bezlutsky, O. Melnyk, T. Emelyanova, V. Lisnychiy, A. Lytvynenko, and S. Sova, “Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice,” in *Proc. of the 28th Int. Sci. Conf. «Transport Means»*, Kaunas, Lithuania, Oct. 2-4, 2024, pp. 581-586, 2024. doi: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586.
- [16] R. Domin, I. Domin, G. Cherniak, A. Mostovych, V. Konstantidi, and P. Gryndei, “Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways,” *Archives of Transport*, vol. 40(4), pp. 15-27, 2016. doi: 10.5604/08669546.1225459.
- [17] A. Shvets, O. Bolotov, A. Percevoj, V. Ghlukhov, O. Bolotov, and L. Saparova, “Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 985(1), article 012010, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012010.
- [18] V.M.G. Gomes, N.M.P. Pinto, P.A. Montenegro, J.A.F.O. Correia, R. Calçada, and A.M.P. Jesus, “Experiments for a fatigue damage analysis applied in leaf spring suspensions of freight wagons,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 54, pp. 561-567, 2024. doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.119.
- [19] R. Melnik, S. Koziak, J. Seńko, J. Dižo, and J. Caban, “Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping,” *Applied Sciences*, vol. 14(22), article 10624, 2024. doi: 10.3390/app142210624.
- [20] Y. Liangliang, L. Shihui, F. Maoha, and W. Chen, “Effects of mixed marshalling modes on longitudinal freight train dynamics,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 237(8), pp. 1060-1071, 2024. doi: 10.1177/09544097231151477.
- Стаття надійшла 26.07.2025
Стаття прийнята 15.08.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Дослідження міцності та динамічних характеристик універсального вантажного вагона мобільною системою / Фомін О. В., Прокопенко П. М., Климаш А. О., Кузьменко С. В. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 301-310. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344983>.