

Т. Ф. МОКРІЙ, М. Б. СОБОЛЕВСЬКА, О. М. КОВТУН, Л. Г. ЛАПІНА,
Д. В. ГОРОБЕЦЬ, С. С. ПАСІЧНИК, В. В. МАЛИЙ

ОБНОВЛЕННЯ ПАРКУ РУХОМОГО СКЛАДУ УКРАЇНСЬКИХ ЗАЛІЗНИЦЬ З ОРІЄНТАЦІЄЮ НА ІНТЕГРАЦІЮ В ЄВРОПЕЙСЬКІ ТРАНСПОРТНІ МЕРЕЖІ

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua*

Стратегічна мета подальшого розвитку вітчизняної залізничної галузі – оновлення рухомого складу залізниць та інфраструктури для задоволення потреб економіки України, у тому числі прискорення інтеграції в європейські транспортні перевезення. У статті викладено результати досліджень, виконаних за останні роки у відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, які спрямовані на вирішення важливих задач розвитку залізничного транспорту України.

Мета досліджень полягала в розробці науково обґрунтованих рішень щодо оновлення парку рухомого складу українських залізниць з орієнтацією на інтеграцію в європейські транспортні мережі. Для цього у відділі виконано цикл теоретичних і експериментальних досліджень. Розглянуто задачу удосконалення контактної пари «колесо–рейка» шляхом визначення профілю обода коліс, використання яких забезпечило би прийнятні показники динамічних якостей вагонів і умов їхньої взаємодії з рейками українських та європейських залізниць, зниження зносу елементів рухомого складу і колії. Проведено математичне моделювання динамічних показників вагонів пасажирського поїзда зчленованої конструкції при русі з різними швидкостями по колії довільного окреслення в плані і профілі з подальшою оцінкою впливу на ці показники змін різних параметрів рухомого складу і колії. Розроблено пристрої поглинання енергії для підвищення пасивної безпеки швидкісного пасажирського поїзда локомотивної тяги та моторвагонного поїзда при аварійних зіткненнях з перешкодами відповідно до вимог діючого в Україні стандарту ДСТУ EN 15227. Виконано оцінку експлуатаційної навантаженості несучих елементів конструкцій вантажних вагонів зі змінними кузовами та розроблено рекомендації щодо елементів кріплення, які забезпечують безпеку перевезень різних вантажів у вагонах зі змінними кузовами.

На підставі результатів виконаних досліджень запропоновано низку нових конструкційних рішень стосовно елементів рухомого складу вітчизняних залізниць. Впровадження цих рішень дасть значний економічний ефект, дозволить підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, покращити взаємодію ходових частин залізничних екіпажів з колією, сприятиме створенню сучасного вітчизняного залізничного комплексу та його інтеграції в європейські транспортні мережі.

Ключові слова: оновлення залізничного транспорту України, вантажні та пасажирські перевезення, профіль обода колеса, зчленований вагон, безпека руху, аварійні зіткнення, система пасивної безпеки, інтеграція в європейські залізничні перевезення.

The strategic aim of further development of the Ukrainian railways is rolling stock and infrastructure renewal to meet the demands of the Ukrainian economy, including a rapid integration into the European transport service. The paper presents the results of recent studies conducted at the Department of Statistical Dynamics and Multidimensional Mechanical System Dynamics, the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, with the aim to solve important problems in the development of the Ukrainian railway transport.

The studies were aimed at developing scientifically substantiated decisions on Ukrainian rolling stock renewal oriented at integration into the European railway networks. To do this, a cycle of theoretical and experimental studies was conducted at the department. Consideration was given to the problem of wheel–rail contact pair improvement by identifying a wheel profile that would offer an acceptable car ride performance and acceptable conditions of car–rail interaction both on the Ukrainian and the European railways and reduce vehicle and rail wear. The car ride performance of an articulated passenger train was simulated mathematically for its motion at different speeds along a track of arbitrary alignment and profile, and the effect of different car and track parameters on the ride performance was estimated. Energy-absorbing devices were developed to increase the passive safety of a speedy locomotive-hauled passenger train and a multiple-unit train in emergency collisions with obstacles according to the Ukrainian Standard DSTU EN 15227. Service loads on the load-bearing components of swap-body freight cars were estimated, and recommendations were developed on fasteners that would provide safe transportation of various freights in swap-body cars.

Based on the results of the studies, a number of design solutions were proposed for Ukrainian railway vehicle components. Their implementation will offer a sizeable economic benefit, increase the train speed and safety, improve the vehicle–track interaction, and facilitate the formation of an up-to-date home railway complex and its integration into the European railway networks.

Ключові слова: Ukrainian railway transport renewal, freight and passenger service, wheel profile, articulated car, train operation safety, emergency collision, passive safety system, integration into the European railway service.

© Т. Ф. Мокрій, М. Б. Соболевська, О. М. Ковтун, Л. Г. Лапіна, Д. В. Горобець,
С. С. Пасічник, В. В. Малий, 2024

Техн. механіка. – 2024. – № 3.

Вступ. Залізнична галузь є однією з основних галузей української економіки, що наповнюють національний бюджет. Стратегічна мета подальшого розвитку цієї галузі – оновити рухомий склад залізниць та інфраструктуру, щоб задовільнити потреби економіки України та прискорити процес інтеграції вітчизняних залізничних перевезень в європейські транспортні перевезення [1].

Розвиток спільного європейського ринку транспортних послуг потребує приведення до єдиного стандарту основних відповідних технічних рішень України та ЄС, які мають визначальний вплив на експлуатаційну сумісність залізниць [2]. Насамперед це стосується рухомого складу.

В першу чергу потрібно створити умови для спільної експлуатації рухомого складу на українських і європейських залізничних коліях. Долати кордони між Україною та Європейським Союзом залізницею проблематично – через відмінність параметрів колій. Колії на пострадянському просторі й у країнах Європи суттєво різняться – не лише шириною (відповідно 1520 мм і 1435 мм), а й профілем головок рейок і нахилом рейок до горизонту (1/20 і 1/40). Перехід з колії одного стандарту на колію іншого стандарту завжди супроводжували чималі труднощі, пов’язані з пересадкою до інших вагонів пасажирів, перевантаженням вантажів, заміною вагонних візків. Це потребує часу і незручно для пасажирів і перевізників. Нині найефективнішим способом подолання кордонів між країнами з різною шириною залізничної колії вважають застосування розсувних колісних пар – системи, здатної змінювати відстань між колесами на спеціальних перекладних колійних пристроях, не зупиняючи руху поїзда [3]. Така заміна потребує лише кількох хвилин для всього поїзда. Водночас, що стосується спільної експлуатації рухомого складу на українських і європейських залізницях, належною має бути сумісність пари «колесо–рейка» з огляду на профілі головок рейок Р65 (Україна) і UIC60 (Європа) та їхній нахил до горизонту. Поліпшити експлуатаційну сумісність українських і європейських залізничних транспортних мереж можна за допомогою коліс з новим профілем обода, які б забезпечували прийнятні показники динамічних якостей вагонів і умов їхньої взаємодії з рейками залізниць обох стандартів.

Сучасними проблемами вітчизняного залізничного транспорту є оновлення рухомого складу з метою підвищення швидкостей руху залізничних екіпажів, покращення їх динамічних якостей, збільшення ресурсу ходових частин, забезпечення безпеки перевезень.

Одним з напрямків оновлення вітчизняного пасажирського рухомого складу є впровадження швидкісного поїзда зчленованої конструкції, де передбачається спирання суміжних вагонів на спільні візки, розташовані між ними [4]. В такій конструкції поїзда використовується менша кількість візків. Оскільки вартість візків складає істотну частину вартості вагонів, то поїзд зчленованої конструкції матиме значно меншу вартість. Зчленованість вагонів надає поїзду цілісності, усуває поздовжні зусилля стиснення та розтягування в процесі експлуатації, суттєво підвищує плавність ходу та комфорт пасажирів. Крім того, навіть за малоімовірного сходу одного з вагонів з рейок потяг залишається нероз’єднаним, чим забезпечується додаткова безпека пасажирських перевезень. Поїзди зчленованої конструкції використовуються в багатьох країнах [5 – 7].

У нових конструкціях пасажирських локомотивів, головних і проміжних вагонів мають бути не тільки ефективні засоби активного захисту для запобігання зіткненням, а й системи пасивної безпеки (СПБ) – для захисту під час аварійних зіткнень. В результаті контрольованого деформування пристроїв поглинання енергії (ППЕ), які входять до складу СПБ, відбувається зниження поздовжніх зусиль в міжвагонних з'єднаннях і прискорень вагонів. Пасивний захист європейського пасажирського рухомого складу організовано таким чином, що основна частина енергії зіткнення поїзда з перешкодою поглинається ППЕ головного вагона (у моторвагонного поїзда) або ППЕ локомотива (у поїзда локомотивної тяги) [8 – 9]. Зазвичай як ППЕ використовуються коробчасті або трубчасті конструкції з різними ініціаторами деформацій і варіантами заповнення. При аварійному зіткненні енергія поглинається в результаті пластичної деформації, розвальцьовування або розрізання елементів ППЕ. Каркас кабіни з пультом управління є посиленою зоною безпеки для виживання та евакуації машиніста при зіткненні. Проміжні вагони поїзда обладнано протипідйомними та зчепними пристроями з енергопоглинальними елементами. Використання систем пасивної безпеки дозволяє підвищити безпеку пасажирських перевезень, знизити ризик травмування та загибелі пасажирів і поїзної бригади, зменшити пошкодження рухомого складу, мінімізувати наслідки аварії. На рис. 1 показано зіткнення двох поїздів, один з яких, розташований ліворуч на рис. 1, а), має СПБ [10].



а)

б)

а) – загальний вид зіткнення поїздів;

б) – вид головного вагона з СПБ після зіткнення поїздів

Рис. 1 – Зіткнення двох поїздів, один з яких має СПБ

На теперішній час Україна потребує також впровадження нових ефективних технологій вантажних перевезень, зокрема з використанням вагонів зі змінними кузовами. Ідея розробки вантажних вагонів зі змінними кузовами полягає у відокремленні рами від кузова вагона та віднесення її до екіпажної частини, в той час як до кузовної частини вагона буде належати тільки кузов (рис. 2). Екіпажною частиною такого вагона є спеціальна платформа, яка має ряд змінних кузовів, що з'єднуються з нею відповідними роз'ємними кріпленнями.



Рис. 2 – Новий вид вантажного рухомого складу залізниць – вагон зі змінним кузовом

При сезонних змінах вантажів кузов одного типу призначення може відокремлюватися від екіпажної частини вагона та замінюватися у порожньому стані кузовом іншого призначення, в результаті чого можна отримати новий спеціалізований вантажний вагон. Технологія перевезень вантажів вагонами зі змінними кузовами дозволяє знизити витрати на придбання і утримання рухомого складу за рахунок ефективної експлуатації платформи як найбільш вартісної частини вагона, уникнути простою вагонів при сезонних коливаннях відправки вантажів, а при пошкодженні кузовів забезпечити їх швидку заміну. Лідерами в розробці вагонів зі змінними кузовами є такі європейські країни, як Швейцарія, Австрія, Німеччина, Швеція [11 – 13].

Відділ статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) має великий досвід для вирішення зазначених вище проблем залізничного транспорту. Зокрема створено ефективні методики дослідження стаціонарних і нестаціонарних коливань залізничних екіпажів як складних механічних систем, розроблено математичні моделі та методи розв'язання задач динаміки транспортних засобів, проведено ґрунтовні дослідження з питань безпеки руху поїздів, отримано ряд важливих теоретичних і практичних результатів [14 – 22].

Мета досліджень. Метою досліджень, викладених в статті, є розробка науково обґрунтованих рішень щодо оновлення парку рухомого складу українських залізниць з орієнтацією на інтеграцію в європейські транспортні мережі. Для цього у відділі виконано цикл теоретичних і експериментальних досліджень. Розглянуто задачу удосконалення контактної пари «колесо–рейка» шляхом визначення профілю обода коліс, використання яких забезпечило би прийнятні показники динамічних якостей вагонів і умов їхньої взаємодії з рейками українських та європейських залізниць, зниження зносу елементів рухомого складу і колії. Проведено математичне моделювання динамічних показників вагонів пасажирського поїзда зчленованої конструкції при русі з різними швидкостями по колії довільного окреслення в плані і профілі з подальшою оцінкою впливу на ці показники змін різних параметрів рухомого складу і колії. Розроблено пристрої поглинання енергії для підвищення пасивної безпеки швидкісного пасажирського поїзда локомотивної тяги та моторвагонного поїзда при аварійних зіткненнях з перешкодами відповідно до вимог діючого в Україні стандарту ДСТУ EN 15227. Виконано оцінку експлуатаційної навантаженості несучих елементів конструкцій вантажних вагонів зі змінними кузовами та розроблено рекомендації щодо елементів кріплення, які забезпечують безпеку перевезень різних вантажів у вагонах зі змінними кузовами.

Удосконалення контактної пари «колесо–рейка». Порівняльний аналіз результатів розрахунків руху пасажирських вагонів, обладнаних колесами зі стандартним українським профілем ободів (ДСТУ ГОСТ 10791:2016) або європейським профілем (S1002), показав, що показники взаємодії вагона з коліями цих залізниць значно кращі у випадках контакту коліс і рейок, традиційних для відповідної залізниці [23]. Поліпшити експлуатаційну сумісність українських і європейських залізничних транспортних мереж можна за допомогою коліс із новим профілем обода.

З метою вибору такого профілю було побудовано сімейство профілів ободів коліс і оцінено ефективність їх використання в колісних парах пасажирського вагона, що рухається по українських та європейських залізницях. При цьому особливу увагу приділено забезпеченню стійкості ходу вагона при експлуатаційних швидкостях руху (до 160 км/год) і прийнятних показників його взаємодії з коліями обох залізничних мереж.

Для досліджень використовувалась просторова математична модель взаємодії залізничного екіпажа та інерційної пружнодисипативної колії [16]. Для кожного варіанта профілю розв'язувалась просторова задача контакту коліс і рейок, аналізувались параметри взаємодії, у тому числі розміри і розташування контактних плям. Також проводились розрахунки руху вагона з різними швидкостями по прямих ділянках колії та його вписування у кругову криву малого радіуса ($R = 300$ м), у тому числі з урахуванням форм профілів головок рейок українських (Р65) і європейських (UIC60) з різним ступенем зносу [24, 25]. Виконано оцінку впливу використання розглянутих профілів ободів коліс на динамічні показники вантажного піввагона та його взаємодію з коліями різних залізниць. При розрахунках використано процеси збурень, що діють з боку колії на екіпаж, сформовані на базі фактичних нерівностей рейкових ниток реальних ділянок залізниць [26 – 28]. Проведено також дослідження напружено-деформованого стану системи «колесо–рейка» при різних поєднаннях елементів контактної пари [29].

При аналізі отриманих результатів з побудованих профілів для подальшого використання обрано один профіль – ІТМ-73ЕР. Порівняння розробленого профілю коліс із стандартними українським та європейським профілями показано на рис. 3, де y , z – лінійні розміри профілів.

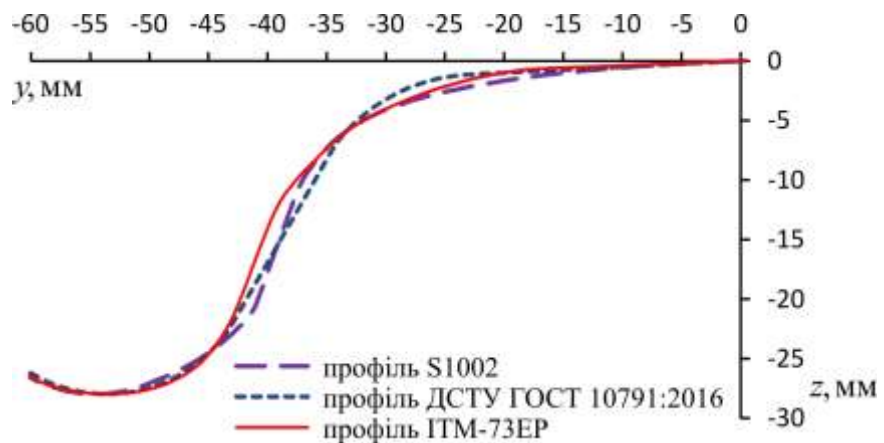


Рис. 3 – Порівняння розробленого профілю ободу коліс із стандартними українським (ДСТУ ГОСТ 10791:2016) та європейським (S1002) профілями

Як показали розрахунки, критична швидкість руху (швидкість, при якій починається різке зростання коливань виляння) пасажирського вагона з розробленим профілем коліс ІТМ-73ЕР дорівнює 170 км/год на європейській та 180 км/год на українській коліях [23].

На рис. 4 наведено залежності від ступеня бічного зносу в кривих ділянках рейок UIC60 (рис. 4, а) і Р65 (рис. 4, б)) максимальних значень гребеневого зносу A (питома робота сил тертя) набіжних на зовнішню рейку коліс пасажирського вагона з профілем ІТМ-73ЕР та (для порівняння) коліс зі стандартним українським і європейським профілями при русі екіпажа в круговій кривій радіуса 300 м зі швидкістю 80 км/год. Терміном «гребневий» позначено знос гребеня і галтелі.

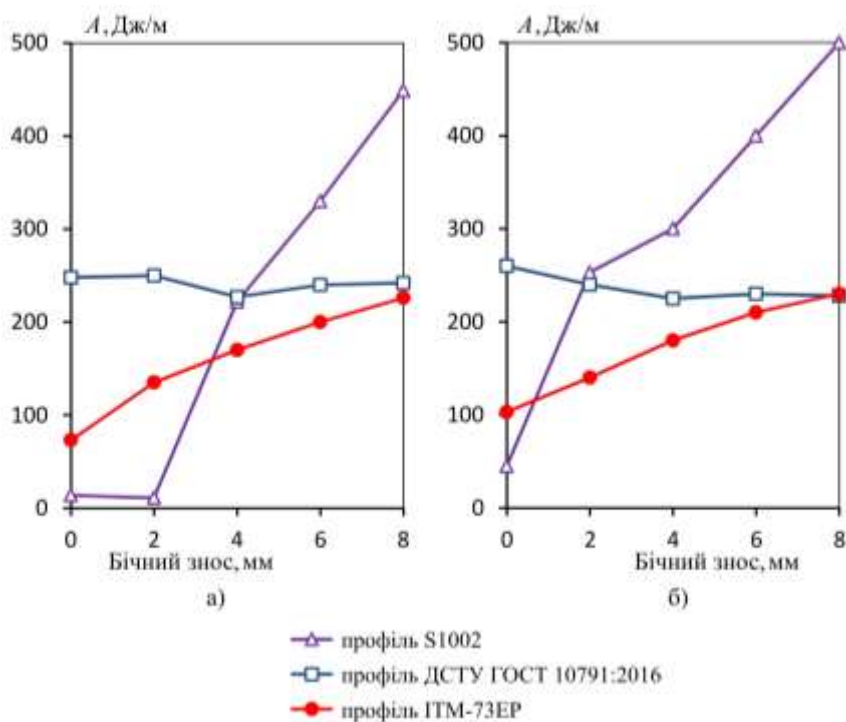


Рис. 4 – Залежності від бічного зносу зовнішньої рейки максимальних значень гребеневого зносу A набіжних на рейку UIC60 (а) і Р65 (б) коліс пасажирського вагона при русі зі швидкістю 80 км/год в круговій кривій радіуса 300 м

Як бачимо з аналізу кривих на рис. 4, показник A зносу обода колеса з профілем ІТМ-73ЕР у 2–3 рази нижчий, ніж відповідний показник зносу обода стандартного українського колеса на незношених рейках, поступово підвищується з ростом ступеня зносу рейок і наближається до показника стандартного колеса при бічному зносі рейок 8 мм. Значення показника A для колеса з профілем ІТМ-73ЕР у випадку незношених головок рейок дещо перевищує відповідне значення для колеса з профілем S1002. Але швидкість зростання цього показника для колеса з профілем ІТМ-73ЕР з ростом ступеня зносу рейки значно нижча, ніж для колеса з профілем S1002, і вже починаючи з малого бічного зносу рейок, показник A для колеса з профілем S1002 перевищує відповідне значення A для колеса з профілем ІТМ-73ЕР, досягаючи різниці у 2,2–2,5 рази при бічному зносі рейок 8 мм.

Таким чином, використання нового зносостійкого профілю обода залізничного колеса ІТМ-73ЕР у пасажирських вагонах дозволить при збереженні високих динамічних якостей екіпажів забезпечувати прийнятні показники їхньої взаємодії з колією в умовах спільної експлуатації на українських та європейських залізницях.

Аналогічні дослідження виконуються щодо розробки форми профілю коліс для розсувних колісних пар вантажних вагонів [30].

Впровадження цих профілів коліс дозволить при забезпеченні нормативних вимог до показників динаміки, взаємодії з колією, рівня безпеки руху потягів як на вітчизняних, так і європейських залізницях значно скоротити час доставки вантажів та пасажирів до пункту призначення.

Поїзд зчленованої конструкції. Загальний вигляд швидкісного зчленованого пасажирського поїзда, що розглядається, наведено на рис. 5. Поїзд складається з семи вагонів: переднього моторного вагона, переднього перехідного вагона, трьох зчленованих вагонів, заднього перехідного вагона і заднього моторного вагона. Перехідний вагон має один самостійний візок і спільний візок із сусіднім зчленованим вагоном.

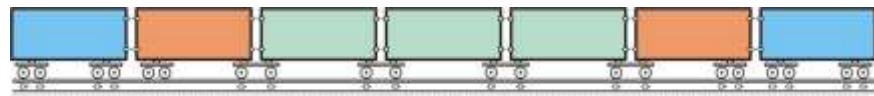


Рис. 5 – Загальний вигляд швидкісного зчленованого пасажирського поїзда

Для дослідження динамічних показників швидкісного зчленованого пасажирського поїзда розроблено просторову розрахункову схему (рис. 6).

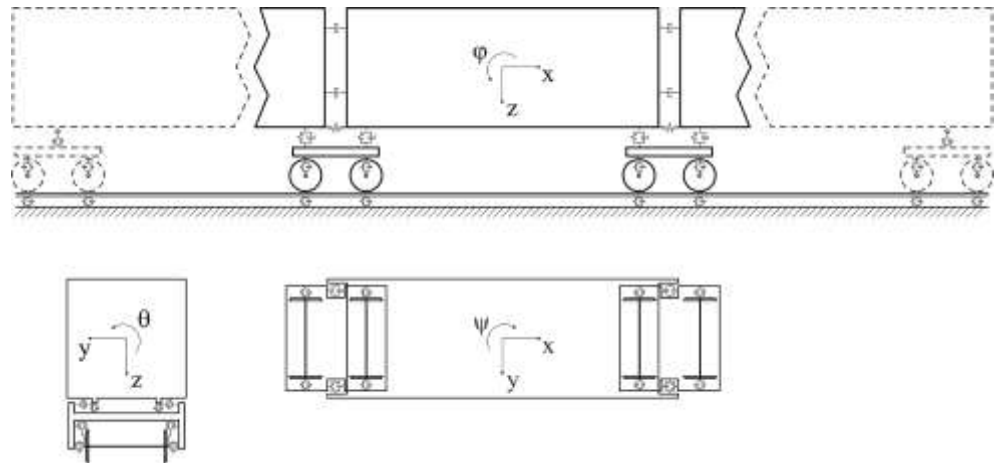
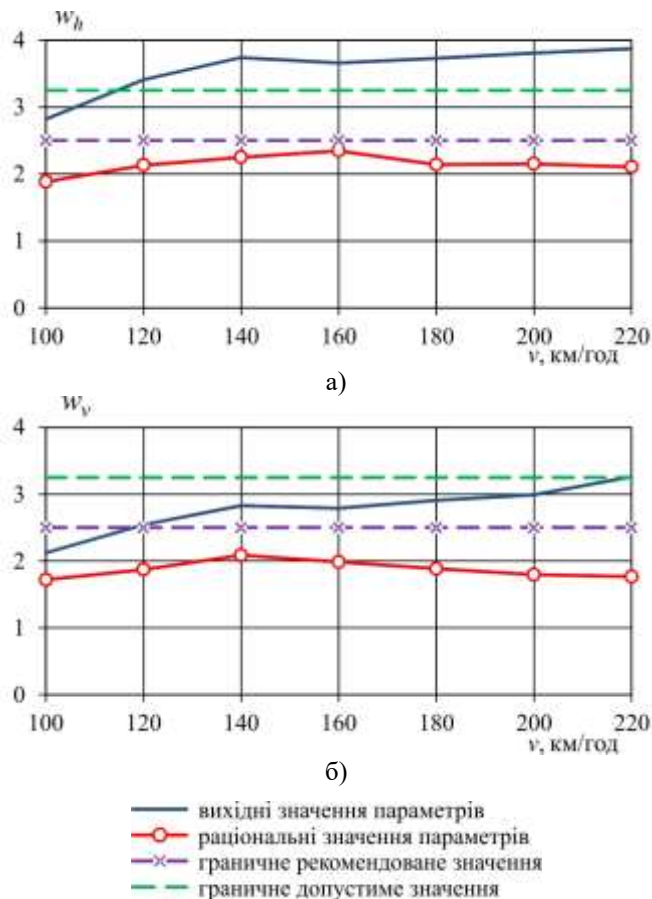


Рис. 6 – Розрахункова схема вагонів зчленованого поїзда

Як видно на рис. 6, кузов зчленованого вагона спирається на спільні візки з сусідніми вагонами. Спільний візок має два ступені підвішування. Первинне підвішування містить пружні та демпфуючі елементи. Вторинне підвішування включає пружно дисипативні елементи з'єднання між рамою візка і кузовами двох зчленованих вагонів, а також центральний шарнір для з'єднання кузовів, робота якого також моделюється за допомогою горизонтальних та вертикальних пружних елементів та амортизаторів. Чотири демпфери з в'язким тертям, розташовані між двома сусідніми кузовами, відіграють роль амортизаторів коливань їх взаємного галопування та виляння.

Розроблені математична модель [31] та програмне забезпечення дозволяють оцінювати динамічні показники вагонів пасажирського поїзда при русі з різними швидкостями по колії довільного окреслення в плані і профілі, моделювати широкий спектр розрахункових випадків, включно з усіма можливими комбінаціями параметрів елементів вагонів, профілів ободів колісних пар і рейок. Вплив рейкової колії моделюється з урахуванням дії зовнішніх збурень, пов'язаних з геометричною недосконалістю рейкової колії (просадки, стики, нерівномірний знос).

Проведено багатоваріантні розрахунки з оцінки впливу змін різних параметрів рухомого складу і колії на динамічні показники вагонів швидкісного пасажирського поїзда зчленованої конструкції під час його руху в діапазоні зміни швидкості від 80 км/год до 220 км/год.



а) – показники плавності ходу у горизонтальному поперечному w_h напрямку; б) – показники плавності ходу у вертикальному w_v напрямку

Рис. 7 – Залежності максимальних значень показників плавності ходу кузова зчленованого вагона з вихідними і раціональними параметрами другого ступеня ресорного підвішування від швидкості руху по прямій ділянці колії з випадковими нерівностями

За результатами розрахунків визначено раціональні параметри другого ступеня ресорного підвішування ходових частин та шарнірного вузла для спирання зчленованих вагонів. Оцінка прогнозних динамічних характеристик

пасажирського поїзда зчленованої конструкції, сформованого з вагонів з обраними параметрами вузлів, який рухається прямолінійними і криволінійними (з великим радіусом) ділянками колії, показала, що плавність ходу і безпека руху поїзда забезпечується у всьому діапазоні допустимих швидкостей в штатних режимах [21].

Для прикладу на рис. 7 показано порівняння залежностей максимальних значень одних з найважливіших характеристик динаміки пасажирського поїзда – показників плавності ходу (у горизонтальному поперечному w_h та вертикальному w_v напрямках) кузова зчленованого вагона з вихідними і раціональними параметрами другого ступеня ресорного підвішування від швидкості руху по прямій ділянці колії з випадковими нерівностями [26].

Як бачимо, у зчленованого поїзда, обладнаного ходовими частинами з вибраними раціональними параметрами, показники плавності ходу у вертикальному та горизонтальному поперечному напрямках знаходяться згідно з нормативними значеннями [32] у зоні рекомендованих значень, тоді як при вихідних значеннях параметрів ходових частин ці показники при деяких швидкостях руху перевищують допустиме значення 3,25.

Аналіз результатів виконаних розрахунків показав, що експлуатація пасажирського поїзда зчленованої конструкції дозволить поліпшити динамічні якості вагонів і підвищити комфортність поїздок для пасажирів.

Пасивна безпека руху поїздів. При створенні сучасного вітчизняного швидкісного пасажирського рухомого складу необхідно використовувати прийняті в Україні стандарти: ДСТУ EN 16223 [33], який регламентує міцність конструкцій в експлуатації, та ДСТУ EN 15227 [34], який визначає вимоги до пасивної безпеки під час аварійних зіткнень поїзда з різними перешкодами. Відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 15227 з пасивної безпеки у відділі статистичної динаміки і динаміки багатовимірних механічних систем ІТМ НАНУ і ДКАУ розроблено пристрої поглинання енергії, що містять стільникові елементи, для пасажирського локомотива, головного вагона та міжвагонних з'єднань [17, 20, 35]. Розроблено наукову методику вибору параметрів ППЕ [35]. Розроблено скінченно-елементні моделі для дослідження пластичного деформування конструкцій ППЕ при ударі [20] та дискретно-масові математичні моделі для дослідження динамічної навантаженості екіпажів еталонних поїздів при аварійних зіткненнях двох ідентичних поїздів, поїзда з вантажним вагоном, а також з великим транспортним засобом на залізничному переїзді [35].

Розроблено схеми установки пристроїв поглинання енергії в кінцевих частинах тягового рухомого складу і проміжних вагонів:

- пасажирський локомотив поїзда локомотивної тяги, оснащений спереду двома ППЕ на рівні зчіпного пристрою [17];
- головний вагон моторвагонного поїзда, оснащений спереду дворівневою системою ППЕ, розташованих на рівні зчіпного пристрою (ППЕ нижнього рівня) і в передньому підвіконні вище рівня зчіпного пристрою (ППЕ верхнього рівня) [20, 35];
- задні частини тягового рухомого складу та проміжні вагони обладнано двома пристроями поглинання енергії нижнього рівня [17, 20, 35].

На рис. 8 показано конструкції пристроїв поглинання енергії, розроблені для головних та проміжних вагонів моторвагонного поїзда, а на рис. 9 – схему їх розташування в поїзді.

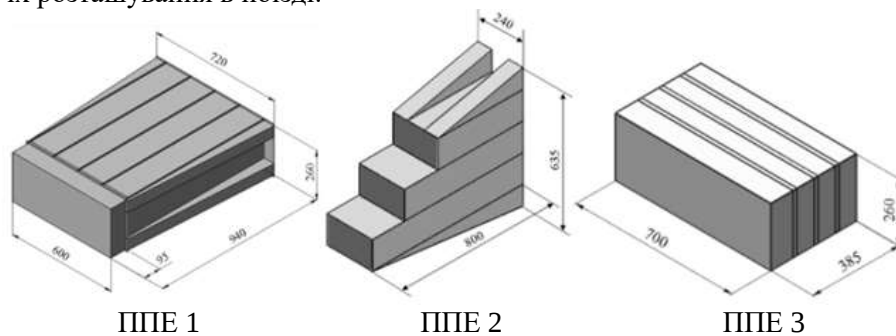
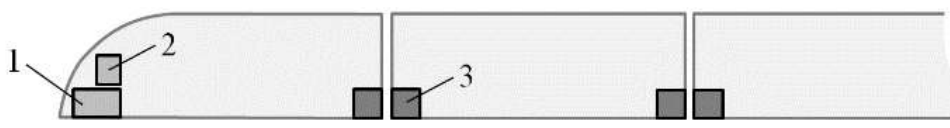


Рис. 8 – Конструкції пристроїв поглинання енергії для моторвагонного поїзда



- 1 – енергопоглинальні пристрої нижнього рівня (ППЕ 1);
- 2 – енергопоглинальні пристрої верхнього рівня (ППЕ 2);
- 3 – пристрої поглинання енергії нижнього рівня (ППЕ 3)

Рис. 9 – Схема розташування пристроїв поглинання енергії в моторвагонному поїзді

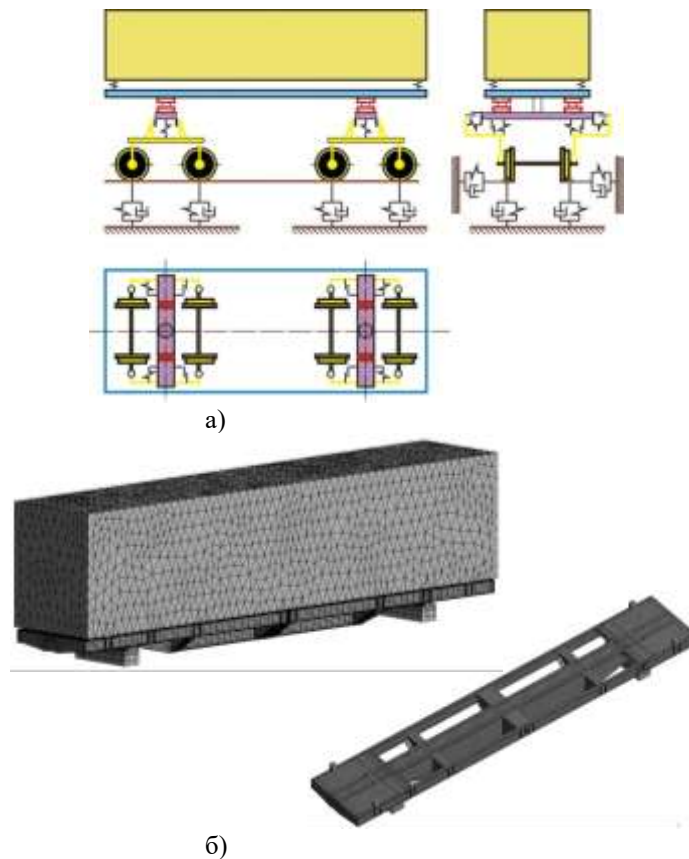
В результаті досліджень отримано параметри конструкцій ППЕ та шляхом виконання креш-тесту прототипу ППЕ для локомотива на випробувальному полігоні в м. Гьорліц (Німеччина) доведено відповідність розроблених пристроїв нормативним вимогам. На рис. 10 показано конструкцію прототипу ППЕ зі стільниковими елементами для локомотива в різні моменти випробування та після його завершення.



Рис. 10 – Креш-тест прототипу ППЕ для локомотива

В результаті математичного моделювання динаміки еталонних поїздів при аварійних зіткненнях доведено, що запропоновані пристрої дозволяють забезпечити захист пасажирів та обслуговуючого персоналу при аварійних зіткненнях згідно з вимогами ДСТУ EN 15227 [34]. Встановлено можливість використання різних матеріалів для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2 та ППЕ 3. Визначено геометричні параметри конструкцій розглянутих ППЕ, виготовлених зі сталі марки 08Ю, алюмінієвих сплавів АМг6 та АМг2 [22]. Розроблено рекомендації щодо пасивного захисту локомотива, головного вагона та проміжних вагонів пасажирських поїздів згідно з ДСТУ EN 15227 [17, 35]. Розроблені науково-методичне забезпечення, математичні моделі та рекомендації можуть бути використані на етапі проєктування головного вагона нового покоління згідно з вимогами ДСТУ EN 15227.

Вантажний вагон із змінними кузовами. Розроблено математичні моделі просторових коливань вантажного вагона зі змінними кузовами при експлуатаційних режимах руху та скінченно-елементні моделі для дослідження міцності його елементів при нормативних навантаженнях з урахуванням різних схем з'єднань кузова з рамою екіпажної частини вагона, наявності та відсутності зазорів в цих з'єднаннях. Відповідні розрахункові схеми вагона та його екіпажної частини показані на рис. 11.



- а) – дискретно-масова схема для дослідження просторових коливань вантажного вагона зі змінними кузовами при експлуатаційних режимах руху;
 б) – скінченно-елементна схема для дослідження міцності його елементів при нормативних навантаженнях

Рис. 11 – Розрахункові схеми вагона та його екіпажної частини

В результаті комплексу досліджень, проведених за допомогою цих моделей, визначено раціональну схему беззazorних з'єднань кузова з рамою екіпажної частини вагона [36]. Розподіл напружень в елементах рами екіпажної частини вагона для цієї схеми при максимальних навантаженнях згідно з ДСТУ EN 12663-2:2018 [37] показано на рис. 12.

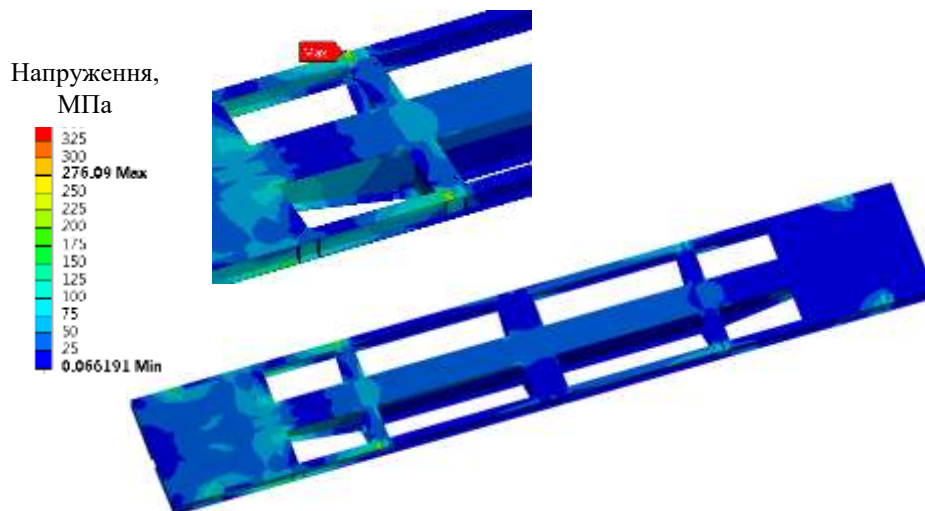


Рис. 12 – Розподіл напружень в елементах рами екіпажної частини вагона

Як видно з рис. 12, максимальний рівень еквівалентних напружень (291 МПа) не перевищує допустимого значення 325 МПа.

Розроблено пропозиції щодо перспективної вітчизняної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами, а також рекомендації щодо елементів кріплення [36], які забезпечують безпеку перевезень вантажів у вагонах зі змінними кузовами відповідно до вимог ДСТУ EN 12663-2:2018. При проектуванні вагонів зі змінними кузовами рекомендовано особливу увагу приділити розробці спеціальних роз'ємних беззazorних з'єднань кузова з екіпажною частиною вагона, які забезпечують його безпечну експлуатацію. Конструкції таких з'єднань залежать від типу екіпажної частини вагона, її вантажопідйомності, маси та габаритів змінного кузова. Якщо екіпажною частиною вагона є фітінгова платформа, а маси та габарити змінного кузова не перевищують маси та габаритів 45-футового контейнера, то достатньо чотирьох звичайних фітінгових з'єднань. Якщо маси та габарити змінного кузова перевищують масу та габарити 45-футового контейнера, потрібна установка на рамі екіпажної частини більшої кількості фітінгових упорів (доцільно їх робити відкидними), а на змінному кузові – фітінгів з додатковими затискними елементами, які дозволять зробити ці фітінгові з'єднання беззazorними. Якщо екіпажною частиною вагона не є фітінгова платформа, то беззazorне з'єднання змінних кузовів з рамою екіпажної частини може бути здійснено через передбачені в їх конструкціях спеціальні елементи з відповідними формами контактних поверхонь та додатково встановлені кріпильні елементи.

Висновки. Виконано цикл теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з вирішенням проблеми оновлення пасажирського та вантажного рухомого складу залізниць України з метою підвищення динамічних

якостей екіпажів, збільшення ресурсу ходових частин, зниження зносу елементів рухомого складу і колії.

З огляду на сучасні світові тенденції розвитку залізничних перевезень та орієнтуючись на євроінтеграцію України, на підставі результатів виконаних досліджень запропоновано низку нових конструкційних рішень стосовно елементів рухомого складу вітчизняних залізниць. Впровадження цих рішень дасть значний економічний ефект, дозволить підвищити швидкість і безпеку руху поїздів, покращити взаємодію ходових частин залізничних екіпажів з колією, сприятиме створенню сучасного вітчизняного залізничного комплексу та його інтеграції в європейські транспортні мережі.

Дослідження виконані за рахунок фінансування за бюджетною програмою «Підтримка розвитку пріоритетних напрямків наукових досліджень (КПКВК 6541230) на 2023 – 2024 роки».

1. Національна економічна стратегія 2030. URL: <https://nes2030.org.ua/#rec246067109> (дата звернення: 07.06.2021).
2. Курган Н., Возня Е. Повышение интероперабельности в международном железнодорожном сообщении Австрия – Словакия – Украина – Россия. Українські залізниці. 2014. № 12 (18). С. 24–33.
3. Колесная пара с раздвижными на оси колесами. URL: https://pikabu.ru/story/razdvizhnyie_kolyosnyie_paryi_6989147 (дата звернення 06.01.2020).
4. Xuel X., Ingleton S., Roberts J., Robinson M. Qualitative Comparison of the Characteristics of Articulated and Non-Articulated Trains and Their Effects on Impact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. 2011 January. Pp. 24–37. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT303>
5. Высокоскоростное движение. По материалам журналов La Vie du Rail. Железные дороги мира. 2009. № 7. С. 9–20.
6. Лунп А., Йон Д., Манглер Р. и др. Высокоскоростной поезд Velaro для России. Железные дороги мира. 2009. № 1. С. 36–50.
7. Универсальный скоростной электропоезд для железных дорог Испании. По материалам компании Talgo. Железные дороги мира. 2009. № 11. С. 37–40.
8. Wingler F. Crash-energy management, Part II. URL: <http://www.drwingler.com/wp-content/uploads/2016/08/Crash-Energy-Management.pdf> (дата звернення: 24.06.2024).
9. Alstom Coradia Regional Trains. URL: <https://www.railway-technology.com/projects/alstom-coradia-regional-trains/> (дата звернення: 24.06.2024).
10. Zderzenie dwóch pociągów w Warszawie. URL: <https://deon.pl/swiat/wiadomosci-z-polski/zderzenie-dwoch-pociagow-w-warszawie,278115> (дата звернення: 24.06.2024).
11. Innovations WASCOSA flex freight system® with timber cassette swap body. URL: https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/innovationen/inno_wascosa_flex_freight_system_timber_swap_body.pdf (дата звернення: 01.11.2023).
12. TransANT: инновационные грузовые вагоны. URL: <https://www.railway.supply/transant-innovacionnye-gruzovye-vagony/> (дата звернення: 08.05.2023).
13. Kiruna Wagon. URL: <https://kirunawagon.com/wagons/modular-system> (дата звернення: 08.05.2023).
14. Ушкалов В. Ф., Лашко А. Д., Мокрий Т. Ф. Модернизация тележек грузовых вагонов как вариант обновления ходовых частей грузового подвижного состава. Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 5. С. 8–15.
15. Markova O., Kovtun H., Maliy V. Modelling train motion along arbitrary shaped track in transient regimes. Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229(1). Pp. 97–105. <https://doi.org/10.1177/0954409713501806>
16. Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю. Математическая модель взаимодействия железнодорожного экипажа и пути с учетом распределения контактных сил по пятнам контакта. Техническая механика. 2015. № 2. С. 79–89.
17. Sobolevska M., Telychko I. Passive safety of high-speed passenger trains at accident collisions on 1520 mm gauge railways. Transport problems. 2017. V. 12. Issue 1. Pp. 51–62. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.5>
18. Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В. Износостойкий профиль колеса для грузового вагона с повышенной осевой нагрузкой. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 20–29. <https://doi.org/10.15407/itm2018.01.020>
19. Ushkalov V., Mokriy T., Malysheva I., Lapina L., Pasichnik S., Bezrukavyy N. Reduction of freight car wheel wear of 1520 mm gauge railways.. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020.V.985.012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012004>
20. Sobolevskaya M., Naumenko N., Gorobets D. Development of passive protection devices for a power head of a high-speed multiple unit train at its collisions according to DSTU EN 15227. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020.V.985/012016.. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012016>
21. Markova O., Kovtun H., Maliy V. Comparison of Articulated and Conventional Passenger Train Dynamic Characteristics at Various Motion Regimes. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. Pp. 217–228. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_23

22. *Соболевська М. Б., Горобець Д. В.* Рекомендації щодо виготовлення пристроїв пасивного захисту головного вагона з різних матеріалів. *Технічна механіка*. 2022. № 2. С. 101–114. <https://doi.org/10.15407/itm2022.02.101>
23. *Мокрій Т. Ф., Малишева І. Ю., Лапіна Л. Г., Безрукавий Н. В.* Профіль ободу коліс пасажирського вагона для умов спільної експлуатації на українських і європейських залізницях. *Технічна механіка*. 2022. № 4. С. 111–120. <https://doi.org/10.15407/itm2022.04.111>
24. *Olofsson U., Telliskivi T.* Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full-scale test and a laboratory study. *Wear*. 2003. № 254 (1-2). Pp. 80–93. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00291-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00291-0)
25. *Подъельников И. В.* Определение типовых форм изношенных профилей головок рельсов на криволинейных участках пути. *Техническая механика*. 2009. № 3. С. 39–43.
26. *Ушкалов В. Ф., Лапина Л. Г., Мащенко И. А.* Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов. *Залізничний транспорт України*. 2012. №1. С. 38–41.
27. *Bondarenko I., Lunys O., Neduzha L., Keršys R.* Dynamic track irregularities modeling when studying rolling stock dynamics. *Transport Means. Proceedings of the International Conference October*, 2019. Pp. 1014–1019.
28. *Лапіна Л. Г., Малишева І. Ю., Мокрій Т. Ф.* Дослідження можливості використання збурень, сформованих за записами нерівностей колії, для розрахунків динаміки швидкісного рейкового екіпажа. *Технічна механіка*. 2022. № 2. С. 115–122. <https://doi.org/10.15407/itm2022.02.115>
29. *Мокрій Т. Ф., Малишева І. Ю., Лапіна Л. Г., Пасічник С. С.* Взаємодія з рейками коліс пасажирського вагона з новим профілем ободу ІТМ-73ЕР в кривоолінійних ділянках колії. *Технічна механіка*. 2023. № 2. С. 84–90. <https://doi.org/10.15407/itm2023.02.084>
30. *Мокрій Т. Ф., Малишева І. Ю., Пасічник С. С.* Профіль обода коліс вантажного вагона з перспективними візками для умов спільної експлуатації на українських і європейських залізницях. *Технічна механіка*. 2023. № 4. С. 90–103. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.090>
31. *Markova O., Kovtun H., Maliy V.* Mathematical modeling of articulated passenger train spatial vibrations. *Technical Mechanics*. 2021. № 2. Pp. 91–99. <https://doi.org/10.15407/itm2021.02.091>
32. ДСТУ 7774:2015 Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахунку та проектування механічної частини вагонів. Чинний від 2016-04-01. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2017. 150 с.
33. ДСТУ EN 12663-1:2018 Залізничний транспорт. Вимоги до конструкції кузова залізничного транспортного засобу. Частина 1. Локомотиви та пасажирський рухомий склад (й альтернативний метод для вантажних вагонів) (EN 12663-1:2010 + A1:2014, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80589 (дата звернення: 24.06.2024).
34. ДСТУ EN 15227:2015 Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=74051 (дата звернення: 24.06.2024).
35. *Sobolevska M., Horobets D.* The passive safety system of a high-speed multiple-unit train. *MATEC Web of Conferences* 390, 02002 (2024) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002002> EOT-2023. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2024/02/mateconf_eot24_02002.pdf (дата звернення: 10.07.2024). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002002>
36. *Соболевська М. Б., Горобець Д. В.* Особливості кріплення кузова до екіпажної частини вантажного вагона зі змінними кузовами. *Технічна механіка*. 2023. № 4. С. 76–89. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.076>
37. ДСТУ EN 12663-2:2018 Залізничний транспорт. Конструкційні вимоги до кузовів залізничних транспортних засобів. Частина 2. Вантажні вагони (EN 12663-2:2010, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81572 (дата звернення: 15.07.2024).

Отримано 15.07.2024,
в остаточному варіанті 20.09.2024