

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗБУРЕНЬ, СФОРМОВАНИХ ЗА ЗАПИСАМИ НЕРІВНОСТЕЙ КОЛІЇ, ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ДИНАМІКИ ШВИДКІСНОГО РЕЙКОВОГО ЕКІПАЖА

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: lglapina18@gmail.com*

Актуальною задачею, що постане перед Україною в період повоєнного відновлення країни, буде осучаснення всієї системи залізничних перевезень, зокрема розвиток швидкісного пасажирського сполучення. Проведення розрахунків щодо прогнозу динамічної поведінки залізничних екіпажів при високих швидкостях руху потребує формування нових масивів вхідних даних (збурень з боку колії), які враховують більш жорсткі вимоги до геометричних параметрів колії.

Метою роботи є визначення можливості використання записів нерівностей, отриманих на реальних ділянках українських залізниць, для побудови складових збурень, що діють на рейковий екіпаж з боку колії під час руху з високими швидкостями.

У статті, що представляється, детально розглянуто нормативи щодо геометричних параметрів колії, придатної для організації швидкісного руху поїздів. Дані містяться в стандарті ДСТУ EN 13848-5:2018 – європейському стандарті, прийнятому в Україні як національний методом підтвердження. За записами осідань і нерівностей в плані рейкових ниток, зареєстрованих колісвимірвальним вагоном на низці ділянок Придніпровської залізниці під час планової перевірки стану колії, сформовано процеси фактичних вертикальних і горизонтальних нерівностей. Якісний стан аналізованих ділянок був таким, що обмеження швидкості руху по них не вимагалось. Обчислено параметри нерівностей на цих ділянках, регламентовані нормативною частиною ДСТУ EN 13848-5:2018. Порівняння отриманих значень параметрів з нормативними показало, що серед розглянутих ділянок існує певна кількість таких, що задовольняють вимогам стандарту до геометрії колії і дозволяють рух поїздів зі швидкостями принаймні до 230 км/год. Використання нерівностей на обраних ділянках колії як складових збурень при розрахунках протестовано на прикладі визначення основних показників динамічних якостей стандартного пасажирського вагона з візками КВЗ-ЦНІІ-М. Результати розрахунків показали можливість застосування сформованих збурень при чисельних дослідженнях динамічної поведінки екіпажів при підвищених швидкостях руху і в той же час підтвердили необхідність розробки нових технічних рішень щодо конструкції рухомого складу, придатного для експлуатації з такими швидкостями.

Ключові слова: швидкісний рух, нерівності залізничної колії, нормативний документ, показники динамічних якостей.

An urgent task for Ukraine during the post-war reconstruction of the country will be the upgrade of the entire railway transportation system, in particular the development of high-speed passenger traffic. The prediction of the dynamic performance of high-speed rail vehicles calls for the formation of new input arrays (track-induced disturbances) that would account for more stringent track geometry requirements.

The aim of this work is to study the possibility of using track irregularities recorded in real sections of the Ukrainian railways to construct the components of track-induced disturbances acting on a rail vehicle moving at a high speed.

This paper considers in detail standard specifications for the geometric parameters of a track suitable for high-speed traffic. The data are contained in the Standard DSTU EN 13848-5:2018, which is a European standard adopted in Ukraine as a national one by confirmation. Using the track subsidence and alignment irregularities recorded by a track measurement car in a number of sections of the Pryndiprovsk railway during a scheduled track inspection, processes of actual vertical and horizontal irregularities were formed. The quality of those sections had not require any speed limitation. Irregularity parameters for those sections were calculated. A comparison between the calculated parameters and those specified by the DSTU EN 13848-5:2018 showed that among the sections considered there exist ones that meet the track geometry requirements and allow speeds at least up to 230 km/h. The use of the irregularities in the selected track sections as disturbance components in calculations was tested by the example of determining the ride performance of a standard passenger car with KVZ-TsNII-M trucks. The calculated results showed the possibility of using the generated disturbances in numerical calculations of the dynamic performance of rail vehicles at increased speeds and at the same time confirmed the need for new engineering solutions on the design of rail vehicles capable of operating at such speeds.

Keywords: high-speed traffic, track irregularities, normative document, dynamic performance indices.

Актуальною задачею, що постане перед Україною в період повоєнного відновлення країни, буде осучаснення всієї системи залізничних перевезень, зокрема розвиток швидкісного пасажирського сполучення. Розробка нових і істотна модернізація існуючих одиниць рухомого складу включає проведення

розрахунків щодо прогнозу динамічної поведінки залізничних екіпажів, а для самих цих розрахунків невід’ємною складовою частиною є коректно сформовані вхідні збурення, які визначають вплив колії на екіпаж у вертикальній та горизонтальній площинах і викликають його просторові коливання. При дослідженнях в часовій області як складові збурення використовують або фактичні нерівності рейкових ниток на реальних ділянках колії, або певні математичні моделі, що відображають і узагальнюють геометричні параметри нерівностей на таких ділянках.

Варто зазначити, що впровадження швидкісного руху поїздів висуває більш жорсткі умови до геометричних параметрів рейкової колії, ніж ті, що є чинними при русі зі звичайними швидкостями. Тому масиви даних або математичні моделі збурень, побудовані раніше, очевидно, не можуть безпосередньо бути використані при дослідженнях динаміки швидкісних екіпажів. Для цього мають бути сформовані інші процеси, і першочерговим етапом побудови збурень є аналіз нерівностей колії.

Нормативи щодо геометричних параметрів колії при швидкісному русі поїздів. З 2019 р. в Україні є чинним стандарт ДСТУ EN 13848-5:2018 [1] (європейський стандарт, прийнятий як національний методом підтвердження). В європейських країнах цей стандарт є частиною серії EN 13848 – основного нормативного документу, який присвячений якості в галузі залізничного транспорту і регламентує геометричні параметри колії, встановлює вимоги до її стану та визначає пов’язані з безпекою межі параметрів для швидкостей руху до 300 км/год. EN 13848 застосовується до швидкісної і звичайної лінії шириною 1435 мм і більше за умови, що транспортні засоби, які на ній експлуатуються, відповідають європейським стандартам безпеки.

В зазначеному документі розглядаються такі види нерівностей:

- ширина колії – найменша відстань між двома рейками, виміряна на відстані 14 мм від поверхні кочення головок рейок;
- нерівності поздовжнього рівня – нерівності колії у вертикальному напрямку, що визначаються як середнє вертикальних відхилень обох рейкових ниток;
- нерівності в бічному напрямку – середнє значення бічних відхилень обох рейкових ниток від номінального центра колії;
- нерівності між рівнями – різниця в висоті між рейковими нитками.

Такий набір нерівностей є еквівалентним іншому набору з чотирьох складових – вертикального і горизонтального відхилень правої та лівої рейкових ниток. Ці набори нерівностей є взаємозамінними, а вибір набору для формування складових збурень при розрахунках зумовлений особливостями використовуваної математичної моделі і програмного продукту, що цю модель реалізує.

Залежно від величини нерівностей встановлено три категорії якості ділянок колії:

- ділянки, на яких відбувається спостереження і обслуговування в рамках планування нормальної роботи (в стандарті позначається AL (*Alert limit*));
- ділянки, на яких необхідно вжити негайних заходів щодо обслуговування (позначається IL (*Intervention limit*));
- ділянки з гранично допустимим рівнем нерівностей (IAL (*Immediate action limit*)).

Стандарт [1] складається з нормативної та інформативної частин. Нормативна частина дає гранично допустимі значення (IAL) таких параметрів колії:

- для змінення ширини колії – величини ізольованих нерівностей і відхилень від середнього на ковзному відрізку довжиною 100 м, при цьому наведені в стандарті значення від розрахункової ширини колії не залежать;

- для нерівностей поздовжнього рівня – значення в діапазонах довжин нерівностей від 3 м до 25 м (діапазон D1) і від 25 м до 70 м (діапазон D2). Нерівності більшої довжини стандартом не регламентуються, оскільки вважається, що вони не впливають на безпеку руху;

- для нерівностей в бічному напрямку – значення в діапазонах D1 і D2;

- для нерівностей між рівнями рейкових ниток в нормативній частині стандарту допустимих значень не наведено. Замість цього регламентується пов'язане із зазначеними нерівностями значення скручування (*twist*), яке визначається різницею між двома значеннями нерівностей між рівнями, взятими на заданій відстані l одне від одного. Значення l для кожної мережі залізниць встановлюється її менеджментом і може становити від 1,3 м до 20 м. На багатьох європейських залізницях вважається $l = 3$ м.

В інформативній частині наведено значення тих же параметрів для ділянок кращого стану – IL та AL , а також орієнтовні значення середньоквадратичного відхилення нерівностей для колії стану AL .

Всі допустимі згідно з нормативною частиною [1] значення геометричних параметрів колії для швидкостей руху понад 120 км/год зведено в табл. 1.

Табл. 1 – Допустимі значення геометричних параметрів нерівностей колії

Найменування параметра	Допустиме значення параметра для швидкості руху V , км/год			
	від 121 до 160	від 161 до 200	від 201 до 230	від 231 до 300
Відхилення пікового значення ширини колії від номінального (мінімум / максимум), мм	-10 / +35	-7 / +28	-7 / +28	-5 / +28
Відхилення середнього значення ширини колії на відрізку 100 м від номінального (мінімум / максимум), мм	-5 / +20	-5 / +20	-5 / +20	-3 / +20
Ізольована нерівність поздовжнього рівня в діапазоні D1, мм	23	20	20	16
Ізольована нерівність поздовжнього рівня в діапазоні D2, мм	–	33	33	28
Ізольована нерівність в бічному напрямку в діапазоні D1, мм	14	12	12	10
Ізольована нерівність в бічному напрямку в діапазоні D2, мм	–	24	24	20
Скручування, мм/м	7	7	5	5

Аналіз нерівностей на реальних ділянках колії. Припустимо, що серед діючих ділянок колії українських залізниць існують такі, нерівності на яких відповідають вимогам стандарту [1]. Записи нерівностей, отримані на таких ділянках, можливо було б використовувати при формуванні складових збурень для прогнозних розрахунків коливань екіпажів, що рухаються з високи-

ми швидкостями. Найпоширенішим способом отримання процесів таких нерівностей є використання записів колієвимірювального вагона (КВ).

Для вибору ділянок колії, нерівності на яких можуть розглядатися як потенційні вихідні дані при формуванні складових збурення, проаналізовано низку записів показань КВ, зареєстрованих під час планової перевірки стану магістральної колії на прямолінійних ділянках Придніпровської залізниці. Якісний стан цих ділянок згідно з чинними нормативами [2] за сумою балів за всі відхилення від норм утримання рейкової колії оцінюється як відмінний, отже обмеження швидкості руху не вимагається. Обрані ділянки колії перевірено на відповідність нерівностей на них нормативній частині стандарту [1].

Оскільки в силу особливостей вимірювальних систем КВ зареєстровані ним записи осідань і нерівностей в плані кожної з рейкових ниток відрізняються від відповідних фактичних вертикальних і горизонтальних нерівностей і формою, і величиною, зазначені записи було перетворено за допомогою відповідних передавальних функцій [3]. З отриманих таким чином фактичних нерівностей колії для кожної з ділянок сформовано по 5 процесів, а саме:

- нерівності поздовжнього профілю колії $\eta_{вп}^+$ (де n – позначення ділянки), які в кожній точці вимірювань x обчислюються як $(\eta_{вп}^n(x) + \eta_{вп}^l(x))/2$, де $\eta_{вп}^n(x)$ і $\eta_{вп}^l(x)$ – фактичні вертикальні нерівності правої та лівої рейкових ниток відповідно;

- нерівності між рівнями $\eta_{вп}^-$, які обчислюються як $\eta_{вп}^n(x) - \eta_{вп}^l(x)$;

- нерівності в бічному напрямку $\eta_{гп}^+$, які обчислюються як $(\eta_{гп}^n(x) + \eta_{гп}^l(x))/2$, де $\eta_{гп}^n(x)$ і $\eta_{гп}^l(x)$ – фактичні нерівності в плані правої та лівої рейкових ниток відповідно;

- змінення ширини колії $\eta_{гп}^-$, яке обчислюється як $\eta_{гп}^n(x) - \eta_{гп}^l(x)$;

- скручування $\eta_{гп}$, яке обчислюється як $(\eta_{вп}^n(x) - \eta_{вп}^l(x + l))/l$ при $l = 3$ м.

Для виділення нерівностей довжиною від 3 м до 25 м та від 25 м до 70 м (тобто в діапазонах D1 и D2) процеси $\eta_{вп}^+$ і $\eta_{гп}^+$ пропущено через смугові фільтри.

Для кожної з ділянок визначено значення геометричних параметрів нерівностей колії, регламентовані [1]. Порівняння отриманих значень з наведеними в табл. 1 нормативними показало, що серед розглянутих ділянок існують такі, нерівності на яких дозволяють рух зі швидкостями принаймні до 230 км/год. Таких ділянок в аналізованій сукупності виявилось одинадцять. На дев'яти з них значення нерівностей дозволяють рух зі швидкостями до 300 км/год. Рівень нерівностей на цих ділянках є таким, що згідно з нормативами [2] осідання мають відхилення від норм утримання рейкової колії лише I ступеня, нерівності в плані – не вище II, причому перевищення межі, встановленої для I ступеня, є незначним. Окремо слід зазначити, що рівень параметрів вертикальних нерівностей на всіх аналізованих ділянках є досить низьким порівняно з нормативними значеннями (не перевищує 35 % від наведених в табл. 1) на відміну від нерівностей в горизонтальній площині, значення параметрів яких здебільшого близькі до нормативних.

Формування складових збурень та їх апробація. Для оцінки можливості використання нерівностей на обраних ділянках колії при прогнозуванні динамічної поведінки екіпажів, що рухаються з високими швидкостями, проведено низку розрахунків з визначення основних показників динамічних якостей стандартного пасажирського вагона з візками КВЗ–ЦНИИ–М. Для розрахунків використовувалась математична модель екіпажа, що рухається по пружнодисипативній інерційній колії довільного окреслення в плані [4]. При побудові розрахункової схеми пасажирського вагона взято до уваги його конструктивні особливості: передача навантажень від кузова на ходові частини здійснюється через бокові ковзуни на надресорну балку, яка через центральне підвішування опирається на жорстку раму візка, зв'язану з колісними парами через буксове підвішування; поздовжні навантаження від кузова на візок передаються через жорсткий шворінь, що з'єднує підп'ятник візка з п'ятником кузова. Збурення подається на входи системи (колеса рейкового екіпажу) з транспортним запізнюванням, яке залежить від відстані між колісними парами та швидкості руху.

Визначались максимальні значення таких показників: вертикальних $\ddot{Z}_{\Pi}$ і горизонтальних $\ddot{Y}_{\Pi}$ прискорень п'ятника кузова в долях прискорення вільного падіння g ; коефіцієнта вертикальної динаміки $K_{\text{дв}}$; рамних сил H_P в долях статичного навантаження на вісь P_0 ; показників плавності ходу вагона у вертикальному та горизонтальному поперечному напрямках W_v та W_r . Розрахунки проводились для руху вагона прямими ділянками колії з постійними швидкостями V від 100 км/год до 200 км/год. Профіль ободу колеса задавався стандартним. Колеса розглядалися як незношені, так і зношені до товщини гребеня 30 мм (найменшої допустимої для пасажирських вагонів при $V > 160$ км/год [5]), рейки – незношені Р65.

Збурення, що діє на вагон з боку колії, включало такі 4 складові:

- симетричну вертикальну нерівність, що обчислюється як напівсума фактичних нерівностей правої і лівої рейкових ниток (еквівалентну визначеним вище нерівностям поздовжнього профілю $\eta_{\text{вл}}^+$);

- кососиметричну вертикальну нерівність, що обчислюється як напіврізниця фактичних нерівностей правої і лівої рейкових ниток (тобто $\eta_{\text{вл}}^- / 2$);

- дві горизонтальні складові, що є фактичними нерівностями в плані правої і лівої рейкових ниток.

Отримані результати розрахунків для обраних одинадцяти ділянок колії наведено на рис. 1 (незношені колеса) і рис. 2 (зношені). Також на цих рисунках показано нормативні значення показників динаміки для відмінної, доброї та задовільної якості ходу вагона [6] і показників плавності ходу з оцінками «дуже добре», «добре» і «граничне» [7].

Результати розрахунків показали, що значення показників динаміки вагонів у вертикальній площині ($\ddot{Z}_{\Pi}$, $K_{\text{дв}}$ і W_v) на всіх розглянутих ділянках досить близькі між собою і нижчі за нормативне значення для відмінної (або

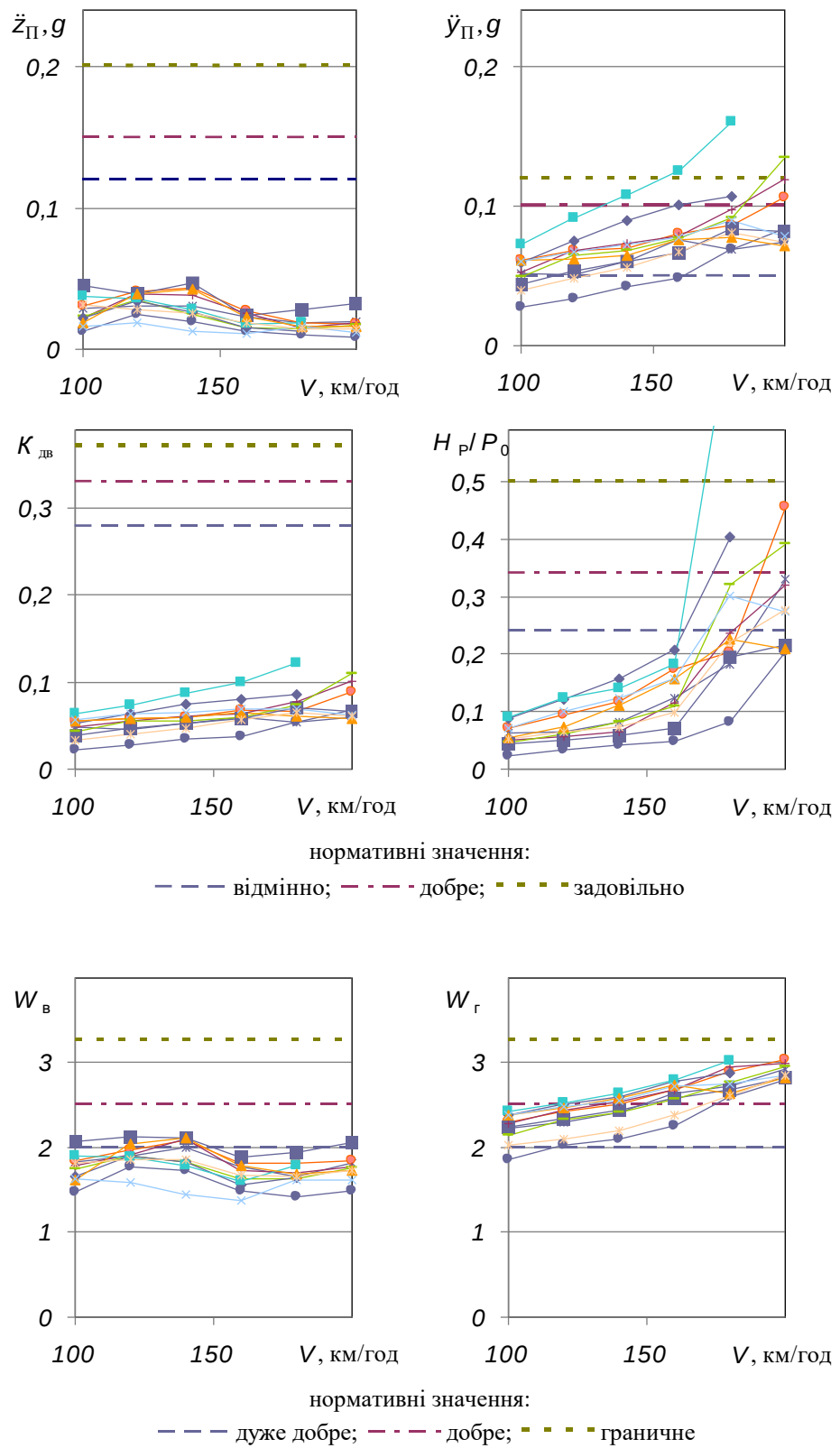


Рис. 1

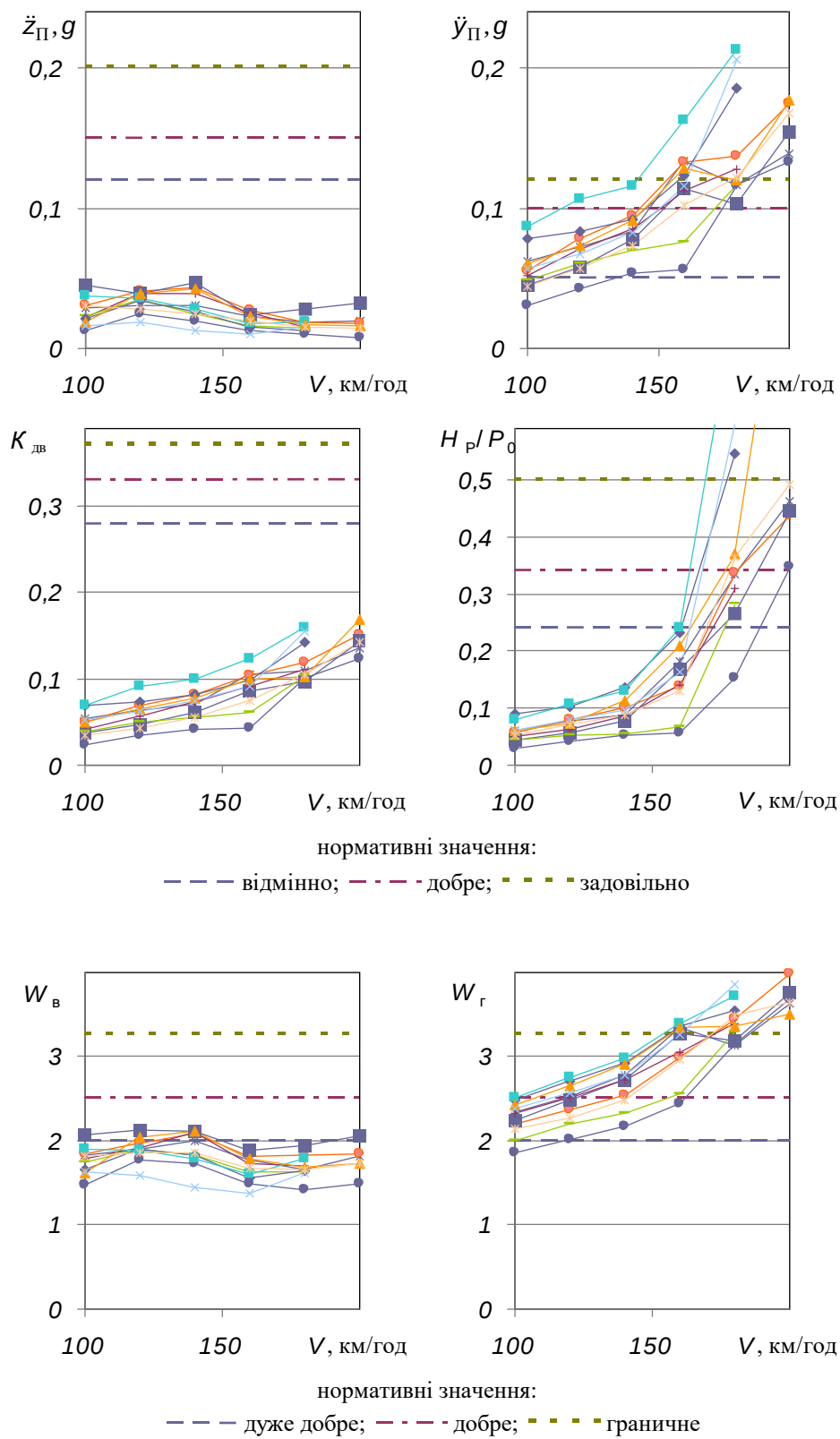


Рис. 2

«дуже доброї» у випадку W_b) якості ходу при всіх швидкостях руху вагонів як з новими, так і зі зношеними колесами. Такі результати для показників динамічних якостей у вертикальній площині є цілком очікуваними, оскільки значення вертикальних нерівностей на обраних ділянках є досить низькими.

Значення горизонтальних прискорень п'ятника кузова $\ddot{y}_\Pi$ і рамних сил H_P/P_0 вагона з незношеними колесами лежать в допустимих межах для доброго ходу при всіх розглянутих швидкостях руху на всіх ділянках, крім однієї. У випадку використання зношених коліс має місце перевищення нормативних значень показників $\ddot{y}_\Pi$ і H_P/P_0 для задовільного ходу при швидкостях руху вагона $V > 160$ км/год на трьох ділянках, а при $V = 200$ км/год – на всіх ділянках. Аналогічна картина спостерігається і для показника плавності ходу у горизонтальному напрямку W_g .

Важливо зазначити, що при швидкості руху вагона понад 160 км/год на п'яти з 11 ділянок в системі «екіпаж – колія» відбувається різке зростання сил взаємодії, що може призвести до сходу з рейок. Оскільки на аналізованих ділянках колії рівень окремих нерівностей згідно зі стандартом [1] є допустимим для руху з високими швидкостями і відсутнє несприятливе поєднання нерівностей різних видів, то таке зростання зумовлене втратою стандартним вагоном стійкості ходу. Для його пристосування до умов руху зі швидкостями вище 160 км/год необхідна модернізація конструкції ходових частин з метою підвищення запасу стійкості ходу екіпажа.

Висновки. Аналіз фактичних нерівностей колії на діючих ділянках українських залізниць показав, що існують такі ділянки, нерівності на яких відповідають вимогам, передбаченим нормативною частиною стандарту ДСТУ EN 13848–5:2018 при організації швидкісного руху поїздів. Сформовані на базі цих нерівностей збурення можуть бути застосовані як вхідні дані при чисельних дослідженнях динамічної поведінки рейкових екіпажів при підвищених швидкостях руху. Показано, що пристосування стандартного пасажирського вагона до умов руху зі швидкостями понад 160 км/год потребує модернізації конструкції ходових частин з метою підвищення запасу стійкості його ходу.

1. ДСТУ EN 13848–5:2018 (EN 13848–5:2017, IDT). Залізничний транспорт. Колія. Властивості геометрії колії. Частина 5. Геометричні порівняльні властивості. Проста лінія. 2018.
2. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП–0267 : Затв. наказом Укрзалізниці № 033–Ц від 01.02.2012 р. / М–во інфраструктури України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління колійного господарства ; розроб. Рибкін В. В., Патласов О. М. К.: Поліграфсервіс, 2012. 46 с.
3. Ушкалов В. Ф., Лапина Л. Г., Мащенко П. А. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов. Залізничний транспорт України. 2012. № 1. С. 38–41.
4. Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Мальшева И. Ю. Математическая модель взаимодействия железнодорожного экипажа и пути с учетом распределения контактных сил по пятнам контакта. Техническая механика. 2015. № 2. С. 79–89.
5. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: ЦВ–ЦІ–0062. – Затв. «Укрзалізниця» 01.04.05 р. вид. офіц. К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс». 2006. 102 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
7. СОУ МПП 45.060–204:2007. Вагони пасажирські. Плавність руху. Методи визначення. Чинний від 2007–12–24. К.: Мінпромполітики України, 2007. 12 с.

Отримано 30.05.2022,
в остаточному варіанті 14.06.2022