

УДК 625.143.482

**ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОПЕРЕЧНИХ СИЛ У КРИВИХ,
У ЗОНАХ НЕРІВНОСТЕЙ ЛАНОК КОЛІЇ**

Д-р техн. наук **О. М. Даренський**, Ю. Л. Тулей («Південна залізниця»),
канд. техн. наук О. О. Овчинников, асп. Я. С. Лейбук

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ В
КРИВЫХ, В ЗОНАХ НЕРОВНОСТЕЙ ЗВЕНЬЕВ ПУТИ**

Д-р техн. наук **А. Н. Даренский**, Ю. Л. Тулей («Южная железная дорога»),
канд. техн. наук А. А. Овчинников, асп. Я. С. Лейбук

**NUMERICAL INVESTIGATIONS OF DYNAMIC TRANSVERSE FORCES IN CURVES,
IN THE ZONES OF RAILS VARIETIES**

D. Sc. (Tech.) **A. N. Darenskiy**, Y. L. Tuley (“Southern Railway”),
PhD (Tech.) A. A. Ovchynnikov, Postgraduate student Y. S. Leibuk

Метою роботи є виявлення числовими методами причин інтенсивного бічного зносу рейок та інших відмов колії в кривих малого радіуса. Дослідження проведені для найбільш масового типу рухомого складу – чотиривісних вантажних вагонів на візках ЦНДІ-ХЗ, перевезення яких складають 75-90 % вантажонапруженості ділянок колії. Таким чином, вплив саме таких вагонів і є основними причинами зазначених розладів. Для вирішення

поставленого завдання в роботі було проведено дослідження впливу на динамічні процеси взаємодії колії та рухомого складу показників плану колії.

Ключові слова: залізнична колія, криві, бічний знос рейки, числові дослідження.

Целью работы является выявление численными методами причин интенсивного бокового износа рельсов и других отказов пути в кривых малого радиуса. Исследования проведены для наиболее массового типа подвижного состава – четырехосных грузовых вагонов на тележках ЦНИИ–ХЗ, перевозки которых составляют 75-90 % грузонапряженности участков пути. Следовательно, воздействие именно таких вагонов и является основными причинами указанных расстройств. Для решения поставленной задачи в работе было проведено исследование влияния на динамические процессы взаимодействия пути и подвижного состава характеристик плана пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, кривые, боковой износ рельсов, численные исследования.

The purpose of the work is to identify, by numerical methods, the causes of intensive lateral wear of rails and other bounces of the track in curves of small radius. The research has been carried out for the most mass type of rolling stock of four-wheel freight cars on the carriages TsNII-Ch3, whose transportation is 75-90% of freight tight sections of the track. Consequently, the effect of such cars is the main causes of these disorders. In order to solve the problem in the work, the influence of the dynamic processes of the interaction of the track and the rolling stock on the following parameters of the road plan was studied: - the influence of the curves' radii, the outstanding accelerations and the width of the track; influence of local smooth and smooth inequalities of the track in terms of. In this work was to study the effect on the dynamic processes of interaction track and rolling stock the following characteristics of the way the plan: the effect of curve radius, outstanding acceleration and track width; the impact of local butt and smooth irregularities in terms of the way. The results of numerical studies. A mathematical model of the spatial dynamic system "crew-path" has been used to perform research. It is based on the design scheme of the path, in the form of beams of long rails, which are based on many elastic-dissipative-sleepers support with non-linear characteristics. This model is implemented in the program Mathcad system. Determined by the direction and lateral forces when driving on curved four-freight wagons 12-1000 model. Change settings such as the curves of the track radii, outstanding acceleration values, the value of the external elevation of rails and track width. Furthermore, it was examined the influence of faults such as unevenness in isolated smooth plane "corners" in the joints, and short isolated irregularities. The obtained data was determined total wear factor of the horizontal rail heads, allows for the impact on the path and the condition of the contacting wheel flanges and rails.

Keywords: railway track, curves, lateral rail wear, numerical research.

Вступ. Ділянки колії в кривих малого радіуса (менше 400 м) істотно відрізняються від інших ділянок значною кількістю технічних відмов, у тому числі бічним зносом головок рейок, розладами в плані і розширеннями рейкової колії. Незважаючи на те, що загальна протяжність кривих з радіусами менше 400 м становить близько 2,5 % загальної протяжності головних колій магістральних

залізниць України, вихід рейок через дефект 44 становить до 23 % загальної кількості вилучених рейок за рік.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основний діючий нормативний документ [2], відповідно до якого повинні виконуватися розрахунки колії на міцність і стійкість, базується на квазістатичному способі розрахунків на дію вертикальних сил. Вплив горизонтальних поперечних

сил, у тому числі в кривих, на величину нормальних напружень у крайках головки і підшви рейки враховується за допомогою поправкових коефіцієнтів, що залежать від типу рухомого складу і радіусів кривих. Визначення цих коефіцієнтів базується на методах розрахунку вписування рухомого складу в колові криві, основи якого були розроблені на початку ХХ ст. У таких розрахунках не враховувався той факт, що лінійна швидкість руху екіпажа і лінійна швидкість на поверхні бандажа обертового колеса різні. Ця різниця, як показав професор М. Ф. Веріго [3], дала помилку у визначенні кута вектора швидкості ковзання колеса по рейці до 63 %.

Навіть більше, у розрахунках за зазначеним методом не враховувалися сили інерції необресорених мас колісних пар і візків, які можуть перевершувати напрямні сили в кілька разів. У роботі [4] зроблена спроба урахування цих сил методами квазістатичного вписування в плавні ізольовані нерівності колії в плані в прямих ділянках колії, однак передбачалося, що гребені коліс не втрачають контакт з робочою гранню зовнішньої рейки нерівності. Тим часом у місцях деяких нерівностей гребені втрачають контакт з рейкою, потім ударом його відновлюють і збуджують горизонтальні поперечні коливання необресореної маси рухомого складу і рейкошпальної решітки.

Методи визначення горизонтальних поперечних сил у кривій отримали подальшого розвитку у роботах [3, 5, 9, 10, 12], у яких методами статистичної динаміки і теорії випадкових функцій визначалися вертикальні і горизонтальні поперечні сили взаємодії рухомого складу та колії. Однак в основу були покладені математичні моделі, у яких коливання екіпажа розкладено на дві незалежні групи – вертикальні і горизонтальні. Результати розрахунків об'єднувалися з використанням принципів суперпозиції. Колія розглядалася як балка, що лежить на суцільній пружній основі і має постійні по довжині масу, жорсткість і демпфування, прив'язані до нейтральної осі

рейки. Однак більш пізні дослідження [1] показали, що в деяких умовах експлуатації, наприклад у кривих малих радіусів, принцип суперпозиції не застосовують.

Слід підкреслити, що, на думку ряду авторів [6, 7, 11, 13], застосування розрахункових схем колії у вигляді балки на пружній основі було викликано обчислювальними труднощами за відсутності достатньо потужних обчислювальних засобів. Тим часом застосування такої схеми може давати суттєві похибки в розрахунках [1]. Наприклад, величина згинального моменту в рейках може бути на 12 % менше, ніж у реальних умовах.

З урахуванням викладеного, у роботі [1] представлена математична модель просторової динамічної системи «екіпаж-колія», в основу якої покладена розрахункова схема колії, у вигляді балок рейок великої довжини, які спираються на велику кількість пружно-дисипативних опор-шпал з нелінійними характеристиками. Крім того, принцип суперпозиції в динамічній підсистемі «екіпаж» не застосовувався. Математична модель реалізована в програмній системі Mathcad.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є виявлення числовими методами причин інтенсивного бічного зносу рейок та інших відмов колії в кривих малого радіуса. Дослідження проведено для найбільш масового типу рухомого складу – чотиривісних вантажних вагонів на візках ЦНДІ-ХЗ, перевезення яких складають 75-90 % вантажонапруженості ділянок колії. Отже, вплив саме таких вагонів і є основними причинами зазначених розладів.

Для вирішення поставленого завдання в роботі було проведено дослідження впливу на динамічні процеси взаємодії колії та рухомого складу таких показників плану колії:

- вплив радіусів кривих, непогашених прискорень і ширини колії;
- вплив локальних стикових і плавних нерівностей колії в плані.

Основна частина дослідження. У кривих малого радіуса через недостатню згинальну жорсткість стикових накладок практично повсюдно діють відступи у вигляді «кутів» у плані. Значення цих «кутів» знаходяться в межах від $0,2^0$ до 2^0 залежно від типу стикових накладок (чотири- або шестидіркові) і величини натягу стикових болтів [5].

Для виявлення впливу цих відступів були проведені числові дослідження при русі чотиривісного вантажного вагона по

кривій з радіусом 300 м. Величина непогашеного прискорення у всіх випадках була прийнята рівною $0,4 \text{ м/с}^2$, швидкість руху – $17,7 \text{ м/с}$ при величині підвищення зовнішньої рейки 100 мм і $20, 25 \text{ м/с}$ при підвищенні 150 мм. Величина кута в стикі приймалася рівною від $0,25^0$ до $2,0^0$, що дозволило виявити вплив цього параметра на процеси динаміки. Результати наведено в табл. 1. Приклад графіка змін горизонтальних поперечних бічних сил першої за ходом руху колісної пари – рис. 1, 2.

Таблиця 1

Екстремальні значення напрямних і бічних сил за наявності стикових нерівностей

Підрейкова основа	Швидкість руху, м/с	Підвищення зовнішньої рейки, мм	Кут у стикі, град	Значення поперечних сил, кН			Сумарний чинник зносу, кН рад
				Напрявні сили	Зовнішня рейка	Внутрішня рейка	
Дерев'яні шпали, скріплення ДО	17,7	100	0,25	15,5	20,1	-8,6	2,340
	17,7	100	0,5	25,5	29,5	-14,6	2,5703
	17,7	100	0,75	50,2	41,3	-16,6	3,4705
	17,7	100	1,5	64,3	65,4	-20,3	4,1704
	17,7	100	1,75	84,6	87,7	-27,3	5,4062
	17,7	100	2,0	106,6	120,2	-39,8	5,4067
	20,25	150	2,0	52,3	61,3	-26,2	4,167
Залізобетонні шпали Ш 1-1, СКД-Б	17,7	100	0,25	19,6	27,6	-9,2	2,750
	17,7	100	0,5	29,2	38,4	-16,5	2,985
	17,7	100	1,5	79,6	185,4	-24,5	5,112
	17,7	100	2,0	120,5	137,4	-41,5	6,65

Знак «-» у таблиці показує напрям дії сили – всередину кривої.

Дані таблиці показують, що збільшення кутів у стикі колії на дерев'яних шпалах за інших рівних умов викликає зростання поперечних сил і сумарного чинника зносу. При зміні кутів від $0,25^0$ до $2,0^0$ напрямні сили зростають у 6,87 разу, бічні – 5,98 разу, сумарного чинника зносу – у 2,37 разу.

Використання залізобетонних шпал зі скріпленням СКД65-Б викликає зростання

горизонтальних поперечних сил до 120 кН для напрямних і до 137 кН для горизонтальних поперечних сил. Сумарний чинник зносу рейок збільшується на 38 %. Взаємодія гребеня колеса з головкою рейки носить яскраво виражений ударний характер (рис. 1).

Таким чином, у стиках, навіть при шестидіркових накладках і високоміцних болтах, виникають кути $0,25^0$. За інших

умов значення цих кутів можуть досягати $2,0^{\circ}$. При швидкостях руху 60–70 км/год чинник зносу збільшується майже в 3 рази. Зменшити ці значення можна, зменшуючи

згинальну жорсткість стику. Корисно також зменшення горизонтальної поперечної жорсткості рейкових опор.

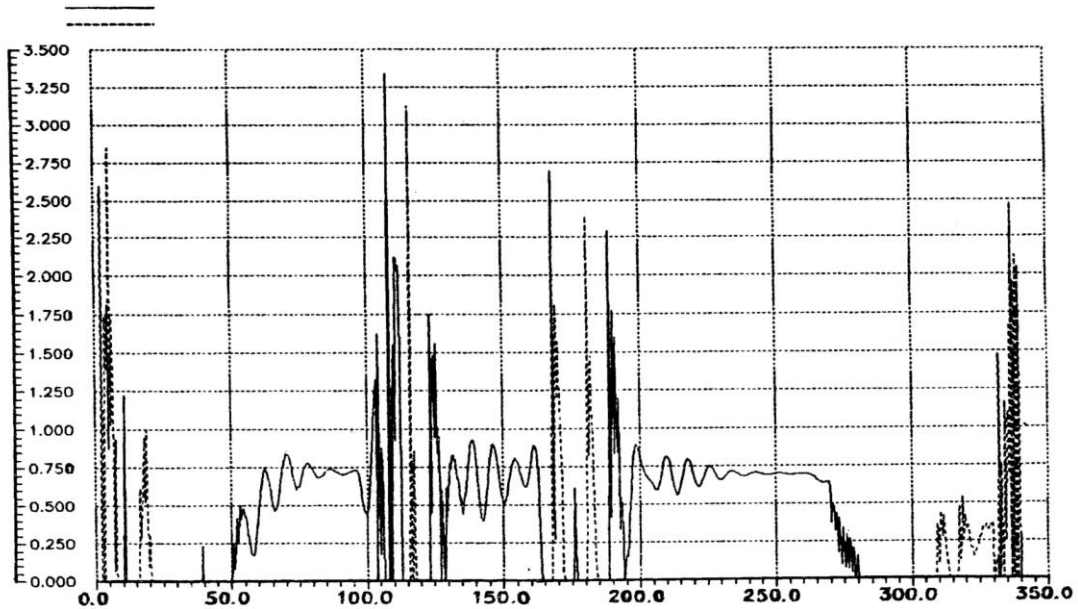


Рис. 1. Графік залежностей напрямних сил на першому за ходом руху колесі в зонах стикових нерівностей

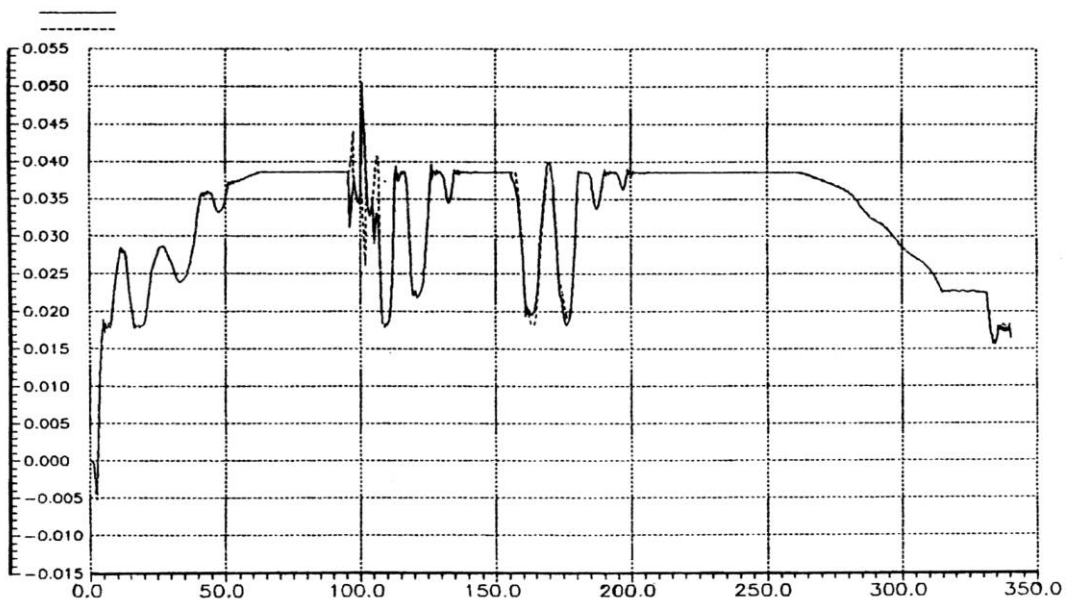


Рис. 2. Кути набігання першого за ходом руху колеса в зонах стикових нерівностей

Дослідження впливу плавних ізолюючих колій у плані проводилося з використанням моделей нерівностей, які були задані у формі зміщеної косинусоїди вигляду:

$$\eta(x) = \frac{a_{нер}}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L} \right), \quad (1)$$

де $a_{нер}$ – амплітуда нерівності, м;

L – загальна довжина, м;

x – відстань від початку нерівності до ординати $\eta(x)$.

Для нерівностей такого виду були проведені числові дослідження впливу

різних значень амплітуди (від 6 до 24 мм). Довжина нерівностей приймалася постійною – 20 м. Радіус кривої був прийнятий рівним 300 м, величина підвищення зовнішньої рейки – 110 мм, швидкість руху вагона – 20,3 м/с.

Крім того, для зіставлення результатів додатково був виконаний розрахунок для варіанта радіуса кривої 600 м. Швидкість руху в цьому випадку була прийнята рівною 27,7 м/с. Такий варіант був розглянутий тому, що в реальних умовах експлуатації в кривих з радіусами $R \geq 600$ м бічний знос дуже малий або відсутній. Результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вплив плавних нерівностей на величину екстремальних сил

Підрейкова основа	Швидкість руху, м/с	Підвищення зовнішньої рейки, мм	Довжина нерівності, м	Амплітуда нерівності, мм	Екстремальне значення горизонтальних поперечних сил, кН		Сумарний чинник зносу, кН · рад
					напрямних	бічних	
Дерев'яні шпали, скріплення ДО	20,3	110	20	6,7	26,2	40,9	0,5393
	20,3	110	20	12,0	47,4	60,3	2,1900
	20,3	110	20	16,7	87,5	92,7	3,1385
	20,3	110	20	23,3	117,9	121,4	4,7219
	27,7	110	20	16,7	34,5	39,4	3,945
Залізобетонні шпали, Ш 1-1, СКД65-Б	20,3	110	20	6,7	31,7	45,5	0,6475
	20,3	110	20	12,0	56,4	73,2	3,210
	20,3	110	20	16,7	96,3	116,4	4,510
	20,3	110	20	23,3	122,6	135,2	6,457

Дані табл. 2 показують, що нерівності колії в плані істотно збільшують кривизну рейок у плані. Це призводить до збільшення чинників зносу у 8,74 разу і появи ударних сил, значення яких може досягати 118-122 кН при дерев'яних шпалах і 123-135 кН при залізобетонних зі скріпленням СКД65-Б.

Окрім досліджень з визначення допустимих значень параметрів плавних ізолюючих нерівностей плану (табл. 2), були проведені дослідження для виявлення

найсприятливіших режимів руху вагонів по плавних ізолюючих нерівностях. Для цього проведено дослідження впливу величини непогашених прискорень на горизонтальні поперечні сили і сумарний чинник зносу при постійних значеннях довжини нерівності, її амплітуди і змінних непогашених прискореннях. Результати наведено в табл. 3. Для можливості зіставлення результатів ці розрахунки виконано тільки для дерев'яних шпал.

Таблиця 3

Вплив непогашених прискорень на величини горизонтальних поперечних сил і сумарний чинник зносу

Радіус кривої, м	Швидкість руху, м/с	Непогашені прискорення, м/с ²	Довжина нерівності, м	Амплітуда нерівності, мм	Екстремальне значення горизонтальних поперечних сил, кН		Сумарний чинник зносу, кН · рад
					напрямних	бічних	
300	10,8	-0,25	10	15	24,7	26,3	9,616
300	14,4	0,05	10	15	25,3	29,05	9,381
300	17,5	0,4	10	15	30,7	38,2	2,482
300	20,0	0,7	10	15	73,5	93,5	5,277
300	20,0	0,7	20	23	29,3	30,90	1,8105
300	17,5	0,4	20	23	29,3	30,60	1,7128
300	16,1	0,22	20	23	20,7	24,89	0,3894
300	14,4	0,05	20	23	42,6	55,85	2,711
300	10,8	-0,25	20	23	30,8	62,76	4,078

У табл. 4 наведено результати досліджень параметрів при русі розрахункового вагона по коротких (1-2 м) ізольованих нерівностях у кривій радіусом 300 м.

При проведенні цих досліджень радіус кривої був прийнятий рівним 300 м, величина непогашеного прискорення 0,4 м/с², швидкість руху 17,5 м/с.

Таблиця 4

Вплив коротких ізольованих нерівностей на екстремальні значення горизонтальних поперечних сил і сумарний чинник зносу

Довжина нерівності, м	Амплітуда нерівності, мм	Екстремальні значення горизонтальних поперечних сил, кН		Сумарний чинник зносу, кН · рад
		напрямні	бічні	
1,0	4	27,3	-9,38	9,616
2,0	4	12,23	-15,15	9,381
2,0	2	31,2	-12,74	2,482

На підставі результатів розрахунків можна зробити такі висновки. Чинником, який в основному визначає динамічні процеси руху екіпажа в кривих малих радіусів, які мають нерівності колії в плані, є радіус сумарної кривої

$$R_c = \frac{R_{кр} \cdot R_{нер}}{R_{кр} + R_{нер}}, \quad (2)$$

де $R_{кр}$ – радіус кривої, м;
 $R_{нер}$ – радіус нерівності, м.

Величину $R_{нер}$, якщо прийняти нерівність у плані, яка описується рівнянням (1), можна визначити як

$$R_{нер} = \frac{L^2}{2 \cdot a_{нер} \pi^2}. \quad (3)$$

Тут позначення ті самі.

Висновки. У результаті досліджень виявлено, що при загальній довжині нерівності 20 м з амплітудою 23,3 мм (нерівність 4 ступеня) її мінімальний радіус буде дорівнювати 217 м, а радіус сумарної кривої, якщо ці нерівності знаходяться в коловій кривій 300 м, складе 126 м. При русі вантажного вагона типу 18-1000 зі

швидкістю 70 км/год сумарне значення чинника бокового зносу зростає від значення 0,252 кН/рад (колії без нерівностей, табл. 1) до значень 17,219 кН·рад (табл. 2), тобто в 68,3 разу, при цьому в момент удару гребеня колеса об рейку значення напрямних сил будуть перевищувати 380 кН при дерев'яних і 425 кН при залізобетонних шпалах. При цьому для таких нерівностей обмеження швидкостей не встановлені. Дані табл. 3 показують, що динамічні впливи на колію з нерівностями плану залежать не тільки і не стільки від величини непогашеного прискорення, скільки від сили удару і кута набігання гребеня колеса на рейку.

Список використаних джерел

1. Даренський, О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту [Текст] : монографія / О. М. Даренський. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.
2. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість [Текст] / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – К. : Транспорт України, 2006. – 168 с.
3. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес [Текст] / М. Ф. Вериго. – М. : ПТКБ ЦП МПС, 1997. – 207 с.
4. Ершов, О. П. Динамическая оценка отступлений в содержании железнодорожного пути и дальнейшее ее совершенствование [Текст] / О. П. Ершов, Н. Ф. Митин. – М. : Транспорт, 1989. – 46 с.
5. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986 – 599 с.
6. Першин, С. П. Вертикальные жесткости пути и его надежность [Текст] / С. П. Першин // Пути и путевое хозяйство. – 1996. – № 6. – С. 8-10.
7. Клименко, А. В. Расчет пути с учетом неровноупругости подрельсового основания [Текст] / А. В. Клименко // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 6. – С. 34-35.
8. Капущенко, Н. И. Износ и сроки службы рельсов и колес подвижного состава [Текст] / Н. И. Капущенко, И. А. Котова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2003. – Вип. 2. – С. 41-46.
9. Herian, J. Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions [Text] / J. Herian, K. Aniolek // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2011. – Vol. 49. – Iss. 1. – P. 71–81.
10. Baluch, H. Diagnostyka nawierzchni kolejowej [Text] / H. Baluch. – Warszawa : Wydawnictwa komunikacji i łączności, 1978. – 415 p.
11. Lichtberger, B. Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economic [Text] / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress, 2005. – 634 p.
12. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [Text] / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen [Text] // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, № 1. – P. 1–14. doi: 10.1177/168781401- 5623696.

13. Ahlf, R. Matching M/W practice to require use of track [Text] / R. Ahlf // J. RT & S (Railway Track & Structures). – New York, 2016. – Vol. 10. – P. 2–3.

Тудей Юзеф Леонідович, заступник начальника філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця».
Овчинников Олександр Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (098) 827-15-94.
E-mail: ovchynnikov@kart.edu.ua.
Лейбук Ярослав Сергійович, аспірант кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (093) 865-79-36. E-mail: leibuk@kart.edu.ua.

Тудей Юзеф Леонідович, заступник начальника філіала «Южная железная дорога» АО «Укрзалізниця».
Овчинников Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры путь и путевое хозяйство Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. E-mail: ovchynnikov@kart.edu.ua.
Лейбук Ярослав Сергеевич, аспирант кафедры путь и путевое хозяйство Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (093) 865-79-36. E-mail: leibuk@kart.edu.ua.

Yuzef Tuley, Deputy Head of Branch “Southern Railway” PAT “Ukrzaliznytsya”.
Ovchynnikov Aleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Track and Tracks Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ovchynnikov@kart.edu.ua.
Leibuk Yaroslav, postgraduate student, Department of Track and Tracks Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (093) 865-79-36. E-mail: leibuk@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.09.2018 р.