

ПАНЧЕНКО С. В., професор, доктор технічних наук,
ДАРЕНСЬКИЙ О. М., професор, доктор технічних наук (Український державний університет залізничного транспорту)

Чисельні дослідження умов безпеки руху поїздів з використанням математичних моделей стану залізничної колії

Для визначення норм допустимих вертикальних і горизонтальних нерівностей в умовах залізниць незагального користування розроблені математичні моделі із застосуванням положень теорії надійності, які враховують стійкість екіпажів, втомну міцність рейок, жорсткості і еквівалентні коефіцієнти дисипації рейкових опор. На підставі досліджень чисельними методами встановлені допустимі швидкості руху по нерівностях плану і профілю з різними амплітудами за різних умов експлуатації колій металургійних і гірничодобувних підприємств.

Ключові слова: залізнична колія, швидкість руху, теорія надійності, безпека руху, математичне моделювання.

Вступ

Забезпечення безпеки руху є актуальним завданням в умовах промислових залізниць при перевезеннях особливо небезпечних вантажів – розплавленого металу і шлаку при безпосередньому контакті працівників підприємств з технологічним промисловим транспортом. За даними служб колії ППЗТ, на сході рухомого складу поза зоною стрілочних переходів припадає від 67 до 80 %. З них частина сходів через порушення стійкості рухомого складу або рейко-шпальної решітки становить 65 %, через руйнування рейок – 25 %. Але на цей час не визначені стани колії, які є небезпечними для руху спеціального та спеціалізованого рухомого складу промислового транспорту з високими осьовими навантаженнями. Це питання потребує спеціальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження пружних і дисипативних характеристик рейкових опор та їх змін в процесі експлуатації [1], встановлені залежності розвитку вертикальних і горизонтальних нерівностей колії промислового транспорту в різних експлуатаційних умовах [2], розроблені методи визначення динамічних вертикальних і горизонтальних поперечних сил взаємодії колії та рухомого складу на базі концепції колії як балки на багатьох пружно-дисипативних опорах і запропонований комплекс моделей елементів верхньої будови колії МСЕ [3] дозволили реалізувати загальний підхід до вирішення проблеми підвищення безпеки руху промислового залізничного транспорту, викладений у [4].

Багатоваріантні розрахунки вертикальних і горизонтальних поперечних сил взаємодії двадцяти найбільш поширених типів спеціальних і спеціалізованих вагонів металургійних і гірничодобувних підприємств дозволили визначити характеристики стійкості цих екіпажів і рейко-шпальної решітки [4, 10, 11] в різних експлуатаційних умовах. До таких умов експлуатації відносяться характеристики рейок, включаючи їх знос, жорсткість і еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкових опор, довжина і амплітуда вертикальних і горизонтальних нерівностей колії. Всі ці характеристики є змінними, залежними від факторів часу або пропущеного по ділянках тоннажу. Розрахунок характеристик стійкості у свою чергу дозволив встановити критичні значення динамічних сил взаємодії рухомого складу і колії і відповідні цим значенням часові показники. Розрахунки показали, що найбільший вплив на величини цих сил мають нерівності колії.

Розрахунки напруженого стану елементів верхньої будови колії, в першу чергу рейок, виконані із застосуванням комплексу моделей МСЕ [3], дали можливість визначити співвідношення діючих і допустимих напружень, встановити критичні умови експлуатації, головними з яких також виявилися характеристики нерівностей і відповідні цим умовам часові показники.

Однак така інформація дала лише якісну оцінку – виконуються чи ні умови безпеки. Кількісну оцінку змін умов безпеки руху, що виникають, можна отримати за допомогою теорії надійності.

Безпосередньо до поняття безпеки руху примикають такі характеристики надійності як безвідмовність і довговічність. Безвідмовністю є здатність зберігати працездатність протягом деякого напрацювання без вимушених перерв.

Характеризується такими числовими показниками як ймовірність і середній час безвідмовної роботи, частотою та інтенсивністю відмов та середнім часом роботи між відмовами. Методи розрахунків показників надійності наведені в спеціальній літературі [5, 12, 13].

Основна частина

Найбільш повну інформацію про безвідмовності роботи системи екіпаж-колія містить закон розподілу напрацювань до першої відмови. Як такі розподіли в розрахунках надійності використовуються експоненціальний, рівномірний, Реллея, Вейбулла та інші розподіли. Однак, враховуючи той факт, що конструкція колії забезпечує в початковий, в деяких випадках досить тривалий період експлуатації безпечний і безвідмовний рух поїздів, у розрахунках надійності, що розглядаються, слід використовувати усічений нормальний розподіл Гаусса. Нормальний розподіл визначається двопараметричними функціями $f(t, x)$ та $F(t, x)$ [6, 7, 9, 12]:

$$f(t, x) = \frac{e^{-\frac{(t-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

$$F(t, x) = \int_0^t \frac{e^{-\frac{(t-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}} dt$$
(1)

де $F(t, x)$ – функція розподілу;
 $f(t, x)$ – щільність нормального розподілу;
 t – час до першої відмови;
 \bar{x} – математичне очікування часу роботи, якій відповідає критичним станам колії;
 σ – дисперсія цієї величини.
 Функція розподілу визначає функцію надійності $P(t)$ або ймовірність безвідмовної роботи [7, 8]:

$$P(t) = F(t, x) \int_0^t f(t) dt$$
(2)

Критичні значення характеристик колії $X_{к.р.}$ – амплітуди і довжини нерівностей, значення пружно-дисипативних характеристик рейкових опор та інші, визначаються розрахунками з умов можливого порушення стійкості екіпажу, рейко-шпальної решітки або руйнування рейки [4, 12].

Зміни характеристик колії x_i в часі (амплітуда нерівності $x_i = \eta$; довжина нерівності $x_i = l_\eta$; жорсткість рейкових опор $x_i = c$; дисипація опор $x_i = \beta$ і т. д.) зазвичай досить добре описуються емпіричними рівняннями парабол:

$$x(t) = at^b$$

$$\sigma(t) = ct^d + \bar{\sigma}$$
(3)

де t – період роботи;
 σ_t – дисперсія величини x_i ;
 a, b, c, d – емпіричні коефіцієнти, одержані або методом випрямлення, або методом найменших квадратів;
 $\bar{\sigma}$ – дисперсія величини x на початку роботи.

Перевірку відповідності емпіричного закону розподілу можна виконати за допомогою критерію Колмогорова або Фішера [5].

Якщо залежності (3) визначені за період спостережень, близький за тривалістю до періоду безвідмовної роботи, то вони дозволяють виконати екстраполяцію і розраховувати період безвідмовної роботи $t = T_0$ з умови $P(t) \geq 0,9973$, тобто допустиме значення x [7]:

$$x(t) = x(t) + 3\sigma(t).$$

Функції, обернені рівнянням (3), дозволяють визначати математичне очікування x і дисперсію $\bar{\sigma}$ для рівняння (1).

Таким чином, застосування теорії надійності дає можливість отримати характеристики надійності системи екіпаж-колія (рівняння 1 і 2), розуміючи під системою в даному випадку «комплекс складових, між якими існують взаємні відносини» [5, 13].

Черговість виконаних розрахунків була прийнята такою:

- 1) формування вихідних даних:
 - залежності змін жорсткості рейкових опор;
 - залежності змін еквівалентних коефіцієнтів дисипації опор;
 - залежності змін характеристик нерівностей колії;
 - експорт в табличному форматі Excel результатів визначень сил взаємодії екіпажів та колії;
 - експорт в табличному форматі Excel результатів визначень діючих напружень в рейках;
- 2) розрахунки умов стійкості рухомого складу, рейко-шпальної решітки і умов втомної міцності рейок, визначення критичних значень вертикальних і горизонтальних поперечних динамічних сил;

3) пошук за допомогою вбудованої функції програмної системи Mathcad критичних станів колії, в першу чергу характеристик нерівностей;

4) визначення математичного очікування і дисперсії часових показників експлуатації, відповідних критичним станам колії;

5) розрахунок ймовірностей безвідмовної роботи системи екіпаж - колія за критеріями стійкості екіпажу, рейко-шпальної решітки та міцності рейок.

Пропонована методика розрахунків реалізована в програмній системі Mathcad.

На рис. 1 подано, як приклад, функції ймовірностей безвідмовного руху чавуновозів вантажопідйомністю 140 т по колії з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах в кривій радіусом 400 м з нерівністю плану лінії довжиною 6 м і амплітудою 60 мм після пропуску 350 млн т зі швидкістю 7 км/год за критеріями стійкості вагона, рейко-шпальної решітки та міцності рейок, які були отримані в

результаті розрахунків. Загальна ймовірність безвідмовної роботи цієї системи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи за зазначеними критеріями і наведена на рис. 1, г.

Розрахунки ймовірностей безвідмовної роботи дозволяють визначати допустимі значення несправностей колії на ділянках обертання різного рухомого складу, планувати проведення ремонтно-колійних робіт.

Однак безпека руху повинна бути забезпечена і до проведення ремонтно-колійних робіт протягом певного часу. Єдиним способом зниження рівня діючих сил, підвищення стійкості екіпажів і рейко-шпальної решітки, запобігання зламам рейок є обмеження швидкостей руху. Так, на рис. 1, г наведена функція надійності при русі чавуновозів 140 т при обмеженні швидкості руху до 3 км/год.

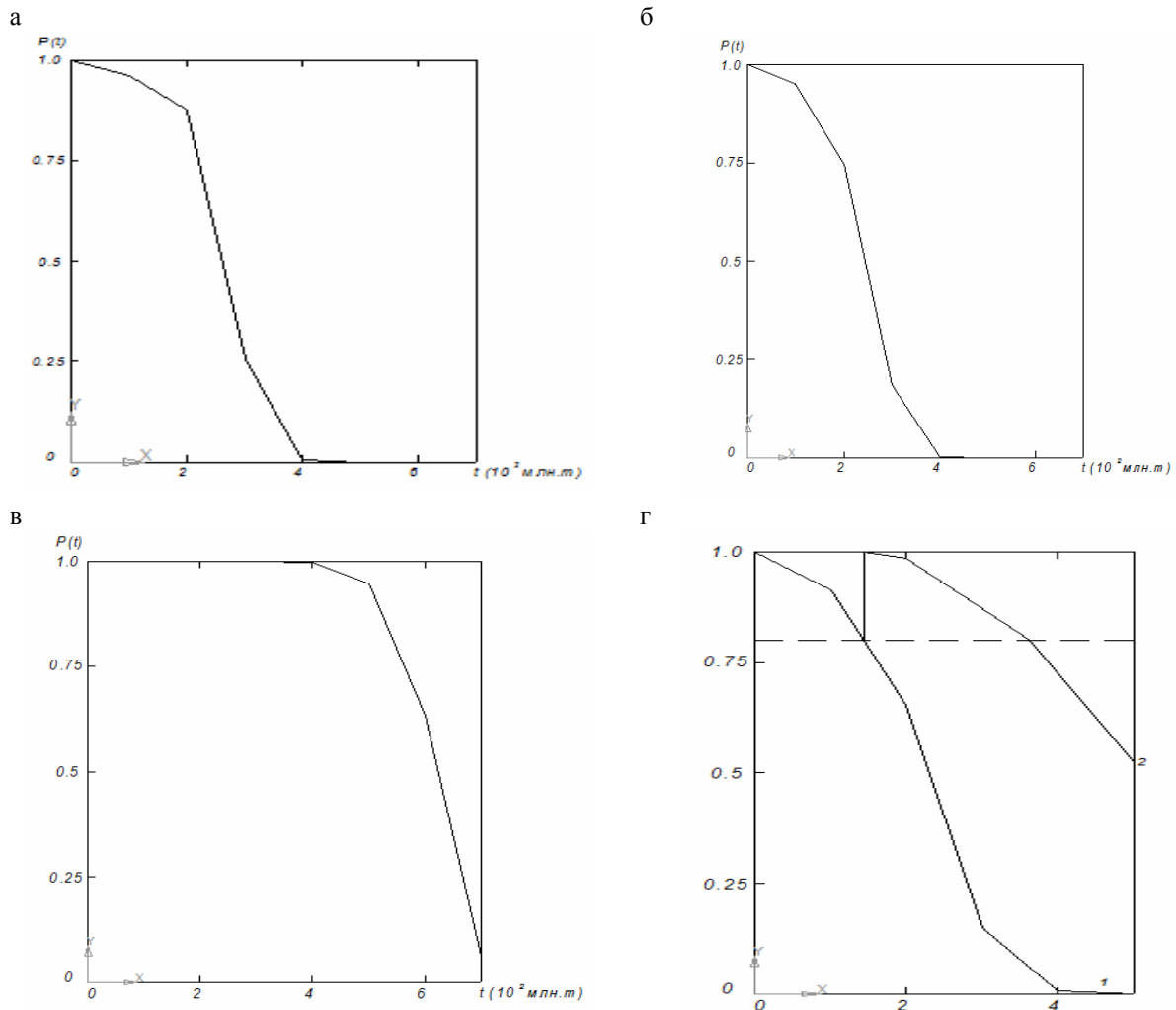


Рис. 1. Функції надійності роботи системи екіпаж-колія при русі чавуновозів вантажопідйомністю 140 т:
 а – за критерієм стійкості решітки; б – за критерієм стійкості екіпажу;
 в – за критерієм міцності рейок; г – 1-загальна ймовірність безвідмовної роботи

Розрахунки функцій надійності для різних експлуатаційних умов металургійних і гірничодобувних підприємств дозволили встановити допустимі швидкості руху по ділянках колії, які мають

нерівності профілю і плану різного ступеня розвитку і при поєднанні цих несправностей (табл. 1 і 2). Такі обмеження дозволяють продовжити безпечний термін експлуатації колії до трьох місяців.

Таблиця 1

Допустимі швидкості руху по колії з нерівностями профілю, км/год

Довжина нерівності, м	Осідання, мм	Колії металургійних підприємств			Колії гірничодобувних підприємств	
		Осьові навантаження, кН			Осьові навантаження, кН	
		≤ 265	265-294	>294	≤265	>265
≤ 5	≤30	10	7	5	20	15
	>30-80	5	3	Рух закривається	10	7
	>80	Рух закривається			5	Рух закривається
>5-10	≤30	Встановлена			Встановлена	
	>30-80	20	15	10	20	15
	>80	10	5	3	10	5
> 10	<30	Встановлена			Встановлена	
	>30-80	25	20	15	30	25
	>80	15	10	5	20	10

Таблиця 2

Допустимі швидкості руху по колії з нерівностями плану, км/год

Довжина нерівності, м	Амплітуда нерівності, мм	Колії металургійних підприємств			Колії гірничодобувних підприємств	
		Осьові навантаження, кН			Осьові навантаження, кН	
		≤ 265	265-294	>294	≤265	>265
≤ 4	≤20	15	10	10	25	20
	20-60	10	7	5	15	10
	>60	Рух закривається			5	Рух закривається
>4-8	≤20	20	15	10	25	20
	20-60	15	10	5	15	10
	>60	7	5	3	10	5
> 8	≤20	Встановлена			Встановлена	
	20-60	20	15	10	25	20
	>60	15	10	5	15	10

Висновки

1. Встановлені критичні стани колії за умов безпеки руху спеціальних та спеціалізованих вагонів промислового транспорту. Такі стани колії характеризуються насамперед величинами вертикальних та горизонтальних нерівностей колії, а також жорсткістю та дисипацією рейкових опор та зносом рейок.

2. Встановлені граничні величини вертикальних та горизонтальних нерівностей колії, при яких можливі сходи рухомого складу внаслідок втрати його стійкості, втрати стійкості рейко-шпальної решітки або руйнування рейок.

3. Визначені допустимі швидкості руху спеціальних та спеціалізованих вагонів по колії, яка має несправності у вигляді вертикальних або горизонтальних нерівностей та при їх поєднанні (табл. 3).

Таблиця 3
 Допустимі швидкості руху по коліях металургійних і гірничодобувних підприємств з поєднанням нерівностей у плані з нерівностями профілю, км/год

Осьові навантаження, кН	Довжина нерівностей, м	Осідання, мм	Довжина нерівностей плану, м										
			≤4			>4÷8							
			Амплітуди нерівностей плану, мм										
≤265	≤10	≤30	≤20	20-60	>60	≤20	20÷60	>60	≤20	20÷60	>60		
			10	7	5	15	10	7	25	15	10		
		>30-80	7	5	3	10	7	5	20	15	10		
			3	Рух закривається									
		≤30	15	10	Рух закривається								
			10	7	5	15	10	5	25	15	10		
	>10	>80	7	5	Рух закривається								
			7	5	7	5	3	15	10	7			
		≤30	7	5	Рух закривається								
			3	Рух закривається									
		>30-80	7	5	7	5	3	20	15	10			
			3	Рух закривається									
265-294	≤10	>80	Рух закривається										
			10	7	Рух закривається								
		≤30	7	Рух закривається									
			7	5	10	7	3	10	7	5			
		>80	5	Рух закривається									
			7	3	Рух закривається								
	>10	≤30	5	Рух закривається									
			5	Рух закривається									
		>30-80	10	5	10	5	3	25	10	5			
			5	Рух закривається									
		>80	10	5	Рух закривається								
			3	Рух закривається									
>294	≤10	≤30	Рух закривається										
			10	5	3	20	10	5					
		>30-80	7	3	Рух закривається								
	3		Рух закривається										
	>10	≤30	10	5	3	20	10	5					
			7	3	Рух закривається								
>80		3	Рух закривається										
	5	Рух закривається											

Список використаних джерел

1. Даренський, О. М. Зміни деяких параметрів жорсткості рейкових скріплень типу КБ при їх експлуатації [Текст] / О. М. Даренський, Н. В. Бугасць // Зб. наук. праць. – Харків : УкрДАЗТ, 2009. – № 111. – С. 282–294.
2. Даренский, А. Н. Результаты определения пространственных неупругих сопротивлений железнодорожного пути деформациям для условий промышленного транспорта [Текст] / А. М. Даренский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – №6. – С. 78–82.
3. Даренський, О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження залізничних колій промислового транспорту [Текст]: монографія / О. М. Даренський. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.
4. Даренський, О. М. Методи оцінювання впливу стану колії на безпеку руху промислового залізничного транспорту [Текст] / О. М. Даренський // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 130. – С. 86-94.
5. Капур, К. Надёжность и проектирование систем [Текст] / К. Капур, Л. Ламберсон. – М. : Мир, 1980. – 608 с.
6. Войнов, К. Н. Прогнозирование надёжности механических систем [Текст]: монография / К. Н. Войнов. – Л. : Машиностроение, 1978. – 208 с.
7. Губачова, Л. О. Надійність транспортних засобів [Текст]: монографія / Л. О. Губачова. – Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля, 2009. – 124 с.
8. Губачева, Л. А. Определение функции эксплуатационной надёжности [Текст] / Л. А. Губачева // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 1. – С. 20-25.
9. Railway construction [Text] / Sz. Fisher, B. Eller, Z. Kada, A. Németh // Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2015. – 334 p.
10. СНиП 2.05.07-91 Споруди транспорту. Промисловий транспорт [Текст] / К., 1991. – 54 с.
11. Ангелейко, В. И. Железнодорожный путь и станции промышленных предприятий [Текст] / В. И. Ангелейко, В. И. Дмитриев, А. Н. Перцев. – К. : Вища школа, 1980. – 184 с.
12. Бондаренко, І. О. Надійність залізничної колії [Текст]: навч. посібник / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, М. А. Арбузов; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2015. – 156 с.
13. Даренський, О. М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій [Текст] / О. М. Даренський, Е. А. Беліков // Зб. наук. праць

Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 149-155.

Панченко С. В., Даренский А. Н. Численные исследования условий безопасности движения поездов с использованием математических моделей состояния железнодорожного пути. Для определения норм допустимых вертикальных и горизонтальных неровностей в условиях железных дорог необщего пользования разработаны математические модели с применением положений теории надежности, которые учитывают устойчивость экипажей, усталостную прочность рельсов, жесткости и эквивалентные коэффициенты диссипации рельсовых опор. На основании исследований численными методами установлены допустимые скорости движения по неровностям плана и профиля с различными амплитудами при разных условиях эксплуатации путей металлургических и горнодобывающих предприятий.
Ключевые слова: железнодорожный путь, скорость движения, теория надежности, безопасность движения, математическое моделирование.

Panchenko S. V., Darenskiy A. N. Numerical studies of traffic safety conditions using mathematical models of railway track condition. To date, unlike the main railways, there is no scientific justification for the norms of permissible vertical and horizontal unevenness of industrial railroad roads where traffic safety is ensured. This is especially true for industrial railway transport metallurgical enterprises that transport particularly dangerous goods (molten metal, slag, hot metal ingots). To solve this problem, mathematical models have been developed using the provisions of reliability theory, which take into account the stability of crews, fatigue strength of rails, rigidity and equivalent coefficients of rail support dissipation. Mathematical models were implemented in the Mathcad software environment. Based on the research by numerical methods, the permissible speeds of movement by irregularities of the plan and profile with different amplitudes under different operating conditions of the ways of metallurgical and mining enterprises are established. The results obtained will make it possible to provide the necessary level of traffic safety in the specific conditions of unlisted railways for the operation of special and specialized rolling stock.

Key words: railway track, speed, reliability theory, traffic safety, mathematical modeling.

Надійшла 18.12.2017 р.

Панченко Сергій Володимирович, д-р техн. наук,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерного
телекерування рухом поїздів Українського державного
університету залізничного транспорту, Харків,
Україна. E-mail: info@kart.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

Даренський Олександр Миколайович, д-р техн. наук,
професор кафедри колії та колійного господарства
Українського державного університету залізничного
транспорту, Харків, Україна. E-mail:
ppx_xiit@kart.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8871-5710>

Sergii Panchenko, Dr.Tech.Science, Department of
automation and computer-integrated technologies
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv,
Ukraine. E-mail: info@kart.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

Alexander Darenskiy, Dr.Tech.Science, Department of
Track and Track Facilities Ukrainian State University of
Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:
ppx_xiit@kart.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8871-5710>