

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 629.4.015 : 625.1.03–047.58

Н. В. ХАЛІПОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Транспортні системи та технології», Академія митної служби України, вул. Дзержинського, 2/4, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел. +38 (056) 469 598, ел. пошта khalipov@rambler.ru

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ ТА РУХОМОГО СКЛАДУ

Мета. Моделювання взаємодії елементів системи «екіпаж–колія» потребує врахування різних за змістом критеріїв, а також аналізу впливу багатьох чинників та фактора невизначеності й випадковості на основні показники задля забезпечення оптимальних або ж раціональних параметрів роботи системи. Для дослідження процесу взаємодії необхідні нові теоретичні підходи до формулювання задач, що базуються на узагальненні існуючих підходів до моделювання. Метою цієї роботи є розвиток моделі взаємодії колії та рухомого складу на основі застосування множинної структури об'єктів. **Методика.** Виділено та сформовано основні критерії оцінки розв'язків задач оптимізації динамічної взаємодії колії та рухомого складу – забезпечення якості та безпеки здійснення процесу перевезень, підвищення їх ефективності та зниження собівартості. На основі використання методів векторної оптимізації запропоновано модель системи взаємодіючих елементів рухомого складу та колії. Для синтезу моделі застосовано математичний апарат з множинної структури об'єктів. **Результати.** Узагальнено підходи до моделювання в задачах взаємодії рухомого складу та колії для різних конструктивних елементів системи за різних умов експлуатації. Цей теоретичний підхід продемонстровано на прикладах моделювання взаємодії пасажирського та вантажного вагонів із колією за різних експлуатаційних умов. **Наукова новизна.** Запропонований теоретичний підхід до розв'язання задач взаємодії колії та рухомого складу, що базується на синтезі існуючих моделей шляхом застосування множинної структури об'єктів. **Практична значимість.** Використання запропонованої моделі дає можливість структурувати основні дані та показники в ході моделювання процесів взаємодії рухомого складу та колії, формувати оптимальні та раціональні параметри функціонування системи та визначати ефективні експлуатаційні параметри й систему заходів щодо раціонального використання інфраструктури.

Ключові слова: моделювання системи «екіпаж–колія»; оптимальні й раціональні параметри взаємодії; теорія множин; векторна оптимізація; множинна структура об'єктів

Вступ

Активне впровадження в Україні Загальної транспортної політики з метою інтеграції до мережі міжнародних транспортних коридорів визначило формування сучасних вимог до транспортних систем, які зумовлені необхідністю підвищення швидкості руху із забезпеченням при цьому високих стандартів якості та безпеки перевезень пасажирів та вантажів.

Збільшення швидкості руху поїздів на певних напрямках вносить зміни в умови експлуатації та взаємодії рухомого складу й колії та

потребує вирішення важливих питань, пов'язаних з нормами їх утримання, оскільки виникають додаткові динамічні навантаження. Закордонні та вітчизняні учені у сфері взаємодії рухомого складу та колії приділяють увагу питанням наукового обґрунтування критеріїв для оцінки динамічних властивостей екіпажів, плавності та безпеки руху, комфортабельності їзди і формування норм утримання колії та рухомого складу в процесі їх експлуатації та на основі наукового аналізу встановлення допустимих швидкостей руху поїздів.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Головні нормативи базуються на експериментальних і теоретичних дослідженнях взаємодії рухомого складу та залізничної колії вченими та фахівцями України, країн СНД та закордонних країн.

Питанням вписування екіпажів у кривих ділянках колії, визначення горизонтальних поперечних сил взаємодії, розрахунку сил інерції при взаємодії колеса та рейки присвячені роботи А. А. Холодецького, К. Ю. Цеглинського, С. П. Тимошенка, Н. П. Петрова, С. М. Куценка, О. П. Єршкова та інших. Подальшого розвитку ці методи набули в працях В. Б. Медея, В. А. Лазаряна та його учнів Є. П. Блохіна, В. Д. Дановича, М. Л. Коротенка, Н. О. Радченка, В. Ф. Ушкалова.

Значний внесок у питання розробки просторової розрахункової схеми для вивчення коливань вагонів, моделі рейко-шпальної решітки внесли Є. П. Блохін, М. Ф. Веріго, В. К. Гарг, В. Д. Данович, А. Я. Коган, М. Л. Коротенко, В. А. Лазарян, А. А. Львов, Н. О. Радченко, Ю. С. Ромен, В. Ф. Ушкалов, В. Д. Хусідов та ін.

Експлуатаційний досвід і теоретичні дослідження дозволили розробити серію критеріїв, що характеризують плавність руху, комфортабельність їзди, міцність колії та її елементів, умови можливого вкочування гребеня колеса на рейку. Докладно існуючі критерії на закордонних залізницях та залізницях СНД проаналізував О. П. Єршков.

У працях В. А. Лазаряна, А. А. Босова, Г. В. Ельфимова, Г. М. Шахунянца та інших вчених детально розглянуті питання улаштування сполучень кривих, у тому числі перехідних. В. І. Андрієнком, В. Г. Альбрехтом, Ю. Д. Волошком, Н. І. Карпущенком, В. Н. Понирко, В. В. Рибкіним, В. Г. Юнкевичем, М. А. Фрішманом показано складний характер взаємодії рухомого складу та колії на цих ділянках, вивчалися питання вибору раціональних параметрів перехідних кривих, взаємодії колії та рухомого складу в перехідних кривих з розбіжностями відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки.

Питання, пов'язані з обґрунтуванням рівня допустимих швидкостей руху по сполученнях кривих, досліджувалися у ВПІЖТі, НІЖТі, ХІТі, ДІТі, КІТі, ЛІЖТі. Питанням підбору відповідних параметрів кривої для раціональної роботи колії, вишукуванню резервів для підви-

щення швидкостей присвячено роботи О. П. Єршкова, М. І. Карпуценка, В. Я. Карцева, М. Б. Кургана, А. М. Орловського, В. О. Певзнера, Ю. С. Ромена, В. В. Циганенка та ін.

Фахівці України, країн СНД та закордонні автори у своїх експериментальних та теоретичних дослідженнях велику увагу приділяють задачам моделювання роботи рейко-шпальної решітки, вивченню коливань вагонів, визначенню допустимих швидкостей руху поїздів. Сучасні погляди на проблеми взаємодії рухомого складу та колії з узагальненням наукових результатів викладено в працях М. Ф. Веріго та А. Я. Когана [3].

Теоретичні та експериментальні дослідження минулих років дозволили розробити нормативи утримання колії та рухомого складу залізниць у процесі їх експлуатації та серію критеріїв, що характеризують плавність руху, комфортабельність їзди, міцність колії та її елементів, умови можливого вкочування гребеня колеса на рейку та ін. Головні нормативи базуються на дослідженні взаємодії рухомого складу та залізничної колії як єдиної системи [6, 7, 10].

Мета

Необхідність врахування декількох різних за своїм змістом критеріїв, забезпечення оптимальних або ж раціональних параметрів шляхом визначення ефективної системи утримання інфраструктури, вплив багатьох чинників на основні показники, фактора невизначеності та випадковості на досліджувані процеси взаємодії потребують нових теоретичних підходів до формулювання задач. Для розв'язання задач, пов'язаних із взаємодією елементів складної системи «екіпаж–колія», необхідне узагальнення підходів до моделювання. У роботі [2] запропоновано математичний підхід до дослідження на основі множинної структури. Метою Цієї роботи є розвиток моделі взаємодії колії та рухомого складу на основі застосування множинної структури об'єктів.

Методика

Теоретичні основи та напрямки застосування методів векторної оптимізації наведено в [2].

Задачу векторної оптимізації можна сформулювати таким чином. Нехай будь-яка множина $E \in \mathfrak{R}(\Omega)$ оцінюється за допомогою декі-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

лькох показників $F_1(E), F_2(E), \dots, F_k(E)$, кожний з яких бажано отримати якомога меншим. Вважаємо, що « E_1 краще за E_2 », якщо

$$\left. \begin{array}{l} F_1(E_1) \leq F_1(E_2), \\ F_2(E_1) \leq F_2(E_2), \\ \dots \\ F_k(E_1) \leq F_k(E_2), \end{array} \right\} \quad (1)$$

при цьому серед нерівностей є хоча б одна строга.

Згідно з (1) визначають правило відбору (критерій) «кращих» множин. Це правило відоме як відношення Парето [15].

Відношення (1) можуть бути подані у вигляді

$$\begin{pmatrix} F_1(E) \\ F_2(E) \\ \dots \\ F_k(E) \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad (2)$$

при $E \in \mathfrak{R}(\Omega)$, де $\mathfrak{R}(\Omega)$ – область визначення функцій множин $F_i(E)$, $i = \overline{1, k}$.

Визначення 1. Дві множини E_1 та $E_2 \in \mathfrak{R}(\Omega)$ називають непорівнянними, якщо серед нерівностей (1) наявна хоча б одна строга протилежна нерівність.

Згідно з (2) оцінка множини $E \in \mathfrak{R}(\Omega)$ здійснюється за допомогою вектора $F(E)$, компонентами якого є показники $F_i(E)$, $i = \overline{1, k}$. Тому задача відбору за допомогою правила (1) називається задачею векторної оптимізації.

Визначення 2. Множина $E \in \mathfrak{R}(\Omega)$ називається ефективною, якщо будь-яка її варіація призводить до «погіршення» одного з показників та «збільшення» деякого іншого показника.

Визначення 3. Множину $\varepsilon \in \mathfrak{R}(\Omega)$ називають розв'язком задачі векторної оптимізації (2), якщо будь-які дві множини E_1 та E_2 з $\varepsilon \in \varepsilon$ непорівнянними, а $\forall A \in \varepsilon$ ефективним.

На непорівнянні варіанти може бути накладено обмеження типу

$$\forall E \in \varepsilon \rightarrow E \in D(\Omega) \subseteq \mathfrak{R}(\Omega), \quad (3)$$

де $D(\Omega)$ – набір допустимих множин з $\mathfrak{R}(\Omega)$.

Співвідношення (3) являє собою ще одне правило відбору й тоді задача векторної оптимізації має два критерії, тобто правила відбору (1) та (2). Тому її називають двокритеріальною задачею векторної оптимізації.

Під час відбору варіантів розв'язання серед непорівнянних між собою точок з ε , тобто із області ефективних рішень, задача векторної оптимізації розв'язку не дає. Який з варіантів обрати, вирішує особа, що приймає рішення. Це зумовлено надзвичайною складністю більшості з розв'язуваних на практиці задач, зокрема і взаємодії колії та рухомого складу. Під час побудови моделі необхідно враховувати безліч обмежень на конструктивні параметри (накладаються як на рухомий склад, так і на колію), нормативних допусків при експлуатації, технологічних параметрів тощо. Усі ці умови надто складно забезпечити одночасно в процесі моделювання. Модель векторної оптимізації насамперед дозволяє відсіяти неефективні варіанти.

Сформуємо основні критерії оцінки розв'язків, що отримуються в процесі вирішення задачі динамічної взаємодії колії та рухомого складу. Перш за все це критерій оцінки якості перевезень, пов'язаний із коливаннями екіпажа в результаті збурень з боку верхньої будови колії. Це обмеження стосується мінімізації динамічних прискорень α . При пасажирських перевезеннях це забезпечує комфортабельність їзди; при вантажних завдяки відповідним динамічним властивостям екіпажа гарантує збереження вантажів та безпеку руху.

Другий критерій пов'язаний із забезпеченням безпеки процесу перевезень. Задачу вирішуємо при максимізації стійкості екіпажа k .

Третій критерій мінімізує час (T) перевезень.

Четвертий критерій (Φ) характеризує ефективність перевезень, тобто забезпечення максимального прибутку від перевезень.

Мінімізація за п'ятим критерієм (C) пов'язана із максимальним зниженням собівартості перевезень.

Таким чином, задача векторної оптимізації набуває вигляду:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ -k \\ T \\ -\Phi \\ C \end{pmatrix} \rightarrow \min . \quad (4)$$

Для оцінки за цими критеріями існує система показників та нормативів, які допомагають чисельно оцінити кожний варіант та прийняти щодо нього рішення. Так, оцінка динамічних властивостей може бути за показниками вертикальної чи горизонтальної динаміки або ж за непогашеними прискореннями при проходженні кривих ділянок.

Стійкість може характеризувати умови безпеки за можливого вкочування гребеня колеса на головку рейки або ж стійкість від перекидання та ін.

Досить часто час доставки пасажирів або вантажів є пріоритетним серед критеріїв, особливо в умовах впровадження прискореного руху.

Критерій ефективності Φ треба розглядати як потік витрат (капітальних та експлуатаційних) та прибутків за періодами, приведені до певного розрахункового періоду, та оцінювати на основі показників ефективності (чистої поточної вартості, внутрішньої норми прибутковості та ін.).

Показник для оцінки собівартості перевезень C залежить від багатьох факторів, починаючи від умов перевезень та закінчуючи тарифами.

Для забезпечення цих вимог (4) модель взаємодії колії та рухомого складу (« $K-PC$ ») подамо як множинний об'єкт Ω_{K-PC} , який характеризується гібридною суперпозицією (структурою), складеною із множин, множин, упорядкованих множин (списків) і неоднорідних множин (послідовностей, кортежів).

Під множиною розуміють вільний набір різних однотипних елементів. Елементи в наборі вільні в тому розумінні, що в множину вони входять у довільному порядку. Змінюючи властивості набору й елементів множинної структури, одержимо інші об'єкти. Якщо в множині зняти обмеження за різними елементами, то одержимо мультимножину. Невільний однотипний набір різних елементів за деяким відношенням утворить упорядкована множина

(облікова множина), у випадку повторюваності елементів у наборі маємо мультисписок. Якщо набір різнотипний, то відповідно він утворить неоднорідну впорядковану або неупорядковану послідовність або кортежі, мультикортеж – упорядкований або неупорядкований. Таким чином, розглянуті об'єкти задаються на єдиній множинній структурі Ω_{K-PC} за допомогою відношень: тотожності, порядку, неоднорідності та ін. Формально ця структура може бути записана так:

$$\Omega_{K-PC} = \{N, \Sigma, \Lambda\}, \quad (5)$$

де $N = \Omega \cup F$ – носій структури, на компоненті Ω якого будуються множинні об'єкти та $F = (\{\}, [], \langle \rangle, (), [[]]$ – алфавіт спеціальних символів; Σ – сигнатура відношень $\varphi_i, i = \overline{1, 4}$ і операції суперпозиції ψ ; Λ – конструктивна аксіоматика, що задає визначення, властивості, правила конструювання об'єктів та ін.

Розглянемо склад аксіоматики Λ множинної структури Ω_{K-PC} .

Для базисних об'єктів:

– компонента носія $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \dots \cup \Omega_n$ неоднорідна;

– $\Omega_i, i = \overline{1, n}$ однорідні (однотипні);

– $\#\Omega_i$ – потужність змісту підкомпоненти;

– якщо $\#\Omega_i = 0$, то підкомпонента порожня, і позначається як $\Omega_i = o$;

– елемент $\omega \in \Omega$, якщо $\exists \Omega_i \subset \Omega, \omega \in \Omega_i$;

– будь-який елемент $\omega \in \Omega$ неподільний (атомарний).

Для розпізнавання об'єктів і відбиття відношень на них використовуємо позначення: $\{\}$ – множина, $[]$ – упорядкована множина, $[[]]$ – неоднорідна множина, $\langle \rangle$ – мультимножина.

Докладний опис систем за допомогою скінченних множин і відношень виконано в роботі [17], а структур – у статті [1].

Наведемо задачу взаємодії колії та рухомого складу як мультимножину задач Ω_{K-PC} . Структура побудована на основі аналізу задач, описаних в [9, 11, 12, 14, 16]. Ця мультимножина може доповнюватися в разі розширення класу

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

об'єктів, що підлягають моделюванню. Мультимножина $\Omega_{\text{К-РС}}$ умовно представлена наборами Ω_i :

$$\Omega_{\text{К-РС}} = \left[\Omega_i, i = \overline{1, n} \right],$$

де Ω_1 – множина задач, яка характеризує рухомий склад; Ω_2 – множина задач, яка характеризує колію; Ω_3 – множина задач, яка характеризує взаємодію елементів системи «колія–екіпаж» під час руху рухомого складу за умов (1).

Множина Ω_1 має таку структуру:

$$\Omega_1 = \left\langle \left\{ \omega_{1,i_1}, i_1 = \overline{1, n_1} \right\}, \left\{ \omega_{2,i_2}, i_2 = \overline{1, n_2} \right\}, \left[\left[\omega_{3,i_3}, i_3 = \overline{1, n_3} \right] \right], \left\{ \omega_{4,i_4}, i_4 = \overline{1, n_4} \right\} \right\rangle, \left[\left[\omega_{5,i_5}, i_5 = \overline{1, n_5} \right] \right],$$

де $\omega_{1,i_1}, i_1 = \overline{1, n_1}$ – тип вагона (пасажирський на візках КВЗ ЦНИИ, вантажний – критий, піввагон, хопер, цистерна, довгобазний вагон); $\omega_{2,i_2}, i_2 = \overline{1, n_2}$ – стан завантаження вагона (завантажений або порожній); $\omega_{3,i_3}, i_3 = \overline{1, n_3}$ – конструктивні параметри (моменти інерції кузова, надресорних балок, колісних пар, профіль коліс), характеристики пружно-в'язких елементів, конструктивна швидкість екіпажа та ін.; $\omega_{4,i_4}, i_4 = \overline{1, n_4}$ – стан рухомого складу (зношення елементів, динамічні властивості); $\omega_{5,i_5}, i_5 = \overline{1, n_5}$ – список заходів для приведення рухомого складу в дієздатний стан в межах експлуатаційних допусків.

Структура множини Ω_2 така:

$$\Omega_2 = \left\langle \left[\left[\omega_{6,j_1}, j_1 = \overline{1, m_1} \right] \right], \left[\left[\omega_{7,j_2}, j_2 = \overline{1, m_2} \right] \right], \left\{ \omega_{8,j_3}, j_3 = \overline{1, m_3} \right\}, \left[\omega_{9,j_4}, j_4 = \overline{1, m_4} \right] \right\rangle,$$

де $\omega_{6,j_1}, j_1 = \overline{1, m_1}$ – характеристика конструктивних елементів верхньої будови колії (рейки – ланкова, безстикова; шпали – дерев'яні, залізобетонні; скріплення – КБ, КПП; баласт – щебневий, піщаний, гравійний); $\omega_{7,j_2}, j_2 = \overline{1, m_2}$ – характеристики основних елементів колії (при-

ведені маси, пружність, моменти інерції); $\omega_{8,j_3}, j_3 = \overline{1, m_3}$ – стан колії (жорсткість, пружність, зношеність елементів); $\omega_{9,j_4}, j_4 = \overline{1, m_4}$ – комплекс заходів для підтримання працездатності колії в межах експлуатаційних допусків (за напрацюванням відповідно до стану: рихтування, стабілізація, заміна елементів, поточний ремонт, капітальний ремонт).

Множину Ω_3 подаємо у вигляді:

$$\Omega_3 = \left\langle \left\{ \omega_{10,k_1}, k_1 = \overline{1, l_1} \right\}, \left\{ \omega_{11,k_2}, k_2 = \overline{1, l_2} \right\}, \left\{ \omega_{12,k_3}, k_3 = \overline{1, l_3} \right\}, \left[\omega_{13,k_4}, k_4 = \overline{1, l_4} \right] \right\rangle,$$

де $\omega_{10,k_1}, k_1 = \overline{1, l_1}$ – характеристика ділянки колії (пряма, кругова крива, вхідна перехідна крива, вихідна перехідна крива, стрілочний перевід);

$\omega_{11,k_2}, k_2 = \overline{1, l_2}$ – стан колії (відхилення за рівнем, у плані, розбіжності відводів кривизни та підвищення в перехідних кривих, нерівножорсткість, зношеність елементів, наявність випадкових нерівностей різного ступеня);

$\omega_{12,k_3}, k_3 = \overline{1, l_3}$ – комплекс заходів для покращення динамічних показників взаємодії (зміна довжини перехідної кривої, узгодження відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки, зміна довжини кругової кривої, кривизна кругової кривої, підвищення зовнішньої рейки кругової кривої, ліквідація нерівностей);

$\omega_{13,k_4}, k_4 = \overline{1, l_4}$ – комплекс заходів для підтримання працездатності колії в межах експлуатаційних допусків без зміни параметрів (рихтування, стабілізація, заміна елементів, поточний ремонт, капітальний ремонт тощо).

Кожна мультимножина містить список необхідних заходів $[\omega_{i,j}]$, які дозволяють управляти критеріями (4).

Список необхідних заходів, що входять до множини Ω_i , формують залежно від змісту завдання.

Ефективність моделі залежить від постановки та розв'язання задач, які кількісно та якісно характеризують кожний з елементів всієї системи. Склад кожної множини формується для певних варіантів, які аналізуються.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Приклад 1. Розглянемо результати моделювання взаємодії пасажирського вагона на візках КВЗ ЦНИИ при проходженні кривих ділянок колії змінної кривизни з відступами в утриманні за розбіжностями відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки [11, 16].

Варіюванню підлягають такі параметри: кривизна кругової кривої, підвищення зовнішньої рейки в кривій, довжина перехідної кривої, величина розбіжностей відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки (при лінійному відводі).

Модель має такий склад:

$\Omega_{\text{К-РС}} = \left[\left\{ \text{пасажирський суцільнометале-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{вий вагон на візках КВЗ ЦНИИ} \right\}, \left\{ \text{заванта-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{жений} \right\}, \left\{ \text{геометричні, пружно-дисипативні} \right. \right. \\ \left. \left. \text{та інерційні характеристики завантаженого па-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{сажирського вагона: маса кузова } 43,53 \text{ т, моменти} \right. \right. \\ \left. \left. \text{інерції кузова вагона: } I_x = 74,2 \text{ т}\cdot\text{м}^2, I_y = 2\,066 \text{ т}\cdot\text{м}^2, \right. \right. \\ \left. \left. I_z = 2\,055 \text{ т}\cdot\text{м}^2; \text{ маса візка } 7 \text{ т, маса рами візка} \right. \right. \\ \left. \left. 2,66 \text{ т, моменти інерції рами візка: } I_x = 0,68 \text{ т}\cdot\text{м}^2, \right. \right. \\ \left. \left. I_y = 2,37 \text{ т}\cdot\text{м}^2, I_z = 2,98 \text{ т}\cdot\text{м}^2; \text{ маса колісної пари} \right. \right. \\ \left. \left. 1,78 \text{ т, моменти інерції колісної пари: } I_x = 1 \text{ т}\cdot\text{м}^2, \right. \right. \\ \left. \left. I_y = 0,15 \text{ т}\cdot\text{м}^2, I_z = 1 \text{ т}\cdot\text{м}^2 \text{ та ін.} \right\}, \left\{ \text{стан вагона} \right. \right. \\ \left. \left. \text{відповідає нормам експлуатації} \right\}, \left[\text{не потре-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{бує ремонту} \right] \right], \left[\left[\text{стикова колія, шпали залі-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{зобетонні, баласт щебеневий} \right] \right], \left[\left[\text{приведена} \right. \right. \\ \left. \left. \text{маса колії в горизонтальному напрямку } 0,3 \text{ кг/см,} \right. \right. \\ \left. \left. \text{приведена маса колії у вертикальному напрям-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{ку } 1,3 \text{ кг/см, горизонтальна жорсткість колії} \right. \right. \\ \left. \left. 30\,000 \text{ кН/м, вертикальна жорсткість колії} \right. \right. \\ \left. \left. 30\,000 \text{ кН/м, коефіцієнт в'язкого тертя в гори-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{зонтальному напрямку } 200 \text{ кНс/м, коефіцієнт} \right. \right. \\ \left. \left. \text{в'язкого тертя у вертикальному напрямку} \right. \right. \\ \left. \left. 200 \text{ кНс/м, та ін.} \right] \right], \left\{ \text{стан колії за напрацю-} \right. \\ \left. \left. \text{ванням та станом елементів відповідає нор-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{мам} \right\}, \left[\text{не потребує ремонту} \right] \right], \left\{ \text{радіус} \right. \\ \left. \left. \text{кругової кривої } 300 \text{ м, підвищення зовнішньої} \right. \right. \\ \left. \left. \text{рейки } 150 \text{ мм, вхідна перехідна крива довжи-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{ною } 150 \text{ м} \right\}, \left\{ \text{розбіжності відводів кривизни} \right. \\ \left. \left. \text{та підвищення зовнішньої рейки на початку} \right. \right. \\ \left. \left. \text{перехідної кривої складає } 60 \text{ м з випереджен-} \right. \right. \\ \left. \left. \text{ням відводу кривизни} \right\}, \left\{ \text{узгодження відво-} \right. \\ \left. \left. \text{дів кривизни та підвищення зовнішньої рейки,} \right. \right. \\ \left. \left. \text{зміна радіусу кругової кривої} \right\}, \left[\text{потребує} \right. \\ \left. \left. \text{усунення наднормативної розбіжності відводів} \right. \right. \\ \left. \left. \text{кривизни та підвищення} \right] \right] \right].$

Приймаємо систему критеріїв

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ -k \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Критерій якості α оцінюватимемо за показниками коефіцієнтів вертикальної динаміки в центральному ступені (нормативне значення $[k_b] \leq 0,2$) та горизонтальної динаміки (нормативне значення $[k_r] \leq 0,25$) і за непогашеним прискоренням α . Безпеку оцінюватимемо за коефіцієнтом стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку (нормативне значення $[k_{\text{ст}}] \geq 1,8$) [13].

Швидкість приймаємо з умови забезпечення значення непогашеного прискорення $\alpha = 0,7 \text{ м/с}^2$, що відповідає максимальному значенню, визначеному нормативами за комфортабельністю їзди. Згідно з нормативами утримання колії [8] розбіжності відводів кривизни та підвищення не повинні перевищувати 30 м.

У результаті моделювання, враховуючи вимоги (5) та обмеження на досліджувані параметри, отримуємо такі значення показників: $k_b = 0,28$, $k_{\text{ст}} = 1,7$, що не відповідає вимогам нормативів; $k_r = 0,21$, що не порушує нормативів.

Збільшуємо радіус кругової кривої до 1 000 м. Моделювання дає такі значення – $k_b = 0,38$; $k_{\text{ст}} = 4,3$, $k_r = 0,16$, що відповідає вимогам за стійкістю та горизонтальною динамікою і порушує нормативи за вертикальною динамікою.

Зменшуємо розбіжності відводів кривизни та підвищення до 30 м. Для кривої радіусом 300 м в результаті моделювання отримуємо $k_b = 0,23$; $k_{\text{ст}} = 1,9$; $k_r = 0,21$, що відповідає нормативним вимогам. Для кривої радіусом 1 000 м в результаті моделювання отримуємо $k_b = 0,22$; $k_{\text{ст}} = 4,3$; $k_r = 0,15$, що відповідає нормативним вимогам.

Отримані в результаті моделювання варіанти є розв'язками багатокритеріальної задачі.

Ефективність варіанта залежить від витрат, пов'язаних із заходами з узгодження відводів

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

кривизни та підвищення зовнішньої рейки в перехідній кривій. Чим більше ресурсів необхідно для приведення колії до задовільного стану, тим гіршим є цей показник.

Систему критеріїв (5) доповнимо третім критерієм, пов'язаним із витратами на усунення розбіжностей відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки в перехідній кривій:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ -k \\ -\Phi \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Усунення цих відступів приведе до покращення показників якості та безпеки, у той час як витрати зростають, внаслідок чого погіршується показник ефективності. Тобто введення критерію ефективності дає можливість відсіяти неефективні варіанти та звужити область прийнятних рішень.

Наприклад, нехай розбіжності відводів кривизни та підвищення зовнішньої рейки не перевищують 30 м, що відповідає нормативним значенням. Усунення цих розбіжностей, наприклад, для кривої радіусом 1 000 м призводить до покращення показників якості та безпеки ($k_v = 0,2$; $k_{ct} = 5,0$; $k_r = 0,13$). При цьому за показником ефективності отримуємо погіршення через витрати на виправку. Тобто рішення в цьому випадку є ефективним та непорівнянним за даними критеріями. Такий варіант (з розбіжностями до 30 м) є розв'язком задачі векторної оптимізації.

Приклад 2. Розглянемо результати моделювання взаємодії пасажирського вагона і колії на різних етапах ремонтних робіт [14, 16]. У цьому випадку критерії мають забезпечувати якість та безпеку перевезень на різних етапах ремонтних робіт та ефективність заходів під час їх здійснення. Система обмежень має вигляд (6).

При цьому критерії якості та безпеки оцінюватимемо за показниками коефіцієнтів, як і в прикладі 1. Параметри пасажирського вагона та колії також приймаємо за прикладом 1.

Нерівності колії формуються на кожному з етапів ремонтних робіт за [15].

Модель має такий склад:

$\Omega_{\text{к-рп}} = \left[\left\{ \text{пасажирський вагон на візках КВЗ ЦНИИ} \right\}, \left\{ \text{завантажений} \right\}, \left\{ \text{дані до}$

розрахунку пасажирського вагона $\left. \right\}, \left\{ \text{стан вагона відповідає нормам експлуатації} \right\}, \left[\text{не потребує ремонту} \right], \left\{ \left[\text{стикова колія, шпали залізобетонні, баласт щебеневиї} \right], \left[\text{дані до розрахунку колії} \right] \right\}, \left\{ \text{стан колії на різних етапах ремонтних робіт: 1 – після виправки та однієї стабілізації колії динамічним стабілізатором; 2 – після повторної виправки та двох стабілізацій; 3 – після пропуску 1 млн т, суцільної післясадової виправки та третьої стабілізації колії} \right\}, \left[\text{перша стабілізація, друга стабілізація, пропуск 1 млн т вантажів та третя стабілізація} \right], \left\{ \left\{ \text{кругова крива радіусом 1 000 м} \right\}, \left\{ \text{вертикальні динамічні нерівності, що відповідають еквівалентним динамічним нерівностям на різних етапах ремонтних робіт; нерівності в плані 5 та 10 мм} \right\}, \left\{ \text{зміна швидкості руху, зміна підвищення, зміна непогашеного прискорення} \right\}, \left[\text{ремонт колії на довгостроково закритому перегоні} \right] \left. \right\}.$

Моделювання показало, що ефективні рішення для першого етапу ремонтних робіт містяться в такій області:

- а) при величині нерівності в плані 5 мм:
 - непогашене прискорення знаходиться в діапазоні 0,3...0,50 м/с²;
 - підвищення зовнішньої рейки лежить в діапазоні 70...105 мм;
 - допустима швидкість 110 км/год.
- б) при величині нерівності в плані 10 мм:
 - непогашене прискорення знаходиться в діапазоні 0,36...0,56 м/с²;
 - підвищення зовнішньої рейки лежить в діапазоні 0...30 мм;
 - допустима швидкість 85 км/год.

Ефективні рішення для другого етапу ремонтних робіт містяться в такій області:

- а) при величині нерівності в плані 5 мм:
 - непогашене прискорення знаходиться в діапазоні 0,2...0,56 м/с²;
 - підвищення зовнішньої рейки лежить в діапазоні 90...130 мм;
 - допустима швидкість 120 км/год.
- б) при величині нерівності в плані 10 мм:
 - непогашене прискорення знаходиться в діапазоні 0,42...0,62 м/с²;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

– підвищення зовнішньої рейки лежить у діапазоні 0...35 мм;

– допустима швидкість 90 км/год.

Для третього етапу ремонтних робіт ефективні рішення містяться в такій області:

а) при величині нерівності в плані 5 мм:

– непогашене прискорення знаходиться у діапазоні 0,38...0,60 м/с²;

– підвищення зовнішньої рейки лежить у діапазоні 115...150 мм;

– допустима швидкість 130 км/год;

б) при величині нерівності в плані 10 мм:

– непогашене прискорення знаходиться у діапазоні 0,39...0,69 м/с²;

– підвищення зовнішньої рейки лежить у діапазоні 0...50 мм;

– допустима швидкість 95 км/год.

З результатів моделювання бачимо, що після кожного з етапів робіт показники покращуються, про що свідчить можливість збільшення допустимих швидкостей руху після реалізації певного комплексу робіт. У той самий час, від етапу до етапу збільшуються витрати, що знижує показник ефективності.

Приклад 3. Розглянемо результати моделювання взаємодії вантажного вагона в порожньому стані при проходженні ділянок колії різної кривизни [9].

Сформуємо систему критеріїв. Для порожніх вагонів найбільш вагомим є критерій безпеки, який характеризує запас стійкості від вкочування гребеня колеса на головку рейки ($k_{ст}$) та час дії сил, при яких порушується нормативне значення [$k_{ст}$] [4]. Згідно з [13] для порожнього вантажного вагона значення $k_{ст}$ має бути не менше 1,3. Другий критерій характеризує час доставки та залежить насамперед від швидкості руху. Приймаємо такі обмеження:

$$\begin{pmatrix} -k \\ T \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Модель має таку структуру:

$\Omega_{K-PC} = \left[\left\{ \begin{array}{l} \text{вантажний піввагон моделі} \\ \text{12-4004 на візках ЦНИИ-Х3} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \text{порожній} \\ \text{дані до розрахунку вантажного вагона –} \\ \text{довжина бази 15,69 м, маса 30 т, моменти інерції} \\ \text{кузова вагона } (I_x=53,1 \text{ т}\cdot\text{м}^2; I_y=1\,001,64 \text{ т}\cdot\text{м}^2;$

$I_z=925,44 \text{ т}\cdot\text{м}^2)$ та ін. $\left. \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \text{стан вагона відповідає} \\ \text{нормам експлуатації} \end{array} \right\}, \left[\begin{array}{l} \text{не потребує ремон-} \\ \text{ту} \end{array} \right], \left\{ \left[\begin{array}{l} \text{стикова колія, шпали залізобетонні,} \\ \text{баласт щебеневиї} \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{дані до розрахунку ко-} \\ \text{лії} \end{array} \right], \left\{ \begin{array}{l} \text{стан колії відповідає нормам утримання} \\ \text{в процесі експлуатації} \end{array} \right\}, \left[\begin{array}{l} \text{не потребує ремон-} \\ \text{ту} \end{array} \right], \left\{ \left\{ \begin{array}{l} \text{пряма ділянка} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \text{наявність випадко-} \\ \text{вих нерівностей у колії в межах нормати-} \\ \text{вів} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \text{зміна швидкості руху} \end{array} \right\}, \left[\begin{array}{l} \text{не потребує} \\ \text{ремонт} \end{array} \right] \right\}.$

У розрахунках при моделюванні приймаємо швидкість руху рухомого складу 50, 70 та 90 км/год. Отримано такі результати:

1. При швидкості руху 50 км/год $k_{ст} = 1,6$, що відповідає нормативним вимогам.

2. При швидкості руху 70 та 90 км/год $k_{ст}$ становить 1,1 та 0,25 відповідно, що порушує нормативні вимоги. Час можливого вкочування гребеня колеса на головку рейки складає 0,15 та 0,27 с відповідно.

За результатами моделювання отримуємо множину ефективних рішень для показників при реалізації швидкості руху екіпажа до 60 км/год.

Таким чином, для цього виду рухомого складу за заданих умов, збільшуючи швидкість у межах до 60 км/год, маємо покращення за другим критерієм (зменшення часу доставки T), водночас за першим критерієм (безпека перевезень) значення коефіцієнта стійкості погіршується та нарешті виходить за межі нормативу.

Тобто розв'язок, отриманий при швидкості руху 60 км/год, є розв'язком задачі векторної оптимізації. Особа, що приймає рішення, виходить з аналізу часу дії рамних сил.

Результати

У роботі узагальнено підходи до моделювання в задачах взаємодії рухомого складу та колії для різних конструктивних елементів системи за різних умов експлуатації. Цей теоретичний підхід продемонстровано на прикладах моделювання взаємодії пасажирського та вантажного вагонів із колією за різних експлуатаційних умов.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано теоретичний підхід до розв'язання задачі взаємодії колії та рухомого складу, що базується на синтезі існуючих моделей шляхом застосування множинної структури об'єктів.

Використання запропонованої моделі дає можливість структурувати основні дані й показники під час моделювання процесів взаємодії рухомого складу та колії та формувати оптимальні та раціональні параметри функціонування системи, визначати ефективні експлуатаційні параметри та систему заходів щодо раціонального використання інфраструктури.

Висновки

1. Теоретичний підхід до моделювання системи «екіпаж–колія» базується на математичному апараті векторної оптимізації. Цей підхід дозволяє узагальнити підходи до моделювання взаємодії колії та рухомого складу на основі застосування множинної структури об'єктів.

2. Сформовано основні критерії оцінки розв'язків задачі оптимізації динамічної взаємодії колії та рухомого складу – забезпечення якості та безпеки здійснення процесу перевезень, підвищення їх ефективності та зниження собівартості, скорочення часу доставки.

3. Використання запропонованої моделі дає можливість структурувати основні дані й показники при моделюванні процесів взаємодії рухомого складу та колії та формувати оптимальні та раціональні параметри функціонування системи, визначати ефективні експлуатаційні параметри та систему заходів щодо раціонального використання інфраструктури.

4. Модель взаємодії колії та рухомого складу подано як мультимножину задач. Склад кожної множини формується для певних варіантів, які аналізуються, та може доповнюватися в разі розширення класу об'єктів, що підлягають моделюванню. Ефективність моделі залежить від постановки та розв'язання задач, які кількісно та якісно характеризують кожний з елементів всієї системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Босов, А. А. Структурна складність систем / А. А. Босов, В. М. Ільман // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 173–179.
2. Босов, А. А. Функції множин та їх застосування : монографія / А. А. Босов // Дніпро-дзержинськ : Вид. дім «Андрій», 2007. – 182 с.
3. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган ; под ред. М. Ф. Вериго. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
4. Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. И. Данилов, В. Д. Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
5. Влияние параметров колеи в переходных кривых на динамику и комфортабельность езды / В. В. Рыбкин, В. В. Цыганенко, М. И. Уманов, Н. В. Халипова // Залізн. трансп. України. – 2002. – № 5. – С. 25–27.
6. Данович, В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Трансп. : зб. наук. пр. – Д., 2001. – Вип. 8. – С. 124–138.
7. Данович, В. Д. Уравнения движения железнодорожного экипажа в переходных и круговых кривых / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Трансп. : зб. наук. пр. – Д., 2001. – Вип. 10. – С. 86–91.
8. Інструкція по устрою та утриманню колії залізниць України / Е. І. Даниленко, А. М. Орловський, А. П. Татуревич та ін. – К. : Трансп. України, 1999. – 248 с.
9. К вопросу об устойчивости против вкатывания колеса на рельс для порожних грузовых вагонов / В. Д. Данович В. В., Рыбкин, А. П. Трякин и др. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2003. – Вип. 3. – С. 90–95.
10. Коган, А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1997. – 326 с.
11. Колебания пассажирского вагона при входе в переходную кривую / В. Д. Данович, В. В. Цыганенко, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Трансп. : зб. наук. пр. – Д., 2002. – Вип. 12. – С. 64–70.
12. Определение допускаемых скоростей движения грузовых вагонов по железнодорожным путям колеи 1520 мм / В. Д. Данович, В. В. Рыбкин, А. П. Трякин и др. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2003. – Вип. 2. – С. 77–86.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. РД 24.050.37 – 95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
14. Скорости движения в кривых после ремонта / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, Н. В. Халипова и др. // Путь и путевое хоз-во. – 2007. – № 10. – С. 29–30.
15. Теоретические и экспериментальные исследования по установлению допускаемых скоростей движения поездов по участку пути, отремонтированному с применением современных путевых машин / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, Н. В. Халипова и др. // 36. наук. пр. КУЕТТ. Сер. Трансп. системи і технології. – К., 2005. – Вип. 7. – С. 101–107.
16. Установлення допустимих швидкостей руху поїздів по ділянці колії, відремонтованій із застосуванням сучасних колійних машин / М. І. Уманов, В. В. Циганенко, Н. В. Халіпова та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 9. – С. 81–87.
17. Atkin, R. H. Mathematical structure in human affairs : monograph / R. H. Atkin. – London : Heinemann, 1974. – 212 p.
18. Kos, Wladyslaw. Krywe przejsciowe z nieliniowym rampami przechylkowym w warunkach eksploatacyjnych PKP / Wladyslaw Kos // Zesz. nauk. Pgdan. Bud. Lad. – 1990. – № 47. – P. 1–129.
19. UIC Code 513 R (1–st edition, 1.7.94). Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. – Paris : Int. Union of Railways, 1995. – 81 p.

Н. В. ХАЛИПОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Транспортные системы и технологии», Академия таможенной службы Украины, ул. Дзержинского, 2/4, Днепропетровск, Украина, 49000, тел. +38 (056) 469 598, эл. почта khalipov@rambler.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. При моделировании взаимодействия элементов системы «экипаж–путь» необходимо учитывать разные по своему содержанию критерии, а также анализировать влияние многих факторов и фактора неопределенности и случайности на основные показатели для обеспечения оптимальных или же рациональных параметров работы системы. Исследование процесса взаимодействия требует новых теоретических подходов к формулированию задач, основанных на обобщении существующих подходов к моделированию. Цель данной работы – развитие модели взаимодействия пути и подвижного состава на основе применения множественной структуры объектов. **Методика.** Выделены и сформированы основные критерии оценки решений задачи оптимизации динамического взаимодействия пути и подвижного состава – обеспечение качества и безопасности осуществления процесса перевозок, повышение их эффективности и снижение себестоимости. На основе использования методов векторной оптимизации предложена модель системы взаимодействующих элементов подвижного состава и пути. Для синтеза модели применено математический аппарат из множественной структуры объектов. **Результаты.** Обобщены подходы к моделированию системы в задачах взаимодействия подвижного состава и пути для элементов разной конструкции при различных условиях эксплуатации. Данный теоретический подход продемонстрирован на примерах моделирования взаимодействия пассажирского и грузового вагонов и пути при разных эксплуатационных условиях. **Научная новизна.** Предложен теоретический подход к решению задачи взаимодействия пути и подвижного состава, основанный на синтезе существующих моделей путем применения множественной структуры объектов. **Практическая значимость.** Использование предложенной модели дает возможность структурировать основные данные и показатели при моделировании процессов взаимодействия подвижного состава и пути, формировать оптимальные и рациональные параметры функционирования системы, определять эффективные эксплуатационные параметры и систему мероприятий по рациональному использованию инфраструктуры.

Ключевые слова: моделирование системы «экипаж–путь»; оптимальные и рациональные параметры взаимодействия; теория множеств; векторная оптимизация; множественная структура объекта

N. V. KHALIPOVA^{1*}

^{1*}Dep. "Transport Systems and Technologies", Academy of Customs Service of Ukraine, ul. Dzerzhinsky, 2/4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 469 598, e-mail khalipov@rambler.ru

MODELING OF THE TRACK AND ROLLING STOCK INTERACTION

Purpose. Interaction of system's elements of "carriage-track" modelling requires consideration of various criteria, it also requires analysis of many uncertainty and randomness factors' influence on the basic parameters to ensure optimal or rational parameters of the system. The researching of interactions' process requires new theoretical approaches to formulation of objectives, based on a generalization of existing modeling approaches. The purpose of this work is development of interaction models between track and rolling stock based on multiple structures of objects. **Methodology.** Dedicated and formed the main evaluation criteria of dynamic interaction between track and rolling stock optimization - quality assurance and safety of transportation process, improving of their efficiency and reducing of prime cost's. Based on vector optimization methods, proposed model of rolling stock and track's elements interaction. For the synthesis of the model used mathematical machine of multiple objects structures. **Findings.** Generalized approaches to modeling in the interaction of rolling stock and track for different structural elements of the system under different exploitation conditions. This theoretical approach demonstrated on the examples of modeling of passenger and freight cars with track under different exploitation conditions. **Originality.** Proposed theoretical approach to the problem of track and rolling stock interaction, based on a synthesis of existing models by using of multiple objects structures. **Practical value.** Using of proposed model allows to structure key data and rational parameters of rolling stock and track interaction's modeling and to formulate optimal and rational parameters of the system, to determine the effective exploitation parameters and measurement system for rational use of infrastructure.

Keywords: simulation of "carriage-track" system; optimal and rational parameters of interaction; the multiple objects structure

REFERENCES

1. Bosov A.A., Ilman V.M. Strukturna skladnist system [Structural complexity of systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, no. 40, pp. 173-179.
2. Bosov A.A. *Funktsii mnozhyn ta yikh zastosuvannia* [The functions of sets and their applications]. Dniprodzerzhynsk, Vyd. dim «Andrii» Publ., 2007. 182 p.
3. Verigo M.F., Kogan A.Ya. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [Track and rolling stock interaction]. Moscow, Transport Publ., 1986. 559 p.
4. Vershinskiy S.V., Danilov V.I., Khusidov V.D. *Dinamika vagonov* [Dynamics of cars]. Moscow, Transport Publ., 1991. 360 p.
5. Rybkin V.V., Tsyganenko V.V., Umanov M.I., Khalipova N.V. Vliyaniye parametrov kolei v perekhodnykh krivykh na dinamiku i komfortabelnost yezdy [Influence of track parameters in transition curves on the dynamics and ride comfort]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2002, no. 5, pp. 25-27.
6. Danovich V.D., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Matematicheskaya model vzaimodeystviya puti i passazhirskogo vagona pri dvizhenii po uchastkam proizvolnoy krivizny [A mathematical model of track and carriage interaction under motion on sections of arbitrary curvature]. *Transport* [Transport], 2001, no. 8, pp. 124-138.
7. Danovich V.D., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Uravneniya dvizheniya zheleznodorozhnogo ekipazha v perekhodnykh i krugovykh krivykh [The equations of railway carriage motion in the transition and circular curves]. *Transport* [Transport], 2001, no. 10. pp. 86-91.
8. Danylenko E.I., Orlovskiy A.M., Taturevych A.P., Sushkov V.F., Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Vorobeychik L.Ya., Patlasov O.M., Rabinovych M.P., Zakapko V.Ya., Buchko V.M., Koidan V.I., Rybachok P.I., Korsun V.P. *Instruktsiia po ustroiu ta utrymanniu kolii zaliznyts Ukrainy* [Instruction on organization and keeping track railways of Ukraine]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 1999. 248 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

9. Danovich V.D., Rybkin V.V., Tryakin A.P., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. K voprosu ob ustoychivosti protiv vkatyvaniya kolesa na rels dlya porozhnykh gruzovykh vagonov [To the question of stability against climb-on of a wheel for empty freight cars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, no. 3. pp. 90-95.
10. Kogan A.Ya. *Dinamika puti i yego vzaimodeystviye s podvizhnym sostavom* [Track dynamics and its interaction with rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997. 326 p.
11. Danovich V.D., Tsyganenko V.V., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Kolebaniya passazhirskogo vagona pri vkhode v perekhodnuyu krivuyu [Fluctuations of a passenger car at the transition curve entering]. *Transport* [Transport], 2002, no. 12, pp. 64-70.
12. Danovich V.D., Rybkin V.V., Tryakin A.P., Myamlin S.V., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Opredeleniye dopuskayemykh skorostey dvizheniya gruzovykh vagonov po zheleznodorozhnym putyam kolei 1520 mm [Maximum permissible velocity test of freight cars on 1520 mm railway tracks]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, no. 2, pp. 77-86.
13. RD 24.050.37 – 95. *Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva* [Freight and passenger cars. Test methods for strength and riding properties]. Moscow, GosNIIV Publ., 1995. 101 p.
14. Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Khalipova N.V., Reydemeyster A.G., Sysyn N.P., Kurgan D.N. Skorosti dvizheniya v krivykh posle remonta [Velocity in the curves after repair]. *Put i putevoye khozyaystvo – Road and track facilities*, 2007, no. 10, pp. 29-30.
15. Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Khalipova N.V., Reydemeyster A.G., Sysyn N.P., Kovalev V.V. Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya po ustanovleniyu dopuskayemykh skorostey dvizheniya poyezdov po uchastku puti, otremonirovannomu s primeneniym sovremennykh putevykh mashin [Theoretical and experimental studies to establish the permissible train velocity on the section of a track which was repaired with modern track machines] *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnologii transportu: Seriya Transportni systemy i tekhnologii* [Proc. of State Economy and Technology University of Transport: Series Transportation Systems and Technology], 2005, issue 7, pp. 101-107.
16. Umanov M.I., Tsyhanenko V.V., Khalipova N.V., Reidemeister A.H., Kovalev V.V. Ustanovlennia dopustymykh shvydkostei rukhu poizdiv po diliansi kolii, vidremontovanii iz zastosuvanniam suchasnykh koliinykh mashyn [Setting of permissible trains velocity at the section of a track, renovated with modern track machines] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, no. 9, pp. 81-87.
17. Atkin R.N. *Mathematical structure in human affairs*. London, Heinemann Publ., 1974. 212 p.
18. Kos Wladyslaw. *Krywe przejsciove z nieliniowym rampami przechylkowym w warunkach ek-sploatacyjnych PKP. Zesz. nauk. Pgdan. Bud. Lad.*, 1990, no. 47. pp. 1-129.
19. UIC Code 513 R (1–st edition, 1.7.94). *Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles*. Paris, International Union of Railways Publ., 1995. 81 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. А. А. Босовим (Україна); д.т.н., проф. Г. Г. Головіновим (Україна)

Надійшла до редколегії 21.06.2013

Прийнята до друку 02.09.2013