

УДК 622.24.0010

## КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ КЕРОВАНОСТІ РЕЙКОВИХ ЕКІПАЖІВ

Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю., Малюк С.В.

### CRITERIA OF RAILWAY VEHICLE HANDLEABILITY

Tkachenko V., Saponova S., Maliuk S.

*У роботі формалізовано поняття керованості рейкових екіпажів та запропоновано критерії її оцінки.*

*Обґрунтовано нові поняття: «керованість рейкових екіпажів» та «кінематичний опір руху». Зокрема, кінематичний опір руху визначено, як складову загального опору руху, пов'язаного з кінематичними невідповідностями між траєкторією руху екіпажу і геометричними параметрами поверхонь кочення коліс колісних пар при спрямуванні екіпажів рейковою колією.*

**Ключові слова:** рейковий екіпаж, керованість, опір руху, фрикційна взаємодія екіпажу і колії, колісна пара, рейка.

**Вступ.** Поняття керованості широко використовується в теорії руху колісних і гусеничних машин, водних і повітряних суден, космічних апаратів. Керованість – властивість транспортної машини підкорятися керуючому впливу. Керованість машини визначається її реакцією у вигляді зміни шляхових, курсових або бічних кінематичних параметрів на керуючий вплив з боку органу управління. Наприклад, у разі автомобіля цим впливом є поворот рульового колеса, в літаку – штурвала або ручки управління і т. д. У залізничних екіпажів, як відомо, немає таких органів управління, і зміна траєкторії руху здійснюється рейковою колією під дією горизонтальних шляхових сил.

Використовуючи термінологію теорії управління колісних машин, автори розглядають якісні показники керованості рейкових екіпажів, пов'язуючи їх з додатковим впливом на екіпаж з боку колії в процесі управління, а саме – додатковим опором руху.

Ідея зменшення опору руху є дуже привабливою через економічний чинник, наприклад, зниження опору усього на 1 % дозволило б щороку економити на одному локомотиві до 150 МВт-год електроенергії або близько 12 т дизельного палива.

**Постановка проблеми.** Поїзд при русі зазнає протидію багатьох сил, різних за причинами виникнення, природою і величиною. Багато з цих сил взаємопов'язані, багато випадкові. Сумарний ефект від

усіх сил протидії руху прийнято оцінювати як опір руху поїзда. Відповідно до цього опором руху називають еквівалентну силу, приведену до обох коліс, на подолання якої витрачається така ж робота, як і на подолання всіх дійсних сил, що протидіють руху. Силами опору називають зовнішні сили, прикладені до поїзда і спрямовані в бік, протилежний його руху. Відповідно до прийнятої класифікації сили опору руху, що діють постійно, складають основний опір руху, а ті що діють періодично відносяться до додаткового опору.

**Виділення невирішеної проблеми.** При проектуванні нових типів рухомого складу, через відсутність відповідної методики, характеристики опору руху не аналізуються [1]. Часто це призводить до невиправданого збільшення в експлуатації фрикційних навантажень на контакти коліс із рейками, які, виконуючи роль фрикційних демпферів з високим рівнем розсіювання енергії, створюють додатковий опір руху. Непрямим тому підтвердженням можуть бути експлуатаційні дані з інтенсивного підрізу гребнів і боковому зносу головок рейок [3].

Розгляд системи екіпаж-колія, як групового багатоконтактного колісного рушія, дозволяє виявити природу додаткової складової загального опору руху, пов'язаної із спрямуванням екіпажів рейковою колією. Ця складова має значний вплив на знос контактних поверхонь коліс і рейок.

Автори вважають що складова опору руху, пов'язана із спрямуванням екіпажів рейковою колією, тобто керованістю, є найбільш привабливими щодо його зменшення.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Першим найбільш докладним дослідженням спрямування екіпажів рейковою колією, як фрикційної взаємодії коліс і рейок можна вважати працю Х. Хеймана [2]. В роботі закладено основні ідеї, спрямування рейкових екіпажів колією. Хоча основну увагу було сфокусовано на силах спрямування, але робота стала підґрунтям подальших досліджень

зокрема опору руху, пов'язаного із спрямуванням колісних пар колією.

Відносна кінематика колісних пар і колії і знос коліс і рейок в кривих ділянках колії розглядався у роботі [4]. Модель контактування рейкового екіпажу і колії розглядається як система багатоточкового контакту коліс і рейок. Аналізуються кінематичні проковзування у контактах при радіальній і оптимальній установці колісних пар в колії. Зроблено висновок про суттєвий вплив паразитних проковзувань на знос коліс і рейок.

Оцінці спрямовуючих сил при проходженні екіпажем кривих малого радіусу присвячено роботу [5]. Оцінку зроблено відповідно до європейського стандарту EN14363 (UIC 518), який використовується при розробці нових, реконструйованих або модернізованих залізничних транспортних засобів. Викладена методика визначення квазістатичного спрямовуючого зусилля непрямим чином підтверджує значний рівень опору руху, пов'язаного із спрямуванням екіпажу колією малого радіусу.

Одним з найбільш актуальних питань залізничної галузі є збитки, пов'язані впливом на інфраструктуру залізниці стану колії і зносу поверхонь кочення коліс транспортних засобів. Дослідженням впливу умов експлуатації рухомого складу на еволюцію зносу залізничних коліс і, як наслідок, на зміну їх профілів та на сили взаємодії транспортного засобу і колії присвячено роботу [6]. Досліджувались навантаження, що діють на залізничну інфраструктуру з боку поїзда на різних швидкостях, на ділянках колії з нерівностями і без нерівностей, а також з колесами, які мають нові та зношені профілі. Дослідження показали, що динамічні навантаження на колію, практично не залежить від стану зносу коліс. З іншого боку, нерівності рейок можуть істотно впливати на сили взаємодії транспортного засобу і колії.

У роботі [7] на основі динамічних багатомасових математичних моделей досліджувалася динаміка руху поїзда у кривих ділянках колії. Задачею досліджень було з'ясування впливу експлуатаційних умов руху поїзда на процес деградації коліс і рейок. З цією метою було введено поняття «робочі умови експлуатації», як базові для порівняння результатів досліджень. Розглядалися різні варіанти геометрії коліс і рейок. За результатами дослідження відмічається великий вплив на деградацію коліс і рейок, насамперед геометрії профілю коліс, радіусу кривої. Зроблено також висновок про залежність виду деградації поверхонь кочення коліс і рейок від умов експлуатації, а саме: у кривих великих радіусів з високим рівнем бічних нерівностей переважає втомне руйнування поверхонь кочення. Для кривих малого радіусу механізм фрикційного зносу є домінуючим, а збільшення рівня бічних нерівностей призводить до переходу до змішаного втомно-зносного режиму деградації. Вплив геометрії коліс і рейок на деградацію вивчався параметризацією геометрії профілів коліс шляхом отримання мета-моделі через регресійний аналіз. Користуючись загальноприйнятною

енергетичною теорією зносу, що пов'язує знос із фрикційними силами взаємодії у контактах коліс і рейок, можна зробити додатковий висновок про залежність сил опору руху від радіусу кривих і горизонтальних нерівностей колії.

Зменшення зносу профілів коліс високошвидкісних поїздів і продовження терміну служби коліс є задачею багатьох досліджень. У роботі [8] ця задача вирішується на математичній моделі високошвидкісного поїзда, в якому колеса розглядалося як гнучкі тіла, шлях без нерівностей. Глибина зносу профілю колеса розраховувалася за відомим законом Арчарда (Archard). За допомогою цієї моделі було вивчено вплив профілю колеса, первинної жорсткості підвіски, ширини колії на знос профілю колеса. Результати моделювання дозволили порівняти профілі коліс щодо зносостійкості поверхонь кочення і визначити параметри «оптимального» профілю. Наприклад, профіль типу XP55 показав найменшу сукупну глибину зносу, а профіль LM – має найбільшу глибину зносу. Зроблено висновок: для зменшення зносу профілю уклон поверхні кочення повинен бути у межах 1:35 - 1:40.

Робота [9] також присвячена аналізу факторів, що впливають на фрикційні процеси у контакті коліс із рейками. Докладно розглядається гармонійна модель зносу колеса в підгребеневій і гребеневій частині профілю поверхні кочення. Засновуючись на теоретичних положеннях теорії Клінгеля (Klingel) автори вважають, що кінематичні поперечні коливання, що отримали назву «вильяння», є основною причиною динамічних нормальних і тангенціальних навантажень у контактах коліс із рейками. Вочевидь, що до цих навантажень слід віднести і сили опору руху, як пов'язані із спрямуванням екіпажів рейковою колією. Автори запропонували характеристики залежностей цих сил від геометрії і властивості матеріалу контактуючих поверхонь коліс і рейок.

**Мета роботи.** Удосконалення структури опору руху на основі формалізації його складових, пов'язаних із фрикційною взаємодією коліс із рейками і спрямуванням екіпажів рейковою колією.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Дослідження характеристик керованості рейкових транспортних засобів в тому вигляді, як вона розглядається в теорії руху колісних машин, є тривіальною задачею, через те, що в цьому випадку має місце управління за жорсткою програмою, і його результат, за винятком випадків сходу екіпажу з рейок, заздалегідь відомий. Однією з подібних характеристик керованості є, зокрема,  $\mu$ , яка визначається мінімальним радіусом кривої, у яку можливе вписування екіпажу. Термін «поворотність» аналогічний вписуванню за Цеглинським і Королевим.

Якісні показники керованості рейкових екіпажів пов'язані з додатковим впливом на екіпаж з боку колії, як органу управління та на колію у вигляді силової реакції екіпажу на керуючий вплив, пов'язаний з процесом управління.

Насамперед, – це горизонтальний вплив па колію. Слід розрізняти два режими управління екіпажу рейковою колією: режим кінематичного вписування, при якому жодна з колісних пар екіпажу не має гребеневого контакту коліс з рейками і режим силового вписування, для якого характерним є спрямування колісних пар з гребневим дотиком. Очевидно, в режимі кінематичного вписування рівень впливу екіпажу на колію буде нижче, ніж в режимі силового вписування.

Іншим якісним показником керованості є додатковий опір руху, пов'язаний із спрямуванням екіпажу рейковою колією, як процесом управління.

У процесі управління екіпажу рейковою колією спостерігається циркуляція силових потоків в замкнутих контурах, утворених елементами ходової частини, приводу і колісними парами. Потужні силові потоки, що циркулюють, хоча і пов'язані з направляючою функцією колісних пар, як правило, є паразитними. Вони призводять до значних додаткових проковзувань в контактах коліс з рейками і, як наслідок, – до механічних втрат та підвищення опору руху, особливо у кривих ділянках колії.

Крім того, додаткові проковзування у контактах коліс і рейок, не пов'язані з проявом тягового зусилля, різко знижують граничні значення коефіцієнта зчеплення, тобто погіршують тягово-динамічні і гальмівні характеристики рухомого складу. Згаданий вище кінематичний опір руху, тісно пов'язаний з напрямними зусиллями і фрикційною взаємодією колісних пар з рейками.

Таким чином, процес управління рухом екіпажу – вписування – пов'язаний з двома групами силових факторів: напрямними і факторами опору.

За існуючою класифікацією опору руху він поділяється на основний і додатковий. До основного опору руху відносять складові, що діють при русі у прямій горизонтальній колії завжди, а до додаткового – складові, що діють не завжди і з'являються в особливих умовах руху. Класифікація опору руху базується на принципі зручності для його експериментального дослідження і використання у тягових розрахунках, але стримує пошук шляхів його зменшення.

Система спрямування залізничних екіпажів рейковою колією являє собою груповий багатокілісний багато-контактний фрикційний рушій. У порівнянні із іншою колісною технікою залізничні екіпажі мають три основні відмінності.

Перша: локомотиви і вагони мають спарені колеса на практично жорстких осях – колісні пари.

Друга: колісні пари формуються – по дві або по три – у візку з паралельними в плані осями.

Третя: спрямування екіпажів рейковою колією відбувається, в основному, завдяки наявності на колісних парах гребнів, що відіграють роль обмежувачів бокового переміщення у межах колії.

Саме ці відмінності, що лежать у первинній основі залізниці, є причиною кінематичного опору руху, дослідженню якого присвячено дану статтю.

За типологією класифікація будується на істотних ознаках і заснована на понятті типу, як одиниці розподілу об'єкту класифікації. Коректність розподілу заснована на двох принципах: повнота розподілу і чистота розподілу. Відповідно до першого – всі члени розподілу повинні бути перераховані. Відповідно до другого – члени розподілу не мають бути пересічними поняттями.

Розглянемо складові «Опір тертя ковзання коліс по рейках» і «Опір руху від кривої ділянки колії». За прийнятою класифікацією вони відносяться до різних типів: перша – до основного опору руху, друга – до додаткового. Але за природою, походженням, механізмом дії і впливом на характеристики рухомого складу їх можна віднести до одного і того ж типу опору – кінематичного опору руху, для якого пропонується наступне визначення.

**Кінематичним опором руху** рухомого складу автори називають опір, пов'язаний із фрикційною контактною взаємодією екіпажу і колії, і виникає внаслідок кінематичного проковзування у контактах коліс і рейок.

Теорія проковзування колеса відносно рейки, запропонована Рейнольдсом (Reynolds), лягла в основу численних наукових робіт, що зробило цей напрям у вивченні опору коченню найбільш розвиненим. Форми профілів колеса і рейки обумовлюють різні радіуси кіл кочення як окремих коліс колісної пари, так і різних точок контакту одного і того ж колеса при двох-точковому контактуванні. Просторовий розподіл швидкостей проковзування призводить до появи диференційного проковзування між основним і гребневим контактами в межах одного колеса. Диференційні проковзування є причиною виникнення паразитних сил у замкнутих силових контурах з вузловими точками у центрах фрикційних контактів і, як наслідок, виникнення додаткового опору руху. Автори пропонують називати опір руху, пов'язаний із диференційним проковзуванням у двох-точковому контакт – **диференційним опором руху**, як складовою кінематичного опору руху.

**Диференційний опір руху.** На рис. 1 показано схему двох-точкового контактування колеса і рейки, яка пояснює природу виникнення диференційного опору руху. Між основним ( $K_1$ ) і гребневим ( $K_2$ ) контактами створюється замкнутий силовий контур, що є причиною паразитного проковзування і утворення сили опору руху ( $F_c$ ).

Система рівнянь рівноваги сил і моментів, що діють на колесо, має вигляд:

$$\begin{cases} F_c = F_{c1} - F_{c2}; \\ F_{c2} \cdot R_2 - F_{c1} \cdot R_1 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $F_c$  опір руху;

$F_{c1}$   $F_{c2}$  сили зчеплення, відповідно, у основному і гребневому контактах;

$R_2$   $R_1$  радіуси кругів кочення, відповідно, для основного і гребеневого контактів.

З системи рівнянь (1) можна отримати вираз для диференційного опору руху:

$$F_c = F_{cu1} \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2)$$

Сили зчеплення визначаються формулами:

$$F_{cui} = N_i \cdot \Psi \cdot k_i \quad (3)$$

де  $N_i$  нормальне навантаження в контактах;

$\Psi$  фізичний коефіцієнт зчеплення у контактах коліс і рейок;

$k_i$  коефіцієнт використання зчеплення.

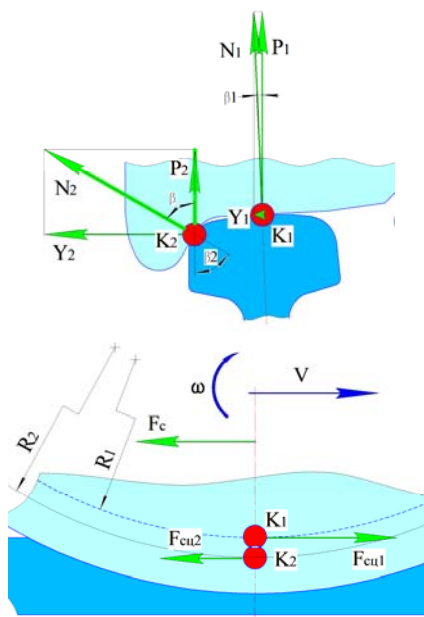


Рис.1. Схема утворення диференційного опору руху при двох-точковому контактуванні колеса і рейки

Величини, зазначені у виразі (2) визначаються наступними формулами:

$$N_i = P_i \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\gamma_i)} \quad (4)$$

де  $P_i$  вертикальні навантаження у контактах;

$\gamma_i$  кути ухилу профіля поверхні кочення у точках контактів.

Вертикальне навантаження в контактах формується зовнішніми силами, що діють на колесо з боку рами візка і рейки. Перерозподіл вертикального навантаження між контактами характеризується коефіцієнтом перекладки контакту  $\chi$

$$\begin{cases} P_1 = (\chi - 1) \cdot P_0; \\ P_2 = \chi \cdot P_0. \end{cases} \quad (5)$$

Коефіцієнт використання зчеплення:

$$k_i = \frac{\varepsilon_i}{a \cdot \varepsilon_i^2 + b \cdot |\varepsilon_i| + c} \quad (6)$$

де  $\varepsilon_i$  відносні проковзування у контактах;

$a, b, c$  – коефіцієнти кореляції характеристики зчеплення  $k(\varepsilon)$  Відносні проковзування в контактах:

$$\varepsilon_i = \frac{\omega \cdot R_i - V}{V} = \frac{R_i - R_0}{R_0} \quad (7)$$

Тут  $V$  швидкість руху центру колеса;

$\omega$  кутова швидкість обертання колісної пари;

$R_0$  середній радіус круга кочення коліс.

Для оцінки рівня диференційного опору руху відмітимо, що у реальних умовах при двох-точковому контактуванні різниця радіусів контактів  $\Delta R = R_1 - R_2$  оже досягати 10...14 мм. При цьому значення проковзування відповідно можуть досягати 0,9 ... 1,3 %, що близьке до критичного, коли  $k_i = 1$

З урахуванням (2)-(7) диференційний опір руху може досягати рівнів, що визначаються формулою:

$$F_c = N_1 \cdot \Psi \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (8)$$

звідки для  $k_1 = 1$  а  $\Psi = 0,33$  тримаємо рівень питомого диференційного опору руху:

$$w_0 = \chi \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \gamma} = 0,6 \cdot \chi \frac{H}{kH} \quad (9)$$

Диференційний опір руху виникає завжди, коли створюються умови для гребеневого контактування коліс і рейок, а саме у наступних випадках:

- при русі екіпажу у кривих ділянках колії коли, якщо одне, або декілька коліс мають гребеневе контактування з рейкою;
- при русі у прямих ділянках колії у режимі ударного набігання коліс на рейки. Цей режим є типовим при середніх і великих швидкостях руху рухомого складу;
- при порушеннях геометрії установки колісних нар в рамі візка: перекосах, поперечних відхиленнях від нормального положення.

В роботі [10] при випробуваннях на експериментальній стендовій установці підтверджено значне підвищення опору руху колісної пари від різниці радіусів коліс, що виникає при поперечному зсуві або кутовому повороті колісної пари відносно осі колії.

**Циркуляційний опір руху.** Значну частину опору руху в кривих ділянках колії, становить опір,

обумовлений циркуляцією паразитної потужності у замкнутих силових контурах групового колісного рушія, як системи спрямування екіпажу рейковою колією. Колеса і колісні пари при русі в складі одного екіпажу відчувають взаємний вплив один на одне через безперервно мінливі кінематичні параметри кожного окремого контакту колеса з рейкою.

Сам принцип спрямування екіпажу рейками за рахунок сил взаємодії екіпажу і колії в точках контакту вимагає наявності керуючих впливів з боку рейок, які неминуче призводять до появи додаткового опору руху. Додатковий опір руху, що є результатом групової взаємодії коліс з рейками і циркуляції паразитної потужності в замкнутих силових контурах колісних пар та візків автори пропонують називати **циркуляційним опором руху**.

Циркуляційний опір руху  $F_c$  може бути визначений з системи рівнянь (рис. 2):

$$\begin{cases} F_c + F_{cu1} - F_{cu2} = 0; \\ (F_{o1} + F_{o2}) \cdot B - (F_{cu1} + F_{cu2}) \cdot A = 0. \end{cases}$$

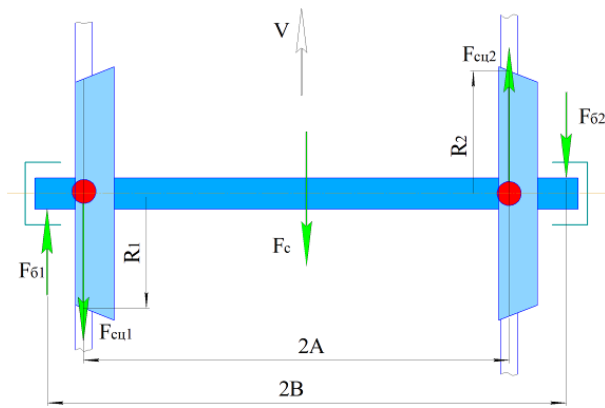


Рис.2. Схема утворення циркуляційного опору руху колісної пари

При русі колісної пари в рейковій колії кожному її поперечному положенню відносно осі колії, який визначає радіус конусів катання коліс, відповідає миттєвий радіус повороту, при якому вона може перекинутися без проковзувань у контактах з рейками, рухаючись по так званій рівноважній траєкторії.

Однак, внаслідок взаємодії між колісними парами через раму візка, фактична траєкторія кочення кожної з колісних пар відрізняється від рівноважної. Досить жорсткий кутовий зв'язок між колесами призводить до циркуляції потужності в контурі «рейкова колія-колісна пара», перерозподілу силового потоку між колесами і, як наслідок, підвищенню опору руху, а у локомотивів, до того ж, і погіршенню зчпних якостей.

У разі групового приводу колісних пар силовий контур має кілька розгалужуються ланцюгів. Енергія циркуляції силового контуру поглинається, в основному, в контактах коліс з рейками, а частково, в

дисипативних зв'язках візки. Нерівномірність перерозподілу силового потоку між колесами залежить від декількох факторів:

- жорсткості характеристик зчеплення;
- крутильної жорсткості осі, тобто параметрів зв'язку коліс;
- геометричних характеристик колісної пари, включаючи конусність і діаметр поверхонь катання коліс, ширину колії і базу візка;
- параметрів поздовжніх і поперечних буксових зав'язків колісної пари з рамою візка;
- радіусів кривої ділянки колії.

Як було зазначено, циркуляційний опір є сліднаслідком циркуляції силових потоків в замкнутих контурах. Контакти коліс з рейками виконують роль роз'єднуючих вузлових точок. Рівень циркулюючої потужності обмежується граничними значеннями сил зчеплення в контактах, завдяки проковзуванню. Прослизання в контактах коліс з рейками, пов'язані з двома парціальними рухами колісної пари: прямолінійним і кутовим навколо миттєвого центра повороту. Дійсний рух колісних пар є сумою цих рухів.

Існування циркуляційного опору руху яскраво підтверджується явищем коливання впливання колісних пар і візків. Можна сказати, що на коливання впливання витрачається паразитна енергія, що циркулює у замкнутих силових контурах колісних пар.

Диференціальний та циркуляційний опір руху є складовими кінематичного опору руху. Кінематичний опір руху має ознаки і основного і додаткового опору, тому, умовно, при русі в прямих ділянках колії його слід розглядати, як частину основного, а при русі в кривих, як частину додаткового. Диференціальний та циркуляційний опір руху виникає, як правило, при наявності замкнутих силових контурів, типових не тільки для випадку взаємодії залізничних екіпажів і колії, а й для багатьох інших динамічних систем з багато-поточною передачею сил і моментів. Динамічні процеси при розгалуженні силових потоків, притаманні приводам більшості транспортних засобів, частково досліджуються за допомогою теорії силового потоку. Деяку подобу силових контурів можна побачити в теорії електричних ланцюгів. Однак, багато явищ, що відбуваються в замкнутих пружних силових контурах механічних передач, можуть бути описані тільки за допомогою теорії замкнутих силових контурів, яка потребує уточнення.

У вітчизняній і зарубіжній літературі даних щодо кількісних характеристик кінематичного опору руху вкрай мало. Практично єдиним і далеко не повним його дослідженням можна вважати теоретичні і експериментальні роботи, виконані для вантажних вагонів в Дослідницькому Центрі залізниці США в Пуебло в 1984-85 рр. У статті [11], присвяченій означеним дослідженням, відмічається значне підвищення опору руху в кривих ділянках колії, навіть при незначній розбіжності в діаметрах коліс на одній колісній парі.

Досліджень, присвячених розробці принципів проектування екіпажів з низьким опором руху на основі технічних рішень з більш раціональним розподілом кінематичного проковзування в контактах коліс з рейками авторами не знайдено.

**Висновки.** У статті пропонується розглядати спрямування екіпажів рейкової колією, як процес управління траєкторією руху. Використовуючи термінологію з теорії управління колісних машин, автори в той же час розглядають якісні показники керованості рухом рейкових екіпажів, яких немає в згаданій теорії. Якість управління пов'язується з додатковим впливом на екіпаж з боку колії, як органу управління, і на колію у вигляді силової реакції екіпажу на керуючий вплив, пов'язаний з процесом управління.

Запропонована в статті методика оцінки якості вписування рейкових екіпажів в криві ділянки колії за показниками керованості, як універсальної характеристики динамічних і тягових якостей і опору руху, дозволяє виробити загальні підходи до конструювання ходових частин рухомого складу на основі комплексної методики оцінки деяких якісних показників рейкових екіпажів.

#### Література

- Fomin, O.V. Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages / O.V. Fomin // Scientific Bulletin of National Mining University . 2015, Issue 2, p.68-76.
- Хейман Х. Направление экипажей рельсовой колеей. □ М:Трансжелдориздат, 1957. 416 с.
- Бабаев А. М. Исследование сопротивления движению автономного рельсового экипажа/ А.М. Бабаев, Н.В. Бодня, Н.Я. Гаркавин // Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. - 2006. - Вип. 12. - С. 107-109
- M. Rosenberger, P. Dietmaier, J. Payer and K. Six. The Influence of the Wheelset Relative Kinematics of Railway Vehicles on Wheel/Rail Wear in Curved Track. Vehicle System Dynamics, Vol. 46, No. 1, 2008, pp. 403-414.
- Zelenka, J., Michalek, T. A New Method of the Assessment of Rail Vehicles Guiding Behaviour in Small-radius Curves. International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 15 (2). 2010. 511-519
- J. Pombo, J. Ambrosio, M. Pereira, R. Verardi, C. Ariaudo, N. Kuka. Influence of Track Conditions and Wheel Wear State on the Loads Imposed on the Infrastructure by Railway Vehicles. Computers and Structures, Vol. 89, No. 21-22, 2011, pp. 1882-1894
- K. Karttunen. Influence of rail, wheel and track geometries on wheel and rail degradation. Doctor Thesis. Göteborg, 2015.
- N. Wu, J. Zeng. Parametric analysis of wheel wear in high-speed vehicles. Journal of Modern Transportation. 2014, Volume 22, Issue 2, pp. 76-83.
- G. Crabb, S. Brown, P. Sanders, D. Wright, S. McRobbie, H. Viner. Investigation of novel systems for monitoring rail adhesion. Published Project Report - PPR 678. Transport Research Laboratory. 2013. 45 P.
- Miyamoto Masayuki. Экспериментальное исследование процессов упругого скольжения в зоне контакта колеса и рельса/ J.Railway Eng.Assoc.-1985.-V.28.-№7.-P.16178-16181.
- Elkins J.A., Wilson N.G. Train Resistance Measurement Using a Roller Rig/ Vehicle Syst.Dyn.-1985.-V.14.-№1-3.-P.46-51.

#### References

- Fomin O.V. Povysheniye stepeni ideal'nosti gruzovykh vagonov i prognozirovaniye ikh etapov evolyutsii / O.V. Fomin // Nauchnyy vestnik natsional'nogo gornogo universiteta. 2015, vypusk 2, s. 68-76.
- Kheyman KH. Napravleniye ekipazhey rel'sovoy koleyey. □ M: Transzheldorizdat, 1957. 416 s
- Babayev A. M. Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu avtonomnogo rel'sovogo ekipazha / A.M. Babayev, N.V. Bodnya, N.YA. Garkavin // Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. - 2006. - Vip. 12. - S. 107-109
- M. Rozenberger, P. Ditmayyer, Dzh. Payer i K. Shestoy. Vliyaniye otноситel'noy kinematiki kolesnykh par zheleznodorozhnogo transporta na iznos koles / rel'sov v krivolinyeynom treke. Dinamika transportnogo sredstva, Vol. 46, N 1, 2008, pp. 403-414.
- Zelenka Dzh., Mikhalek T. Novyy metod otsenki povedeniya napravlyayushchikh rel'sovykh transportnykh sredstv v krivykh malogo radiusa. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhniki. 15 (2). 2010. 511-519
- J. Pombo, J. Ambrosio, M. Pereira, R. Verardi, C. Ariaudo, N. Kuka. Vliyaniye usloviy dorozhnogo pokrytiya i sostoyaniya iznosa koles na nagruzki, nalagayemye na infrastrukturu zheleznodorozhnyimi transportnymi sredstvami. Komp'yutery i struktury, Vol. 89, No. 21-22, 2011, pp. 1882-1894
- K. Karttunen. Vliyaniye geometrii rel'sov, koles i gusenits na razrusheniye koles i rel'sov. Doktorskaya dissertatsiya. Geteborg, 2015 god.
- N. Wu, J. Zeng. Parametricheskiy analiz iznosa koles v vysokoskorostnykh transportnykh sredstvakh. Zhurnal sovremennogo transporta. 2014, tom 22, vypusk 2, str. 76-83.
- G. Crabb, S. Brown, P. Sanders, D. Wright, S. McRobbie, H. Viner. Issledovaniye novykh sistem kontrolya adgezii rel'sov. Opublikovannyy otchet po proyektu - PPR 678. Transportnaya issledovatel'skaya laboratoriya. 2013 god. 45 P.
- Miyamoto Masayuki. Eksperimental'noye issledovaniye pro-tsessov uprugogo skol'zheniya v zone kontakta kolesa i rel'sa / J.Railway Eng.Assoc.-1985.-V.28.-№7.-R.16178-16181.
- Elkins J.A., Wilson N.G. Izmereniye soprotivleniya dvizheniyu s pomoshch'yu rolikovoy ustanovki / avtomobilya Sist.Dyn.-1985.-V.14.-№1-3.-P.46-51.

#### Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю., Малюк С.В. Критерии оценки управляемости рельсовых экипажей.

*В работе формализовано понятие управляемости рельсовых экипажей и предложены критерии ее оценки. Обоснованы новые понятия: «управляемость рельсовых экипажей» и «кинематический сопротивление движению». В частности, кинематическая сопротивление движения определено, как составляющую общего сопротивления движения, связанного с кинематическими несоответствиями между траекторией движения экипажа и геометрическими параметрами поверхностей качения колес колесных пар при направлении экипажей рельсовой колеей.*

**Ключевые слова:** рельсовый экипаж, управляемость, сопротивление движению, фрикционное взаимодействие экипажа и пути, колесная пара, рельс.

**Tkachenko V., Saprionova S., Maliuk S. Criteria of railway vehicle handleability.**

*The article formalized the concept of railway vehicles handleability and proposed criteria for its evaluation. Developing of new concepts: "handling of railway vehicle dynamics" and "kinematic resistance to movement". In particular, the kinematic resistance to movement is defined as a component of a General resistance movement associated with the kinematic discrepancies between the trajectory of the crew and geometrical parameters of the rolling surface of the wheels of wheelsets in the direction of the crews of the rail.*

**Keywords:** rail carriage, handling, resistance, friction interaction of the crew and the way, a pair of wheels, rail.

**Ткаченко В.П.** – д.т.н., проф. кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» ДЕТУТ.

**Сапронова С.Ю.** – д.т.н., проф. кафедри «Вагони та вагонне господарство» ДЕТУТ.

**Малюк С.В.** – кафедра «Тяговий рухомий склад залізниць» ДЕТУТ.

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 05.03.2017