

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 531.16:629.4.067

### КІНЕМАТИКА РУХУ КОЛІСНОЇ ПАРИ ПІСЛЯ СХОДУ З РЕЙОК

Канд. техн. наук О. В. Оробінський, канд. фіз.-мат. наук Н. А. Аксьонова,  
канд. техн. наук В. М. Петухов

### КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПОСЛЕ СХОДА С РЕЛЬС

Канд. техн. наук А. В. Оробинский, канд. физ.-мат. наук Н. А. Аксёнова,  
канд. техн. наук В. М. Петухов

### KINEMATICS OF MOVEMENT OF A WHEEL PAIR AFTER ITS DERAILMENT

Ph.D.tehn O.V. Orobinskiy, Ph.D.phys-math. N. A. Aksenova, Ph.D.tehn. V. M. Petuhov

*Для створення алгоритму визначення сходу вагона з рейок розроблена кінематична модель руху колісної пари по шпалах. Для цього на першому етапі створення моделі було визначено траєкторію руху колісної пари після її сходу з рейок, визначено миттєві центри швидкостей осі колеса. Кінематичний аналіз такого руху колеса показав, що амплітуда і частота коливань колісної пари при її русі після сходу з рейок залежать від діаметра колеса, ширини шпал, а також від відстані між шпалами. Надалі це дозволить створити надійний алгоритм розпізнавання сходу колісних пар для побудови апаратного і програмного забезпечення технічної системи виявлення сходів вагонів.*

**Ключові слова:** вагон, колісна пара, миттєвий центр швидкості, кінематичний аналіз, траєкторія.

*Для создания алгоритма определения схода вагона с рельс разработана кинематическая модель движения колесной пары по шпалам. Для этого на первом этапе создания модели была определена траектория движения колесной пары после ее схода с рельс, определены мгновенные центры скоростей оси колеса. Кинематический анализ такого движения колеса показал, что амплитуда и частота колебаний колесной пары при ее движении после схода с рельс зависят от диаметра колеса, ширины шпал, а также от расстояния между шпалами. В дальнейшем это позволит создать надежный алгоритм распознавания схода колесных пар для построения аппаратного и программного обеспечения технической системы обнаружения сходо́в вагонов.*

**Ключевые слова:** вагон, колесная пара, мгновенный центр скорости, кинематический анализ, траектория.

*The work is devoted to a deep study of the kinematics of a wheeled pair at the derailment of a railroad car. Attention to this subject is increased, since the damage caused by the descent of passenger and freight trains is sufficiently great. Currently available technical means do not allow timely identification of the car wagon, and the data presented in the literature, sufficiently, do not allow to create the necessary equipment for its detection.*

*In order to solve this problem, the work of studying the movement of the wheeled car after the derailment. A trajectory and a kinematic model of the motion of a wheel along a tie lattice are constructed.*

*The wheel pair after its descent from the rail moves, as a rule, along the sleeper grille. Accordingly, its trajectory of motion depends on the upper structure of the path in this section. In this case, the wheels continue to move along the axis of the path. In this paper, for the initial simplification, only the movement of the wheel in a plane parallel to the vertical plane of the track axis is considered. Also, the inelastic deformation of sleepers at low speeds is not taken into account.*

*The kinematics of the movement of the wheel along the sleepers, that is, after the derailment, has been analyzed. Analytic dependencies of the connection between the movement of the wheel and the parameters of the upper structure of the path are made. It is shown that the amplitude and frequency of oscillations of a wheel pair at its descent depend on the diameter of the wheel, the width of the horizontal surface of the sleeper and the distance between the axes of the sleepers. Instantaneous centers of wheel velocities at characteristic points are determined. The developed kinematic model determines the main diagnostic signs of the derailment of wagons from the rail. This will make it possible to create a reliable descent recognition algorithm for constructing the hardware and software of the technical control system for car wagons from the rail. This model allows us to use it later to create the sensors of the descent.*

**Keywords:** railway carriage, wheel, the instantaneous center of speed, kinematic analysis, trajectory.

**Вступ.** Схід вагонів з рейок – дуже небезпечний інцидент, що призводить до тяжких наслідків. Небезпека полягає також у тому, що виявити його для своєчасної зупинки поїзда досить складно.

Найбільш відомий приклад – катастрофа електропоїзда ІСЕ-1, яка сталася в 1998 році, коли на лінії Ганновер – Гамбург у вагона лопнув бандаж колеса, у результаті чого колісна пара зійшла з рейок. Поїзд проїхав ще понад 6 кілометрів, поки не вдарився об опори автомобільного мосту. У результаті трагедії загинула 101 особа, 88 були поранені.

Не менш актуальною ця проблема є і для вантажних поїздів, оскільки значна шкода від сходів вантажних вагонів завдається економіці і інфраструктурі залізничного транспорту, а також навколишньому середовищу [15]. На жаль, у наш час відсутні надійні системи розпізнавання сходів. Увага дослідників направлена на вирішення завдань щодо усунення причин сходів рухомого складу, але сходи з різних причин відбуваються досить часто. Тому вирішення проблеми

своєчасного виявлення сходів вагонів має важливе як економічне, так і соціальне значення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш повні сучасні дослідження сходів вагонів у результаті дефектів колії або дефектів ходових частин представлені в роботах [3, 5, 6].

Основними причинами сходів вагонів, за дослідженнями [8, 14, 15], є:

- несправності ходових частин рухомого складу;
- наявність переломів профілю колії з різницею ухилу більше 5% і наявність кривих радіусом менше 1000 м;
- застосування рекуперативного гальмування та максимальної тяги;
- рух по кривих з непогашеним прискоренням, близьким до  $0,7 \text{ м/с}^2$ ;
- перевантаження рухомого складу.

У роботі [1] наведені результати досліджень моделювання динамічних зусиль у зоні колесо-рейка у візках Y25.

Створенню математичних моделей коливань вагона при взаємодії з рейковою колією присвячена робота [2].

Комп'ютерному моделюванню динаміки вагонів присвячено роботи [4, 7]. Кінематиці колісної пари при її сході присвячені дослідження [11]. Різні аспекти механізму сходу розглядаються в роботі [12].

Теоретичному розробленню систем виявлення та реєстрації сходу рухомого складу присвячено роботи [10, 13], але в них не розглядаються особливості руху колісних пар по шпалах при сході.

В основній частині розглянутих робіт запропоновано заходи щодо запобігання сходу рухомого складу. Однак детально кінематика і динаміка колісної пари після сходу її з рейок у сучасних дослідженнях не представлені.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є побудова кінематичної моделі руху колісної пари після її сходу. Така модель дозволить у подальшому сформулювати основні діагностичні ознаки сходу, а також на базі цієї моделі побудувати діагностичну модель сходу колісної пари.

Для цього потрібно вирішити такі завдання:

- визначити траєкторію руху колісної пари після сходу її з рейок;

- отримати аналітичний вираз, що зв'язує рух колеса з параметрами верхньої будови колії (шпальної решітки);

- виконати кінематичний аналіз руху колеса по верхній будові колії після сходу.

**Основна частина дослідження.** Як показує досвід, колісна пара після сходу її з рейок рухається по шпальній решітці, зберігаючи загальний напрямок руху вагона. Відповідно її траєкторія руху залежить від верхньої будови колії на даній ділянці. При цьому колеса продовжують рухатися уздовж осі колії. Дослідження кінематики колісної пари проведено для випадку відсутності транспортного запізнення руху одного колеса колісної пари відносно іншого, що може мати місце при коливаннях вилання, вписуванні в криву ділянку колії тощо. Коливальний процес розглянуто у плоскій системі координат (площина  $XZ$ ). Узагальненою координатою є переміщення колеса у вертикальній площині, обумовлені його рухом по шпальній решітці (збурююче зусилля). Також до уваги береться непружна деформація шпал. На рис. 1 наведено фази руху колеса по шпалах.

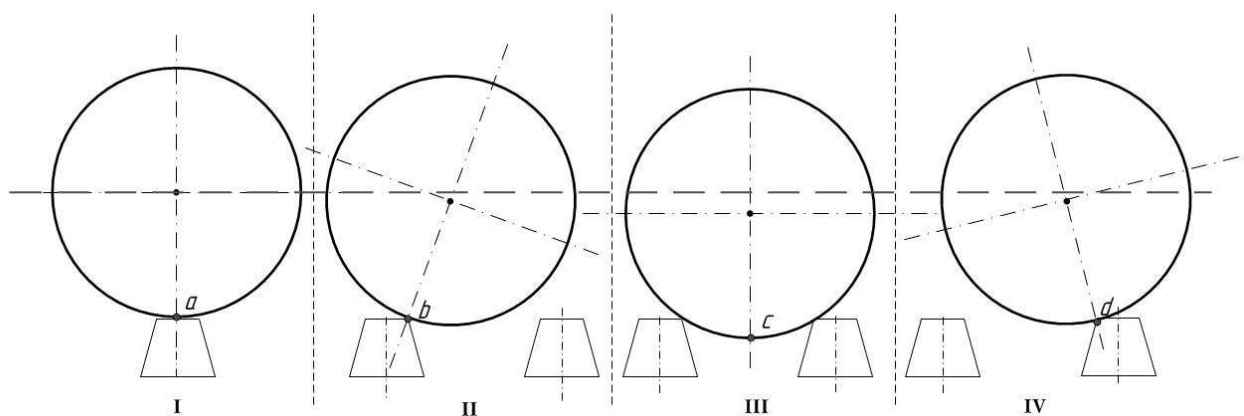


Рис. 1. Фази руху колеса по шпалах

Фаза I – рух колеса по горизонтальній поверхні; II – скокування колеса; III – колесо в міжшпальному просторі; IV –

закочування колеса на шпалу. Схема руху колеса радіусом  $R$  після сходу показана на рис. 2.

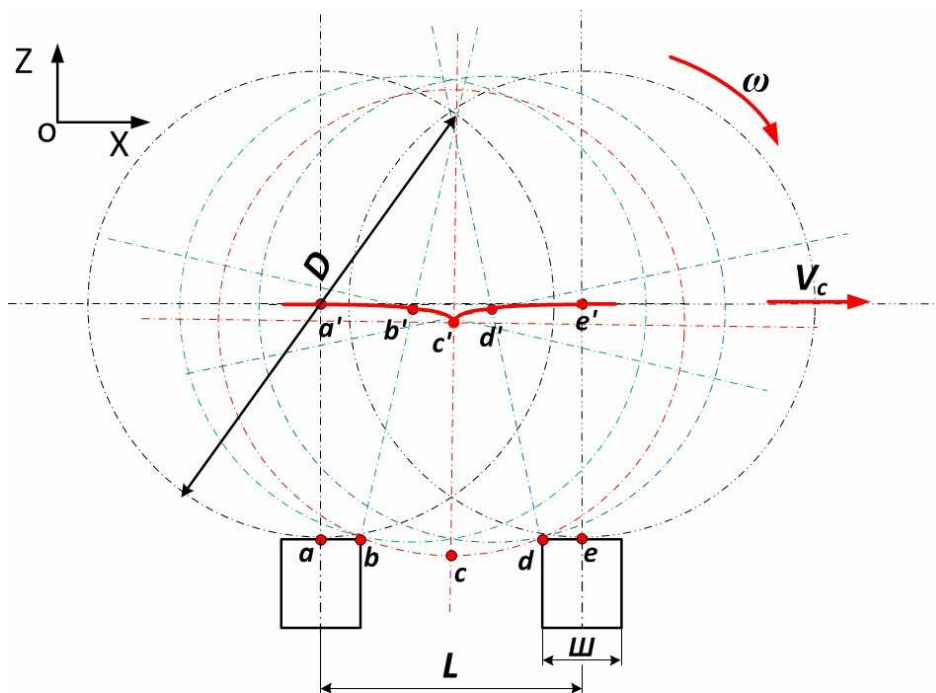


Рис. 2. Схема руху колеса після сходу

Тут характерні точки  $a, e$  – це миттєві центри швидкостей колеса на середині шпал; точки  $b$  і  $d$  – на ребрах шпал;  $c$  – середина відстані між шпалами. Відповідно точки  $a', b', c', d', e'$  – проєкції цих точок на траєкторію руху центра колеса  $C$ . Центр колеса рухається прямолінійно по ділянці, рівній ширині шпали, і по дузі кола на ділянках, де відбувається його скочування в

міжшпальний простір і його викочування на горизонтальну поверхню шпали.

На рис. 3, а зображена траєкторія центра колеса по шпалах, з якого видно, що вона має періодичність  $T$  з відстанню  $L$  між центрами шпал з максимальною амплітудою  $A$  (глибиною провалу) колеса між шпалами (рис. 3, б).

а)



б)

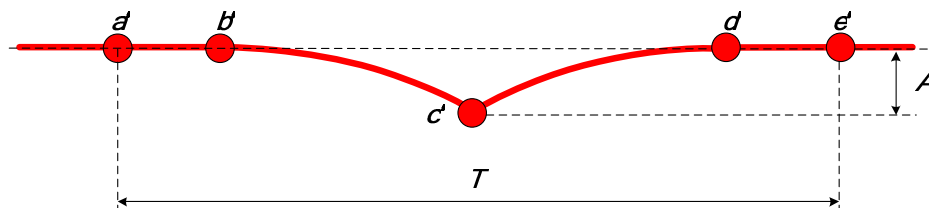


Рис. 3. Траєкторія руху колеса по шпалах

Вертикальна амплітуда колеса буде визначатися виразом

$$A = R - \sqrt{R^2 - (L - u)^2 / 4} , \quad (1)$$

де  $R$  – радіус колеса.

Лінійна частота провалів  $v$  колеса при коченні по шпалах має таку залежність від швидкості руху:

$$v = \frac{V_c}{(L - u)} , \quad (2)$$

де  $L$  – відстань між центрами шпал;  
 $u$  – ширина шпали.

Центр колеса рухається прямолінійно (по горизонтальній ділянці шпали) і по дузі кола (на ділянках, де відбувається скочування колеса з однієї шпали і удар об наступну шпалу).

Рівняння руху центра колеса можуть бути представлені по етапах руху. Закон руху описується функціями, відповідними фазам руху, з періодом  $T$  залежно від часу  $t$  (рис. 3, б).

Перший і четвертий інтервали являють собою прямолінійний рух, а другий і третій – рух по дузі кола (рис. 4). Подальший рух відбувається з періодом  $T$  і постійним збільшенням горизонтальної координати.

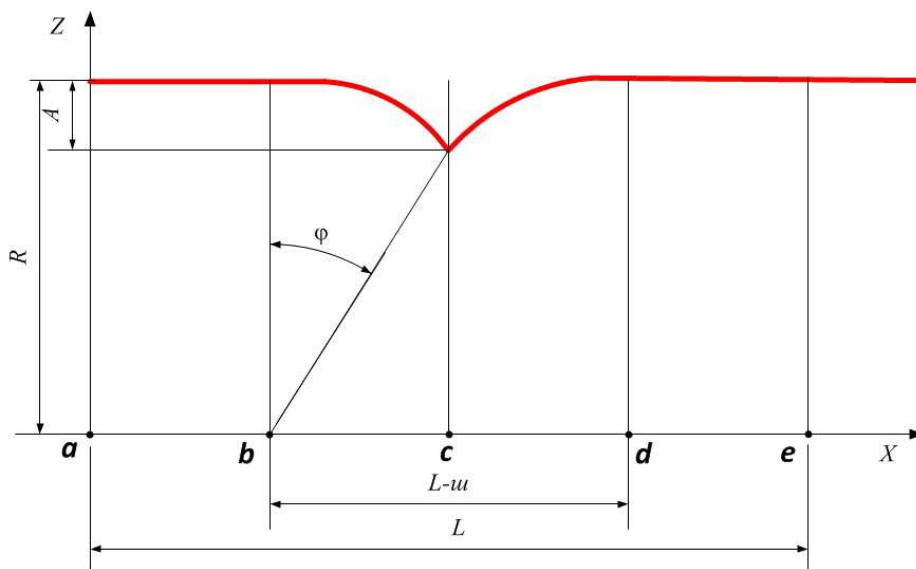


Рис. 4. Графоаналітична залежність для визначення рівняння руху центра колеса

1. На інтервалі  $a \leq x \leq b$

$$x = a + V_c \cdot t; \quad z = R . \quad (3)$$

2. На інтервалі  $b \leq x \leq c$

$$x = b + R \cdot \sin \alpha; \quad z = R \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

де  $\alpha$  – центральний кут, що виникає при скочуванні центра колеса в міжшпальний

простір, при цьому кут  $\alpha$  набуває значення  $0 \leq \alpha \leq \varphi$ , тоді

$$\varphi = \arccos\left(\frac{(R - A)}{R}\right) . \quad (5)$$

3. На інтервалі  $c \leq x \leq d$

$$x = c + R \cdot \sin \alpha; \quad z = R \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

4. На інтервалі  $d \leq x \leq e$

$$x = d + V_c \cdot t; \quad z = R . \quad (7)$$

Періодичні удари вагонного колеса по шпалах викликають різку миттєву зміну

напрямку вектора швидкості  $V_c$  центра колеса, тобто миттєвий центр швидкостей у точці  $c$  переміщається з положення  $b$  в  $d$ . Графік кінематичного аналізу подано на рис. 5.

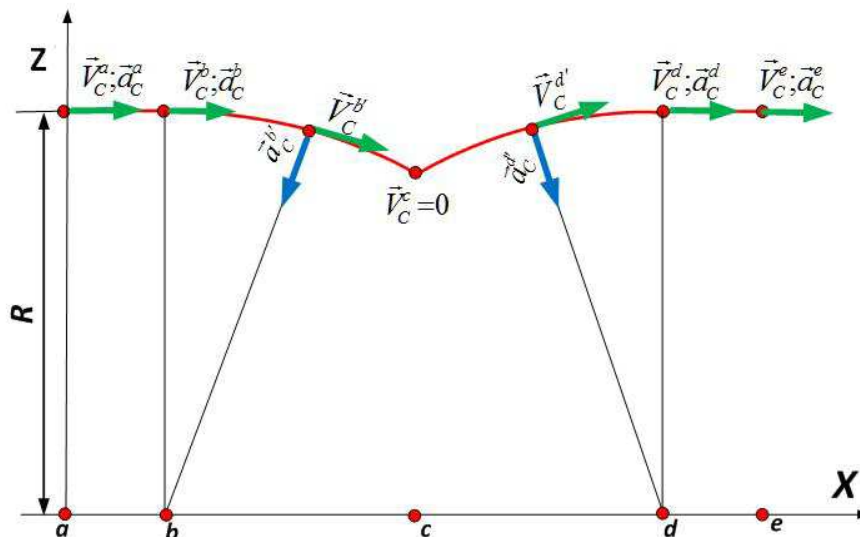


Рис. 5. Кінематичний аналіз руху центра колеса після сходу

При рівномірному русі швидкість  $V_c$  і прискорення  $a_c$  центра колеса визначаються першою і другою відповідно похідними від закону руху точки  $C$  за часом. Тобто при русі по дузі кола вектор швидкості  $V_c$  спрямований по дотичній, а прискорення  $a_c$  по радіусу (рис. 5).

**Висновки.** На основі проведених досліджень у роботі були отримані такі результати:

1. Визначено графічним способом траєкторію руху колеса після сходу його з рейок по шпальній решітці, що виглядає як циклічна комбінація прямолінійних ділянок і сегментів кіл.

2. Отримано аналітичний вираз, що характеризує схід, пов'язує параметри верхньої будови колії (шпальна решітка) і колеса. Показано, що амплітуда і частота коливань колісної пари при її сході залежать від діаметра колеса, ширини

горизонтальної поверхні шпали і відстані між осями шпал.

3. Виконано кінематичний аналіз руху колісної пари після її сходу.

Розроблення кінематичної моделі руху колісної пари після її сходу – це перший етап для побудови динамічної моделі такого руху. Кінцевою метою вивчення цього процесу має стати побудова діагностичної моделі сходу вагонів з рейок на базі представленої моделі. Все це дозволить створити надійний алгоритм розпізнавання сходу для побудови апаратного і програмного забезпечення технічної системи контролю сходів вагонів з рейок. Існуючі вбудовані системи контролю букс при певному доопрацюванні програмного забезпечення цілком здатні визначати схід колісної пари [9].

Таким чином, розроблена кінематична модель руху колісної пари після її сходу

визначає основні діагностичні ознаки сходу вагонів з рейок і дозволяє використовувати

її в подальшому для побудови діагностичної моделі сходу.

### Список використаних джерел

1. Berghuvud, Ansel. Dynamic modelling of freight wagons [Text] / Ansel Berghuvud, Sebastian Stichel, Thomas Nordmark. – Master's Degree Thesis, 2011. – 80 p.
2. Buonsanti, M. Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies [Text] / M. Buonsanti, G. Leonardi // European Journal of Scientific Research. – 2012. – Vol. 86, № 2. – P. 274–282.
3. Iwnicki, S. D. Handbook of Railway Vehicle Dynamics [Text] / S. D. Iwnicki. – London : CRC Press, 2006. – 527 p.
4. Mcclanachan, M. An investigation of the effect of bogie and wagon pitch associated with longitudinal train dynamics, The Dynamics of vehicles on roads and tracks, Vehicle Syst. [Text] / M. Mcclanachan, C. Cole, D. Roach, B. Scown. – Dyn. Suppl. (33), 1999. – P. 374–385.
5. Zeng, J. Study on the wheel/rail interaction and derailment safety [Text] / J. Zeng, P. Wu // Wear. – 2011. – Vol. 9–10, № 265. – P. 1452–1459.
6. Вериго, М. Ф. Взаимодействия пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
7. Ловська, А. О. Комп'ютерне моделювання динаміки несучої конструкції кузова вагона при перевезенні залізничним поромом [Текст] // А. О. Ловська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3 – С. 9–14.
8. Лысюк, В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов [Текст] / В. С. Лысюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 2002. – 215 с.
9. Мартынов, И. Э. Натурные испытания встроенной системы контроля технического состояния буксовых узлов [Текст] / И. Э. Мартынов, В. М. Петухов // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 180–182.
10. Орлова, А. М. Выбор типов, мест расположения датчиков и критериев для сигнализации о сходе грузового вагона на основе математического и физического моделирования [Текст] / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, Н. В. Смирнов // Наука та прогрес транспорту. – Днепропетровск : Днепропетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна, 2004. – № 5. – С.162–166.
11. Панов, Ю. Л. Кинематика колесных пар вагонной тележки [Текст] / Ю. Л. Панов, А. Ю. Панов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – № 4 (1). – С. 180–185.
12. Салтыков, Д. Н. Анализ изменения взаиморасположения элементов грузового вагона в результате схода [Текст] / Д. Н. Салтыков, А. Э. Павлюков // Труды науч.-практ. конф. «Безопасность движения поездов» : сб. докл. – М. : МИИТ, 2004. – С. VI-25–VI-26.
13. Салтыков, Д. Н. Разработка принципов создания устройств регистрации схода с рельсов нетягового подвижного состава [Текст] / Д. Н. Салтыков // Труды Междунар. конф. «Развитие транспортного машиностроения в России» : сб. докл. – М. : ВНИИЖТ, 2004. – С. 135-136.
14. Сокол, Э. Н. Механизм железнодорожно-транспортных происшествий при сходе с рельсов подвижного состава // Матеріали доп. наук.-техн. конф. «Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів», 17-21 лютого 1997 р., м. Славське. – К.; Львів, 1997. – С. 100–102.

15. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) [Текст] : монография / Э. Н. Сокол. – 2-е изд., доп. – К. : Транспорт України, 2004. – 368 с.

---

Оробінський Олександр Васильович, кандидат технічних наук, кафедра механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-52.

E-mail: aorobinskiy@gmail.com.

Аксёнова Наталя Анатоліївна, кандидат фізико-математичних наук, кафедра механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-52. E-mail: naavoneska@gmail.com.

Петухов Вадим Михайлович, кандидат технічних наук, кафедра вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: hiitwagen@gmail.com.

Оробинский Александр Васильевич, кандидат технических наук, кафедра механики и проектирования машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-52.

E mail: aorobinskiy@gmail.com.

Аксенова Наталья Анатольевна, кандидат физико-математических наук, кафедра механики и проектирования машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-52.

E mail: naavoneska@gmail.com.

Петухов Вадим Михайлович, кандидат технических наук, кафедра вагонов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (057) 730-10-35. E mail: hiitwagen@gmail.com.

Orobinskiy Alexandr Vasil'evich, candidate of Engineering Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-52. E-mail: aorobinskiy @gmail.com.

Aksenova Natalya Anatolyevna, candidate of Physico-mathematical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-52. E-mail: naavoneska@gmail.com.

Petukhov Vadim Mykhaylovych, candidate of Engineering Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: hiitwagen@gmail.com.

Статтю прийнято 05.07.2018 р.