

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Ольшанський Василь Павлович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, м. Харків; тел.: (066) 010-09-55.; e-mail: stasolsh77@gmail.com.

Ольшанский Василий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко, г. Харьков; тел.: (066) 010-09-55.; e-mail: stasolsh77@gmail.com.

Olshanskiy Vasilii Pavlovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkov; tel.: (066) 010-09-55.; e-mail: stasolsh77@gmail.com.

Ольшанський Станіслав Васильович – кандидат фізико-математичних наук, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, м. Харків; тел.: (057) 343-29-41; email: stasolsh77@gmail.com.

Ольшанский Станислав Васильевич – кандидат физико-математических наук, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко, г. Харьков; тел.: (057) 343-29-41; email: stasolsh77@gmail.com.

Olshanskiy Stanislav Vasilevich – PhD in Physics and Mathematics, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkov; tel.: (057) 343-29-41; email: stasolsh77@gmail.com.

УДК 531.16:629.4.067

В. М. ПЕТУХОВ, Н. А. АКСЁНОВА**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПОСЛЕ СХОДА С РЕЛЬС**

Визначено траєкторію руху колісної пари вагону після її сходу з рейок. Побудовано кінематичну модель руху колеса по шпальній решітці. Виконано кінематичний аналіз руху колеса по шпалах. Отримано аналітичний вираз, що зв'язує рух колеса з параметрами верхньої будови колії. Показано, що амплітуда і частота коливань колісної пари при її сході залежать від діаметра колеса, ширини горизонтальної поверхні шпала і відстані між осями шпал. Визначено миттєві центри швидкостей колеса в характерних точках. Розроблена кінематична модель визначає основні діагностичні ознаки сходу вагонів з рейок. Це дозволить створити надійний алгоритм розпізнавання сходу для побудови апаратного і програмного забезпечення технічної системи контролю сходів вагонів з рейок.

Ключові слова: колесо, кінематичний аналіз, діагностична модель, траєкторія.

Определена траектория движения колесной пары вагона после ее схода с рельс. Построена кинематическая модель движения колеса по шпальной решетке. Выполнен кинематический анализ движения колеса по шпалам. Получено аналитическое выражение, связывающее движение колеса с параметрами верхнего строения пути. Показано, что амплитуда и частота колебаний колесной пары при ее сходе зависят от диаметра колеса, ширины горизонтальной поверхности шпала и расстояния между осями шпал. Определены мгновенные центры скоростей колеса в характерных точках. Разработанная кинематическая модель определяет основные диагностические признаки схода вагонов с рельс. Это позволит создать надежный алгоритм распознавания схода для построения аппаратного и программного обеспечения технической системы контроля сходо́в вагонов с рельс.

Ключевые слова: колесо, кинематический анализ, диагностическая модель, траектория.

Kinematic analysis of the movement of a wagon wheel pair after its derailment is performed. Based on the studies carried out, the following results were obtained. The trajectory of motion of the center of the wheel after its coming off the rail along the sleeper grating is determined graphically. The center of the wheel moves rectilinearly along the horizontal section of the sleeper and along the arc of the circle in the areas where the wheel rolls from a sleeper and hits the next one. Thus, the trajectory of motion looks like a cyclic combination of rectilinear segments and segments of circles. An analytic expression characterizing wagon derailment is obtained, which connects the parameters of the upper structure of the track (the sleeper grid) and the wheel. The motion of the center of the wheel is determined by different equations depending on the stages of motion. The law of motion is given by different functions corresponding to different motion stages. It is shown that the amplitude and frequency of oscillations of a wheel pair at its derailment 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 development of a kinematic model of the movement of a wagon wheel pair after its derailment allows one to proceed constructing a dynamic model of such a motion. The ultimate goal of studying this process should be the construction of a diagnostic model for the derailment of wagons based on the presented kinematic and dynamic models. This will make it possible to create a reliable derailment recognition algorithm for constructing the hardware and software of a wagon derailment technical control system.

Key words: wheel, kinematic analysis, diagnostic model, trajectory.

Введение. Сход вагонов с рельс – наиболее опасный инцидент, приводящий к тяжелым последствиям. Его опасность заключается в том, что обнаружить его для своевременной остановки поезда довольно сложно.

Наиболее известный случай – крушение электропоезда ICE-1, которое произошло в 1998 году, когда на линии Ганновер – Гамбург у поезда лопнул бандаж колеса, в результате чего колесная пара сошла с рельсов. Поезд проследовал ещё более 6 километров пока не ударился об опоры автомобильного моста. В результате трагедии погиб 101 человек, 88 были ранены.

Также не менее актуальна эта проблема и для грузовых поездов, поскольку значительный ущерб от сходо́в

грузовых вагонов наносится экономике и инфраструктуре железнодорожного транспорта, а также окружающей среде [1]. К сожалению, в настоящее время отсутствуют надежные системы распознавания сходов. И к тому же, внимание исследователей направлено на решение задач по устранению причин схода подвижного состава, но, тем не менее, сходы происходят довольно часто. Поэтому решение проблемы своевременного обнаружения схода вагонов имеет важное как экономическое, так и социальное значение.

Анализ последних исследований. Причины и механизм схода вагонов в настоящее время достаточно изучены. Наиболее полные современные исследования сходов вагонов в результате дефектов пути или дефектов ходовых частей представлены в работах [2, 3, 4]. Кинематике колесной пары при сходе посвящены труды [2, 5]. Различным аспектам схода и регистрации этого явления посвящены работы [6 – 8]. Тем не менее, детально изученной кинематики колесной пары после ее схода с рельс нигде не представлено.

Цель и постановка задачи. Целью работы является построение кинематической модели движения колесной пары после ее схода. Такая модель позволит в дальнейшем сформировать основные диагностические признаки схода, а также на базе этой модели построить диагностическую модель схода колесной пары.

Для этого требуется решить следующие задачи:

- определить траекторию движения колесной пары после ее схода с рельсов;
- получить аналитическое выражение, связывающее движение колеса с параметрами верхнего строения пути (шпальной решетки);
- выполнить кинематический анализ движения колеса по верхнему строению пути после схода.

Математическая модель. Колесная пара после схода её с рельс движется, как правило, по шпальной решетке. Соответственно, ее траектория движения зависит от верхнего строения пути на данном участке. При этом колеса продолжают двигаться вдоль оси пути. В данной работе, для первоначального упрощения рассматривается только движение колеса в плоскости, параллельной вертикальной плоскости оси пути. Также не учитывается неупругая деформация шпал при невысоких скоростях движения.

Схема движения колеса радиусом R после схода показана на рис. 1.

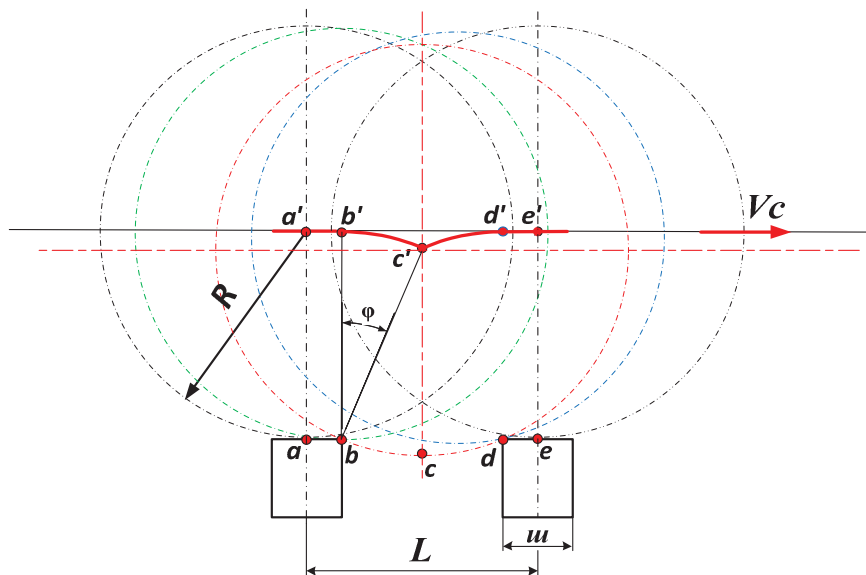


Рис. 1 – Схема движения колеса после схода.

Здесь характерные точки a, e – это мгновенные центры скоростей колеса на середине шпал; точки b и d – на ребрах шпал; c – середина расстояния между шпалами. Соответственно точки a', b', c', d', e' – проекции этих точек на траекторию центра колеса C . Центр колеса движется прямолинейно по участку, равному шпалы, и по дуге окружности на участках, где происходит его скатывание в межшпальное пространство и его выкатывание на шпалу.

На рис. 2, а приведена траектория центра колеса, из которого видно, что она имеет периодичность T , равную расстоянию L , между центрами шпал с максимальной глубиной провала колеса A между шпалами (рис. 2, б).

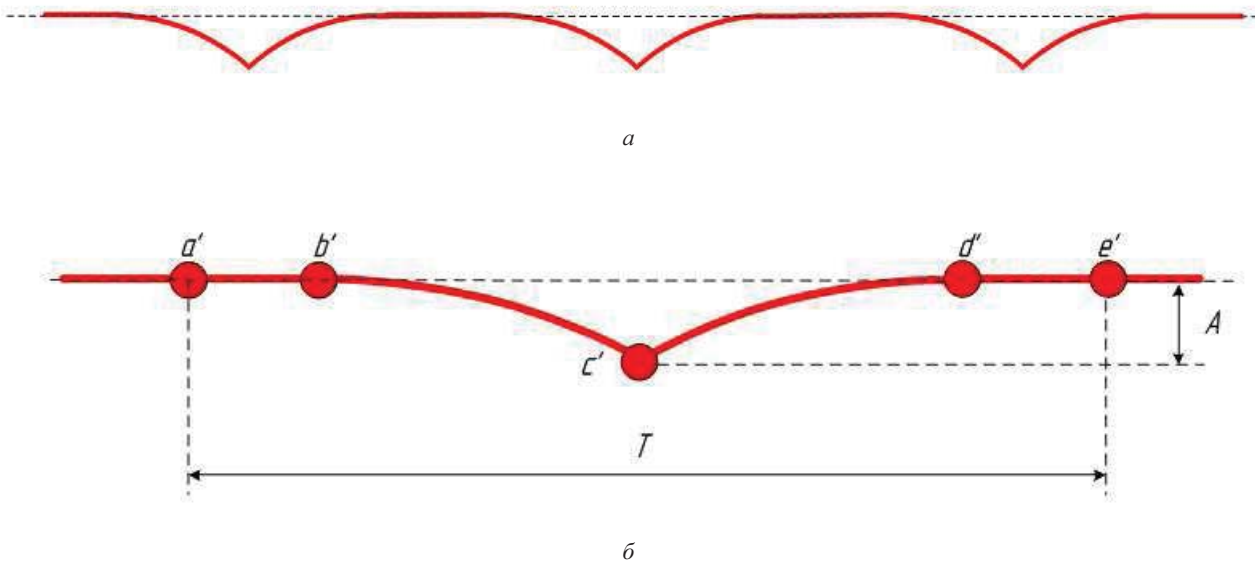


Рис. 2 – Траектория движения колеса после схода.

Амплитуда (провал) колеса будет определяться выражением

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

где R – радиус колеса.

Частота провалов ν при качении колеса по шпалам имеет следующую зависимость от скорости движения:

$$\nu = \frac{V_C}{(L - u)}, \tag{2}$$

где L – расстояние между центрами шпал; u – ширина шпалы.

Центр колеса движется прямолинейно (по горизонтальному участку шпалы) и по дуге окружности (на участках, где происходит скатывание колеса с одной шпалы и удар о следующую шпалу).

Уравнения движения центра колеса могут быть представлены по этапам движения. Закон движения описывается функциями, соответствующими этапам движения, с периодом L , в зависимости от времени t (рис. 3).

Первый и четвертый интервалы представляют прямолинейное движение, а второй и третий – движение по дуге окружности (рис. 3). Дальнейшее движение происходит с периодом, равным L , и постоянным приращением горизонтальной координаты.

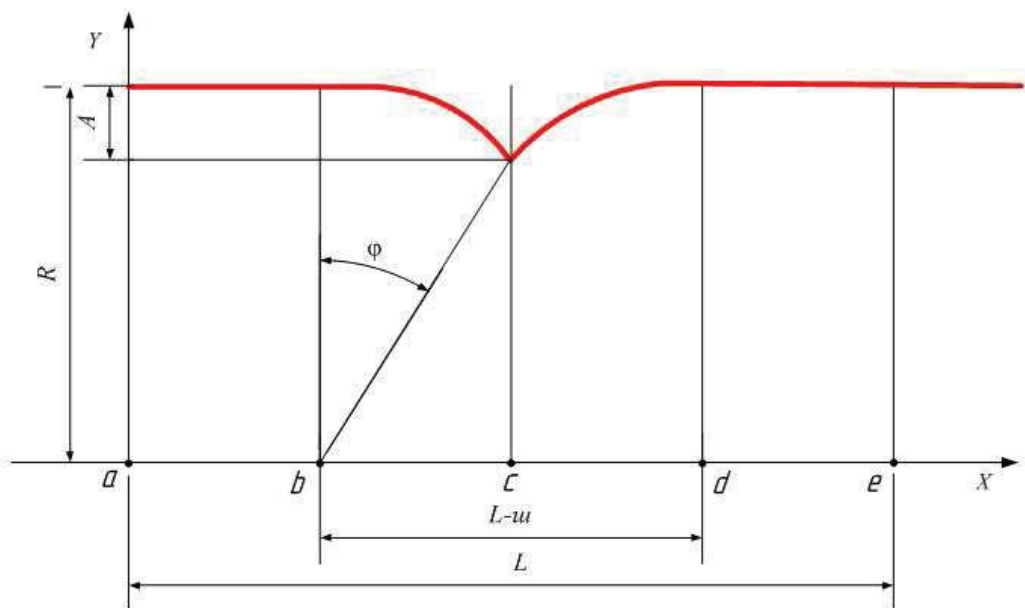


Рис. 3 – К определению уравнения движения центра колеса.

1. На участке $a \leq x \leq b$

$$x = a + V_C \cdot t; \quad y = R. \quad (3)$$

2. На участке $b \leq x \leq c$

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

где α – центральный угол, образующийся при скатывании центра колеса в межшпальное пространство, при этом угол α принимает значения: $0 \leq \alpha \leq \varphi$, тогда

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

3. На участке $c \leq x \leq d$

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

4. На участке $d \leq x \leq e$

$$x = d + V_C \cdot t; \quad y = R. \quad (7)$$

Периодические удары вагонного колеса о шпалы вызывают резкое мгновенное изменение направления V_C вектора скорости центра колеса (оси) и, следовательно, мгновенный центр скоростей (точка) перемещается из положения b в d . График кинематической модели представлен на рис. 4.

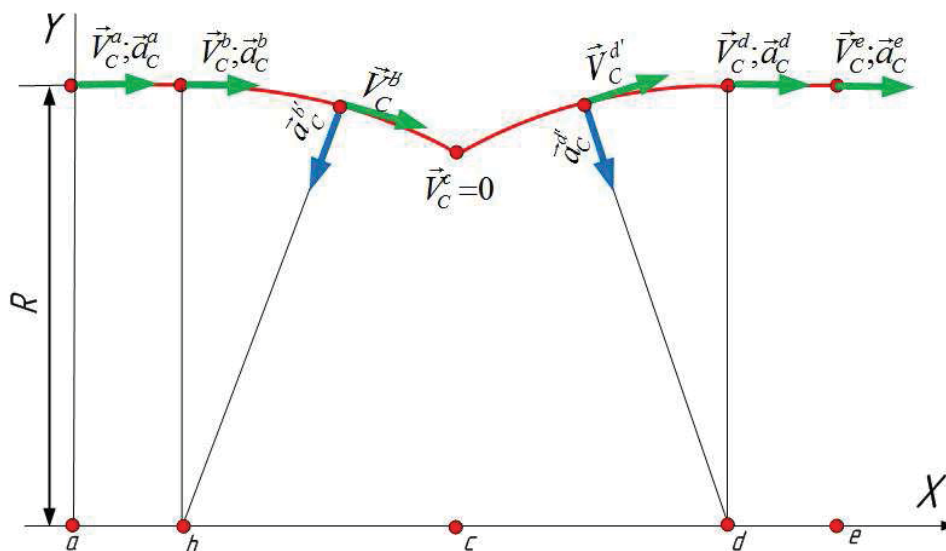


Рис. 4 – Траектория движения колеса после схода.

При равномерном движении скорость V_C и ускорение a_c центра колеса определяются первой и второй, соответственно, производными от закона движения по времени. То есть, при движении по дуге окружности вектор скорости V_C направлен по касательной, а ускорения a_c по радиусу (рис. 4).

Перспективы дальнейших исследований. Разработка кинематической модели движения колесной пары после ее схода – это первый этап к построению динамической модели такого движения. Конечной целью изучения этого процесса должно стать построение диагностической модели схода вагонов с рельсов на базе представленной модели. Все это позволит создать надежный алгоритм распознавания схода для построения аппаратного и программного обеспечения технической системы контроля сходов вагонов с рельс. Разрабатываемые и существующие встроенные системы контроля букс при определенной доработке программного обеспечения вполне способны определять сход колесной пары [9].

Выводы. На основе проведенных исследований в работе были получены следующие результаты.

Определена графическим способом траектория движения колеса после схода его с рельс по шпальной решетке, которое выглядит как циклическая комбинация прямолинейных участков и сегментов окружностей.

Полученное аналитическое выражение, характеризующее сход, связывает параметры верхнего строения пути (шпальная решетка) и колеса. Показано, что амплитуда и частота колебаний колесной пары при ее сходе зависят от диаметра колеса, ширины горизонтальной поверхности шпалы и расстояния между осями шпал.

Выполнен кинематический анализ движения колесной пары после ее схода.

Таким образом, разработанная кинематическая модель движения колесной пары после ее схода определяет

основные диагностические признаки схода вагонов с рельс и позволяет использовать ее в дальнейшем для построения диагностической модели и создания датчиков схода.

Список литературы

1. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики). Монография. 2-е издание, дополненное. – К. : Транспорт Украины, 2004. – 368 с.
2. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействия пути и подвижного состава. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2002. – 215 с.
4. Сокол Э. Н. Механизм железнодорожно-транспортных происшествий при сходе с рельсов подвижного состава // Матер. докл. науч.-техн. конф. «Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів», 17 – 21 лютого 1997 р., м. Славське. – Киев, Львов, 1997. – С. 100 – 102.
5. Панов Ю. Л., Панов А. Ю. Кинематика колесных пар вагонной тележки // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – № 4 (1). – С. 180 – 185.
6. Салтыков Д. Н., Павлюков А. Э. Анализ изменения взаиморасположения элементов грузового вагона в результате схода // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». Сборн. докл. – М. : МИИТ, 2004. – С. VI-25 – VI-26.
7. Салтыков Д. Н., Павлюков А. Э. Разработка принципов создания устройств регистрации схода с рельсов нетягового подвижного состава // Труды Международной конференции «Развитие транспортного машиностроения в России». Сборн. докл. – М. : ВНИИЖТ, 2004. – С. 135 – 136.
8. Орлова А. М., Лесничий В. С., Смирнов Н. В. Выбор типов, мест расположения датчиков и критериев для сигнализации о сходе грузового вагона на основе математического и физического моделирования // «Наука та прогрес транспорту». – Днепропетровск : Днепропетровский национальний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, 2004. – №5. – С. 162 – 166.
9. Мартынов И. Э., Петухов В. М. Натурные испытания встроенной системы контроля технического состояния буксовых узлов // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 180 – 182.

References (transliterated)

1. Sokol E. N. *Skhody s rel'sov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teoryi i praktiki). Monografiya. 2-e izdanie, dopolnennoe* [Derailments and collisions of rolling stock (Forensic expertise. Elements of theory and practice). Monograph. 2nd ed. Augmented]. Kiev, Transport Ukraine Publ., 2004. 368 p.
2. Verigo M. F., Kogan, A. Ya. *Vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava* [Railway – rolling stock interactions]. Moscow, Transport Publ., 1986. 559 p.
3. Lysjuk V. S. *Prichiny i mekhanizm skhoda koleasa s rel'sa. Problema iznosa koleas i rel'sov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Reasons and mechanisms of wheel derailment. Problems of wheel and sleeper wear. 2nd ed. Revised and augmented]. Moscow, Transport Publ., 2002. 215 p.
4. Sokol E. N. *Mekhanizm zheleznodorozhno-transportnykh proishestviy pri skhode s rel'sov podvizhnogo sostava* [Mechanism of railway and transport incidents caused by rolling stock derailment]. *Mater. dokl. nauk.-tekh. konf. "Fizychni metody i zasoby kontrolyu materialiv ta vyrobiv", (17 – 21 luytogo 1997 r., Slavs'ke)* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Physical methods and means of control of materials and products"]. Kiev, Lvov, 1997. – pp. 100–102.
5. Panow Yu. L., Panow A. Yu. *Kynematika koleasnykh par vagonnoy telezhki* [Kinematics of a wagon car wheel pair]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of the N. I. Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod], 2013, no. 4 (1), pp. 180–185.
6. Saltykov D. N., Pavlyukov A. E. *Analiz izmeneniy vzaimoraspolzheniya elementov gruzovogo vagona v rezul'tate skhoda* [Analysis of relative positioning of the elements of a freight car caused by derailment]. *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsiy. "Bezopasnost' dvizheniya poezdov" Sb. Dokl.* [Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Train traffic safety". Report collection]. Moscow, MIIT Publ., 2004, pp. VI-25–VI-26.
7. Saltykov D. N., Pavlyukov A. E. *Razrabotka printsypov sozdaniya ustroystv registratsii skhoda s rel'sov netyagovogo podvizhnogo sostava* [Development of principles for creating non-traction rolling stock derailment registration devices]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Razvitiye transportnogo mashinostroeniya v Rossyi". Sborn. Dokl.* [Proceedings of the International Conference "Development of Transport Engineering in Russia"]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2004, pp. 135–136.
8. Orlova A. M., Lesnichiy V. S., Smirnov N. V. *Vybor tipov, mest raspolzheniya datchikov i kriteriev dlya sygnalizatsiyi o skhode gruzovogo vagona na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya* [Choosing types, sensor placement spots, and criteria for signaling about freight car derailment based on mathematical and physical modeling]. *"Nauka ta progres transportu"* ["Science and transport advancement"]. Dnepropetrovsk, Dnepropetrovskiy natsional'nyy universitet zheleznodorozhnogo transporta im. V. Lazaryana Publ., 2004, no. 5, pp. 162–166.
9. Martynov I. E., Petukhov V. M. *Naturnye ispytaniya vstroennoy sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya buksovikh uzlov* [Full-scale testing of inbuilt axle-box technical condition control system]. *Mir transporta* [World of transport]. 2013, no. 2, pp. 180–182.

Поступила (received) 26.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Кінематична модель руху колісної пари після її сходу з рейок / В. М. Петухов, Н. А. Аксьонова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 92 – 97. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2222-0631.

Кинематическая модель движения колёсной пары после схода с рельс / В. М. Петухов, Н. А. Аксёнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 92 – 97. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2222-0631.

Kinematic model of wheel pair motion after its derailment / V. M. Petukhov, N. A. Aksenova // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 30 (1252). – pp. 92 – 97. Bibliog.: 9 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Петухов Вадим Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: hiitwagen@gmail.com.

Петухов Вадим Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: hiitwagen@gmail.com.

Petukhov Vadim Mykhaylovych – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov; tel.: (057) 730-10-52; e-mail: hiitwagen@gmail.com.

Аксёнова Наталья Анатольевна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: naavoneska@gmail.com.

Aksёnova Natalya Anatolyevna – кандидат физико-математических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков; тел.: (057) 730-10-52; e-mail: naavoneska@gmail.com.

Aksenova Natalya Anatolyevna – Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov; tel.: (057) 730-10-52; e-mail: naavoneska@gmail.com.

УДК 621.43.001.4

И. С. РЕВЕЛЮК

КОНТИНУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ СИНФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ СИЛИКОНОВОГО МАСЛА ПО КОЛЬЦЕВЫМ КАНАЛАМ ДЕМПФЕРОВ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА ДИЗЕЛЯ

Досліджуються динамічні характеристики в дослідних конструкціях демпферів крутильних коливань колінчастого вала дизеля, у яких для накопичення і розсіювання енергії резонансних коливань вала використовуються синфазні течії силіконового масла середньої в'язкості по кільцевих каналах круглого або прямокутного перерізу. На основі рівнянь нестационарного руху нестискуваної рідини складені математичні моделі зазначених течій і, при використанні перетворення Лапласа для перехідного процесу або методу комплексних амплітуд для сталих коливань, знайдені аналітичні рішення цих рівнянь (у вигляді сум відповідного функціонального ряду). Вказані механічні моделі механізмів, що замінюють, з фрикційними зв'язками, які відповідають цим моделям. Отримано аналітичні вирази для коефіцієнта в'язкого демпфірування і приведенного моменту інерції, що залежать від частоти усталених коливань вала. Виконано порівняння динамічних характеристик для демпферів крутильних коливань, обладнаних рідким (силіконовим) і твердим (сталевим) маховиком.

Ключові слова: демпфірування крутильних коливань, маховик з фрикційним зв'язком, нестационарні течії по каналу, в'язка нестискувана рідина, властивості силіконового масла.

Исследуются динамические характеристики в опытных конструкциях демпферов крутильных колебаний коленчатого вала дизеля, у которых для накопления и рассеивания энергии резонансных колебаний вала используются синфазные течения силиконового масла средней вязкости по кольцевым каналам круглого или прямоугольного сечения. На основе уравнений нестационарного движения несжимаемой жидкости составлены математические модели указанных течений и, при использовании преобразования Лапласа для переходного процесса или метода комплексных амплитуд для установившихся колебаний, найдены аналитические решения этих уравнений (в виде сум соответствующего функционального ряда). Указаны механические модели заменяющих механизмов с фрикционными связями, отвечающие этим моделям. Получены аналитические выражения для коэффициента вязкого демпфирования и приведенного момента инерции, зависящих от частоты установившихся колебаний вала. Выполнено сравнение динамических характеристик для демпферов крутильных колебаний, снабженных жидким (силиконовым) и твердым (стальным) маховиком.

Ключевые слова: демпфирование крутильных колебаний, маховик с фрикционной связью, нестационарные течения по каналу, вязкая несжимаемая жидкость, свойства силиконового масла.

Dynamic characteristics in experimental designs of torsional vibration dampers of a diesel engine crankshaft, in which an in-phase flow of silicone oil of medium viscosity along annular channels of circular or rectangular cross-section is used to accumulate and dissipate the energy of resonant vibration of the shaft, are studied. On the basis of the equations of nonstationary motion of incompressible fluid, mathematical models of these flows are compiled. Analytical solutions of these equations are found (in the form of the sums of the corresponding functional series) using the Laplace transform for transient or complex amplitude method for steady-state vibration. Mechanical models of the replacement mechanisms with frictional bonds, corresponding to these models, are indicated. Analytical expressions are obtained for the coefficient of viscous damping and the reduced moment of inertia, which depend on the frequency of the steady vibration of the shaft. Dynamic characteristics for torsional vibration dampers equipped with a liquid (silicone) and a solid (steel) flywheel are compared.

Key words: damping of torsional vibrations, flywheel with frictional coupling, nonstationary flow along a channel, viscous incompressible fluid, properties of silicone oil.

Введение и постановка задачи. Демпфер крутильных колебаний, показанный на рис. 1, применяется в конструкциях большинства современных высокооборотных дизелей. Устройство устанавливается на носок коленчатого вала, где, как правило, наблюдается максимальная амплитуда колебаний. Шлицевое соединение обеспечивает совместное вращение вала и корпуса демпфера. Фрикционная связь между маховиком и корпусом осуществляется через узкие кольцевые каналы плоской формы, заполненные силиконовым маслом высокой вязкости, а точнее, специально синтезированной для решения подобных задач полиметилсилоксановой жидкостью (ПМС), имеющей длинные молекулы. Выбор рабочего тела вызван положительными качествами ПМС, а именно относительно слабой зависимостью её вязкости от температуры [1].

На установившемся режиме маховик вращается вместе с валом, но при появлении угловых ускорений на стенках каналов возникают касательные напряжения, пытающиеся сохранить угловую скорость неизменной. При этом указанные напряжения оказываются одинаковыми во всех поперечных сечениях канала, поэтому жидкость в канале колеблется *синфазно*. Гидродинамический расчет этих напряжений не вызывает больших проблем и основывается на том предположении, что эпюра скоростей жидкости в зазоре не отличается от её формы