

Способ диагностирования гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе

О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, А.В. Коновалов✉, С.А. Кахаев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉alekseikonov2016@mail.ru

Резюме

В статье описывается важность улучшения характеристик подвижного состава для повышения эффективности железнодорожного транспорта и достижения такой стратегической цели, как увеличение грузооборота. От состояния рессорного подвешивания тягового подвижного состава зависят динамическая нагруженность, износ и повреждаемость его экипажной части, затраты на ремонт и техническое обслуживание, виброзащищенность машинистов. Гидравлический гаситель колебаний является ответственным узлом в подвеске тягового подвижного состава, а наличие дефектного гидравлического гасителя колебаний может привести к сходу тягового подвижного состава, а также способствует повышению износа его элементов, отрицательно воздействует на путь и вызывает необходимость снижения скорости. В работе представлена конструкция рессорного подвешивания первой и второй ступеней, описывается ее назначение и принцип работы гидравлических гасителей колебаний на электровозе серии ЗЭС5К. Приведены существующие методы и способы диагностирования гидравлических гасителей колебаний. С помощью программы MSC Adams произведены расчет и моделирование электровоза серии ЗЭС5К. С учетом полученных результатов можно предположить, что происходит при исправном и неисправном состояниях гидравлических гасителей колебаний. В исследовании также приводится новый метод диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе с помощью установки датчиков виброускорения на подвижной состав в определенные места по предложенной схеме.

Ключевые слова

электроподвижной состав, гидравлический гаситель колебаний, диагностика, датчик виброускорения, техническое состояние рессорного подвешивания, рессорное подвешивание, моделирование

Для цитирования

Способ диагностирования гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе / О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, А.В. Коновалов, С.А. Кахаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 79–88. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).79-88.

Информация о статье

поступила в редакцию: 06.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 13.06.2024 г.; принята к публикации: 17.06.2024 г.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания по работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза «Ермак» серии 2(3)ЭС5К» № 124060500020-4 от 5 июня 2024 г. Этап 1: «Цифровой двойник колесно-моторного блока электровоза серии «Ермак» для увеличения пропускной способности Восточного полигона при реализации тяжеловесного движения».

A method for diagnosing hydraulic vibration dampers on traction rolling stock

O.V. Mel'nichenko, A.O. Lin'kov, A.V. Konovalov✉, S.A. Kakhaev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉alekseikonov2016@mail.ru

Abstract

The article describes the importance of improving the characteristics of rolling stock in order to increase the efficiency of railway transport and achieve strategic goals such as increasing freight turnover. The condition of the spring suspension of traction rolling stock determines the dynamic loading, wear and damage to its undercarriage part, repair and maintenance costs, as well as the vibration protection of the drivers. The hydraulic vibration damper is an important node in the suspension of the traction rolling stock, and the presence of a defective hydraulic vibration damper can result in a derailment of the traction rolling stock, as well as increase the wear of the elements of the traction rolling stock, negatively affect the path and lead to the need to reduce speed. The design and purpose of the spring suspension of the first and second stages, as well as the principle of operation of hydraulic vibration dampers on an electric locomotive of the 3ES5K series, are described. The existing methods and methods for diagnosing hydraulic vibration dampers are presented. With the help of the MSC Adams program, the calculation and modeling of the

3ES5K series electric locomotive was performed. Based on the results obtained, it can be seen what happens when the hydraulic vibration dampers are in good working order and when faulty. The article describes a new method for diagnosing the technical condition of hydraulic vibration dampers on traction rolling stock by installing vibration acceleration sensors on the rolling stock in definite locations, with the layout of the sensors also given.

Keywords

electric rolling stock, hydraulic vibration dampener, diagnostics, vibration acceleration sensor, technical condition of spring suspension, spring suspension, modeling

For citation

Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Kononov A.V., Kakhaev S.A. Sposob diagnostirovaniya gidravlicheskih gasitelei kolebaniy na tyagovom podvizhnom sostave [A method for diagnosing hydraulic vibration dampers on traction rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 79–88. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).79-88.

Article Info

Received: June 6, 2024; Revised: June 13, 2024; Accepted: June 17, 2024.

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state assignment for the work «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of a digital twin of the wheel-motor unit of the Ermak electric locomotive series 2(3)ES5K» No 124060500020-4 dated June 5, 2024 Stage 1: «Digital twin of the wheel-motor unit of the Ermak series electric locomotive to increase the capacity of the Eastern landfill during the implementation of heavy traffic».

Введение

В современных условиях железнодорожный транспорт играет ключевую роль в экономике России. Одной из важных задач стратегических документов ОАО «РЖД» является повышение грузооборота сети железных дорог к 2025 г. на 42 % [1].

Одним из способов достижения поставленной цели является повышение надежности и улучшение технического обслуживания и ре-

монта. Поэтому важными являются вопросы улучшения характеристик тягового подвижного состава, его надежности и ремонтпригодности, а также сокращения времени простоя на техническом обслуживании и ремонте.

Цель статьи заключается в исследовании рессорного подвешивания электровоза серии 3ЭС5К, а именно гидравлических гасителей колебаний в среде моделирования MSC Adams.

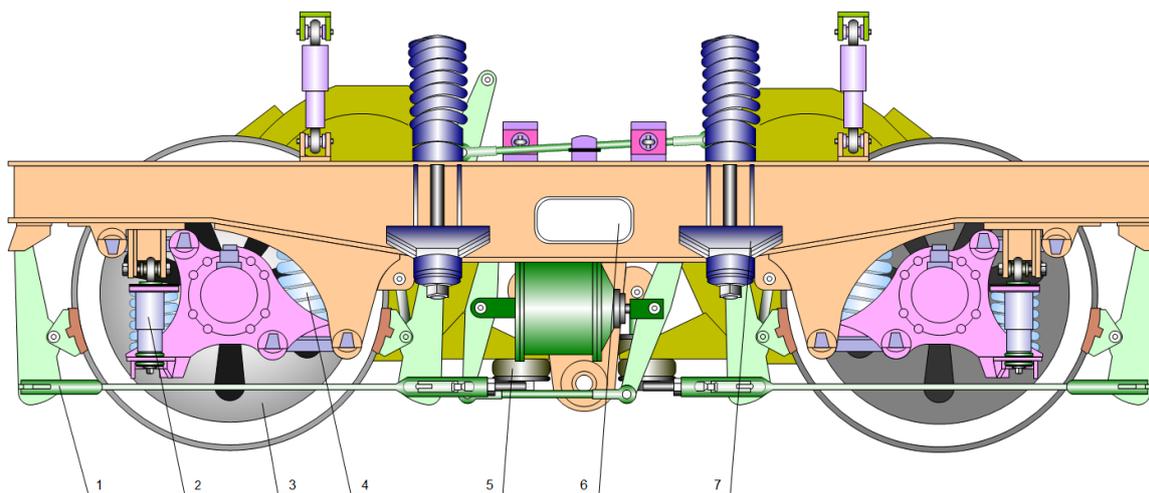


Рис. 1. Тележка электровоза серии 3ЭС5К:

1 – система тормозная; 2 – гидравлический гаситель колебаний; 3 – пара колесная; 4 – рессорное подвешивание; 5 – подвеска тягового электродвигателя; 6 – рама тележки; 7 – люльчатое подвешивание; 8 – система смазки гребней

Fig. 1. Bogie of the 3ES5K series electric locomotive:

1 – braking system; 2 – hydraulic vibration dampener; 3 – wheelset; 4 – spring suspension; 5 – traction electric motor suspension; 6 – bogie frame; 7 – cradle suspension; 8 – comb lubrication system

Конструкция рессорного подвешивания

Рессорное подвешивание первой ступени предназначено для равномерного распределения по буксам колесных пар весовых нагрузок от рам тележек и для уменьшения динамических сил, передаваемых колесными парами на надрессорное строение при прохождении экипажем тягового подвижного состава неровностей пути [2]. На рис. 1 представлена тележка электровоза серии 3ЭС5К.

Рессорное подвешивание первой ступени в соответствии с рис. 2 состоит из пружин 4, втулок 2 и регулировочных прокладок 3, 4. Пружины устанавливаются на приливы корпуса буксы. Верхняя часть крайней пружины через втулку и регулировочные прокладки упирается в кронштейн 1, который, в свою очередь, крепится к раме тележки тремя болтами М20. Верхняя часть другой пружины опирается непосредственно на опорную площадку прилива большого буксового кронштейна.

Гидравлические гасители колебаний предназначены для установки в систему рессорного подвешивания тягового подвижного состава с целью обеспечения нормируемых показателей плавности хода и воздействия на рельсовый путь [3–5].

На каждой тележке электровоза 3ЭС5К в соответствии с рис. 2 установлено по четыре

буксовых гидравлических гасителя колебаний.

Гидравлический гаситель колебаний работает параллельно с пружинами рессорного подвешивания. Он установлен вертикально между кронштейнами корпуса буксы и рамы тележки по одному на каждой буксе.

Рессорное подвешивание второй ступени предназначено для передачи вертикальных и поперечных сил от кузова на раму тележки, уменьшения величины горизонтального и вертикального воздействия тягового подвижного состава на путь [6]. Рессорное подвешивание второй ступени в соответствии с рис. 3 представляет собой стержень 10, к нижней части которого приложена вертикальная нагрузка от кузова. Кузов кронштейнами 1 через балансир 11 устанавливается на нижний шарнир рессорного подвешивания второй ступени, состоящий из опор 12, 14 и прокладки 13. Нижний шарнир удерживается на стержне гайкой 15, которая стопорится крючком 18.

Вертикальная нагрузка через регулировочную шайбу 3, стержень 10, пружину 4, шайбу 6, фланец стакана 5 и верхний шарнир, состоящий из двух опор 7 и прокладки 13, передается на кронштейн 8 рамы тележки. Шарниры рессорного подвешивания второй ступени обеспечивают колебательное движение стержня, вызванное горизонтальным поперечным

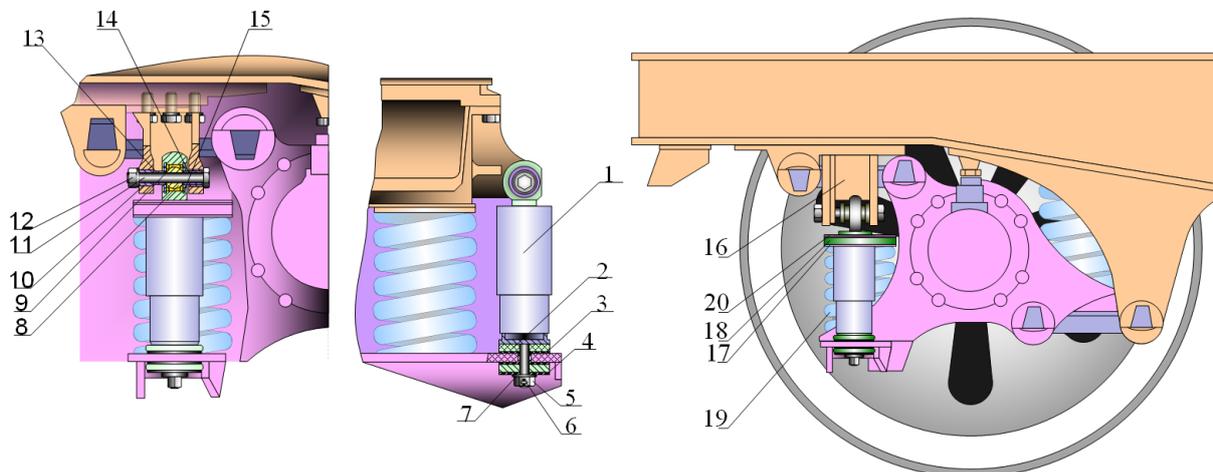


Рис. 2. Рессорное подвешивание первой ступени электровоза серии 3ЭС5К:

- 1 – гидравлический гаситель колебаний; 2 – амортизатор; 3, 4, 6 – шайба; 5 – гайка; 7 – шплинт; 8 – шарнирный подшипник; 9 – фторопластовое кольцо; 10, 17 – втулка; 11 – валик; 12 – гайка; 13, 14 – втулка дистанционная; 15 – стопорное кольцо; 16 – кронштейн; 18, 20 – прокладка; 19 – пружина; 21 – планка

Fig. 2. Spring suspension of the first stage of the 3ES5K series electric locomotive:

- 1 – hydraulic vibration dampers; 2 – shock absorber; 3, 4, 6 – washer; 5 – nut; 7 – cotter pin; 8 – articulated bearing; 9 – fluoroplastic ring; 10, 17 – sleeve; 11 – roller; 12 – nut; 13, 14 – remote bushing; 15 – locking ring; 16 – bracket; 18, 20 – gasket; 19 – spring; 21 – bar

перемещением кузова и поворотом тележки относительно кузова.

Горизонтальные усилия от кузова на тележку передаются рессорным подвешиванием второй ступени при поперечном отклонении кузова до 15 мм от среднего положения и люлечными подвесками в параллель с горизонтальным упором при перемещении кузова от 15 до 30 мм. После сжатия пружины горизонтального упора на рабочий ход 15 мм упор работает как жесткий ограничитель [7, 8].

Актуальность проблемы

От состояния рессорного подвешивания тягового подвижного состава зависит динами-

ческая нагруженность, износ и повреждаемость его экипажной части, затраты на ремонт и техническое обслуживание, а также виброзащитенность машинистов. Гидравлический гаситель колебаний является ответственным узлом в подвеске тягового подвижного состава, а наличие дефектного гидравлического гасителя колебаний может привести к сходу тягового подвижного состава, а также способствует повышению износа его элементов, отрицательно воздействует на путь и вызывает необходимость снижения скорости.

В современных электровозах для первой и второй ступени рессорного подвешивания применяются цилиндрические пружины, кото-

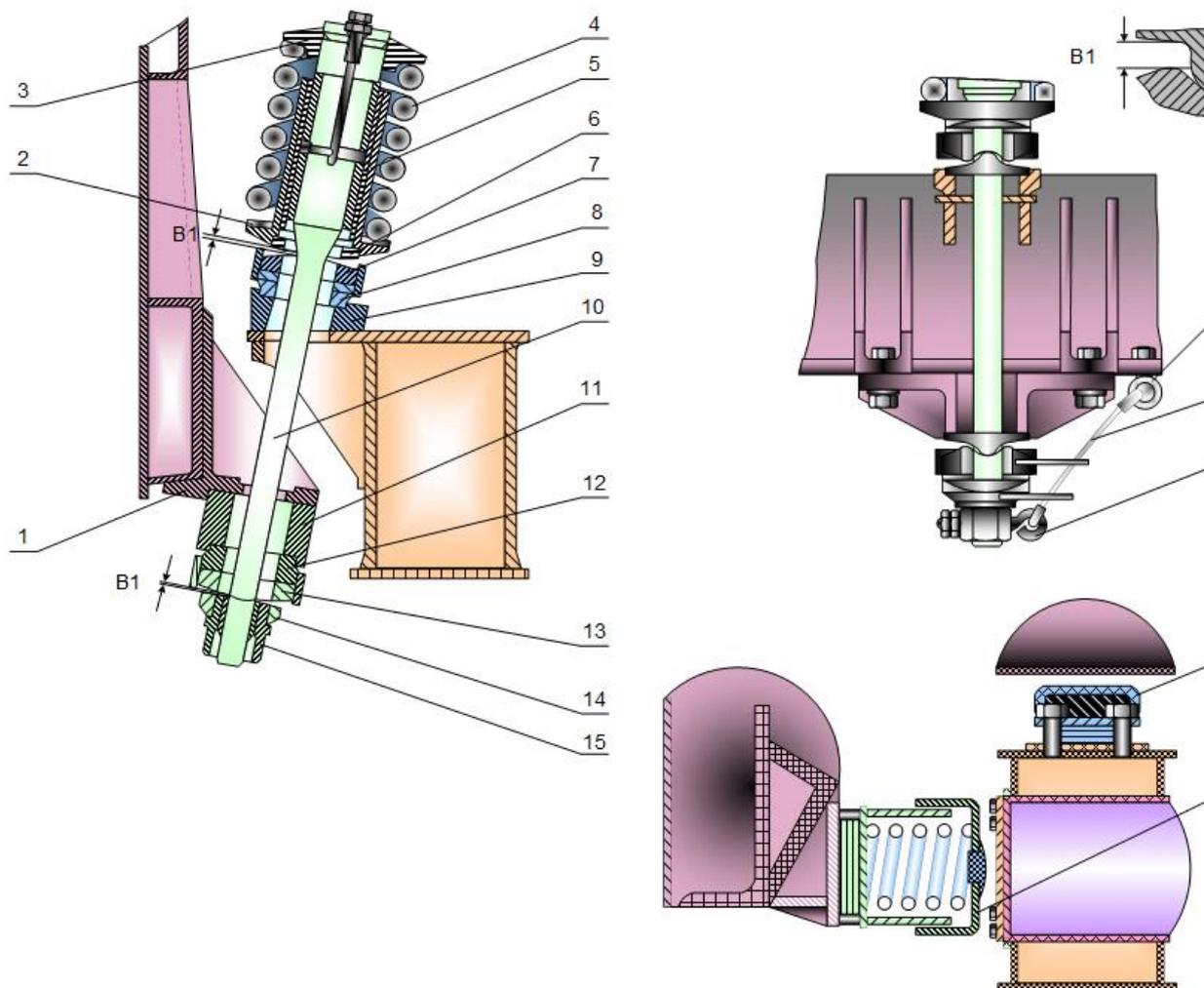


Рис. 3. Рессорное подвешивание второй ступени:

1 – кронштейн; 2, 3, 6, 8 – шайба; 4 – пружина; 5 – стакан; 7 – опора; 9 – кронштейн; 10 – стержень; 11 – балансир; 12, 14 – опора; 13 – прокладка; 15 – гайка; 16 – болт; 17 – трос; 18 – крюк; 19 – вертикальный упор; 20 – горизонтальный упор

Fig. 3. Spring suspension of the second stage:

1 – bracket; 2, 3, 6, 8 – washer; 4 – spring; 5 – cup; 7 – support; 9 – bracket; 10 – rod; 11 – balancer; 12, 14 – support; 13 – gasket; 15 – nut; 16 – bolt; 17 – cable; 18 – hook; 19 – vertical stop; 20 – horizontal stop

рые имеют ряд преимуществ перед листовыми рессорами. Однако их основной недостаток заключается в отсутствии сил сопротивления, необходимых для уменьшения или ограничения амплитуд колебаний кузова и тележек электровоза. Поэтому в таких случаях обязательно устанавливаются специальные гидравлические гасители колебаний, способные преобразовывать механическую энергию колебательного процесса в тепловую и рассеивать ее в окружающую среду. В настоящее время в конструкции подвешивания современных электровозов применяются гидравлические гасители колебаний.

На сегодняшний день ведется множество работ по реализации умного локомотива и умного депо, которые требуют максимальной информации о техническом состоянии всех основных узлов тягового подвижного состава.

Актуальность проблемы подтверждается частым выявлением течи гидравлических гасителей колебаний при визуальном осмотре в процессе эксплуатации и техническом обслуживании. Для исследования был взят пункт технического осмотра локомотивов на ст. Большой Луг. При осмотре толкача было обнаружено более 60 % потекших гидравлических гасителей колебаний. На рис. 4 представлено фото электровоза серии 3ЭС5К № 128 и потекшие гидравлические гасители колебаний.

Существующие методы и технологии диагностирования гидравлических гасителей колебаний

Для диагностики состояния гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе применяются различные методы и



а



б

Рис. 4. Электровоз серии 3ЭС5К № 128 (а) и потекшие гидравлические гасители колебаний (б)
Fig. 4. 3ES5K series electric locomotive No 128 and leaking hydraulic vibration dampers

технологии, одним из которых является визуальный осмотр, позволяющий выявить видимые дефекты и повреждения. Кроме того, проводится анализ характеристик колебаний на существующих специализированных стендах для диагностики гидравлических гасителей колебаний [9–13]. Способы предполагают демонтаж гидравлических гасителей колебаний с тягового подвижного состава на позициях текущего ремонта с последующей установкой на испытательный стенд. На стенде гидравлические гасители колебаний подвергаются различным видам нагрузок в течение испытательного времени. После испытаний формируются рабочие диаграммы и отчет о результатах диагностики гидравлических гасителей колебаний, на основании которых делается заключение об их работоспособности.

Недостаток способов заключается в том, что невозможно оперативно реализовать диагностику гидравлических гасителей колебаний без демонтажа с тягового подвижного состава.

Принцип работы гидравлического гасителя колебаний

Принцип работы гидравлического гасителя колебаний заключается в последовательном перемещении вязкой жидкости поршнем через узкие каналы. При прохождении жидкости через эти каналы возникает вязкое трение.

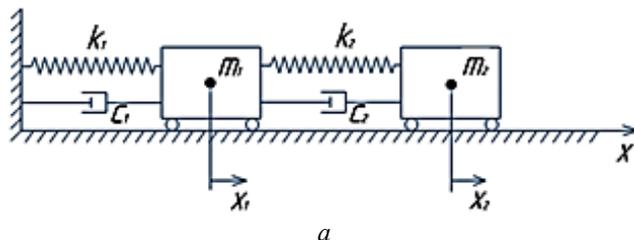
На рис. 5, а показана двухмассовая система с гидравлическими гасителями колебаний, имеющими постоянные вязкого демпфирования c_1 и c_2 [14]. Если к системе не приложены нагрузки, уравнения движения в усилиях имеют вид (рис. 5, б):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1). \end{aligned}$$

В матричных обозначениях эти уравнения запишутся так:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + SX = 0, \quad (1)$$

где



$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix}, \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}.$$

Матрица демпфирования C состоит из коэффициентов влияния демпфирования, которые можно рассматривать как силы, необходимые для получения единичных скоростей. Таким образом, произвольный элемент C_{ij} матрицы коэффициентов влияния вязкого демпфирования представляет собой действие демпфирования, соответствующее единичной скорости типа j . Это определение аналогично тому, которое давалось применительно к коэффициентам влияния жесткости и инерции, и процедура определения элементов столбцов матрицы C аналогична той, которая описана ранее применительно к матрицам S и M . Если следовать указанной процедуре, матрица демпфирования будет всегда симметричной.

Поскольку в уравнении (1) присутствуют члены, обусловленные влиянием скорости, то и решение однородных дифференциальных уравнений будет более сложным, чем для колебаний без демпфирования. Решение системы содержит как минимум три дифференциальных уравнения второго порядка с одной стороны электровоза, поэтому точного аналитического решения не будет, в связи с чем используем систему моделирования для анализа частных решений.

Также следует учитывать широкополосные колебания, возможные в кривых малого радиуса с силой до 10g и частотой до 500 Гц, что приводит к достаточно резкому росту количества отказов гидравлических гасителей колебаний у толкачей на горно-перевальном участке.

Моделирование

Для того чтобы посмотреть, как меняет свое поведение тяговый подвижной состав, была спроектирована одна секция электровоза серии ЗЭС5К и железнодорожный путь в среде

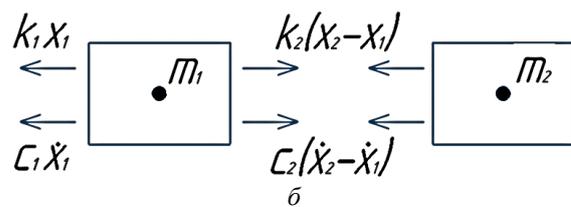


Рис. 5. Двухмассовая система с гидравлическими гасителями колебаний (а) и при отсутствии нагрузок (б)
Fig. 5. Two-mass system with hydraulic vibration dampers (a) and in the absence of loads (b)

моделирования MSC Adams [15, 16].

На рис. 6 представлена схема расположения датчиков вибрации и неровность пути «ступенька».

При проектировании локомотивов необходимо оценивать и выбирать оптимальные характеристики рессорного подвешивания для обеспечения их динамических свойств. Для этого используются специальные программы, которые позволяют проводить компьютерное моделирование движения поезда по прямым и кривым участкам пути с учетом различных факторов, таких как неровности пути и наклоны рельсов. Эти программы также позволяют одновременно рассчитывать ускорения, скорости и перемещения различных элементов конструкции локомотива [17].

По модели секции электровоза серии 3ЭС5К был произведен расчет системой MSC Adams и построены графики зависимости вертикального ускорения от времени для букс и кузова электровоза, углового ускорения от времени для тележки. Для наглядности объединены четыре графика с разными параметрами гидравлических гасителей колебаний. Графики приведены на рис. 7–9.

Способ диагностирования

Предлагается новый способ диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний тягового подвижного состава, при котором устанавливаются датчики виброускорения на узлы тягового подвижного состава, сигнал с которых считывается, преоб-

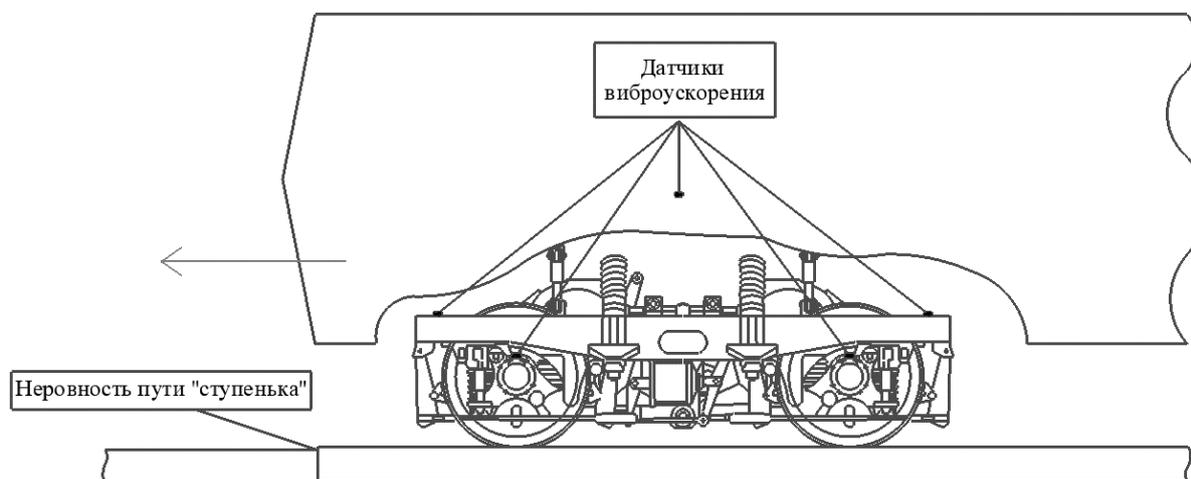


Рис. 6. Модель одной секции электровоза серии 3ЭС5К и расположение датчиков вибрации

Fig. 6. Model of one section of the 3ES5K series electric locomotive and the location of vibration sensors

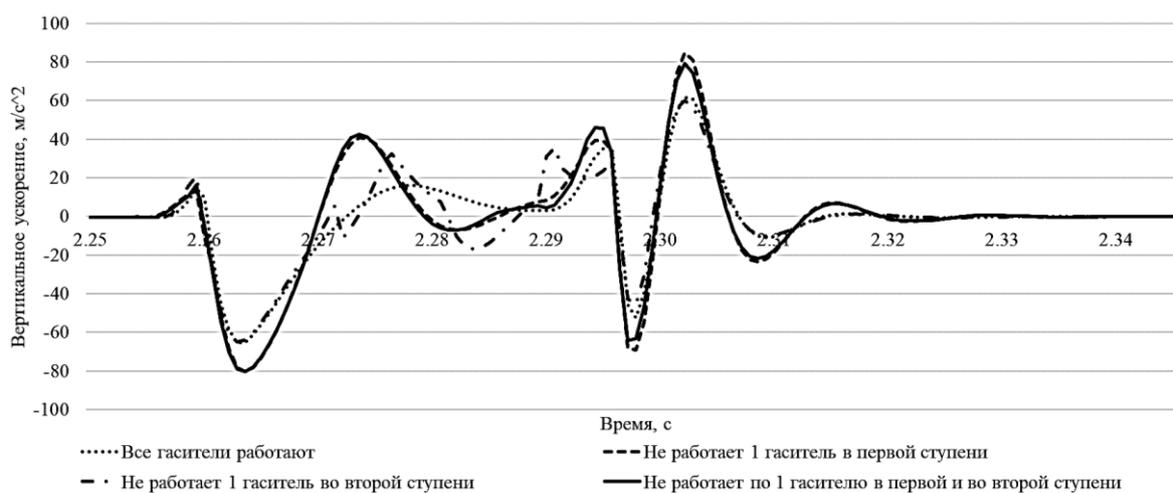


Рис. 7. Зависимость вертикального ускорения от времени для буксы

Fig. 7. Dependence of vertical acceleration on time for the axle box

разуется и сравнивается с эталонным, после чего на основании сравнения делается вывод о техническом состоянии диагностируемого узла, при этом один или несколько датчиков виброускорения устанавливаются отдельно на буксы, тележку и кузов тягового подвижного состава, а анализ сигнала выполняется при проезде тяговым подвижным составом неровности пути – «ступеньки».

Предлагаемый способ обоснован на выборе входных диагностических параметров нейронной распознающей сети для диагностирования технического состояния гидравлического гасителя колебаний. Разработана и обос-

нована топология и параметры нейронной сети, осуществляющей идентификацию вида неисправности гидравлического гасителя колебаний. На основании выполненных теоретических исследований реализована методика диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний в условиях локомотивного депо. Разработаны программные методы формирования входных диагностических параметров и выходных диапазонов [18].

Заключение

В результате проведенного исследования в программе MSC Adams были получены дан-

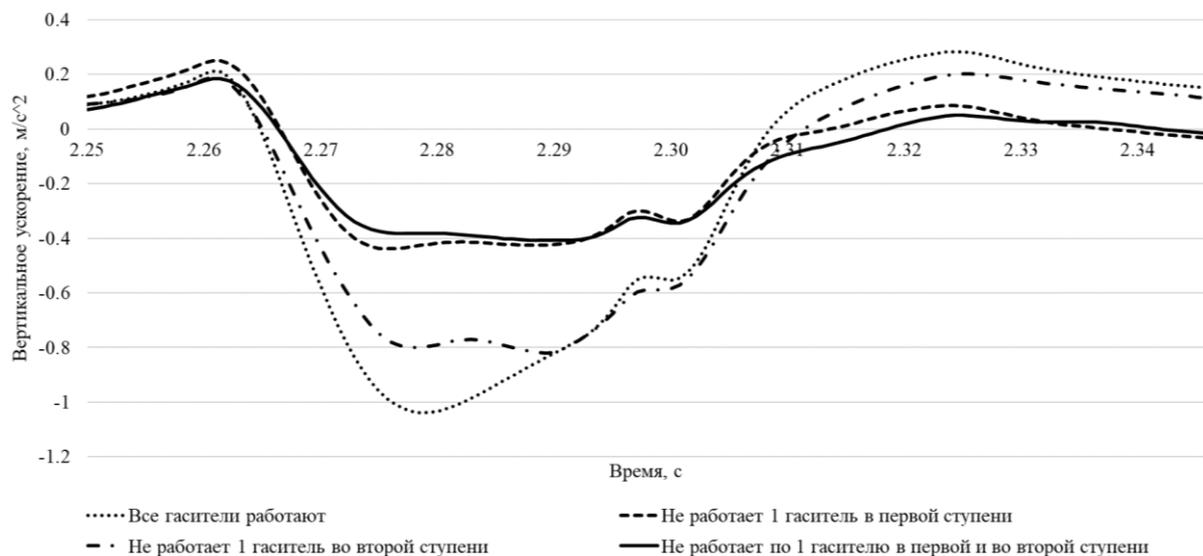


Рис. 8. Зависимость вертикального ускорения от времени для кузова

Fig. 8. Dependence of vertical acceleration on time for the body

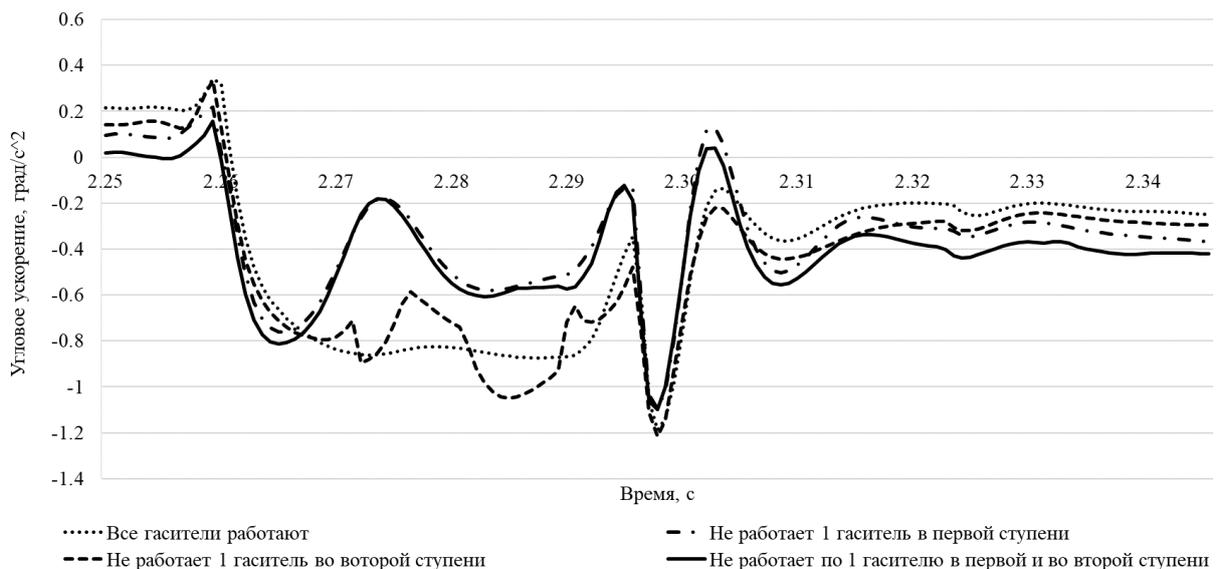


Рис. 9. Зависимость углового ускорения от времени для тележки

Fig. 9. Dependence of angular acceleration on time for a bogie

ные, которые демонстрируют влияние технического состояния гидравлических гасителей колебаний на движение тягового подвижного состава. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что техническое состояние элементов подвески оказывает существенное воздействие на характеристики движения и поведение тягового подвижного состава.

Предложенный в ходе данной работы способ диагностики технического состояния гидравлических гасителей колебаний тягового по-

движного состава открывает новые возможности для оценки их технического состояния непосредственно в условиях эксплуатации. Это позволит своевременно выявлять возникающие неисправности или отклонения в работе гидравлических гасителей колебаний, что повысит безопасность движения тягового подвижного состава. Данная работа является важным техническим решением в рамках создания цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза ЗЭС5К.

Список литературы

1. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
2. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 6. Механическая часть. ИДМБ.661142.009РЭ6 (ЗТС 001.012 РЭ6). Новочеркасск : Новочеркас. электровозостроител. завод, 2004. 66 с.
3. Руководство по эксплуатации 677.00 РЭ. Демпферы гидравлические подвижного состава железных дорог. Первомайск : Транспневматика, 2008. 69 с.
4. Челноков И.И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. М. : Транспорт, 1975. 73 с.
5. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту гидравлических и фрикционных гасителей колебаний локомотивов ПКБ ЦТ.25.0113. М. : ПКБ ЦТ, 2011. 250 с.
6. Электровоз ВЛ85 : Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
7. Электровоз ВЛ80р. Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканова, Н.М. Васько, В.И. Покромкин и др. М. : Транспорт, 1985. 541 с.
8. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. М. : Транспорт, 1992. 440 с.
9. Стенд испытания гидравлических гасителей колебаний // ТПИ : сайт. URL : <https://tpiomsk.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-zheleznodorozhnogo-transporta/lokomotivnoe/stend-ispytaniya-gidravlicheskih-gasiteley-kolebaniy/> (дата обращения 30.05.2024).
10. Болобовов С.И. Стенд для испытания гидродемпферов тягового подвижного состава // Локомотив. 2023. № 4. С. 10–11.
11. Пат. 7201 Рос. Федерация. Стенд для испытания гасителей колебаний вагонов и локомотивов / Ю.П. Бороненко, В.И. Варава, Г.М. Левит. № 97110618/20 ; заявл. 24.06.1997 ; опубл. 16.07.1998.
12. Пат. 102798 Рос. Федерация. Стенд снятия нагрузочной характеристики гидродемпфера / Е.Г. Борисов, А.В. Голубев, В.С. Усс. № 2010141222/28 ; заявл. 07.10.2010 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. 2 с.
13. Пат. 2556768 Рос. Федерация. Универсальный стенд для испытания гасителей колебаний / В.А. Каньшин, А.М. Третьяков, Ф.П. Мельников и др. № 2013149886/11 ; заявл. 07.11.2013 ; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 20. 12 с.
14. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
15. Иванов А.А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования. М. : MSC.Software Corporation, 2003. 97 с.
16. Марченко Д.М. Создание компьютерной модели вагона для динамического моделирования в MSC.ADAMS // Механика. Исследования и инновации. 2017. № 10. С. 148–156.
17. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартинформ, 2014. 46 с.
18. Шкодун П.К. Диагностирование технического состояния гидравлических гасителей колебаний при ремонте и обслуживании подвижного состава : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 21 с.

References

1. Rrasporyazhenie ОАО «RZhD» № 769/r ot 17.04.2018 g «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC Russian Railways No 769/r dated April 17, 2018 «On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)»].
2. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 6. Mekhanicheskaya chast'. IDMB.661142.009RE6 (ZTS 001.012 RE6) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). User manual. Book 6. The mechanical part. IDMB.661142.009RE 6 (ZTS 001.012 RE6)]. NovoCherkassk: NovoCherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2004. 66 p.
3. Rukovodstvo po ekspluatatsii 677.00 RE. Dempfery gidravlicheskie podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Operating manual 677.00RE. Hydraulic dampers of railway rolling stock]. Pervomaisk: Transpnevmatika Publ., 2008. 69 p.

4. Chelnokov I.I. *Gidravlicheskie gasiteli kolebanii passazhirskikh vagonov* [Hydraulic vibration dampers of passenger wagons]. Moscow: Transport Publ., 1975. 73 p.
5. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu gidravlicheskikh i friktsionnykh gasitelei kolebanii lokomotivov PKB TsT.25.0113* [Maintenance and repair manual for hydraulic and friction vibration dampers of locomotives PKB TsT 25.0113]. Moscow: PKB TsT Publ., 2011. 250 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakova L.A., Yarosh V.P., Sobolev Yu.V., Matlakhov A.A., Ukrainskii E.V., Andryushchenko T.F., Krivun A.A., Strel'tsov A.I., Mikheev B.K., Orlov Yu.A., Parichenko N.A., Zakis' E.A., Shtepenko P.K., Shestakov E.F. *Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL85. Operation manual]. Moscow: Transport, 1992. 480 p.
7. Tushkanov B.A., Vas'ko N.M., Pokromkin V.I., Matlakhov A.A., V.K. Mikheev, Nazin V.V., Orlov M.P., Popov V.I., Poltorak P.S., Poludnenko A.N., Sobolev Yu.V., Korbut E.A., Chaika A.M., Strel'tsova T.V. *Elektrovoz VL80r. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL80r. User manual]. Moscow: Transport Publ., 1985. 541 p.
8. Biryukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P., Serdobintsev E.V., L'vov N.V., Korotenko M.L., Rybnikov E.K., Derkach B.A. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava* [The mechanical part of traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992. 440 p.
9. *Stend ispytaniya gidravlicheskikh gasitelei kolebanii (Elektronnyi resurs)* [Test bench for hydraulic vibration dampers (Electronic resource)]. Available at: <https://tpiomsk.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-zheleznodorozhnogo-transporta/lokomotivnoe/stend-ispytaniya-gidravlicheskikh-gasiteley-kolebanii/> (Accessed May 30, 2024).
10. Bolobonov S.I. *Stend dlya ispytaniya gidrodempferov tyagovogo podvizhnogo sostava* [Test bench for hydraulic dampers of traction rolling stock]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2023, no. 4, pp. 10–11.
11. Boronenko Yu.P., Varava V.I., Levit G.M. Patent RU 7201 U1, 16.07.1998.
12. Borisov E.G., Golubev A.V., Uss V.S. Patent RU 102798 U1, 10.03.2011.
13. Kan'shin V.A., Tret'yakov A.M., Mel'nikov F.P., Belyaev V.I. Patent RU 2556768 C2, 20.07.2015.
14. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W, Jr. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration Problems in Engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.
15. Ivanov A.A. *MSC.Adams: teoriya i elementy virtual'nogo konstruirovaniya i modelirovaniya* [Theory and elements of virtual construction and modeling]. Moscow: MSC.Software Corporation Publ., 2003. 97 p.
16. Marchenko D.M. *Sozdanie komp'yuterno modeli vagona dlya dinamicheskogo modelirovaniya v MSC.ADAMS* [Creation of a computer model of a wagon for dynamic modeling in MSC.ADAMS]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii* [Mechanics. Research and innovation], 2017, no. 10, pp. 148–156.
17. GOST R 55513-2013. *Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State Standard R 55513-2013 Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 46 p.
18. Shkodun P.K. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya gidravlicheskikh gasitelei kolebanii pri remonte i obsluzhivani podvizhnogo sostava* [Diagnosis of the technical condition of hydraulic vibration dampers during repair and maintenance of rolling stock]. Ph.D.'s theses. Omsk, 2002. 21 p.

Информация об авторах

Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Линьков Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: linkovalex@mail.ru.

Коновалов Алексей Владимирович, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: alekseikonov2016@mail.ru.

Кахаев Семен Александрович, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.

Information about the authors

Oleg V. Mel'nichenko, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Alexei O. Lin'kov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: linkovalex@mail.ru.

Alexei V. Konovalev, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: alekseikonov2016@mail.ru.

Semen A. Kakhaev, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.