

И. А. Заковырин <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПЛАВНОСТИ ХОДА И СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА В ТОЧКЕ КОНТАКТА КОЛЕСО-РЕЛЬС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА.

**Аннотация.** Системы подвесок железнодорожного транспорта эксплуатируются в широком многообразии внешних условий. При этом элементы системы подрессоривания являются неуправляемыми и настроенными на некоторое среднее значение. Как следствие существуют проблемы с повышенным износом в точке контакта колесо-рельс, а также сниженные показатели безопасности и плавности хода подвижного состава.

Возможным решением может стать использование демпфера, построенного на основе магнито-реологической жидкости, который может быть установлен в подвеске железнодорожного транспортного средства. Такой демпфер способен менять вязкость рабочей жидкости несколько сотен раз в секунду. При этом, при отказе питания, демпфер переходит в пассивное состояние с коэффициентом демпфирования сравнимым с обычным гидравлическим демпфером.

В статье рассмотрены способы применения этих гасителей колебаний в подвеске железнодорожного экипажа для потенциального уменьшения проблем износа, плавности хода и безопасности.

В качестве объекта, на котором проводилось исследование была выбрана автотомтриса, из-за относительной простоты описания её системы подвески. Проведено математическое моделирование использования управляемых гасителей колебаний в подвеске автотомтрисы для трех случаев: когда управляемым является только вертикальные демпферы, когда управляемым является только наклонные горизонтальные демпферы и когда все демпферы являются управляемыми.

Результаты этого моделирования показывают возможность увеличения показателей безопасности и комфорта пассажиров, а также снижения износа в точке контакта колесо-рельс.

**Ключевые слова:** полуактивная подвеска, магнито-реологическая жидкость, магнито-реологический демпфер, управляемый демпфер.

I. A. Zakovyrin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

## METHOD FOR INCREASING SMOOTH RIDE AND REDUCING WEAR AT WHEEL-RAIL CONTACT POINT USING MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER.

**Abstract.** Railway suspension systems operate in a wide variety of environmental conditions. At the same time, the elements of the suspension system are uncontrollable and tuned to a certain average value. As a result, there are problems with increased wear at the wheel-rail contact point, as well as reduced safety and smoothness of the rolling stock.

A possible solution would be to use a damper based on a magnetorheological fluid, which can be installed in the suspension of a railway vehicle. Such a damper is capable of changing the viscosity of the working fluid several hundred times per second. In this case, in the event of a power failure, the damper goes into a passive state with a damping coefficient comparable to a conventional hydraulic damper.

The article discusses how to use these vibration dampers in the suspension of a railway vehicle to potentially reduce wear, ride and safety issues.

A railcar was chosen as the object on which the study was carried out, due to the relative simplicity of the description of its suspension system. Mathematical modeling of the use of controlled vibration dampers in the railcar suspension has been carried out for three cases: when only vertical dampers are controlled, when only inclined horizontal dampers are controlled, and when all dampers are controlled.

The results of this simulation show the possibility of increasing the safety and comfort of passengers, as well as reducing wear at the wheel-rail contact point.

**Key words:** semi-active suspension, magnetorheological fluid, magnetorheological damper, controlled damper.

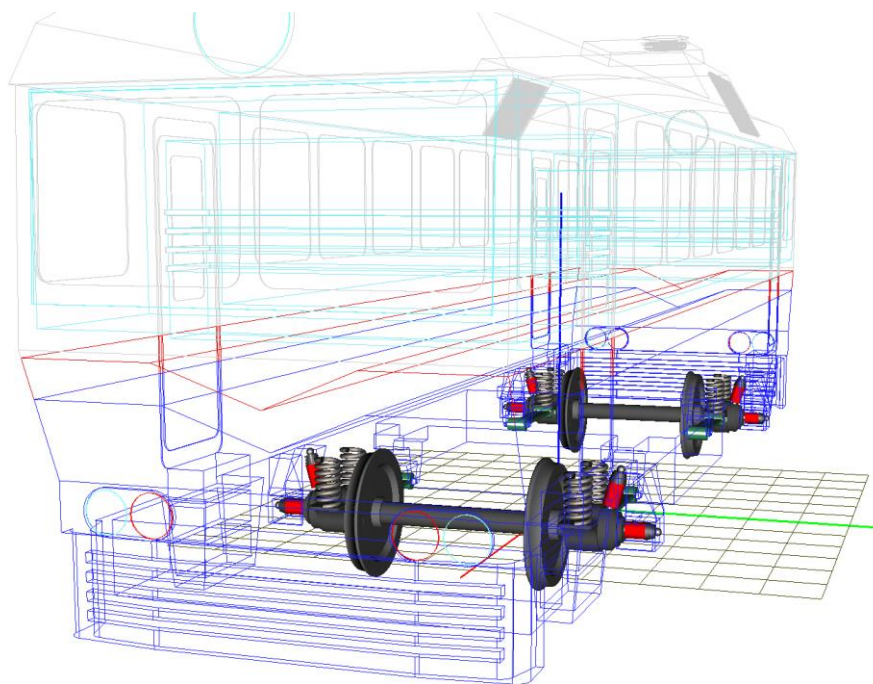
**Введение.** На сегодняшний день в ОАО «РЖД» есть инициатива, которая нацелена на увеличение показателя безопасности и комфортности пассажироперевозок, а также снижения

износа в точке контакта колесо-рельс. Одной из причин снижения описанных ранее показателей может являться использование нерегулируемых гасителей колебаний. Так как они являются настроенными на среднее значение, и по ходу движения локомотива и вагонов возникают колебания, которые могут негативно сказываться на безопасности и износе. Помимо этого, подвижной состав может эксплуатироваться в различных климатических условиях, на разных по качеству участках пути, его параметры могут меняться в течение работы. Все это может привести к низкой эффективности работы демпферов. В этой работе с помощью математического моделирования исследуется возможность приближения описанных ранее целей путем использования управляемых магнито-реологических демпферов в подвеске железнодорожного экипажа.

Сам магнито-реологический демпфер, как правило, представляет из себя однотрубный газо-гидравлический амортизатор, в рабочей области которого помещено магнито-реологическое масло [1]. Внутри поршня находится катушка индуктивности. При ходе поршня на сжатие или отбой, жидкость перетекает через зазор из области большего давления в область меньшего. Особенность заключается в том, что при протекании тока через катушку создается магнитное поле, которое изменяет вязкость жидкости в зазоре. Таким образом достигается эффект переменного демпфирования.

Из особенностей построения системы поддрессоривания с таким демпфером, можно отметить следующее: подсистема управления демпфером должна включать в себя микроконтроллер, датчики ускорения и взаимного положения поддрессоренной и неподдрессоренной массы, источник управляющего напряжения; поскольку демпфер можно устанавливать в различных точках подвески, можно гасить различные виды колебаний; при выходе из строя источника питания, демпфер становится обычным нерегулируемым газо-гидравлическим амортизатором с заранее настроенным коэффициентом демпфирования.

**Модель.** Для проведения исследований использовался программный комплекс «Универсальный механизм» (рисунок 1). В качестве объекта исследования была выбрана автомотриса в силу относительной простоты строения системы подвешивания, а также наличия подготовленного шаблона. После добавления в модель переменных, отвечающих за изменение демпфирования, модель была перенесена в среду Matlab/Simulink как S-функция, дальнейшие исследования проводились в Matlab/Simulink (рисунок 2).



**Рис. 1.** автомотриса с управляемыми гасителями колебаний.

Исследование включало в себя три случая. Первый – когда использовались управляемые демпферы, установленные только в поперечном горизонтальном направлении для гашения таких колебаний как относ и виляние. Второй, когда управляемые демпферы были расположены под углом к вертикали (наклонные гасители, для снижения влияния боковой качки, галопирования и подпрыгивания). В третьем случае все из установленных гасители колебаний были управляемыми. Расположенные управляемые демпферы показаны на рисунке 1 и выделены красным цветом.

Измеряемые показатели: перемещение и ускорение кузова автототрисы в поперечных горизонтальных и вертикальных плоскостях. Также износ в точке контакта колесо рельс для переднего левого колеса колесной пары (для остальных точек контакта ситуация схожа).

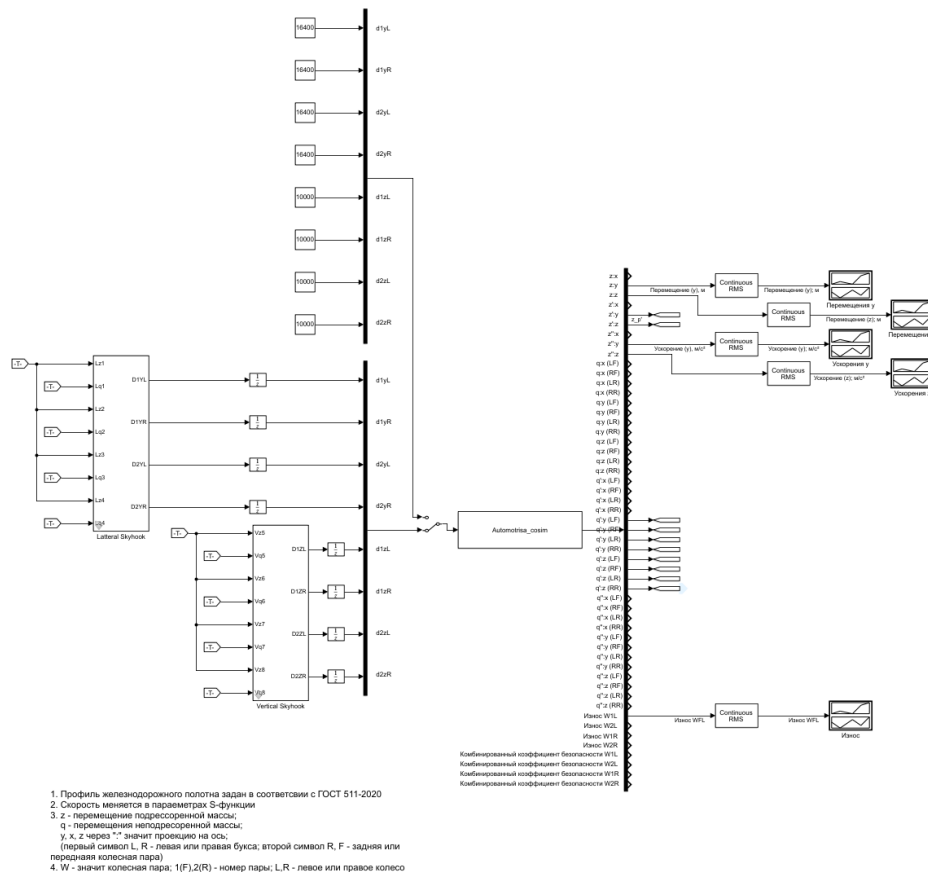


Рис. 2. Модель автототрисы в среде Matlab/Simulink.

Алгоритмом, управляющим коэффициентами демпфирования является skyhook [2]:

$$k = \begin{cases} k_{\max}, & \text{при } (\dot{z} - \dot{q})\dot{z} \geq 0; \\ k_{\min} = k_0, & \text{при } (\dot{z} - \dot{q})\dot{z} < 0, \end{cases}$$

где  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  – максимальное и минимальное значение коэффициента демпфирования;  $k_0$  – постоянное значение коэффициента демпфирования;  $z$  – линейные перемещения поддрессоренной массы;  $q$  – кинематическое возмущение на подвеску (неровности железнодорожного полотна).

В процессе моделирования были использованы следующие значения:

Так как автором не было найдено экспериментальных данных о параметрах магнитореологических демпферов, соответствующих требованиям [3], был сделан запрос в фирму, которая занимается производством магнитореологических гасителей колебаний. Из ответа следует, что вполне возможно создать такой демпфер, который изменяет свое демпфирование в 10 раз, и соответствует динамическим требованиям железнодорожного

амортизатора, однако так как не известно как подобное устройство повело бы себя на практике, диапазон изменения демпфирования был выбран равным пяти.

То есть в случае с горизонтальными гасителями колебаний -  $k_0 = 16400 \text{ Нс/м}$ ;  $k_{\text{max}} = 82000 \text{ Нс/м}$ . В случае с наклонными гасителями -  $k_0 = 10000 \text{ Нс/м}$ ;  $k_{\text{max}} = 0 \dots 50000 \text{ Нс/м}$ .

Задержка управления составляла  $t = 0.01 \text{ с}$ .

Микронеровности пути моделировались согласно [4].

**Результаты моделирования.** Для большей наглядности к результатам моделирования был применен блок continuous RMS. Графики для первого, второго и третьего случая моделирования показаны на рисунках 3, 4, 5 соответственно.

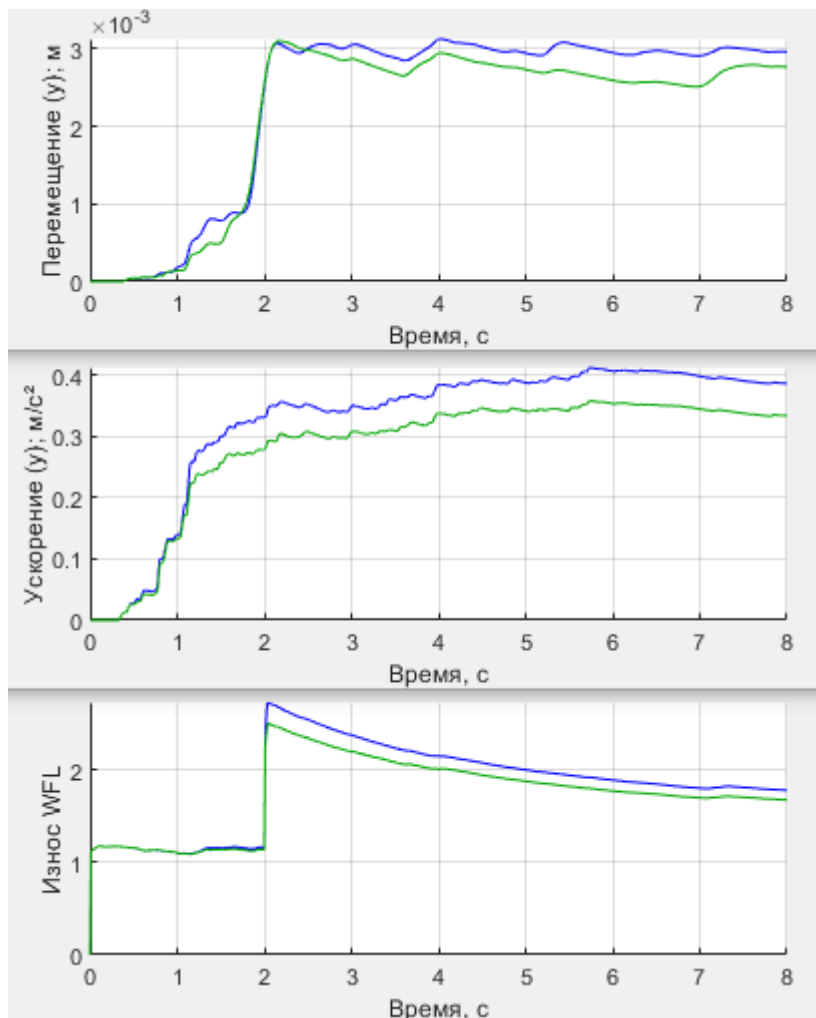
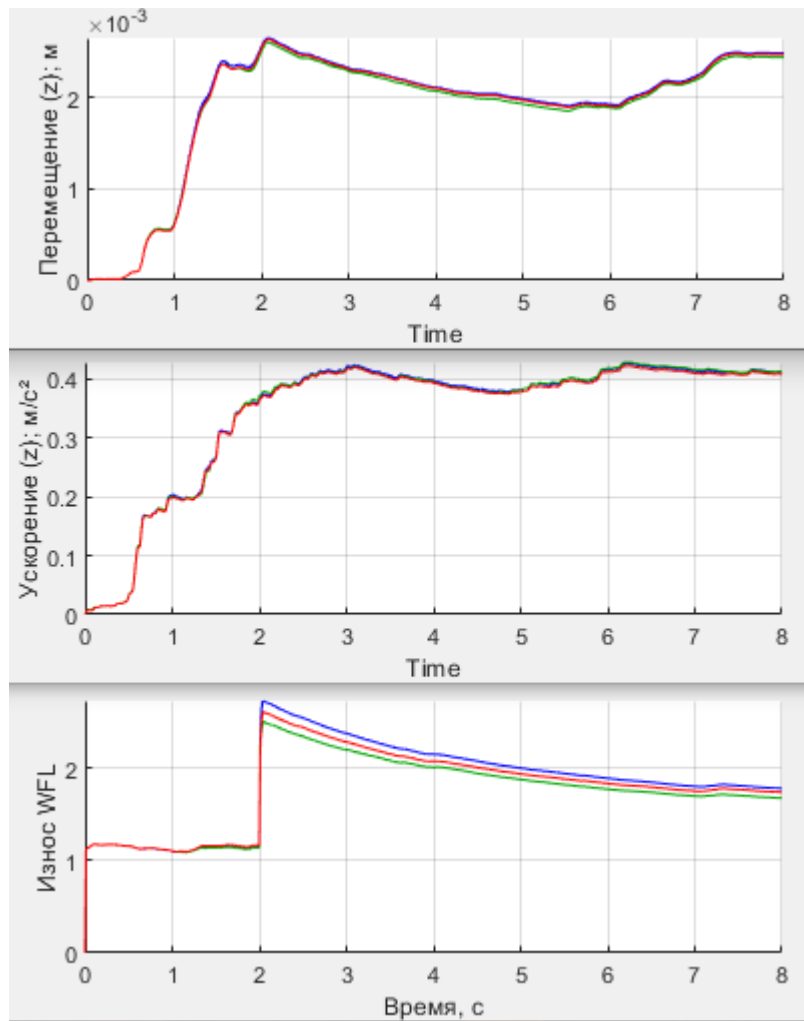
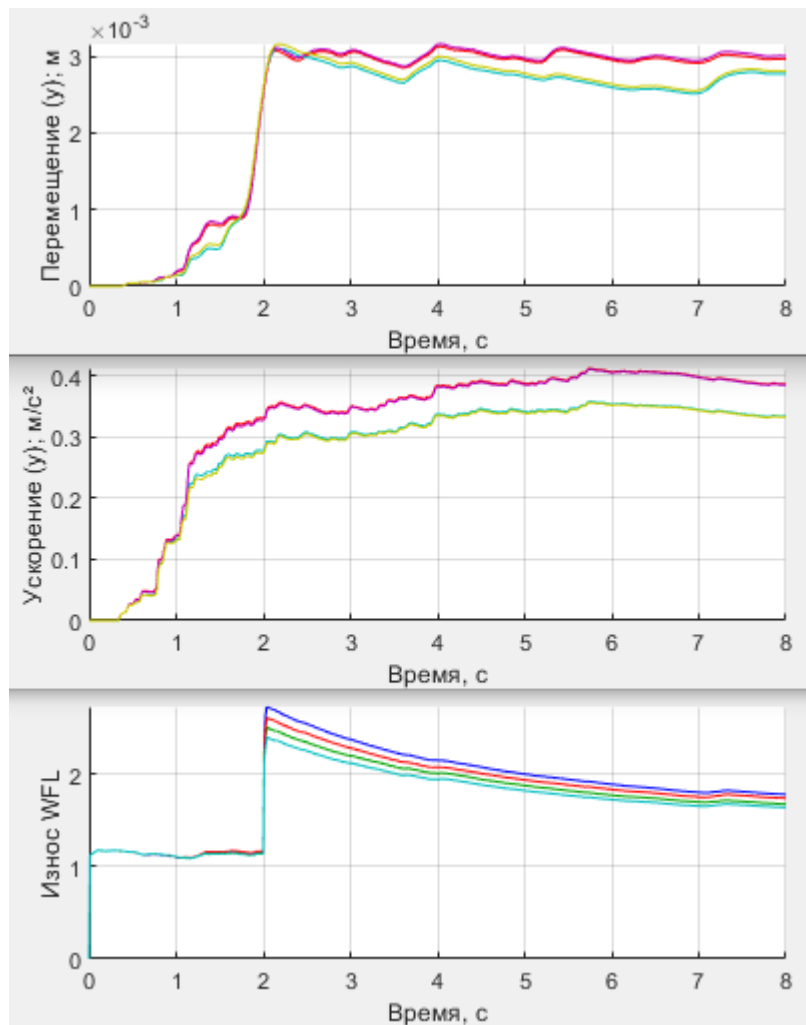


Рис. 3. Графики ускорений, перемещений и износа, активны только поперечные горизонтальные гасители колебаний (синий пассивная подвеска, зеленый – skyhook горизонтальные гасители).



**Рис. 4. Графики ускорений, перемещений и износа активны только вертикальные гасители колебаний (синий пассивная подвеска, зеленый – skyhook поперечные гасители, красный – skyhook вертикальные гасители).**

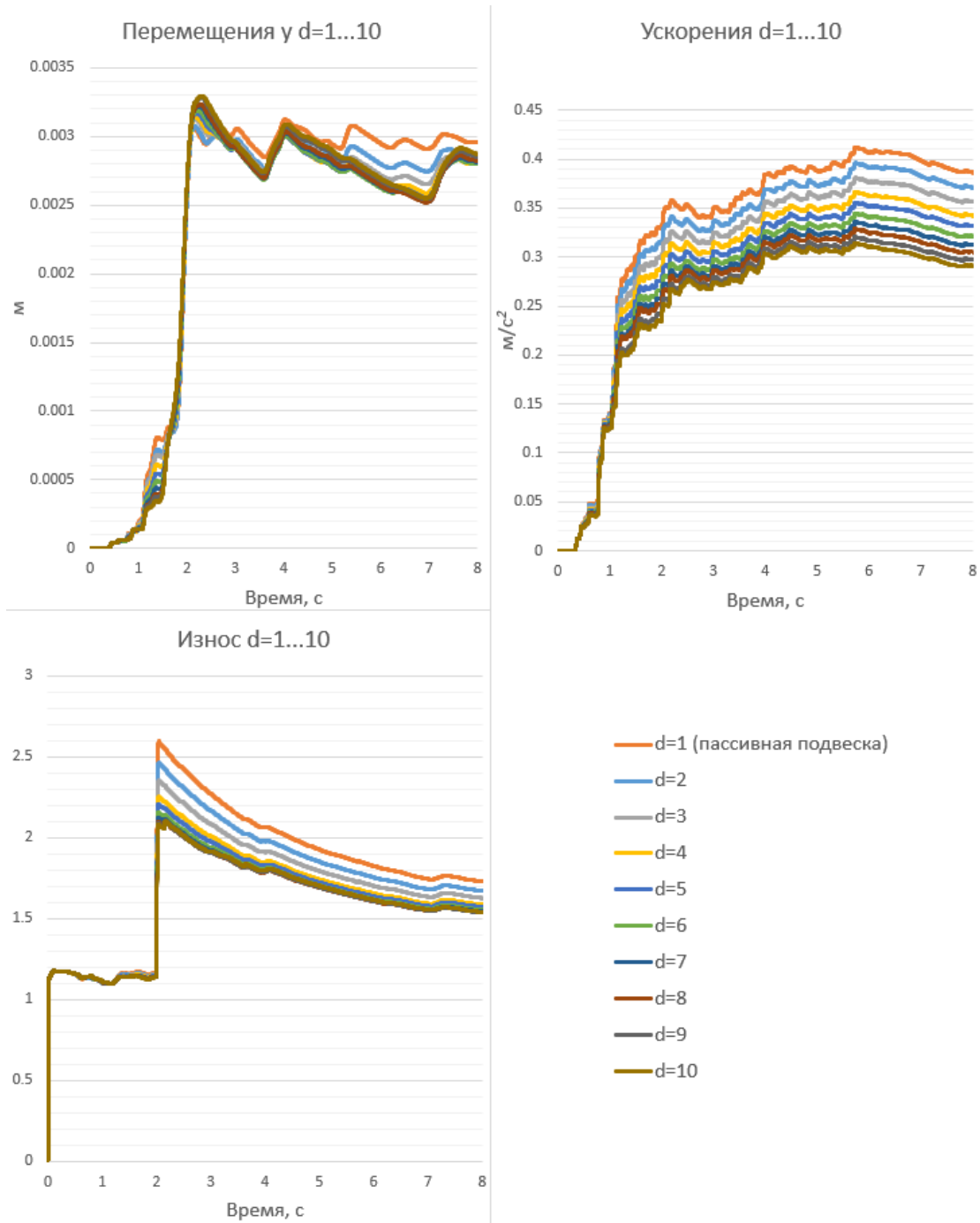
Полученные данные показывают следующий результат: В случае работы только поперечных горизонтальных гасителей колебаний (рисунок 3) показатель ускорения снизился в среднем почти на 8%, показатель перемещения снизился примерно на 6-7%, показатель износа снизился примерно на 5,5%. Во втором случае, когда регулируются только вертикальные демпферы (рисунок 4) результат уже не столь заметен, показатель износа снизился на 2,7%, а показатели перемещений и ускорений на 2-3%.



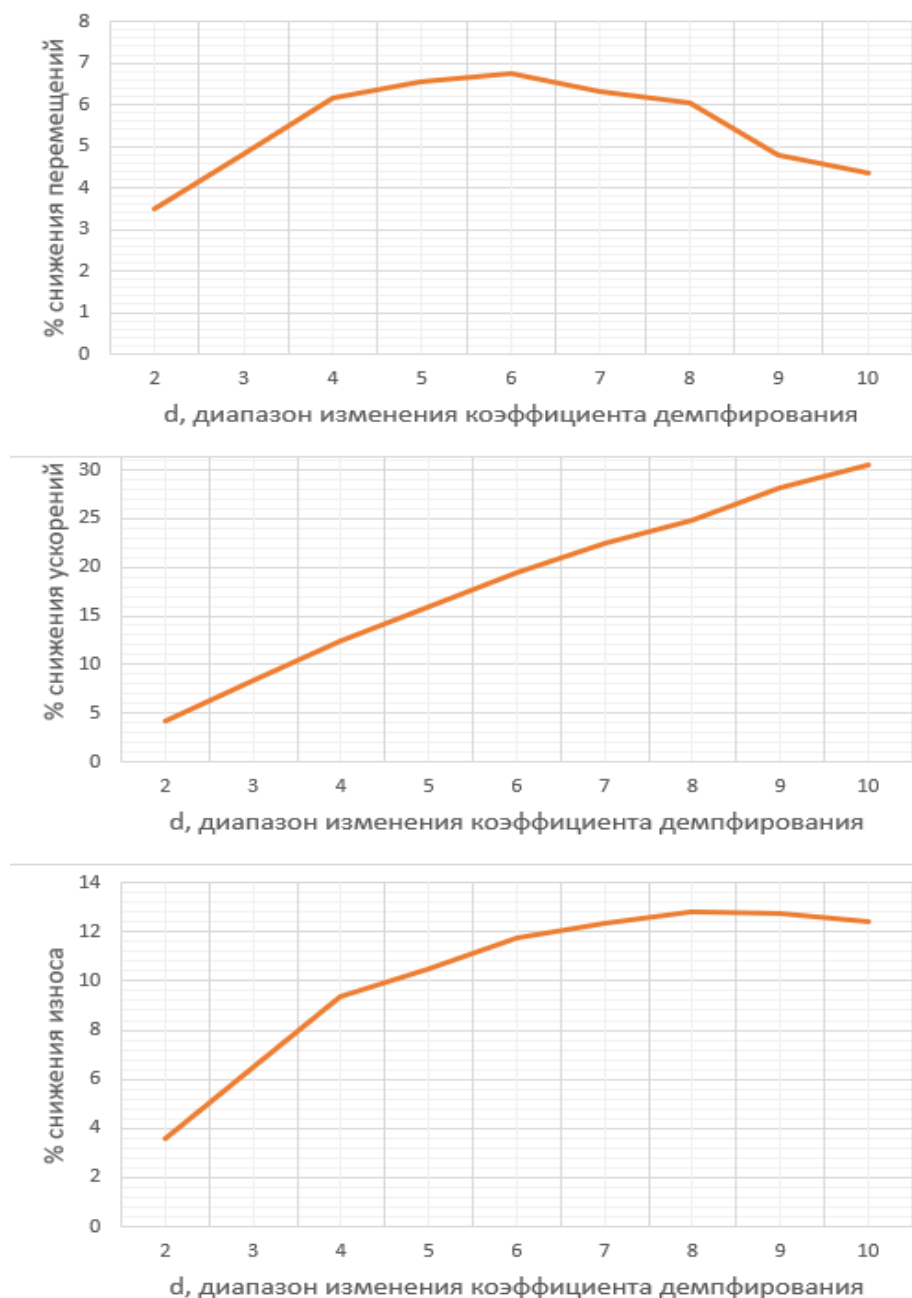
**Рис. 5. Графики ускорений, перемещений и износа активны все гасители колебаний (синий – пассивная подвеска, зеленый – skyhook поперечные гасители, красный – skyhook вертикальные гасители, голубой – skyhook вертикальные и поперечные).**

В случае, когда все из установленных гасителей колебаний являются управляемыми, показатель износа снижается примерно на 8% в сравнении с пассивной нерегулируемой подвеской.

Так же было проведено исследование влияния диапазона изменения демпфирования на измеряемые показатели. Проведены моделирования с диапазоном от 2 до 10 раз с шагом в единицу. То есть в таком случае  $k_0 = 10000$  Нс/м с  $k_{\max} = d \cdot k_0$  Нс/м, где  $d = 2 \dots 10$  для наклонных демпферов и  $k_0 = 16400$  Нс/м с  $k_{\max} = d \cdot k_0$  Нс/м, где  $d = 2 \dots 10$  для горизонтальных поперечных демпферов. Если в случае выполнения необходимых требований по долговечности и надежности придется снизить диапазон изменения демпфирования, был взят минимальный диапазон изменения в 2 раза. Максимальный, в соответствии с заявлениями фирм производителей и научной литературы [1] был принят равным 10. График с результатами этого исследования показан на рисунке 6, график, на котором изображен процент снижения показателей износа, перемещений и ускорений показан на рисунке 7. Из графиков видно, что наиболее эффективны случаи, когда коэффициент демпфирования увеличивается в 6-8 раз по сравнению с выключенным состоянием. При этом при  $d > 6$ , эффект снижения амплитуды перемещений начинает уменьшаться, а при  $d > 8$  начинает увеличиваться и износ. Это может быть связано с «релейным» алгоритмом управления, помимо этого необходимо более тщательно учитывать и физические процессы, происходящие в самом демпфере, в том числе его гистерезисное поведение.



**Рис. 6. Управляемая подвеска при диапазоне изменения коэффициента демпфирования регулирования от 2 до 10**



**Рис. 7. Процент снижения износа, перемещений и ускорений при диапазоне изменения коэффициента демпфирования от 2 до 10**

**Заключение.** Из проведенных исследований можно сделать вывод, что, во-первых, наибольший вклад в снижение показателя комфорта пассажиров и показателя износа вносят поперечные колебания. Во-вторых, что с помощью регулируемых гасителей колебаний можно повысить комфорт пассажироперевозок и снизить износ в точке контакта колесо рельс. В-третьих, стоит добавить, что ключевые роли при таком подходе играют: диапазон изменения коэффициента демпфирования и время переключения демпфера. Чем меньше время переключения и оптимальнее подобран диапазон, тем эффективнее работает система.

В дальнейшем для управления демпфированием планируется использовать самоподстраивающийся алгоритм с непрерывным управлением, который, согласно предыдущим исследованиям, показывает большую эффективность чем skyhook и его модификации. [5 - 10].



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение. Монография. *Вестник научно-технического развития*. – Москва, 2018. №7. с.22-27.
2. Karnopp D., Crosby M.J., Harwood R.A., “Vibration control using semi-active force generators,” *Transactions of the Asme Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96, No.2, pp. 619-626.
3. ГОСТ 33749-2016. Демпферы гидравлические железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ, 2019. 16 с.
4. ПНСТ 511 – 2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. Москва, Стандартинформ, 2021. 24 с.
5. Круглов С.П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. –2019. –№1.40 – С. 27-40 –Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 10.12.2020).
6. Круглов С.П. Модификации рекуррентного метода наименьших квадратов с фактором забывания для функциональной устойчивости текущего параметрического оценивания динамических процессов. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн.*, 2019. № 1. с. 1-12 –Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 22.09.2020).
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория автоматического управления*. – С.Петербург: Профессия, 2003. 747 с.
8. Круглов С.П., Заковырин И.А. Управление адаптивной подвеской автомобиля на основе идентификационного алгоритма. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн.*, 2020, № 3(8). – с. 29-44 –DOI:10.26731/2658-3704.2020.3(8). 29-44 –Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/38-2020>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 01.11.2020).
9. Круглов С.П., Заковырин И.А. Адаптивный магнитореологический амортизатор в подвеске транспортного средства с регулируемой жесткостью. *Автоматизация. Современные технологии*. 2022. Т. 76. № 9. С. 419-427.
10. Патент RU 2782049 С1 Способ адаптивного управления амортизатором с магнитореологической жидкостью в подвеске транспортного средства. Круглов С.П., Заковырин, 21.10.2022. Заявка № 2022103649 от 11.02.2022.

## REFERENCES

1. Belyaev E.S., Ermolaev A.I., Titov E.YU., Tumakov S.F. *Magnitoreologicheskie zhidkosti: tekhnologii sozdaniya i primeneniye. Monografiya*. [Magnetorheological fluids: technologies of creation and application. Monograph.] – *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Scientific and technical development bulletin]. – Moscow, 2018. №7. pp. 22-27.
2. Karnopp D., Crosby M.J., Harwood R.A., “Vibration control using semi-active force generators,” *Transactions of the Asme Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96, No.2, pp. 619-626.
3. GOST 33749-2016. *Dempfery gidravlicheskie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Hydraulic dampers for railway rolling stock. General specifications]. Moscow, Standartinform publ., 2019. 16 p.
4. PNST 511 – 2020. *Vagony gruzovye. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ochenki pokazatelej dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov raschetnymi metodami*. [Freight cars.

Design irregularities of the railway track for use in dynamic qualities estimation of freight cars]. Moscow, Standartinform publ., 2021. 24 p.

5. Kruglov S.P. *Skhodimost' nevyazki identifikatsii v sisteme upravleniya s parametricheskoy adaptatsiyey* [Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation] // *Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 1. P. 27-40. [Accessed 10.12.2020].

6. Kruglov S.P. *Modifikatsii rekurrentnogo metoda naimen'shikh kvadratov s faktorom zabyvaniya dlya funktsional'noy ustoychivosti tekushchego parametricheskogo otsenivaniya dinamicheskikh protsessov* [Modifications of the rekurrent method of least squares with forgetting factor for the functional stability of the current parametrical estimation of dynamic processes]. *Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal]. 2019, no. 1. pp. 1-12. [Accessed 22.09.20].

7. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. [Automatic control theory.] – S.Peterburg: Professiya [S. Petersburg: Profession]. 2003, 747 p.

8. Kruglov S.P., Zakovyryn I.A. *Upravlenie adaptivnoj podveskoj avtomobilya na osnove identifikatsionnogo algoritma* [Adaptive vehicle suspension control based on identification algorithm]. *Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami. ehlektron. nauch. zhurn* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems. Electronic scientific journal]. 2020, no. 3(8), pp. 29-44. [Accessed 01.11.2020].

9. Kruglov S.P., Zakovyryn I.A. *Adaptivnyj magnitoreologicheskij amortizator v podveske transportnogo sredstva s reguliruemoy zhestkost'yu* [Adaptive magnetorheological shock absorber in vehicle suspension with adjustable stiffness]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tehnologii* [Automation. Modern technologies]. 2022. V. 76. No. 9. pp. 419-427.

10. Patent RU 2782049 C1 *Sposob adaptivnogo upravleniya amortizatorom s magnitoreologicheskoy zhidkost'yu v podveske transportnogo sredstva* [Method for adaptive control of shock absorber with magnetorheological fluid in vehicle suspension]. Kruglov S.P., Zakovyryn, 10/21/2022. Application No. 2022103649 dated February 11, 2022.

### **Информация об авторах**

Заковырин Игорь Александрович – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [ZakIgor@bk.ru](mailto:ZakIgor@bk.ru)

### **Information about the authors**

Zakovyryn Igor Alexandrovich – post-graduate student of the Department "Automation of production processes", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [ZakIgor@bk.ru](mailto:ZakIgor@bk.ru)