

УДК 621.337

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА****Н.И. Щуров, П.А. Бахолдин, Д.А. Бахолдин***Новосибирский государственный технический университет*

При создании системы электромагнитного гашения колебаний необходимым является учет параметров транспортного средства и условий эксплуатации, таких как качество дорожного полотна, тип транспортного средства и его массогабаритные показатели. Для определения энергетических параметров на различных участках дорожного полотна была разработана математическая имитационная модель транспортного средства. В качестве среды программирования для создания имитационной модели была выбрана среда графического программирования MATLAB Simulink. Проведен ряд опытов с применением различных параметров транспортного средства, типов дорожного полотна в рамках существующих ездовых циклов. Результаты моделирования позволяют получить базовые расчетные характеристики электромагнитного гасителя колебаний выбранного транспортного средства, на основе которых будет производиться дальнейший расчет линейного электромагнитного гасителя колебаний. Зависимость энергоэффективности системы определялась при использовании транспортного средства на дорогах, имеющих различный индекс ровности дорожных покрытий.

Ключевые слова: электромагнитный гаситель колебаний, имитационное моделирование, международный индекс ровности дорожных покрытий, энергоэффективность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62

Введение

Подвеска транспортного средства, как один из ключевых компонентов, выполняет ряд задач, таких как устойчивость и управляемость авто, маневренность и обеспечение плавности хода. Подвеска включает в себя упругие элементы, гасители колебаний и направляющие. В настоящее время получили распространение механические, гидравлические и пневматические гасители колебаний. Одним из современных видов автомобильных подвесок является так называемая, электромагнитная подвеска, в которой электропривод может выполнять роль как упругого элемента, так и демпфера. Данный тип подвески может быть выполнен с применением гасителей колебаний различной конструкции, при этом возможность рекуперации энергии, затраченной на преодоление неровностей путевой структуры, позволяет повысить общую энергетическую эффективность транспортного средства.

1. Имитационная модель пассивной подвески

Для определения требований к системе управления электромагнитной подвеской была создана имитационная математическая модель транспортного средства. Определение параметров модели необходимо начать с разработки имитационной модели пассивной подвески и впоследствии модернизировать имеющуюся модель в активную. Под пассивной подвеской в данном случае следует понимать возможность работы подвески только как гасителя колебаний с изменяемыми характеристиками.

Математическая модель системы управления подвеской относится к имитационным моделям и необходима для создания и упрощения физической модели. Для таких технических систем ради получения аналитической математической модели исследователь вынужден накладывать жесткие ограничения на модель и прибегать к упрощениям. При этом приходится пренебрегать некоторыми особенностями технической системы, что приводит к тому, что математическая модель перестает быть средством изучения сложной системы. [1, 12, 13].

Для создания практичной и функциональной имитационной модели была выбрана среда графического программирования Simulink на основе MATLAB. Данная среда имеет подходящие библиотеки, направленные на создание сложных имитационных моделей различных узлов. Также для контроля оценки результатов данная среда моделирования имеет возможность визуализации объектов при помощи библиотек «Unreal Engine Scenario Simulation».

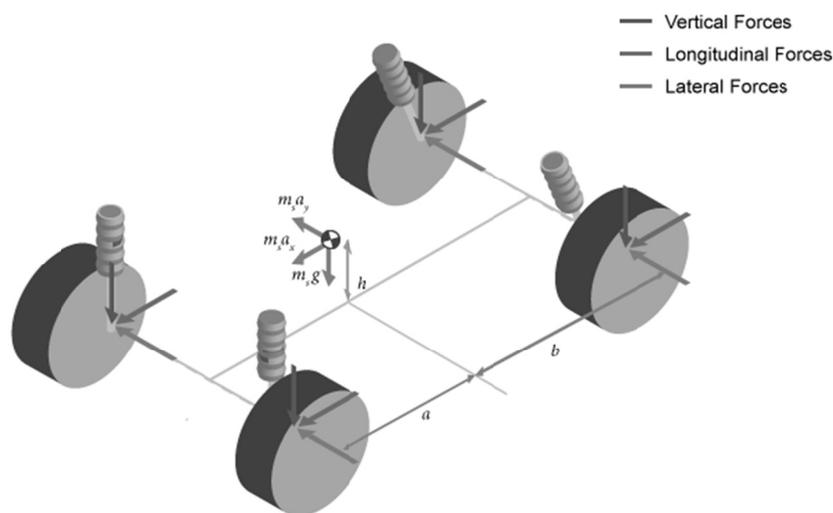


Рис. 1 – Пример визуализации работы имитационной модели подвески транспортного средства в среде «Unreal Engine Scenario Simulation»

Fig. 1 – An example of visualization of the operation of a simulation model of the vehicle suspension in the "Unreal Engine Scenario Simulation" environment

На рис. 1 представлена модель системы подвешивания транспортного средства [2, 3], где имитация неровностей путевой структуры реализована линейными приводами, передающими воздействие на ступицу колеса. Использование специализированных блоков библиотек Vehicle Dynamics Blockset позволяет наиболее точно настроить параметры элементов транспортного средства и учесть все необходимые параметры.

Данная имитационная модель позволяет учитывать взаимодействие и влияние на систему упругого подвешивания различных параметров:

- конструкции рычагов подвески;
- тягового привода;
- тормозной системы;
- различных вариантов загрузки транспортного средства;
- неровностей путевой структуры и уклона;
- маневрирования;
- направления и скорости ветра;
- давления в шинах.

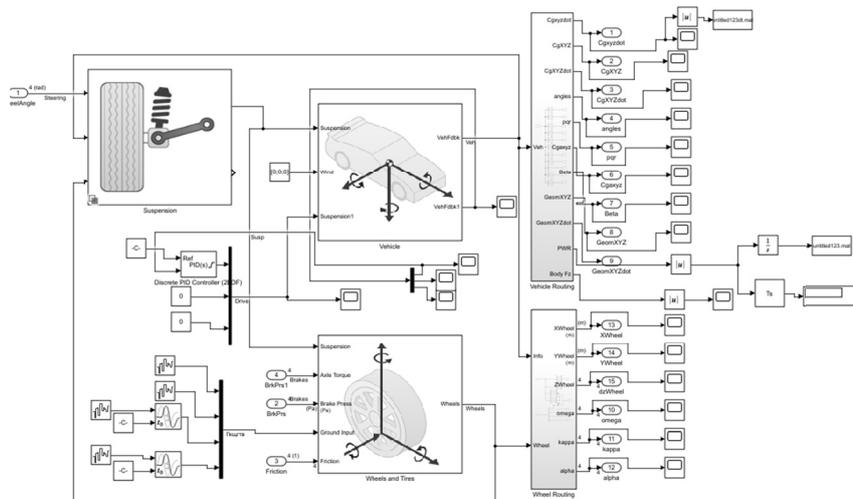


Рис. 2 – Пример взаимодействия универсальных блоков библиотеки Vehicle Dynamics Blockset

Fig. 2 – An example of the interaction of generic blocks of the Vehicle Dynamics Blockset library

Используемые блоки учитывают различные системы упругого подвешивания и влияние стабилизатора поперечной устойчивости.

Имитация колеса и шины

Блок Combined Slip Wheel (рис. 3) реализует продольные и боковые реакции колеса. На основе крутящего момента тягового электродвигателя, тормозных механизмов, параметров дорожного полотна и величины прогиба колеса блок определяет частоту вращения колеса, сопротивление качению, вертикальное перемещение, силы и моменты во всех шести степенях свободы. Данные свойства позволяют изучать резонансные явления в подвеске транспортного средства, возникающие во время движения транспортного средства.

Характеристики дорожного профиля

Для имитации дорожного полотна применялись различные методы.

- Использование параметров неровностей путевой структуры на основе данных, полученных путем сканирования путевой структуры [4].
- Задание неровности путевой структуры на основе статистических данных в соответствии с индексом ровности дороги IRI.

Международный индекс ровности IRI (International Roughness Index), который используют все страны Таможенного союза как в период строительства, так и в период эксплуатации), представляет собой отношение величины суммарного перемещения неподдресоренной массы автомобиля относительно поддресоренной массы к длине участка дороги (м/км или мм/м). Он определяется расчетом в результате моделирования движения по микропрофилю $\frac{1}{4}$ части эталонного автомобиля со скоростью 80 км/ч [5, 9, 15].

Показатель IRI является логическим развитием понятия ровности по толчком, но не обладает его существенными недостатками – зависимостью показаний толчкомера от особенностей подвески используемого автомобиля.

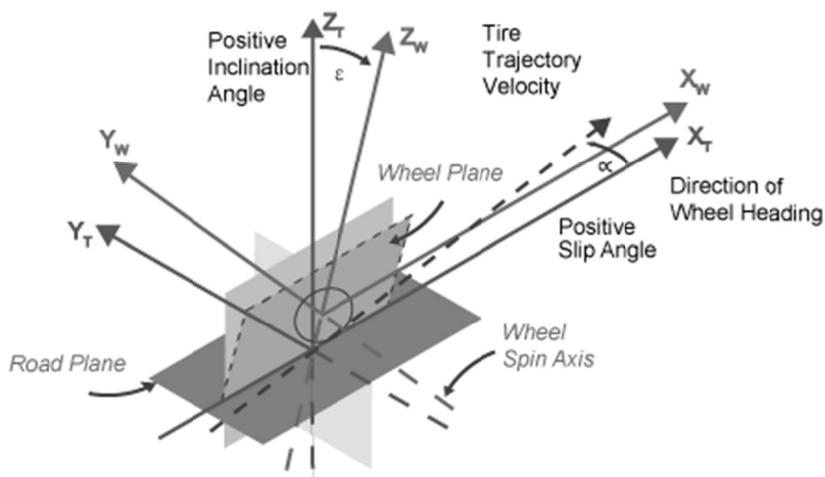


Рис. 3 – Блок Combined Slip Wheel библиотеки Vehicle Dynamics Blockset
 Fig. 3 – A Combined Slip Wheel block of the Vehicle Dynamics Blockset library

При измерениях профилометром расчет показателя IRI (м/км или мм/м) осуществляют путем использования программного обеспечения, входящего в состав измерительного оборудования. Пример профиля дорожного полотна, полученного путем сканирования, представлен на рис. 4.



Рис.4 – Пример профиля дорожного полотна, используемого при моделировании

Fig. 4 – An example of a roadbed profile used for modeling

Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта по шкале IRI в странах Таможенного союза приведены в таблице и на рис. 5.

Таблица 1 / Table 1

Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта по шкале IRI в странах Таможенного союза
Standards of road pavement evenness during construction, reconstruction or overhaul by the IRI scale in the countries of the Customs Union

№ п/п	Дорожные покрытия. Категории дорог	Допустимые значения IRI (м/км) по странам [источник информации]			
		Казахстан [9, 10]	Россия		Беларусь [П]
			[10]	[11]	
1	Асфальтобетонные и цементобетонные: – дороги I категории; – дороги II и III категорий	до 2,4 до 3,0	до 2,2 до 2,2	до 2,1 до 2,6	до 1,5 (2,0*) до 2,0
2	Холодный асфальтобетон, черный щебень, каменные материалы, обработанные вяжущими материалами: – дороги III категории; – дороги IV, V и VI категорий	до 4,2 до 4,6	до 2,2 до 2,6	до 4,1 до 4,6	до 2,0** до 2,5**
3	Щебеночные и гравийные покрытия: – дороги III категории; – дороги IV и V категорий	до 6,4 до 7,6	–	до 6,4 до 6,4	–

Примечание.

1. В Республике Беларусь нормы ровности дорожных покрытий по шкале IRI в период эксплуатации заданы только для усовершенствованных покрытий.

2. В России требования к ровности дорожных покрытий заданы показателями толкомера ТХК-2 и ПКРС-2У. Нормативных показателей IRI в период эксплуатации не существует. Они представлены лишь только в проекте документа [5]. Поэтому в левой колонке по России представлены показатели по шкале IRI, полученные через уравнения связи [6].

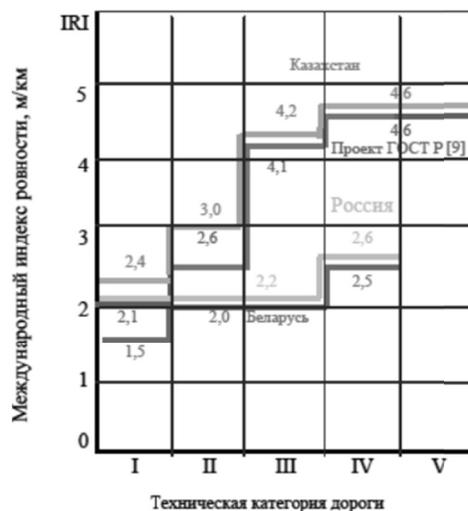


Рис. 5 – Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта в странах Таможенного союза
Fig. 5 – Standards of road pavement evenness during construction, reconstruction or overhaul in the countries of the Customs Union

Результаты имитационного моделирования

В ходе эксперимента было рассмотрено влияние на выходную мощность и усилие на гасителе колебаний различных параметров транспортного средства и путевой структуры. Также были определены зависимости энергоэффективности гасителя колебаний при различных полных массах транспортного средства.

На основании полученных осциллограмм и последующей обработки данных было получено среднее значение усилия на электромагнитном гасителе колебаний расчетного транспортного средства при движении по дорожному покрытию I и II категории (рис. 6 и 7). Кривая нормального распределения нагрузки на гасителе колебаний представлена на рис. 8.

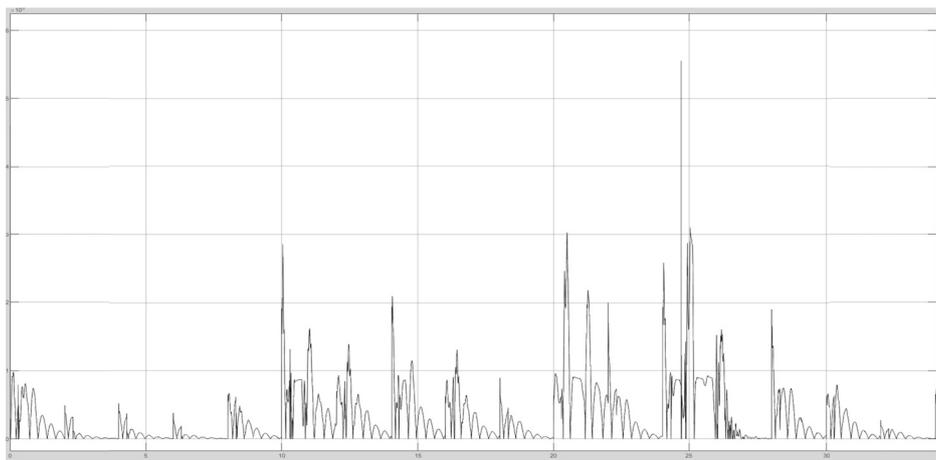


Рис. 6 – Осциллограмма мощности, выделяемой гасителем колебаний

Fig. 6 – An oscillogram of the shock absorber power

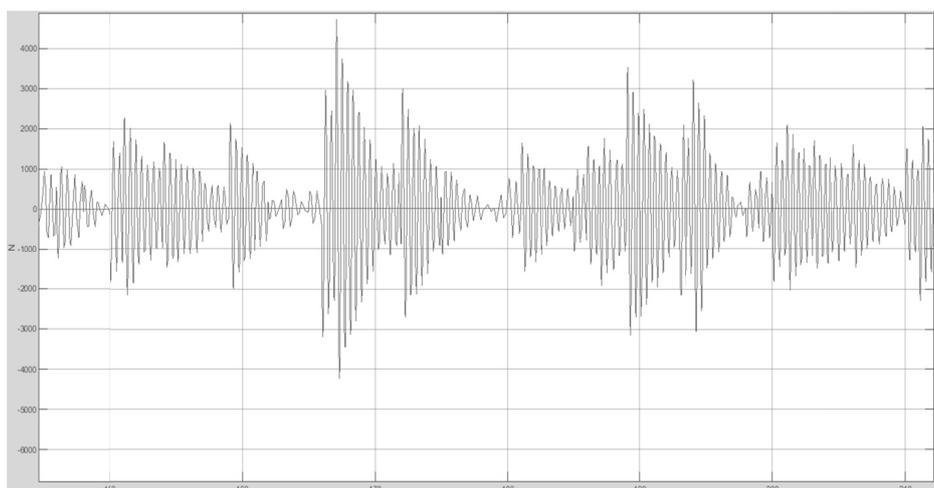


Рис.7 – Фрагмент осциллограммы нагрузки гасителя колебаний

Fig. 7 – An oscillogram fragment of the shock absorber load

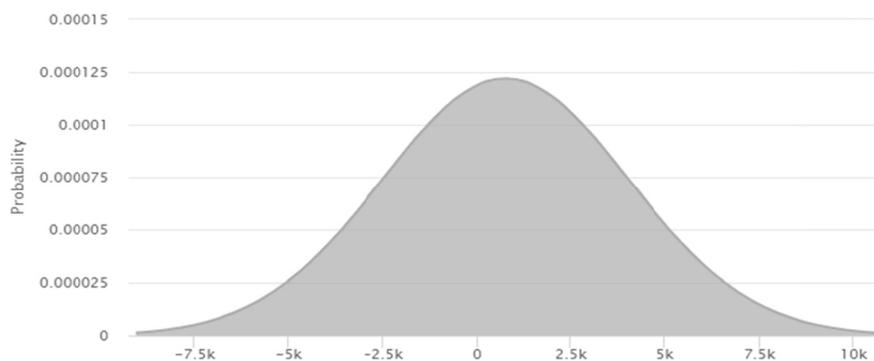


Рис. 8 – Кривая нормального распределения нагрузки на гасителе

Fig. 8 – A normal load distribution curve on the damper

На рис. 9 виден практически линейный рост поглощаемой гасителем колебаний мощности в диапазоне скоростей от 35 до 110 км/ч.

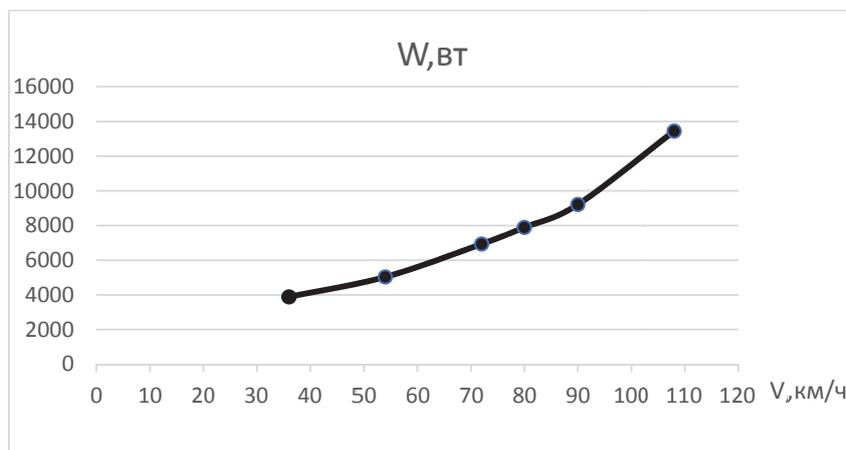


Рис. 9 – Зависимость мощности на амортизаторе от скорости движения

Fig. 9 – Shock absorber power dependence on the movement speed

Разработанная имитационная математическая модель электромагнитного гасителя колебаний позволяет обработать как статистические показатели неровности дорожного полотна, так и данные, полученные путем трехмерного сканирования реального участка пути.

Заключение

На основании результатов моделирования можно оценить выходные характеристики пассивного гасителя с точки зрения величины усилия и выделяемой мощности.

На основании проведенных экспериментов были получены необходимые значения мощности при различных скоростях движения транспортного средства.

На основании полученных осциллограмм и последующей обработки данных было получено среднее значение усилия на электромагнитном гасителе колебаний расчетного транспортного средства при движении по дорожному покрытию I и II категории.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Causemann P.** Moderne Schwingungsdämpfung // *Automobiltechnische Zeitung*. – 2003. – N 105. – P. 1072–1079.
2. Vehicle Body 6DOF: 6DOF rigid vehicle body to calculate translational and rotational motion. – URL: <https://ch.mathworks.com/help/releases/R2018a/vdynblks/ref/vehiclebody6dof.html> (accessed: 30.06.2021).
3. Unreal Engine Scenario Simulation. – URL: <https://ch.mathworks.com/help/driving/unreal-engine-scenario-simulation.html> (accessed: 30.06.2021).
4. **Доморозов А.Н., Нгуен В.Н.** Анализ методов диагностирования технического состояния систем подвесок АТС на современных вибростендах // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2010. – № 5 (45). – С. 131–134.
5. **Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б.** Математические модели систем транспортных средств: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2018. – 100 с.
6. **Рязанцев В.И., Альсаламех Б.** Стабилизация вертикальной реакции дороги на колесо при движении по периодическому профилю дороги // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2016. – № 4 (30). – С. 57–65.
7. Active suspension system of one-wheel car models using the sliding mode control with VSS observer / T. Yoshimura, S. Matumura, M. Kurimoto, J. Hino // *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*. – 2002. – Vol. 1 (1). – P. 133–152.
8. ГОСТ 30412–96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий. – Дата введ. 1997-01-01. – М.: Минстрой России, 1996.
9. СТ РК 1219–2003. Государственный стандарт Республики Казахстан. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий / Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Министерства промышленности и торговли РК. – Астана: Госстандарт, 2003. – 23 с.
10. ПР РК 218-35–04. Инструкция по контролю качества и приемке работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог / Министерство промышленности и торговли Республики Казахстан, Комитет по делам строительства. – Астана, 2004. – 176 с.
11. ПР РК 218-03–02. Инструкция по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером / Минтранс РК Республики Казахстан. – Астана, 2003. – 40 с.
12. **Blundell R., Chen X., Kristensen D.** Semi-nonparametric IV estimation of shape-invariant engel curves // *Econometrica*. – 2007. – Vol. 75, N 6. – P. 1613–1669.
13. ОДН 218.0.006–2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Отраслевые дорожные нормы / Минтранс РФ, Росавтодор. – М., 2002. – 137 с.
14. **Shchurov N.I., Bakholdin N.I.** The active electromagnetic suspension of vehicle // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2018. – P. 399–401. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545214.
15. **Bakholdin N.I., Shchurov N.I., Rozhkova M.V.** Determination of energy regeneration electromagnetic suspension of the autonomous vehicle // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2018. – P. 48–51. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546226.

ENERGY PARAMETERS OF THE VEHICLE ELECTROMAGNETIC SHOCK ABSORBER

Shchurov N.I., Bakholdin P.A., Bakholdin D.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The creation of an electromagnetic shock absorber system is necessary taking into account such parameters of the vehicle and operating conditions as the quality of the roadway, the grades, and the weight and size of the vehicle. A mathematical simulation model of the vehicle was developed to determine energy indicators in various road sections. The MATLAB Simulink

programming environment was chosen to create the most practical and functional simulation model. A number of experiments were carried out using various parameters of the vehicle, types of roadways and driving cycles. Simulation results allow obtaining basic characteristics of electromagnetic damper of the selected vehicle, on the basis of which a linear electromagnetic damper shock absorber will be calculated. System energy efficiency was determined when using a vehicle on roads having a different road surface evenness index.

Keywords: electromagnetic shock absorber, simulation modeling, international road surface evenness index, energy efficiency.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62

REFERENCES

1. Causemann P. Moderne Schwingungsdämpfung. *Automobiltechnische Zeitung*, 2003, no. 105, pp. 1072–1079.
2. Vehicle Body 6DOF: 6DOF rigid vehicle body to calculate translational and rotational motion. Available at: <https://ch.mathworks.com/help/releases/R2018a/vdynblks/ref/vehiclebody6dof.html> (accessed 30.06.2021).
3. Unreal Engine Scenario Simulation. Available at: <https://ch.mathworks.com/help/driving/unreal-engine-scenario-simulation.html> (accessed 30.06.2021).
4. Domorozov A.N., Nguyen V.N. Analiz metodov diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya sistem podvesok ATS na sovremennykh vibrostendakh [Analysis of methods for diagnosing the technical state of automatic telephone exchange suspension systems on modern vibration stands]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 5 (45), pp. 131–134.
5. Zhileikin M.M., Kotiev G.O., Sarach E.B. *Matematicheskie modeli sistem transportnykh sredstv* [Mathematical models of vehicle systems]. Moscow, MSTU Publ., 2018. 100 p.
6. Ryazantsev V.I., Al'salameh B. Stabilizatsiya vertikal'noi reaktsii dorogi na koleso pri dvizhenii po periodicheskomu profilyu dorogi [Stabilization of the vertical reaction of the road to the wheel when moving along the periodic profile of the road]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2016, no. 4 (30), pp. 57–65. (In Russian).
7. Yoshimura T., Matumura S., Kurimoto M., Hino J. Active suspension system of one-wheel car models using the sliding mode control with VSS observer. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2002, vol. 1 (1), pp. 133–152.
8. GOST 30412–96. *Dorogi avtomobil'nye i aerodromy. Metody izmerenii nerovnosti osnovanii i pokrytii* [State standard 30412–96. Methods for measuring unevenness of substrates and coatings]. Moscow, Minstroii Rossii Publ., 1996.
9. ST RK 1219–2003. *Gosudarstvennyi standart Respubliki Kazakhstan. Dorogi avtomobil'nye i aerodromy. Metody izmerenii nerovnosti osnovanii i pokrytii* [State standard of the Republic of Kazakhstan. Automobile roads and airfields. Methods for measuring unevenness of substrates and coatings]. Astana, Gosstandart Publ., 2003. 23 p.
10. PR RK 218-35-04. *Instruktsiya po kontrolyu kachestva i priemke rabot pri stroitel'stve i remonte avtomobil'nykh dorog* [Instruction on quality control and works acceptance when construction and repair of the car roads]. Astana, 2004. 176 p.
11. PR RK 218-03-02. *Instruktsiya po otsenke rovnosti dorozhnykh pokrytii tolchkomerom* [Instructions for assessing the flatness of road surfaces with a pusher]. Astana, 2003. 40 p.
12. Blundell R., Chen X., Kristensen D. Semi-nonparametric IV estimation of shape-invariant engel curves. *Econometrica*, 2007, vol. 75, no. 6, pp. 1613–1669.
13. ODN 218.0.006–2002. *Pravila diagnostiki i otsenki sostoyaniya avtomobil'nykh dorog. Otrazlevyye dorozhnye normy* [Rules for diagnostics and assessment of the state of highways. Industry road standards]. Moscow, 2002. 137 p.
14. Shchurov N.I., Bakholdin N.I. The active electromagnetic suspension of vehicle. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 399–401. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545214.
15. Bakholdin N.I., Shchurov N.I., Rozhkova M.V. Determination of energy regeneration electromagnetic suspension of the autonomous vehicle. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 48–51. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546226.

16. Bakholdin D.A. [On the calculation of the storage capacity of an electric bus]. *Nauchno-tekhnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego: sbornik materialov 7 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. In 2 vol. [The scientific and technical progress: the current and perspective future directions: collection of materials of the 7th international scientific-practical conference. In 2 vol. Vol. 2], Kemerovo, March 6, 2018, pp. 98–100. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических комплексов, НГТУ. Область научных интересов: энергосберегающие технологии на электрическом транспорте. Имеет более 160 публикаций (Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20. E-mail: schurov@corp.nstu.ru).

Schurov Nikolay Ivanovich (b. 1947) – Doctor of Sciences (Eng.), Head of the Department "Electrotechnical Units" of Novosibirsk State Technical University; Highly experienced in the field of engineering; Area of expertise is electrotechnics and electric transport; the author of many scientific papers (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: schurov@corp.nstu.ru).



Бахолдин Павел Андреевич – родился в 1993 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Проходит обучение на факультете мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Комбинированная энергоустановка маршрутного такси на базе автомобиля "Газель"» в 2017 г. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Baholdin Pavel Andreevich (b. 1993) – postgraduate student of "Electrotechnical Units" department of Novosibirsk State Technical University. Currently, his research interests are aimed at developing an energy-efficient vehicle suspension. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: baholdin@ngs.ru).



Бахолдин Дмитрий Андреевич – родился в 1991 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Проходит обучение на факультете мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Электрическая силовая установка легкого летательного аппарата самолета типа» в 2019 г. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Baholdin Dmitry Andreevich (b. 1991) – postgraduate student of "Electrotechnical Units" department of Novosibirsk State Technical University. Currently, his research interests are aimed at developing an energy efficient vehicle with energy storage devices. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Статья поступила 24 мая 2021 г.
Received May 24, 2021

To Reference:

Shchurov N.I., Bakholdin P.A., Bakholdin D.A. Energeticheskie pokazateli elektromagnitnogo gasitelya kolebanii transportnogo sredstva [Energy parameters of the vehicle electromagnetic shock absorber]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 53–62. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62.