Emel'yanovich Sergej Vladimirovich – mladshij nauchnyj sotrudnik Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo nauchnogo uchrezhdeniya «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut ispol'zovaniya tekhniki i nefteproduktov v sel'skom hozyajstve», g. Tambov, e-mail: seruvarovo@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 09.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.372:004.4
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-49-56

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКИ ПНЕВМОКОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

[1]Афоничев Дмитрий Николаевич
[2]Остриков Валерий Васильевич
[1]Пиляев Сергей Николаевич
[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *При движении остов пневмоколесной машины подвержен одновременно двум внешним воздействиям: от неоднородности физико-механических свойств и неровностей пути и от активной системы подвески. Предлагается компьютерная модель, включающая в себя подмодель решения уравнений динамического режима системы, подмодель формирования воздействий активной подвески и подмодель генерации возмущающих воздействий со стороны дороги в виде случайного профиля пути с заданной корреляционной функцией, единичной ступеньки и синусоиды. Задание параметров модели, связь между подмоделями и блоками внутри их осуществляется с помощью механизма программы SimInTech, называемого «Сигналы». Подмодель решения уравнений позволяет получить скорости и перемещения элементов физической модели с последующей их записью в базу данных сигналов. Здесь же вычисляются значения перемещений штока подвески с учетом угла наклона остова машины. Блоки воздействия со стороны профиля дороги позволяют имитировать все возможные режимы движения. Для использования в разнообразных имитационных моделях динамики транспортных средств включен универсальный блок моделирования случайного профиля пути, который позволяет генерировать профиль пути со спектральной плотностью, соответствующей большому набору дорог различного вида. Вид дороги и параметры вида спектральной плотности профиля дороги задаются с помощью соответствующего скрипта. Предложенный подход является многофункциональным, позволяющий определить ускорение и параметры транспортного средства, воздействия случайного профиля, препятствий и тягового усилия. Структура комплекса позволяет включать в модель и рассматривать устройства активной подвески различной формы (гидравлические, пневматические) и способы управления ими.*

Ключевые слова: *активная подвеска, пневмоколесная машина, компьютерная модель, управляющие воздействия, случайный профиль дороги.*

COMPUTER MODEL OF THE ACTIVE SUSPENSION OF AN AIR-WHEELED MACHINE

[1]Afonichev Dmitry
[2]Ostrikov Valery
[1]Pilyaev Sergey
[1]FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great»
[2]FSBSI «All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture»

Abstract. *The skeleton of a pneumatic wheeled vehicle is simultaneously subject to two external influences: from the heterogeneity of the physical and mechanical properties and unevenness of the track, and from the active suspension system when moving. A computer model, which includes a submodel for solv-*

ing the equations of the dynamic mode of the system, a submodel for the formation of active suspension effects, and a submodel for generating disturbances from the side of the road in the form of a random path profile with a given correlation function, a unit step, and a sinusoid, is proposed. The parameters of the model are set, the connection between the submodels and the blocks inside them is carried out using the mechanism of the SimInTech program, called "Signals". A submodel for solving equations allows you to obtain the velocities and movements of the elements of the physical model with their subsequent entry into the signal database. Here, the values of the movements of the suspension rod are calculated, taking into account the angle of inclination of the machine frame. The impact blocks from the side of the road profile allow you to simulate all possible traffic modes. For use in various simulation models of vehicle dynamics, a universal block for modeling a random path profile is included, which allows generating a path profile with a spectral density corresponding to a large set of roads of various types. The type of road and the parameters of the type of spectral density of the road profile are set using the appropriate script. The proposed approach is multifunctional, allowing to determine the acceleration and parameters of the vehicle, the effects of a random profile, obstacles or traction. The structure of the complex makes it possible to include in the model and consider active suspension devices of various shapes (hydraulic, pneumatic) and ways to control them.

Keywords: *active suspension, pneumatic wheeled vehicle, computer model, control actions, random road profile.*

Введение. В процессе движения пневмоколесной машины возможны вертикальные колебания ее остова, кресел водителя и пассажиров, связанные с неровностями на опорной поверхности под колесными движителями. Эти колебания приводят к неблагоприятным для человека вибрациям, иногда превышающим допустимый по санитарно-гигиеническим требованиям уровень [1, 2, 3, 4]. Поэтому проектирование новых и усовершенствование существующих виброзащитных систем подвески остова пневмоколесной машины за счет повышения качества ее систем демпфирования вертикальных колебаний, которое позволит решить данную проблему, представляется актуальным. В целом системы подвески можно разделить на три типа: пассивные, полуактивные и активные [3, 4, 5]. В отличие от полуактивных систем подвески, активные системы подвески используют дополнительный привод между кузовом транспортного средства и колесной осью для добавления или рассеивания энергии в системе, в результате чего может быть достигнута улучшенная реакция подвески по сравнению с полуактивными и пассивными подвесками. Хотя система активной подвески обычно требует более высокого энергопотребления и сложной механической конструкции, она постепенно была признана многообещающим путем для достижения лучших характеристик подвески из-за ее несомненного превосходства над другими системами подвески [4]. Основной трудностью в использовании активных систем подвески является создание адекватных систем управления [6, 7], для разработки которых необходима достаточно адекватная математическая модель системы «дорога – остов машины», построению которой и посвящена настоящая работа.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим построение подобной компьютерной модели с помощью программного комплекса SimInTech московской фирмы ООО «3В Сервис» [5, 8, 9, 10, 11].

Описание системы является затруднительным, в соответствии с чем упростим решаемую задачу [3, 12].

1. Колебательные движения имеют место только в вертикальной плоскости.
2. Условия (дорожные) аналогичны под бортами, то есть дорожный профиль одинаков.
3. Все силы направлены вертикально.
4. Массовые, демпфирующие элементы системы совершают вертикальные движения.
5. Двигатель и вся трансмиссионная часть являются жёстким элементом.
6. Возмущающим действием на систему является неровность под колёсами.

Эти условия позволяют рассматривать движение только половины машины в вертикальной плоскости, проходящей через ее центр масс. На рисунке 1 представлена схема физической модели динамической системы машины, учитывающая указанные выше допущения. Суть ее работы заключена в вертикальных перемещениях центра масс (точка О) по координате y и угловые перемещения α вокруг относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс (точка О) элемента массой m, который моделирует массу двигателя, трансмиссии, остова и кабины.

Воздействия от подвески колес передней и задней осей передаются в точки А и В на остов машины массой *m* и моментом инерции *J*. Динамические свойства шин учитываются в виде суммарных коэффициентов жесткости и вязкого трения соответственно переднего моста c_{t1}, k_{t1} и заднего моста c_{t2}, k_{t2}. Система подвески также задается в виде демпфирующего и пружинного элементов, которые могут иметь как линейные, так и нелинейные характеристики: c_1, c_2 и k_1, k_2. Активный привод подвески представлен в виде сил u_1, u_2 воздействующих на остов в точках А и В.

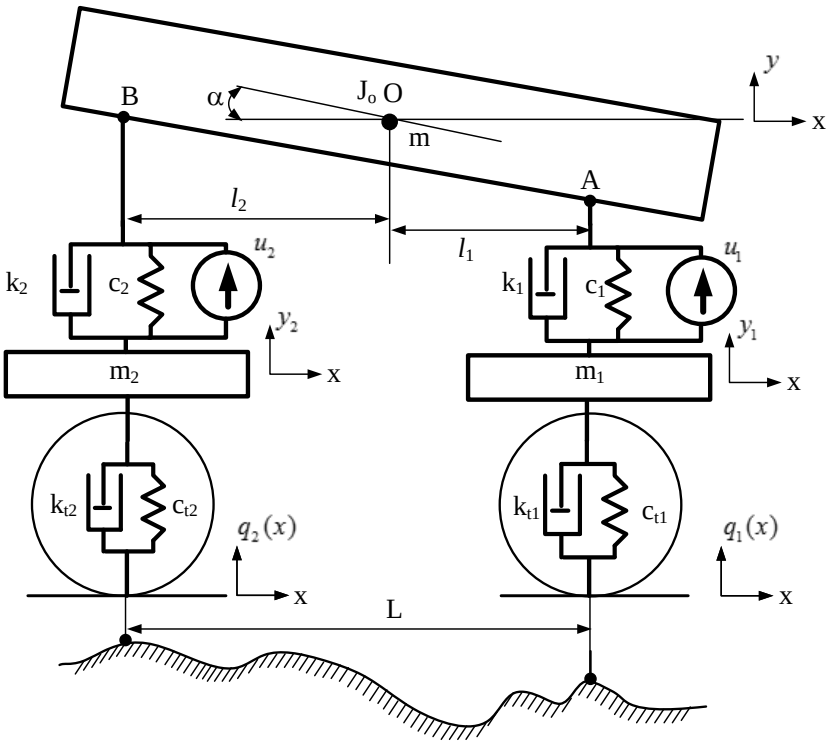

Рисунок 1 – Схема физической модели системы «дорога – остов машины»

Используя классические методы механики [3, 13], получим уравнения динамического режима рассматриваемой системы в следующем виде:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2y}{dt^2} + F_{d1} + F_{f1} + F_{d2} + F_{f2} = u_1 + u_2; \\ J\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} - l_1\left(F_{d1} + F_{f1}\right) + l_2\left(F_{d2} + F_{f2}\right) = l_1u_1 - l_2u_2; \\ m_1\dfrac{d^2y_1}{dt^2} + F_{dt1} + F_{tf1} - F_{d1} - F_{f1} = -u_1; \\ m_2\dfrac{d^2y_2}{dt^2} + F_{dt2} + F_{tf2} - F_{d2} - F_{f2} = -u_2, \end{cases} \quad (1)$$

где y, y_1, y_2 – вертикальные перемещения остова машины, переднего и заднего колеса, м;

m, m_1, m_2 – половина массы остова машины, масса переднего и заднего колес, кг;

α – угол отклонения остова машины от горизонтали в точке центра масс, град.;

J – момент инерции остова машины относительно центра масс, Н·м^2;

l_1, l_2 – расстояния от центра масс машины до передней и задней осей, м;

$F_{dt1}, F_{dt2}, F_{d1}, F_{d2}$ – силы сжатия соответствующих пружинных элементов, Н;

$F_{ft1}, F_{ft2}, F_{f1}, F_{f2}$ – демпфирующие силы соответствующих демпирующих элементов, Н.

В случае линейных пружинных и демпфирующих элементов силы в уравнениях (1) определяются следующим образом:

$$\begin{cases} F_{dt1} = c_{t1}\left(y_1 - q_1(x)\right); F_{ft1} = k_{t1}\dfrac{d\left(y_1 - q_1(x)\right)}{dt}; \\ F_{dt2} = c_{t2}\left(y_2 - q_2(x)\right); F_{ft2} = k_{t2}\dfrac{d\left(y_2 - q_2(x)\right)}{dt}; \\ F_{d1} = c_1\left(y - y_1 + l_1 \sin\alpha\right); F_{f1} = k_1\dfrac{d\left(y - y_1 + l_1 \sin\alpha\right)}{dt}; \\ F_{d2} = c_2\left(y - y_2 - l_2 \sin\alpha\right); F_{f2} = k_2\dfrac{d\left(y - y_2 - l_2 \sin\alpha\right)}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где c_{t1}, k_{t1} – жесткость и коэффициент демпфирования левого переднего колеса;

c_{t2}, k_{t2} – жесткость и коэффициент демпфирования левого заднего колеса;

c_1, k_1, c_2, k_2 – жесткость и коэффициент демпфирования подвески соответственно передней и задней осей;

l_1, l_2 – расстояния от точки центра масс остова машины до передней и задней точек крепления подвески;

$q_1(x) = q_2(x) = q_1(x - L)$ – профиль пути под колесами передней и задней осей;

L – колесная база машины.

Как следует из уравнений (1) и (2) в процессе движения остов машины подвержен одновременно двум внешним воздействиям: от неоднородности физико-механических свойств и неровностей пути и от активной системы подвески. На рисунке 2 представлено окно проекта SimInTech со схемой построенной имитационной модели активной подвески пневмоколесной машины. Модель включает в себя подмодель решения уравнений (1) и (2) «Модель автомобиля», подмодель формирования воздействий активной подвески «Управление» и подмодель генерации возмущающих воздействий со стороны дороги в виде случайного профиля пути с заданной корреляционной функцией, единичной ступеньки и синусоиды. Задание параметров модели, связь между подмоделями и блоками внутри их осуществляется с помощью очень удобного механизма программы SimInTech, называемого «Сигналы» [11].

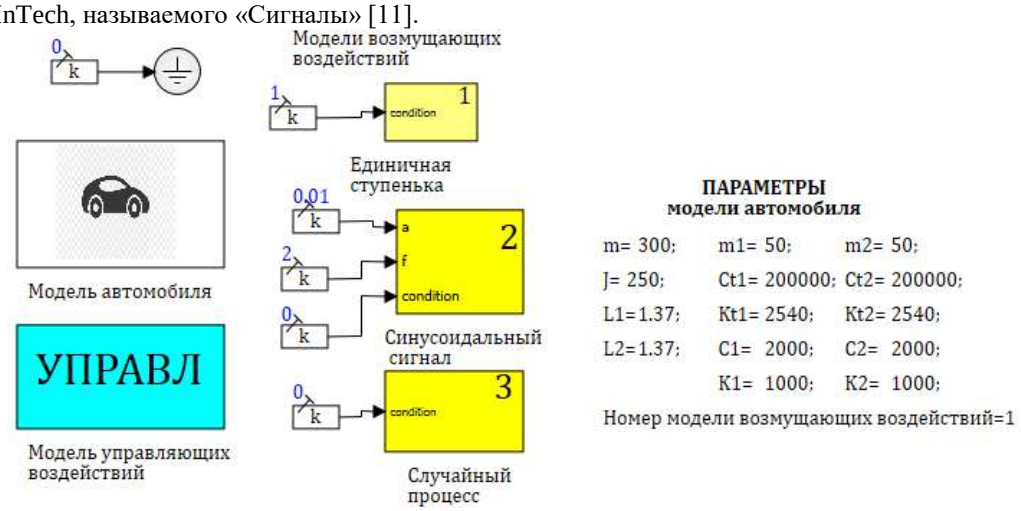

Рисунок 2 – Внешний вид модели активной подвески пневмоколесной машины

На рисунке 3 представлен внешний вид подмодели «Модель автомобиля». Она состоит из программного блока SimInTech, с помощью которого, согласно выражениям (1) и (2) в виде вектора вычисляются правые части дифференциальных уравнений (ускорения). Далее этот вектор дважды интегрируется для получения скоростей и перемещений элементов физической модели с последующей их записью в базу данных сигналов. Здесь же вычисляются значения перемещений штока подвески с учетом угла наклона остова машины.

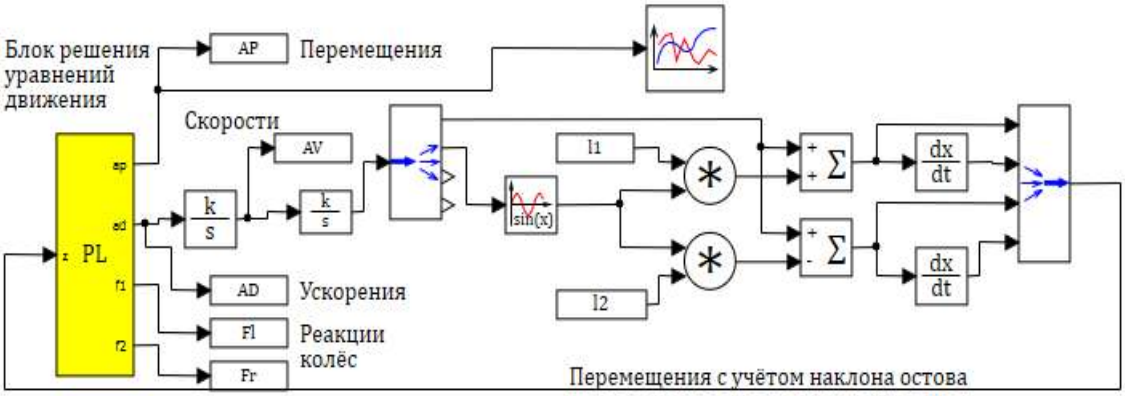

Рисунок 3 – Структура блока «Модель автомобиля»

Блоки воздействия со стороны профиля дороги позволяют имитировать все возможные режимы движения. В качестве примера на рисунке 4 приведены результаты моделирования в случае наезда машины с параметрами модели из рисунка 2 при скорости 0,33 м/с на ступеньку высотой 0,1 м. Для использования в разнообразных имитационных моделях динамики транспортных средств включен универсальный блок моделирования случайного профиля пути [12, 14, 15]. На рисунке 5 представлена структура субмодели генерации профиля пути. Данный блок позволяет генерировать профиль пути со спектральной плотностью, соответствующей большому набору дорог различного вида.

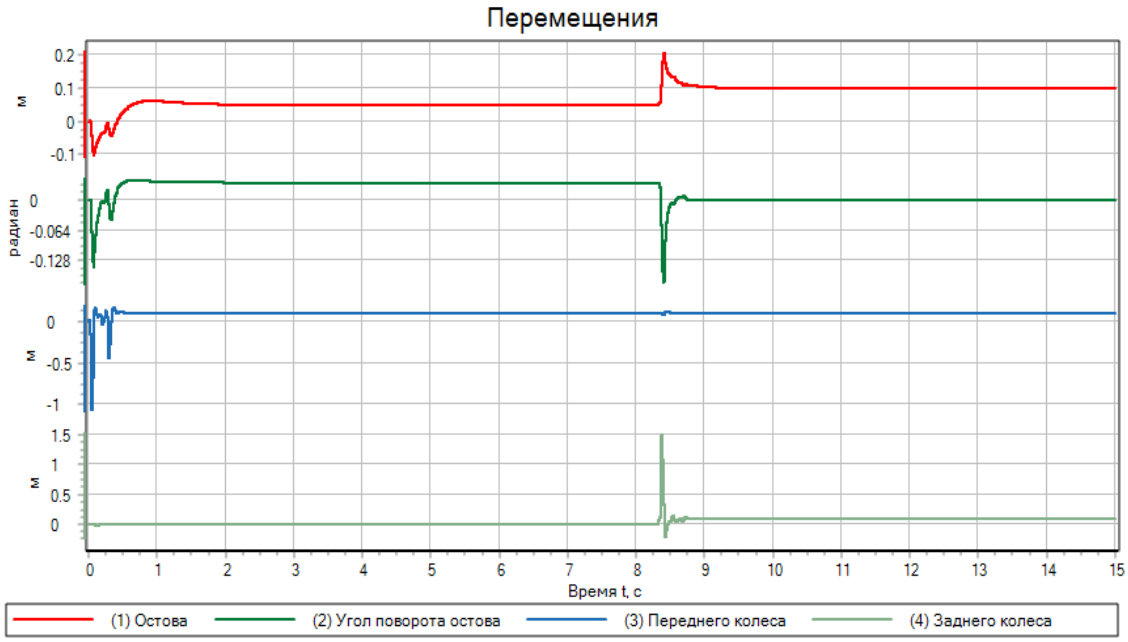

Рисунок 4 – Результаты моделирования при наезде машины на ступеньку со скошенным краем

Вид дороги и параметры вида спектральной плотности профиля дороги задаются с помощью соответствующего скрипта. В качестве примера на рисунке 6 представлен результат моделирования с профилем дороги «Изношенный асфальт» [12, 14, 15].

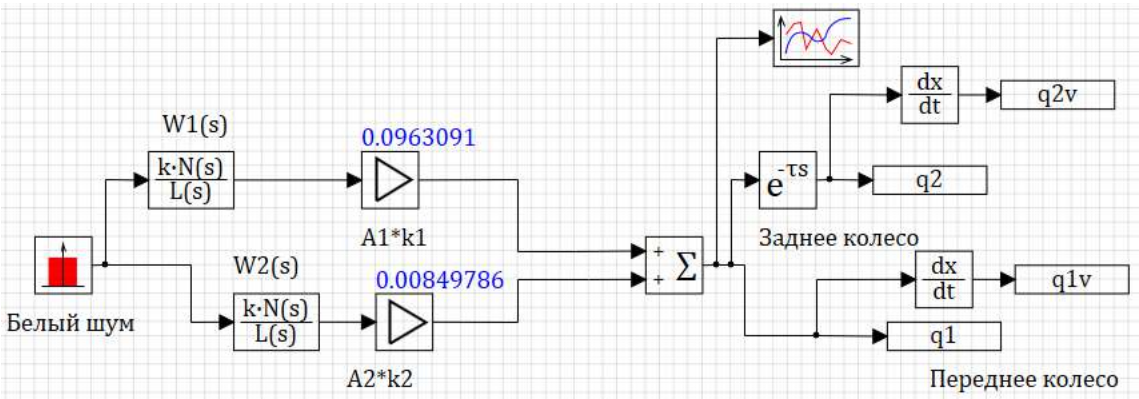

Рисунок 5 – Субмодель генерации профиля пути

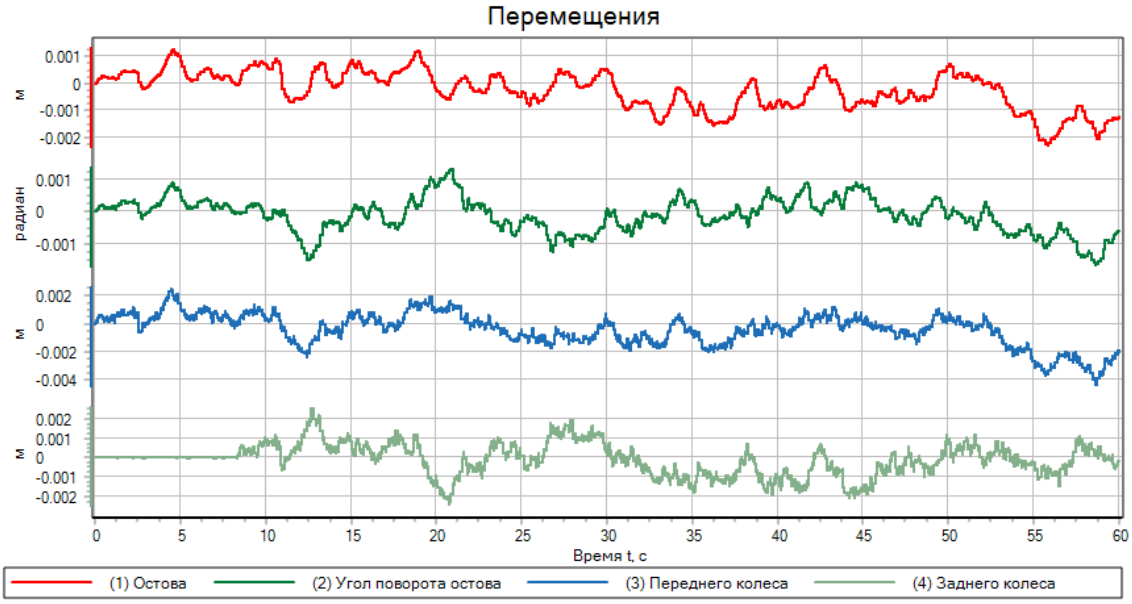

Рисунок 6 – Результаты моделирования при профиле пути типа «Изношенный асфальт»

Заключение. Таким образом, построенная модель позволяет оценивать ускорения, их характер, характеристики транспортного агрегата и вида воздействий: профиля пути и устройства активной подвески.

Список литературы

1. Волоков В.С. Основы расчета систем автомобилей, обеспечивающих безопасность движения. С-Пб.: Издательство «Лань», 2021. 144 с.

2. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Введ. в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 40. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 30 с.

3. Semi-active Suspension Control. Improved Vehicle Ride and Road Friendliness / Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 302 p.

4. Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles / S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, L. Dugard. GB: Oxford, Elsevier Ltd, 2010. 232 p.

5. Чмиль В.П., Чмиль Ю.В. Автотранспортные средства. С-Пб.: Издательство «Лань», 2021. 336 с.

6. Пиляев С.Н., Кузьменко С.В., Аксенов И.И. Динамическое моделирование сложных технических систем // Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019): матер. нац. научной конф. в 2-х ч.; г. Воронеж, 17-18 апреля 2019 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. Ч. I. С. 223–228.

7. Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П. Оптимальное и адаптивное управление. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. 112 с.

8. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Кузьменко С.В. Использование программного комплекса SimInTech для проектирования мехатронных систем // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. научно-прак. конф.; Воронеж, 26-27 ноября 2019 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. С. 335–338.

9. Афоничев Д.Н., Тихонов В.В., Хромых Н.Ю. Особенности информационных систем контроля и управления // Наука вчера, сегодня, завтра: матер. научно-практич. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 2016. С. 84–88.

10. Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2021. 494 с.

11. Среда динамического моделирования SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://simintech.ru.

12. Динамика системы: дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

13. Пиляев В.С., Пиляев С.Н. Компьютерное моделирование подвески автомобиля // Современные технологии и автоматизация производства: материалы I-й национальной научно-технической конференции студентов и молодых ученых; Воронеж, 22 марта 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. № 1(1). С. 107–113.

14. Афоничев Д.Н., Лощенко А.В., Пиляев С.Н. Моделирование микропрофиля пути с помощью программного комплекса SimInTech // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: матер. международной науч.-практ. конф.; г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 268–277.

15. Имитационная модель вертикальных колебаний кресла оператора трактора в программном комплексе SimInTech / О.И. Поливаев, Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, А.В. Лощенко, А.Ю. Черемисинов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. № 4(67). С. 79–87.

References

1. Volokov V.S. Osnovy rascheta sistem avtomobilej, obespechivayushchih bezopasnost' dvizheniya. S-Pb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2021. 144 s.

2. SN 2.2.4/2.1.8.566-96. Proizvodstvennaya vibraciya, vibraciya v pomeshcheniyah zhilyh i obshchestvennyh zdanij. Vved. v dejstvie Postanovleniem Goskomsanepidnadzora Rossii ot 31 oktyabrya 1996 g. № 40. M.: Informacionno-izdatel'skij centr Minzdrava Rossii, 1997. 30 s.

3. Semi-active Suspension Control. Improved Vehicle Ride and Road Friendliness / Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 302 p.

4. Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles / S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, L. Dugard. GB: Oxford, Elsevier Ltd, 2010. 232 p.

5. CHmil' V.P., CHmil' YU.V. Avtotransportnye sredstva. S-Pb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2021. 336 s.

6. Pilyaev S.N., Kuz'menko S.V., Aksenov I.I. Dinamicheskoe modelirovanie slozhnyh tekhnicheskih sistem // Nauka, obrazovanie i innovacii v sovremennom mire (NOI-2019): mater. nac. nauchnoj konf. v 2-h ch.; g. Voronezh, 17-18 aprelya 2019 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2019. CH. I. S. 223–228.

7. Serdobincev YU.P., Kuhtik M.P. Optimal'noe i adaptivnoe upravlenie. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. 112 s.

8. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Kuz'menko S.V. Ispol'zovanie programmnogo kompleksa SimInTech dlya proektirovaniya mekhatronnyh sistem // Nauka i obrazovanie na sovremennom etape

razvitiya: opyt, problemy i puti ih resheniya: mater. nac. nauchno-prak. konf.; Voronezh, 26-27 noyabrya 2019 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2019. S. 335–338.

9. Afonichev D.N., Tihonov V.V., Hromyh N.YU. Osobennosti informacionnyh sistem kontrolya i upravleniya // Nauka vchera, segodnya, zavtra: mater. nauchno-praktich. konf. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU. 2016. S. 84–88.

10. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. Model'noe proektirovanie elektromekhanicheskih mekhatronnyh modulej dvizheniya v srede SimInTech. M.: DMK Press, 2021. 494 s.

11. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya SimInTech [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://simintech.ru.

12. Dinamika sistemy: doroga – shina – avtomobil' – voditel' / A.A. Hachaturov, V.L. Afanas'ev, V.S. Vasil'ev i dr. M.: Mashinostroenie, 1976. 535 s.

13. Pilyaev V.S., Pilyaev S.N. Komp'yuternoe modelirovanie podveski avtomobilya // Sovremennye tekhnologii i avtomatizaciya proizvodstva: materialy I-j nacional'noj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov i molodyh uchenyh; Voronezh, 22 marta 2021 g. Voronezh: FGBOU VO «VGLTU», 2021. № 1(1). S. 107–113.

14. Afonichev D.N., Loshchenko A.V., Pilyaev S.N. Modelirovanie mikroprofilya puti s pomoshch'yu programmnogo kompleksa SimInTech // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij dlya effektivnogo razvitiya APK: mater. mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf.; g. Voronezh, 27 marta 2020 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2020. S. 268–277.

15. Imitacionnaya model' vertikal'nyh kolebanij kresla operatora traktora v programmnom komplekse SimInTech / O.I. Polivaev, D.N. Afonichev, S.N. Pilyaev, A.V. Loshchenko, A.YU. CHeremisinov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. № 4(67). S. 79–87.

Сведения об авторах:

Принадлежность к организации

Афоничев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Пиляев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Affiliation

Afonichev Dmitry – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department of electrical engineering and automation of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Ostrikov Valery – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the laboratory for the use of lubricants and spent petroleum products of federal state budgetary scientific institution «All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture», Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Pilyaev Sergey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 08.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022