

АНАЛИЗ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ КОЛЕСНОГО РОБОТА-САНИТАРА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.Е. Парубец

parubetspe@student.bmstu.ru
SPIN-код: 5394-0397

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведено описание пространственной нелинейной динамической модели колесного мобильного робота-санитара для оценки показателей вибронагруженности на этапе проектирования. Модель реализована в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм». Взаимодействие шины с твердым неровным опорным основанием описано с помощью полуэмпирической модели с точечным контактом шины с дорогой. На основе разработанной математической модели выполнен анализ вибронагруженности при различных режимах движения мобильного робота по грунтовой дороге хорошего качества. Приведены результаты расчетов при движении мобильного робота со скоростью 9 км/ч и различных параметрах системы поддрессоривания. Разработанную модель можно применять для оценки вибронагруженности робота-санитара и выдачи рекомендаций по режимам его движения и параметрам системы поддрессоривания.

Ключевые слова

Мобильный робот-санитар, вибронагруженность, имитационное моделирование, программные комплексы, автоматизированное моделирование, динамика системы тел, модель взаимодействия шины с дорогой

Поступила в редакцию 05.02.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. При отсутствии изготовленного образца робота-санитара единственным способом оценки его вибронагруженности является проведение математического моделирования. Для достоверной оценки показателей вибронагруженности колесного робота-санитара (КРС) на этапе проектирования требуется создание пространственных динамических моделей с учетом кинематики подвески [1]. Для многоосных колесных транспортных средств число тел модели может достигать нескольких десятков, что усложняет аналитический вывод уравнений движения. Эффективным инструментом для решения данных задач являются программные комплексы автоматизированного анализа динамики тел [2–7]. В таких комплексах по описанию системы в виде набора твердых тел, шарниров и силовых взаимодействий из библиотеки типовых элементов осуществляется автоматическое формирование уравнений движения, имеются встроенные средства для их численного решения.

В данной работе решена задача создания динамической модели для определения вибронагруженности мобильного робота-санитара в программном ком-

плексе автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм».

Модель колесного робота-санитара. В качестве объекта исследования рассматривается КРС полной массой 950 кг с колесной формулой 6×6 и независимой подвеской всех колес на продольных рычагах. Модель КРС состоит из подсистем, показанных на рис. 1.

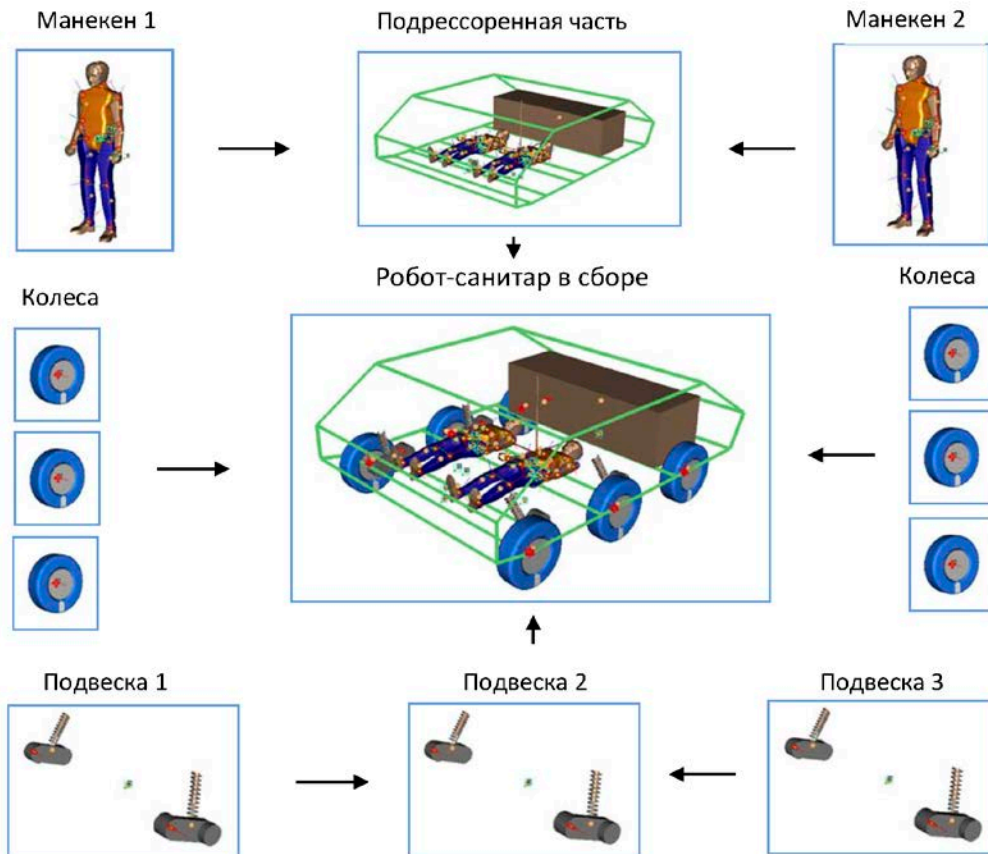


Рис. 1. Структура модели колесного робота-санитара 6×6

Модель подрессоренной части состоит из массово-инерционных моделей корпуса, манекенов и силовой установки, а также невесомой геометрической модели корпуса. Модель подвески моделируется в виде набора твердых тел, связанных идеальными шарнирами и силовыми элементами. Массы тел подвески задаются в виде параметров, а моменты инерции вычисляются по геометрическим моделям элементов. Модель моторно-трансмиссионной установки описывается с помощью аналитических зависимостей в модели машины в сборе и распределяет момент двигателя, формируемый по заданному управляющему сигналу, поровну между всеми колесами КРС.

Модель взаимодействия шины с опорной поверхностью. Вычисление сил и моментов, действующих на колесо со стороны опорной поверхности, осу-

ществляется на полуэмпирической модели шины с точечным контактом. Модель шины реализована с помощью переменных и функций программного комплекса «Универсальный механизм». На каждом шаге расчета определяют радиус-вектор центра колеса, угловое положение и кинематические параметры тела, представляющего в модели колесо, и на основе этих данных по аналитическим зависимостям, описывающим силовые характеристики шины, вычисляют силы и моменты, действующие на колесо со стороны дороги.

Схема модели взаимодействия шины с твердым опорным основанием показана на рис. 2.

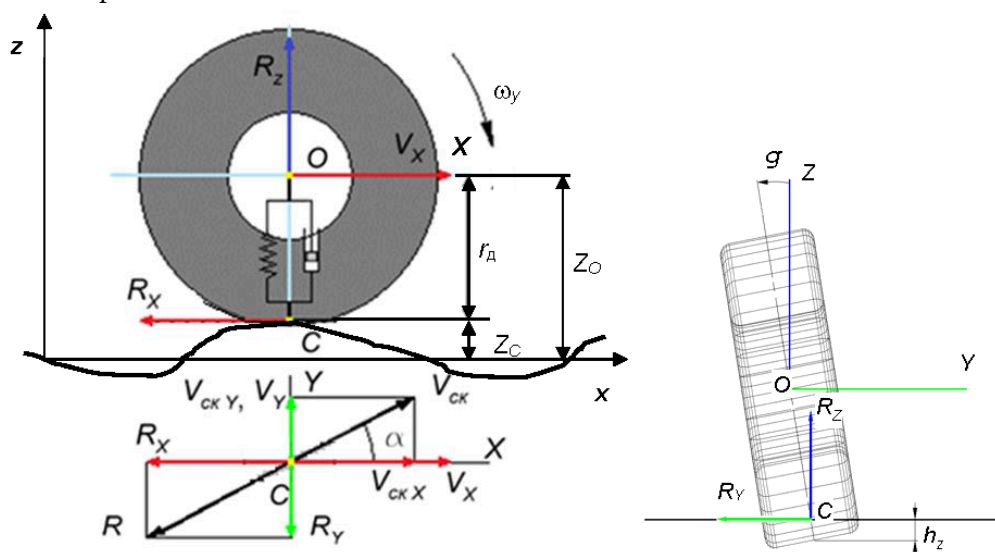


Рис. 2. Модель взаимодействия шины с дорогой

Вертикальная реакция вычисляется по упруго-вязкой модели [1]:

$$R_z = P_{z_st} \left(\frac{h_z}{h_{z_st}} \right)^{1.5} - b_z V_z,$$

где P_{z_st} — статическая нагрузка на колесо, h_{z_st} — статический прогиб шины; b_z — коэффициент линейно-вязкого сопротивления шины в вертикальном направлении; V_z — проекция скорости центра колеса на ось Z .

Вертикальный прогиб шины h_z

$$h_z = \max(0, r_0 \cos \gamma - r_d),$$

где r_0 — свободный радиус колеса; γ — угол наклона колеса; r_d — динамический радиус колеса, равный расстоянию между Z центра колеса (в точке O) и z дороги (в точке C).

$$r_d = Z_O - Z_C.$$

Сила взаимодействия шины с дорогой в горизонтальной плоскости определяется по зависимости

$$R = \mu_s(S_k) \cdot R_Z,$$

где S_k — коэффициент скольжения; $\mu_s(S_k)$ — коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием.

Коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием определяется по формуле [1]

$$\mu_s(S_k) = \mu_{s\alpha\max} \left(1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}}\right) \left(1 + e^{-\frac{S_k}{S_1}}\right),$$

где S_0, S_1 — константы, определяющие форму кривой; $\mu_{s\alpha\max}$ — коэффициент взаимодействия при полном скольжении в контакте шина — дорога [1]:

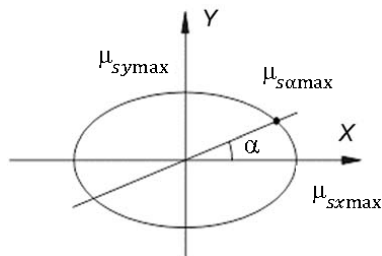


Рис. 3. Эллипс трения

$$\mu_{s\alpha\max} = \frac{\mu_{sx\max} \mu_{sy\max}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 \sin^2 \alpha + \mu_{sy\max}^2 \cos^2 \alpha}},$$

где $\mu_{sx\max}$, $\mu_{sy\max}$ — параметры эллипса трения (рис. 3).

Коэффициент S_k определяется по формуле [1]

$$S_k = \frac{V_{ck}}{\omega_y r_{kc}},$$

где r_{kc} — радиус качения колеса в свободном режиме:

$$r_{kc} = \frac{3r_d}{1 + 2r_d/r_0};$$

V_{ck} — скорость скольжения, определяемая как

$$V_{ck} = \sqrt{V_{ckX}^2 + V_{ckY}^2};$$

$$V_{ckX} = V_X - \omega_y r_{kc};$$

$$V_{ckY} = V_Y - \omega_x r_d,$$

Вектор \mathbf{R} силы взаимодействия шины с опорной поверхностью в горизонтальной плоскости направлен противоположно вектору скорости скольжения \mathbf{V}_{ck} . Угол α поворота вектора скорости скольжения относительно оси X ПСК колеса определяется следующими выражениями:

$$\sin \alpha = \frac{V_{\text{ckY}}}{V_{\text{ck}}}; \quad \cos \alpha = \frac{V_{\text{ckX}}}{V_{\text{ck}}}.$$

Проекции вектора силы, действующей в плоскости дороги, на оси ПСК колеса рассчитываются следующим образом:

$$R_x = -R \cos \alpha; \quad R_y = -R \sin \alpha.$$

Моменты, действующие на колесо, вычисляются следующим образом.

$$\begin{aligned} M_x &= R_y r_d - R_z r_d \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}; \\ M_y &= -R_x r_d + M_f; \\ M_z &= 0, \end{aligned}$$

где M_f — момент сопротивления качению колеса, определяемый по формуле

$$M_f = -R_z r_{\text{kc}} f \operatorname{sign} \omega_y,$$

где f — коэффициент сопротивления качению,

$$f = f_0 + k_f V_x^2,$$

где f_0 — коэффициент сопротивления качению при малой скорости (около 5 км/ч); k_f — коэффициент роста сопротивления качению с увеличением скорости.

Модель случайного микропрофиля дороги. При анализе виброн нагруженности микропрофиль дороги обычно описывается в виде реализации случайной функции. Для описания профиля дороги, одинакового под движителем левого и правого борта машины, достаточно знать корреляционную функцию высот неровностей. Наиболее распространенный тип аппроксимации корреляционных функций профиля дорожной поверхности $R(l)$ имеет вид [5]

$$R(l) = D_q e^{-\alpha_T |l|} \cos(\beta_T l),$$

где D_q — дисперсия неровностей дорожной поверхности; l — длина пути; α_T , β_T — коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности профиля.

В данном исследовании для анализа виброн нагруженности КРС была выбрана грунтовая дорога хорошего качества. Для выбранной дороги $D_q = 47,6 \text{ см}^2$, $\alpha_T = 0,38 \text{ м}^{-1}$, $\beta_T = 0,47 \text{ м}^{-1}$ [8].

Реализация профиля дороги была получена с помощью формирующих фильтров, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка, реализованных в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Фрагмент реализации грунтовой дороги хорошего качества представлен на рис. 4.



Рис. 4. Фрагмент реализации грунтовой дороги хорошего качества

Анализ вибронегруженности КРС. Анализ вибронегруженности проводили путем оценки октавных уровней вертикальных виброускорений кузова в местах крепления носилок для раненых, в районе головы и поясницы, полученных при моделировании прямолинейного движения робота-санитара с постоянной скоростью по грунтовой дороге хорошего качества. Положение точек замера ускорений показано на рис. 5.

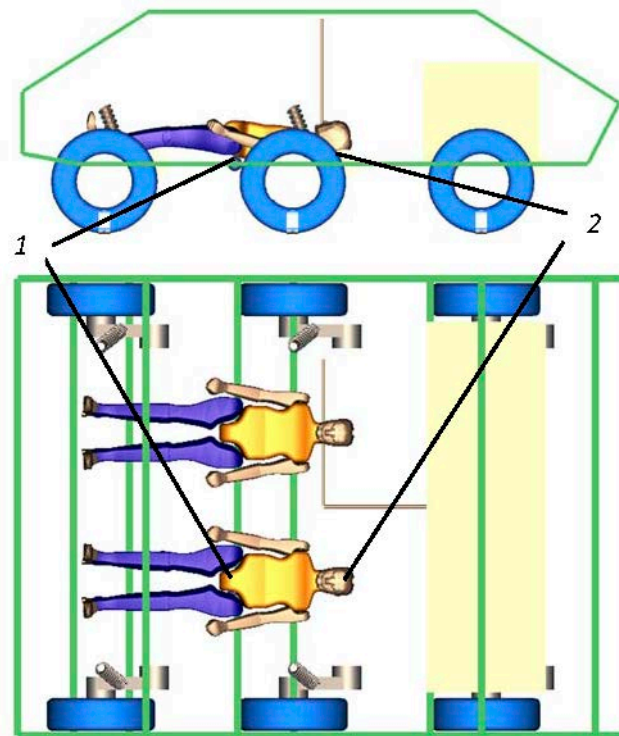


Рис. 5. Точки замера ускорений:

1 — в районе поясницы; 2 — в районе головы

Робот-санитар предназначен для эвакуации раненых с переднего края в полевую госпиталь либо к вертолетной площадке, расположенных, как правило, на расстоянии нескольких километров. В связи с этим при анализе принято допущение, что при движении со скоростью 9 км/ч время эвакуации составит не более получаса.

Для каждой полученной временной реализации ускорения определялись логарифмические уровни в пяти октавах диапазона частот 0,8...20 Гц [9]. Результаты анализа виброускорений при базовых параметрах подвески представлены в табл. 1. Таблица содержит пять двойных колонок, соответствующих пяти октавным полосам частот. В первой части каждой колонки приведены действующие логарифмические уровни виброускорений a_{z1} , а во второй части — нормативные значения этих уровней по ГОСТ РВ 2320-003-2006 [10] для воздействия на раненых в течение получаса.

Таблица 1

Распределение уровней вертикальных ускорений по октавным полосам частот для скорости 9 км/ч и нормативные значения для времени воздействия полчаса при базовых характеристиках амортизатора

Точки замера	Октава 1		Октава 2		Октава 3		Октава 4		Октава 5	
	a_{z1} , дБ	Норма дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ
1	135	135	132,4	132	130,7	130	126,8	130	123,4	135
2	137	135	134,4	132	132,5	130	128,9	130	125,4	135

Из табл. 1 видно, что в первой, второй и третьей октавах виброускорения при базовых значениях параметров подвески превышают уровень безопасности эвакуируемых. В табл. 2 приведены те же параметры вибронегруженности для варианта с увеличенным на 50 % коэффициентом демпфирования. Видно, что после увеличения коэффициента демпфирования во всех пяти октавах логарифмические уровни виброускорений не выходят за рамки безопасных и использование робота для эвакуации раненых допустимо при скорости 9 км/ч и времени эвакуации полчаса.

Таблица 2

Распределение уровней вертикальных ускорений по октавным полосам частот для скорости 9 км/ч и нормативные значения для времени воздействия полчаса с увеличенным на 50 % коэффициентом демпфирования

Точки замера	Октава 1		Октава 2		Октава 3		Октава 4		Октава 5	
	a_{z1} , дБ	Норма дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ	a_{z1} , дБ	Норма, дБ
1	130	135	128	132	127,3	130	122,8	130	118,6	135
2	131,5	135	129,5	132	128,7	130	124,5	130	120,1	135

Данные табл. 1 и 2 представлены в графической форме на рис. 6.

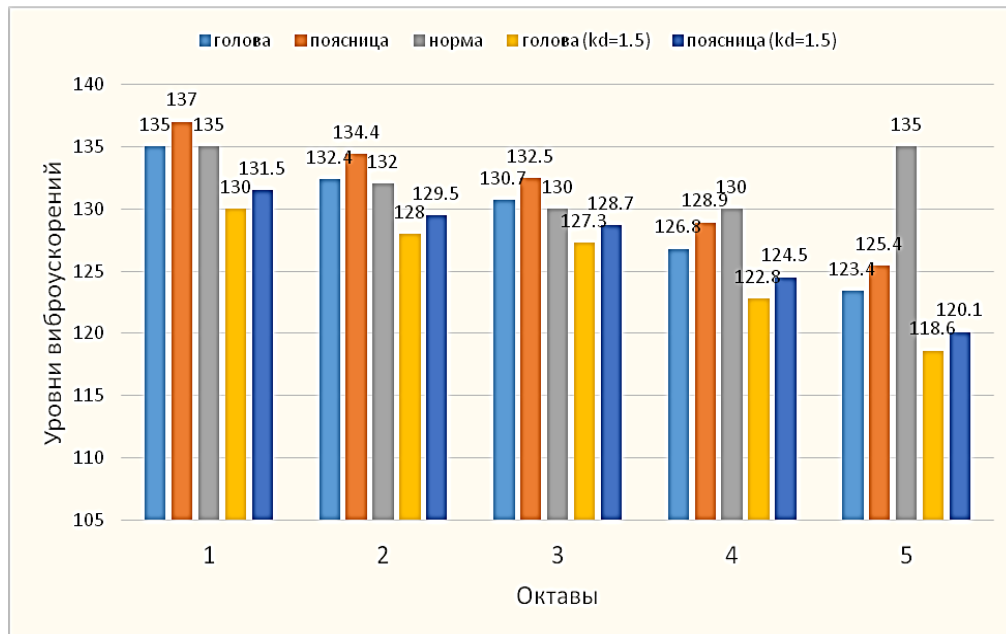


Рис. 6. Распределение уровней вертикальных ускорений по октавным полосам частот для скорости 9 км/ч и нормативные значения для времени воздействия полчаса (kd — коэффициент демпфирования)

Заключение. В результате проведенной работы в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» создана пространственная нелинейная динамическая модель многоосного КРС для анализа вибронгруженности, включающая полуэмпирическую модель взаимодействия с твердым неровным опорным основанием. С помощью полученной модели проведен анализ вибронгруженности робота-санитара при движении по грунтовой дороге хорошего качества со скоростью 9 км/ч и различных параметрах системы поддрессирования.

Разработанная модель может применяться на ранних этапах проектирования для оценки вибронгруженности робота-санитара на твердых неровных дорогах со случайным микропрофилем и выдачи рекомендаций по режимам движения и параметрам системы поддрессирования.

Литература

- [1] Горелов В.А., Комиссаров А.И., Мирошниченко А.В. Моделирование колесного транспортного средства 8×8 в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел. *Межд. науч.-тех. конф. «Пром-Инжиниринг»*. Челябинск, ЮУрГУ, 2015, с. 221–225.
- [2] Blundell M., Harty B. *The multibody systems approach to vehicle dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [3] Эйлер. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем. *euler.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.euler.ru> (дата обращения: 25.09.2019).

- [4] Программный комплекс Универсальный механизм (UM). *umlab.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.umlab.ru> (дата обращения: 25.09.2019).
- [5] Adams. The multibody dynamics simulation solution. *mscsoftware.com: веб-сайт*. URL: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 25.09.2019).
- [6] Simpack. Multibody simulation software. *3ds.com: веб-сайт*. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simpack/> (дата обращения: 06.12.2019).
- [7] RecurDyn Professional. *functionbay.org: веб-сайт*. URL: https://www.functionbay.org/flexible-multibody-dynamics-software/catalog/recurdyn_professional-item-9.html (дата обращения: 06.12.2016).
- [8] Жилейкин М.М. Моделирование систем транспортных средств. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [9] ГОСТ 12.1.012.2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. М., Стандартинформ, 2010.
- [10] ГОСТ РВ 2320-003-2006. Военная автомобильная техника. Плавность хода. Показатели и методы их определения. М., Стандартинформ, 2007.

Парубец Петр Евгеньевич — студент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Комиссаров Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Парубец П.Е. Анализ вибронегруженности колесного робота-санитара с помощью имитационного моделирования. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-586>

ANALYSIS OF VIBRATION LOAD OF A WHEELED ROBOT-NURSE USING SIMULATION

P.E. Parubets

parubetspe@student.bmstu.ru

SPIN-code: 5394-0397

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper gives a description of a spatial nonlinear dynamic model of a wheeled mobile robot-nurse for evaluating vibration load indicators at the design stage. The model is implemented in the software package for automated modeling of the dynamics of body systems "Universal Mechanism". The interaction of the tire with a solid, uneven support base is described using a semi-empirical model with the point contact of the tire with the road. On the basis of the developed mathematical model, an analysis of vibration loading was carried out under various modes of movement of a mobile robot on a dirt road of good quality. The calculation results are given for the movement of a mobile robot at a speed of 9 km/h and various parameters of the suspension system. The developed model can be used to assess the vibration load of a robot-nurse and give recommendations on the modes of its movement and the parameters of the suspension system.

Keywords

Mobile robot-nurse, vibration load, simulation, software, automated modeling, dynamics of a system of bodies, model of tire-road interaction

Received 05.02.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Gorelov V.A., Komissarov A.I., Miroshnichenko A.V. [8×8 wheeled vehicle modeling in a multibody dynamics simulation software]. *Mezhd. nauch.-tekh. konf. "Prom-Inzhiniring"* [Int. Sci-Tech. Conf. on Industrial Engineering]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2015, pp. 221–225 (in Russ.).
- [2] Blundell M., Harty V. *The multibody systems approach to vehicle dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [3] Eyler. Programmnyy kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh system [Eyler. Software package for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems]. *euler.ru: website*. URL: <http://www.euler.ru> (data obrashcheniya: 25.09.2019).
- [4] Programmnyy kompleks Universal'nyy mekhanizm (UM) [Universal mechanism (UM) software pack]. *umlab.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.umlab.ru> (accessed: 25.09.2019).
- [5] Adams. *The multibody dynamics simulation solution*. *mscsoftware.com: website*. URL: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (accessed: 25.09.2019).
- [6] Simpack. *Multibody simulation software*. *3ds.com: website*. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simpack/> (accessed: 06.12.2019).
- [7] RecurDyn Professional. *functionbay.org: website*. URL: https://www.functionbay.org/flexible-multibody-dynamics-software/catalog/recurdyn_professional-item-9.html (accessed: 06.12.2016).

- [8] Zhileykin M.M. Modelirovanie sistem transportnykh sredstv [Modelling of vehicle systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [9] GOST 12.1.012.2004. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vibratsionnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya [State standard 12.1.012.2004. Occupational safety standards system. Vibration safety. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2010 (in Russ.).
- [10] [GOST RV 2320-003-2006. Voennaya avtomobil'naya tekhnika. Plavnost' khoda. Pokazateli i metody ikh opredeleniya [State standard RV 2320-003-2006. Military automotive vehicles. Running smoothness. Rates and methods for their determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2007 (in Russ.).

Parubets P.E. — Student, Department of Multi-purpose Caterpillar Machines and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Komissarov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Multi-purpose Caterpillar Machines and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Parubets P.E. Analysis of vibration load of a wheeled robot-nurse using simulation. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-586.html> (in Russ.).