

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОЗАЩИТЫ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ С ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЕМ

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE VIBRATION PROTECTION OF THE ACTIVE SUSPENSION SYSTEM WITH PID CONTROL

В.А. КУЗЬМИН
З.А. ГОДЖАЕВ, д.т.н.

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр
ВИМ», Москва, Россия, kuzmin.viktor92@mail.ru

V.A. KUZ'MIN,
Z.A. GODZHAEV, DSc in Engineering

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow,
Russian Federation, kuzmin.viktor92@mail.ru

Пневмоподвеска используется для гашения вибраций и обеспечения комфортных условий труда для оператора транспортного средства. Причиной повышенной вибрации трактора зачастую являются неправильно подобранные упругодемпфирующие характеристики подушек активной системы подрессоривания, которые не справляются (или справляются крайне неэффективно) с колебаниями, поступающими от внешнего фона. Поскольку проведение эксперимента для динамического анализа пневмоподвески занимает много времени, то для получения параметров отклика пневмоподвески используют математические модели системы подрессоривания транспортного средства. В данной статье приведена сравнительная характеристика систем подрессоривания с цилиндрической пружиной и линейной пневматической рессорой в качестве системы подрессоривания. Для проведения моделирования использовался программный комплекс Matlab/Simulink, в котором на основании ранее полученных значений эквивалентной жесткости была построена имитационная модель трактора. Так как трактор в данной модели рассматривается как линейная система, то была рассчитана его спектральная функция по спектру входных параметров неровностей пути и АЧХ трактора. Эти параметры использовались для анализа вибрационного отклика системы подрессоривания для оценки эффективности системы и, как следствие, оценки комфорта оператора. Также был реализован алгоритм пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулирования системы подрессоривания в функции выходных параметров. В сравнительном исследовании показано, как линейная модель пневматической системы подрессоривания, контролируемая ПИД-регулятором, способна гасить колебания, возникающие от неровностей дороги, и насколько она более эффективна чем пассивная система подрессоривания транспортного средства с цилиндрической пружиной. Критерием эффективности в данной работе был показатель высоты перемещения остова трактора.

Ключевые слова: сравнительная оценка, пневмоподвеска, система подрессоривания, ПИД-регулятор.

The pneumatic suspension is used to absorb vibration and provide comfortable labor conditions for transportation vehicle drivers. The cause of increased vibration of the tractor, often, are incorrectly matched elastic-damping characteristics of the cushions of the active suspension system, which can not cope (or cope extremely ineffectively) with fluctuations coming from the external background. Since the realization of an experiment for the dynamic analysis of pneumatic suspension takes a long time, the mathematical models of the vehicle suspension system are used to obtain the response parameters of the pneumatic suspension. In the given article the comparative characteristic of spring's systems with a cylindrical spring and a linear pneumatic spring as a suspension system is given. To carry out the simulation, the Matlab/Simulink software complex was used, in which, based on the previously obtained values of equivalent rigidity, a simulation of the tractor was built. Since the tractor in this model is considered as a linear system, its spectral function was calculated from the spectrum of the input parameters of the path unevenness and the frequency response of the tractor. These parameters were used to analyze the vibration response of the suspension system to assess the effectiveness of the system and, as a result, assessment of the operator comfort. The algorithm of the proportional integral differentiating (PID) regulation of the suspension system was implemented depending on their output parameters as well. The comparative study shows how the linear model of the pneumatic suspension system controlled by a PID-regulator is able to suppress fluctuations arising from road roughness and whether it is effective than a passive suspension system for a vehicle with a coil spring. The criterion of efficiency in this work was the indicator of the tractor's displacement height.

Keywords: comparative assessment, air-cushion suspension, cushion system, PID-regulator.

Введение

Конструкция системы поддрессоривания оказывает прямое влияние на эксплуатационные свойства транспортного средства в т.ч. на комфорт оператора и эффективности работы транспортного средства. Известно [1, 2], что эффективность вождения и безопасность транспортного средства очень важны и могут быть усовершенствованы путем анализа результатов динамического моделирования системы поддрессоривания автомобиля. Из-за того, что пневмоподвеска с электронным управлением имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как, например, регулируемая жесткость, то многие производители стали использовать ее в своих транспортных средствах. Использование пневматической активной системы поддрессоривания вместо пассивной системы поддрессоривания может в значительной степени снизить его вибрацию [3].

Метод исследования

Использовался метод математического моделирования с построением математической модели в программном комплексе Matlab/Simulink.

Экспериментальная часть

Схема пневмоподвески с указанием действующих на нее сил [3] представлена на рис. 1.

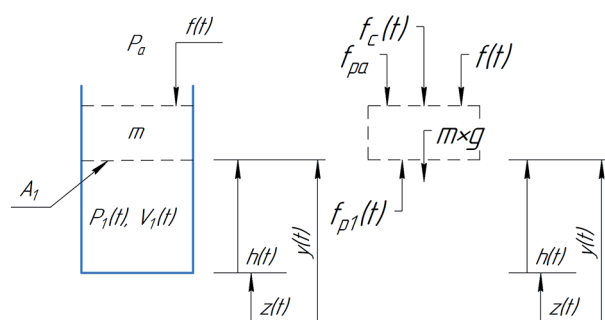


Рис. 1. Блок-схема пневмоподвески:

P_a – атмосферное давление, A_1 – площадь поперечного сечения подушки; $P_1(t)$, $V_1(t)$ – давление и объем подушки в текущий момент времени соответственно; $y(t)$, $h(t)$, $z(t)$ – расстояние от земли до поршня пневмоподушки, величина рабочего объема пневмоподушки и клиренс соответственно; $f(t)$ – частота вибрации в текущий момент времени; m – поддрессоренная масса

На основании схемы пневмоподвески, показанной на рис. 1, было выведено уравнение движения (1):

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m} \left[k_{equ} \left[(y(t) = z(t)) - (y_0 - z_0) \right] - c \cdot (\dot{y}(t) - \dot{z}(t)) - f(t) \right] \quad (1)$$

Уравнение показывает, как коэффициент демпфирования пружины связан с площадью поршня (A_1), высотой пневмопружины (h_0) и внутреннем давлением (p_1) [4].

В этом уравнении используется эквивалентная жесткость пружины, полученная для линейной модели пружины [5] в результате ее линеаризации относительно центра масс системы:

$$k_{equ} = \frac{n \cdot A_1 \cdot p_1}{h_0},$$

где n – частота вибрации транспортного средства.

Для упрощения расчетов влияние атмосферного давления и силы, возникающие вследствие термодинамических изменений, не учитывались.

Для обеспечения комфорта работы оператора решающим фактором является частота вибрации транспортного средства. Частота вертикальных колебаний должна быть приближена к собственной частоте человека, то есть колебаться в пределах от 1 до 1,6 Гц [5–8]. Для данной модели транспортное средство рассматривается как единая система, и его частота определяется по формуле:

$$n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_{equ}}{m}}.$$

Собственная частота пневмоподвески в данной модели $n = 1,53$ Гц.

Если транспортное средство рассматривается как линейная система, то можно рассчитать его спектральную функцию по спектру входных параметров неровностей пути и АЧХ транспортного средства. Эти параметры используются для анализа вибрационного отклика параметров системы и оценки комфорта работы оператора.

Результаты и обсуждения

Для создания модели подвески могут быть использованы как уравнения состояния, так и дифференциальные уравнения. В данной работе использовались дифференциальные уравнения, выполненные в программной среде Matlab/Simulink. Модель, показанная на рис. 2, была разработана в программной

среде Simulink. На ней представлена линейная модель 1/4 части транспортного средства.

С помощью программного комплекса Matlab/Simulink была подготовлена профилограмма неровностей пути, представленная на рис. 3.

Проведя моделирование работы пассивной системы поддресоривания транспортного средства с цилиндрической пружиной, была получена профилограмма результирующего перемещения поддресоренной части транспортного средства, представленная на рис. 4.

По сравнению с цилиндрической пружиной использование в качестве системы поддресоривания транспортного средства пневматической пружины позволяет уменьшить его вертикальные перемещения почти вдвое (см. рис. 5).

По результатам полученных перемещений поддресоренной части транспортного средства с пневмоподвеской в Simulink был разработан ПИД-контроллер. Схема пневмоподвески с ПИД-контроллером представлена на рис. 6.

Контроллер с ПИД-регулированием обладает высоким быстродействием и надежностью. Этим объясняются его преимущества при управлении системой поддресоривания транспортного средства в режиме реального времени. Формируемый при этом сигнал управления имеет вид:

$$u = k_p \cdot e + k_i \int edt + k_D \frac{de}{dt}, \quad (2)$$

где e – сигнал рассогласования, k_p – пропорциональный коэффициент, k_i – постоянная интегрирования, k_D – постоянная дифференцирования.

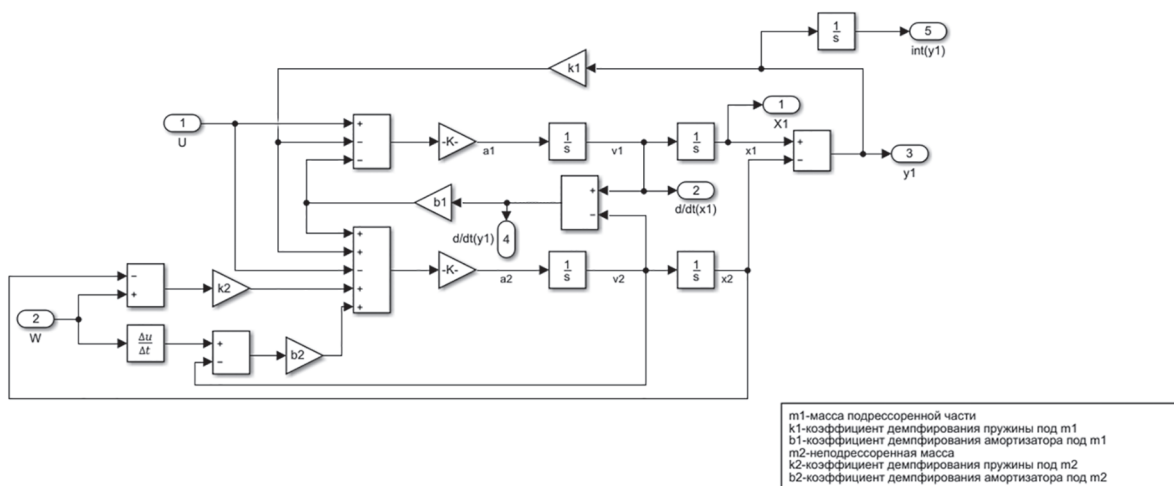


Рис. 2. Модель системы поддресоривания транспортного средства:

m_1, m_2 – масса поддресоренной и неподдресоренной части транспортного средства, соответственно;
 k_1, k_2 – коэффициент демпфирования пружины под m_1 и m_2 , соответственно;
 b_1, b_2 – коэффициент демпфирования амортизатора под m_1 и m_2 , соответственно

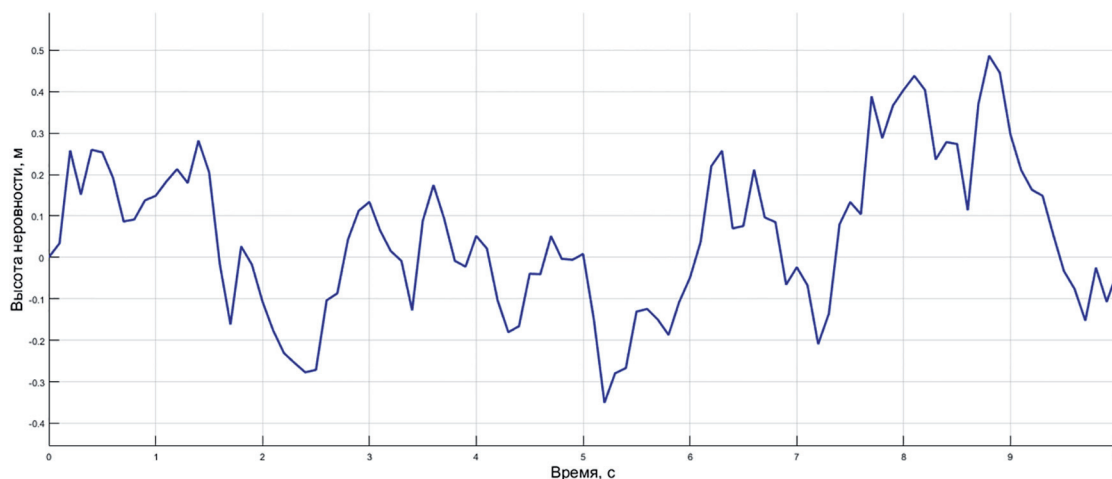


Рис. 3. Профилограмма неровности пути

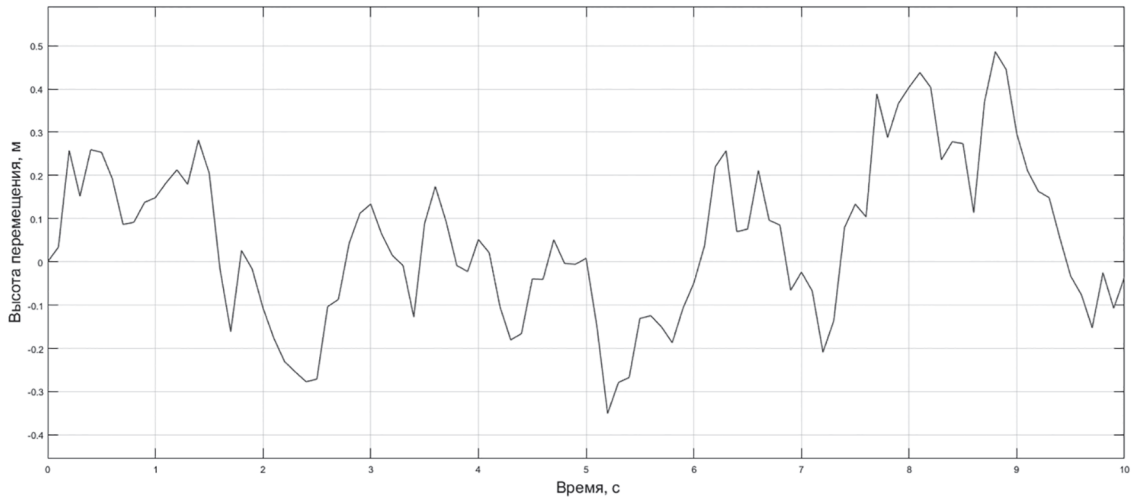


Рис. 4. Профилограмма результирующего перемещения поддресоренной части транспортного средства с цилиндрической пружиной

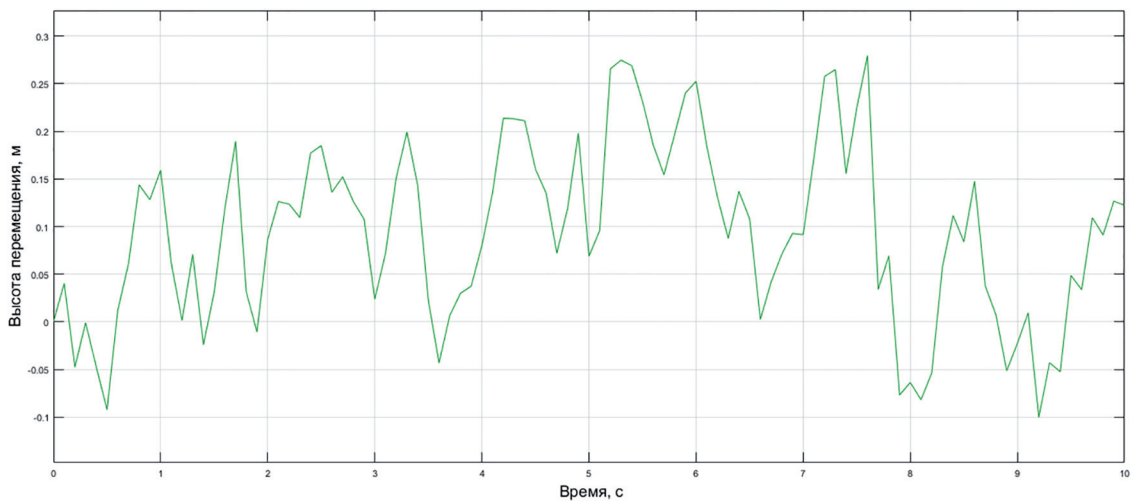


Рис. 5. Профилограмма результирующего перемещения поддресоренной части транспортного средства с пневмоподвеской

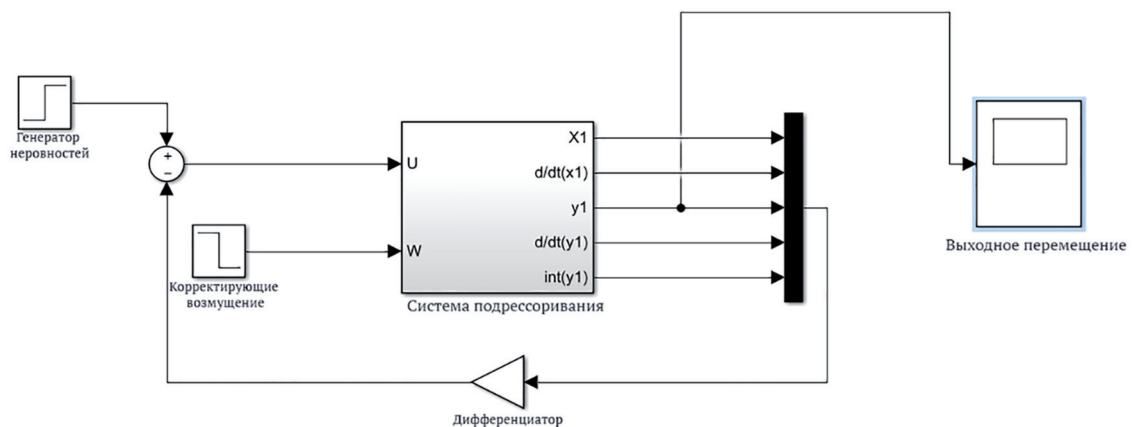


Рис. 6. Пневмоподвеска с ПИД-контроллером

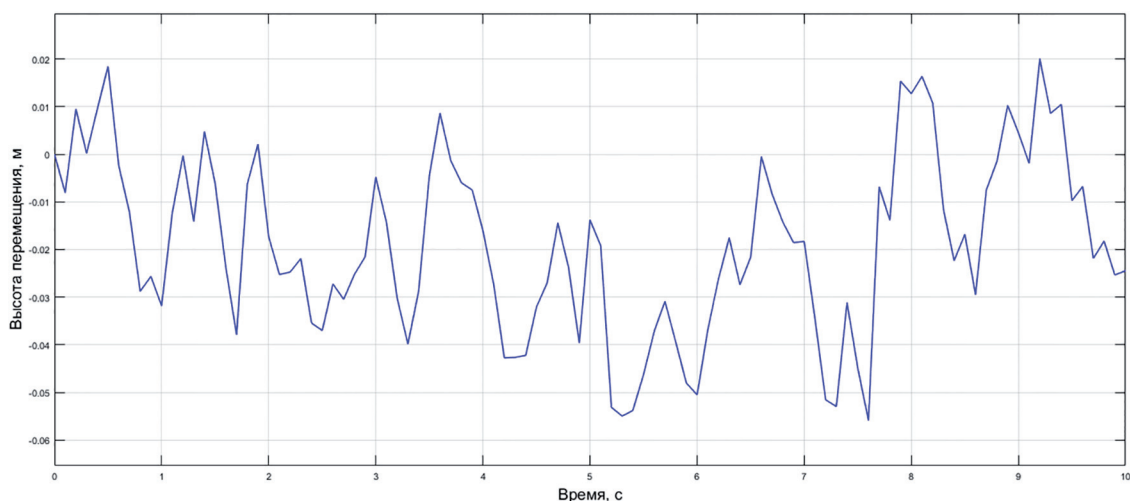


Рис. 7. Профилограмма зависимости высоты перемещения от времени для пневмоподвески с ПИД-контроллером

Полученный в (2) сигнал u отправляется на вход, оказывая при этом воздействие на систему поддресоривания. Выходной сигнал повторно отправляется на контроллер, который, принимая этот сигнал, вычисляет его производную, снова берет интеграл и отправляет в систему скорректированный сигнал u . Этот процесс продолжается все время, пока система активна.

На рис. 7 показаны полученные вертикальные колебания поддресоренной части транспортного средства при использовании ПИД-контроллера.

Итак, активное управление системой поддресоривания обеспечивает значительное уменьшение вибраций транспортного средства.

Заключение

По данным сравнительного математического моделирования были оценены с точки зрения вертикальных перемещений пассивная система поддресоривания транспортного средства, пассивная пневмоподвеска и пневмоподвеска с активным управлением посредством ПИД-контроллера. Как видно из приведенных графиков, наилучший результат показала пневмоподвеска с активным управлением посредством ПИД-контроллера. Она гораздо эффективнее пассивной системы поддресоривания. Уменьшение величины вибрации делает более комфортной работу оператора и увеличивает срок службы транспортного средства.

Из результатов динамического моделирования подвески видно также, что динамическое моделирование подвески является эффектив-

ным способом оценки работы системы поддресоривания. Этот метод позволяет легко изменять упругодемпфирующие характеристики системы поддресоривания и оценивать, насколько при этом изменяется величина вибрации поддресоренной части транспортного средства.

Литература

1. Кузьмин В.А., Федоткин Р.С. Расчетный метод оценки вибронгруженности кабины трактора с помощью имитационной модели // Будущее машиностроения России: Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием). М., 2017. С. 516–519.
2. Кузьмин В.А., Овчаренко А.С., Федоткин Р.С. Экспериментальное исследование упругодемпфирующих характеристик виброизоляторов различных типов системы поддресоривания кабины колесного трактора // Будущее машиностроения России: Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием). М., 2017. С. 520–523.
3. Шеховцов К.В. Снижение уровня вибронгруженности рабочего места оператора трактора за счет применения динамических гасителей колебаний в системе поддресоривания кабины: дис. ... канд. техн. наук: Москва, 2014. 159 с.
4. Савочкин В.А., Шишанов С.М. Основы линейной теории поддресоривания транспортных и тяговых гусеничных машин: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение». М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 93 с.

5. Годжаев З.А., Надеждин В.С., Красавин П.А., Фараджев Ф.А. К вопросу моделирования нелинейного пневмоупругого элемента пассажирского автобуса. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 308–322.
6. Годжаев З.А., Победин А.В., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С. Перспективы использования динамических гасителей колебаний в подвесках тракторных кабин // Тракторы и сельхозмашины. № 11, 2014. С. 16–21.
7. Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. № 10, 2016. С. 41–44.
3. Shekhovcov K.V. Snizhenie urovnya vibronagruzhenosti rabocheho mesta operatora traktora za schet primeneniya dinamicheskikh gasitelej kolebanij v sisteme podressorivaniya kabiny: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Decrease in the level of vibration loading of the tractor operator's workplace due to the use of dynamic vibration dampers in the cabin suspension system: dissertation for a degree of the candidate of technical sciences]: 05.05.03. Moskva, 2014. 159 p.
4. Savochkin V.A., Shishanov S.M. Osnovy linejnoy teorii podressorivaniya transportnyh i tyagovyh gusenichnyh mashin. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po special'nosti «Avtomobile- i traktorostroenie» [Fundamentals of the linear theory of the suspension of transport and traction caterpillar machines. Textbook for students of high schools, studying in the specialty «Automotive and tractor construction»]. Moscow: MGТУ «MAMI» Publ., 2007. 93 p.
5. Godzhaev Z.A., Nadezhdin V.S., Krasavin P.A., Faradzhev F.A. The question of modeling a nonlinear pneumoelastic element of the passenger bus. Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGТУ im. N.EH. Bauman. 2014. No 12, pp. 308–322 (in Russ.).
6. Godzhaev Z.A., Pobedin A.V., Shekhovcov V.V., Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S. Prospects for the use of dynamic vibration dampers in the suspension of tractor cabins. Traktory i sel'hozmashiny. No 11, 2014, pp. 16–21 (in Russ.).
7. Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Unmanned mobile agricultural energy facility. Traktory i sel'hozmashiny. No 10, 2016, pp. 41–44 (in Russ.).

References

1. Kuz'min V.A., Fedotkin R.S. The calculation method for an assessment of the vibration load of the tractor cab using a simulation model. Budushchee mashinostroeniya Rossii: Desyataya Vserossijskaya konferenciya molodyh uchenykh i specialistov (s mezhdunarodnym uchastiem) [The Future of Mechanical Engineering of the Russia Federation The Tenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with International Participation)]. Moscow: 2017, pp. 516–519 (in Russ.).
2. Kuz'min V.A., Ovcharenko A.S., Fedotkin R.S. Experimental investigation of the elastic-damping characteristics of the various types vibration isolators of suspension system for the wheeled tractor cab. Budushchee mashinostroeniya Rossii: Desyataya Vserossijskaya konferenciya molodyh uchenykh i specialistov (s mezhdunarodnym uchastiem) [The Future of Mechanical Engineering of the Russia Federation The Tenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with Interna-