

Моделирование случайных процессов, обусловленных профилем опорной поверхности транспортно-технологических средств

Юрий Петрович Корнюшин¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: theroland@yandex.ru;
Александр Владимирович Лавров²,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
e-mail: vimlavrov@mail.ru;

Анастасия Владимировна Сидорова¹,
аспирант,
e-mail: nancy85@yandex.ru

¹Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что сельскохозяйственные транспортно-технологические средства в процессе выполнения работ подвергаются внешним случайным воздействиям. Описание и моделирование этих воздействий позволит улучшить эксплуатационные показатели средства на этапах исследования и проектирования. (*Цель исследования*) Формирование случайных процессов с заданными корреляционными функциями, обусловленных профилем опорной поверхности под колесами транспортно-технологического средства при выполнении операций; визуализация полученных случайных реализаций высоты профиля опорной поверхности. (*Материалы и методы*) Изменение высоты профиля опорной поверхности вдоль траектории движения транспортно-технологического средства при постоянной скорости предложено рассматривать как стационарный случайный процесс. В зависимости от типа опорной поверхности выбираются вид и параметры корреляционной функции. Далее в среде *Matlab* осуществляется моделирование высоты профиля опорной поверхности под колесами. (*Результаты и обсуждение*) Получены реализации высоты профиля опорной поверхности в виде асфальта и стерни пшеницы. Проведено сравнение корреляционной функции смоделированной реализации случайного процесса с исходной корреляционной функцией. (*Выводы*) Установили, что предложенный алгоритм позволяет получить случайный процесс с заданными свойствами корреляционной функции для описания колебаний высоты профиля опорной поверхности под колесами транспортно-технологического средства с достаточно высокой степенью адекватности, используя массив реализаций в количестве не менее 50.

Ключевые слова: транспортно-технологические средства, опорная поверхность, внешние воздействия, моделирование случайных процессов, корреляционная функция.

■ Для цитирования: Корнюшин Ю.П., Лавров А.В., Сидорова А.В. Моделирование случайных процессов, обусловленных профилем опорной поверхности транспортно-технологических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №3. С. 61-66. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-61-66. EDN OYCEFL.

Modeling Random Processes Induced by the Support Surface Profile in Transport and Technological Systems

Yuri P. Korniyushin¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: theroland@yandex.ru;
Alexander V. Lavrov²,
Ph.D.(Eng.), head of laboratory,
e-mail: vimlavrov@mail.ru;

Anastasia V. Sidorova¹,
postgraduated,
e-mail: nancy85@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russian Federation

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The research article demonstrates that agricultural transport and technological systems are susceptible to external random influences during their operation. By accurately describing and modeling these effects, the performance of the tool can

be enhanced during the research and design stages. (*Research purpose*) The objective of this research is to generate random processes with predefined correlation functions that simulate the profile of the supporting surface under the wheels of agricultural transport and technological systems during operations. Additionally, the study aims to visually represent the resulting random implementations of the support surface profile height. (*Materials and methods*) The proposed approach considers the variation in support surface profile height along the trajectory of agricultural transport and technological systems, while maintaining a constant speed, as a stationary random process. The selection of the correlation function type and its parameters is dependent on the specific characteristics of the support surface. Subsequently, using the Matlab environment, the model for the support surface profile height under the wheels is developed. (*Results and discussion*) Successful implementations of support surface profile height have been achieved for two distinct scenarios: asphalt and wheat stubble. A comparative analysis is conducted between the correlation function of the simulated implementation of the random process and the original correlation function. (*Conclusions*) The proposed algorithm has demonstrated its capability to generate a random process with specified correlation function properties, accurately describing the height fluctuations of the support surface profile under the wheels of agricultural transport and technological systems. The adequacy of the algorithm has been confirmed through a comprehensive analysis of at least 50 implementations, highlighting its effectiveness and reliability.

Keywords: transport and technological systems, support surface, external influences and effects, modeling of random processes, correlation function.

■ **For citation:** Korniyushin Yu. P., Lavrov A.V., Sidorova A.V. Modelirovanie sluchaynyh protsessov, obuslovlennykh profilem opornoj poverkhnosti transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Modeling random processes induced by the support surface profile in transport and technological systems]. *Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N3. 61-66 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-61-66. EDN OYCEFL.

Моделирование внешних случайных воздействий на сельскохозяйственные транспортно-технологические средства (ТТС) при движении по опорной поверхности с различной высотой неровностей остается актуальной задачей. Это обусловлено тем, что такие средства эксплуатируются именно при данном типе воздействий [1]. Возможность улучшить условия труда тракториста, повысить качество работ, долговечность транспортно-технологических средств связана с точностью воспроизведения профиля опорной поверхности на этапе исследования и проектирования.

Цель исследования – формирование случайных процессов с заданными корреляционными функциями, обусловленных профилем опорной поверхности под колесами ТТС при выполнении операций; визуализация полученных случайных реализаций высоты профиля опорной поверхности.

Материалы и методы. Изменение высоты q профиля опорной поверхности вдоль траектории движения средства с постоянной скоростью по пути L в ряде работ предложено рассматривать как стационарный случайный процесс [1, 2]. Исходя из этого, для моделирования высоты профиля опорной поверхности достаточно знать корреляционную функцию $R_z(l)$, которая характеризует структуру поверхности [3-5]. Корреляционную функцию высоты профиля чаще всего выбирают нескольких видов [6-8]:

$$\begin{aligned} R_z &= \sigma_z^2 e^{-\alpha_1(l)}, \\ R_z &= \sigma_z^2 e^{-\alpha_2(l)} \cos(\beta l), \\ R_z &= \sigma_z^2 (A_1 e^{-\alpha_1(l)} + A_2 e^{-\alpha_2(l)} \cos(\beta l)), \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_z – среднеквадратическое отклонение, см;

α_1, α_2 и β – коэффициенты, характеризующие затухание и периодичность функции, соответственно, 1/м;

A_1 и A_2 – коэффициенты, характеризующие доли экспоненциальной и периодической составляющих.

Каждая из формул (1) соответствует определенному типу опорной поверхности: первая – с отдельными выступами и впадинами; вторая – с нерегулярной качкой; третья – как с нерегулярной качкой, так и отдельными впадинами и выступами.

Параметры, входящие в выражение корреляционной функции для каждого типа опорной поверхности, приводятся во многих литературных источниках (*табл. 1*) [1, 2, 7].

Аргументы L реализации и сдвига l (пройденного пути) в корреляционной функции измеряются в единицах длины (метр). Для характеристики профиля поверхности поля или дороги как функции воздействия на ТТС переходим от этих аргументов в выражениях (1) к временным аргументам t и τ в единицах времени (секунда). При этом коэффициенты α и β будут иметь размерность c^{-1} и соответствовать скорости движения агрегата $v = 1$ м/с. Для учета скорости движения значения α и β при единичной скорости (*табл. 1*) умножаются на заданную скорость v , т.е. $\alpha_v = \alpha \cdot v$ и $\beta_v = \beta \cdot v$ [3-5].

Для подготовки исходных данных в среде *Matlab* необходимо создать m -файл с исходными данными из *таблицы 1*.

Например:

```
clear; s = tf('s')
```

```
% Исходная корреляционная функция  
R(l)=D*exp(-alfa*abs(l))*cos(beta*l)
```



Таблица 1

Table 1

ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ АППРОКСИМАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ВЫСОТ ПРОФИЛЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА $V = 1$ М/С
NUMERICAL COEFFICIENTS OF APPROXIMATION FOR CORRELATION FUNCTION OF SUPPORT SURFACE PROFILE HEIGHTS AT TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SPEED $V = 1$ M/S

Вид опорной поверхности (фон, рельеф) Types of base surface (background, relief)	σ_z , см sm	A_1	A_2	α_1 , 1/м 1/m	α_2 , 1/м 1/m	β , 1/м 1/m	Источники
Цементобетон / Cement concrete	0,5-1,24	–	–	–0,15	–	–	[1]
Асфальт / Asphalt	0,8-1,26	0,85	0,15	–0,2	–0,05	0,6	[1]
Асфальтированная дорога (в хорошем состоянии) Asphalt road (good condition)	0,815	0	1	0	0,13	1,05	[7]
Асфальтированная дорога (в изношенном состоянии) Asphalt road (worn condition)	1,1	0,85	0,15	0,2	0,05	0,6	[7]
Грунтовая дорога / Dirt road	2,12	–	1,0	–	0,58	0,63	[2]
Булыжник удовлетворительного качества Cobblestone of satisfactory quality	1,35-3,28	–	–	0,45	–	–	[1]
Булыжник с впадинами и буграми Cobblestone with depressions and mounds	1,35-3,28	0,85	0,15	–0,5	–0,2	1	[1]
Стерня колосовых культур / Stubble of cereal crops	3,26	0,9	0,1	0,7	0,2	1,57	[2]
Стерня пшеницы / Wheat stubble	2,4	–	1,0	–	0,42	0,29	[2]
Стерня кукурузы / Corn stubble	3,22	0,7	0,3	0,25	0,60	1,57	[2]
Пропашное поле / Tilled field	2,15	–	1,0	–	0,57	1,59	[2]
Залежь / Ledge	5,18	1,0	–	1,3	–	–	[2]

$v=2.5$; % скорость движения, м/с
 % Стерня пшеницы
 $Dq=2.4 \cdot 2.4e-4$; % дисперсия опорной поверхности, м²
 $\alpha=0.42$; % параметр α
 $\beta=0.29$; % параметр β
 % Пересчитываем параметры корреляционной функции с привязкой ко времени
 $\alpha_t = \alpha \cdot v$;
 $\beta_t = \beta \cdot v$.

Суть задачи моделирования случайного профиля опорной поверхности в моменты времени, соответствующие заданному шагу дискретизации, заключается в использовании некоторого формирующего фильтра, преобразующего сигнал типа «белый шум» в стационарный процесс с заранее заданными параметрами корреляционной функции. Случайные процессы с корреляционными функциями (1) относятся к классу случайных процессов с рациональной спектральной плотностью. Для их моделирования наиболее удобно применять разностные уравнения [9]. Это приводит к алгоритмам, не имеющим методической погрешности и сводящимся к простым рекуррентным соотношениям.

Алгоритм моделирования стационарного случайного процесса с рациональным спектром рассмотрен в работе [10]. Во всех алгоритмах заложен принцип преобразования последовательности $x[n]$ независимых нормально распределенных случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией (дискретный белый шум) в последовательность $y[n]$ с корреляционной функцией $R[N]=R(n\Delta t)$. Так, для корреляционной функ-

ции $R_z = \sigma_z^2 e^{-\alpha_2(l)} \cos(\beta l)$ дискретная передаточная функция формирующего фильтра и рекуррентный алгоритм для моделирования случайного процесса имеют вид [9, 11]:

$$G(\omega) = \frac{2\sigma^2}{\alpha} \frac{1+x^2+x_0^2}{(1+(x+x_0)^2)(1+(x-x_0)^2)}, \quad (2)$$

$$x = \frac{\omega}{\alpha}, x_0 = \frac{\omega_0}{\alpha},$$

$$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2}, \quad (3)$$

где $a_0 = \sigma \alpha$; $a_1 = \sigma \frac{\alpha_0}{\alpha_1}$;

$$b_1 = 2\rho \cos(\omega_0 \Delta t); b_2 = -\rho^2;$$

$$\alpha_0 = \rho(\rho^2 - 1) \cos(\omega_0 \Delta t);$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_0^2}}{2}}; \alpha_2 = 1 - \rho^4$$

$$\rho = \exp(-\alpha \Delta t).$$

Для рассмотренного алгоритма в среде *Matlab* создан *m*-файл для моделирования высоты профиля опорной поверхности под колесами ТТС. Для формирования усредненной реализации используется массив реализаций в количестве *m*, исходя из соображений достоверности результатов. При получении случайного процесса произведен отсев переходного процесса формирующего фильтра с длиной участка 10 000 с учетом общей длины 20 000.

$N_T = 16384$; % Задаем длину числовой последовательности % N_T

```

delt = .05
% Получение последовательности с формирующего фильтра
nn = 50;% массив реализаций в количестве m
h = delt;
sigma = sqrt(Dq); %
gam_0 = beta_t*delt; %
gamma_max = alfa_t*delt; %
ro = exp(-gamma_max); %
al_0 = ro*(ro^2-1)*cos(gam_0); %
al_2 = 1-ro^4; %
al_1 = sqrt((al_2+sqrt(al_2^2-4*al_0^2))/2); %
b2 = -ro^2; %
b1 = 2*ro*cos(gam_0); %
a1 = sigma*al_0/al_1; %
a0 = sigma*al_1; %
% Задание DbSh дискретный белый шум
DbSh = randn(nn, N_T+20000);
for r=1 : nn
X1(r,1) = 0;
X1(r,2) = 0;
end;
for r=1 : nn
for i=3 : N_T+20000
X1(r,i) = a0 * DbSh(r,i) +a1 * DbSh(r,i-1)
+ b1 * X1(r,i-1) + b2*X1(r,i-2);
end;
end;
% X1 - выход формирующего фильтра
% Отсев переходного процесса формирующего фильтра
for r=1 : nn
for i=1 : N_T+10000
X12(r,i) = X1(r,i+10000);
end;
end;
% Начинаем моделировать
T_sim = delt*(N_T+10000);
T_sim = 1500;
tc = linspace(0,T_sim,N_T+10000); %
Время на модель
for r=1 : nn
for i=1 : N_T+10000
X(i) = X12(r,i); % Вход на модель
end;
open_system('x1.slx');
% sim('x1.slx',T_sim);
sim('x1.slx',tc);
close_system('x1.slx');
figure(1)
handle=plot(input.time,input.Data,'k');
set(handle,'LineWidth',3)
xlabel('t')
ylabel('input')

```

```

grid on
input = input.Data; %
for i=1 : N_T+10000
input0(r,i) = input(i);
end;
end.

```

Для сохранения и визуализации полученной реализации высоты профиля опорной поверхности воспользуемся блоками *To Workspace* и *Scope* в среде *Simulink* (рис. 1).

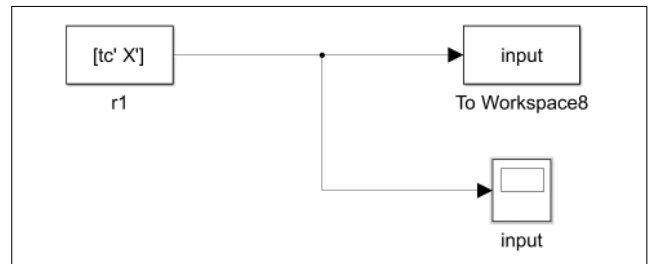


Рис. 1. Подпрограмма в среде *Simulink* для формирования и визуализации полученного массива

Fig. 1. *Simulink* subroutine for array generation and visualization

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Полученная в итоге моделирования реализация представлена на рисунке 2.

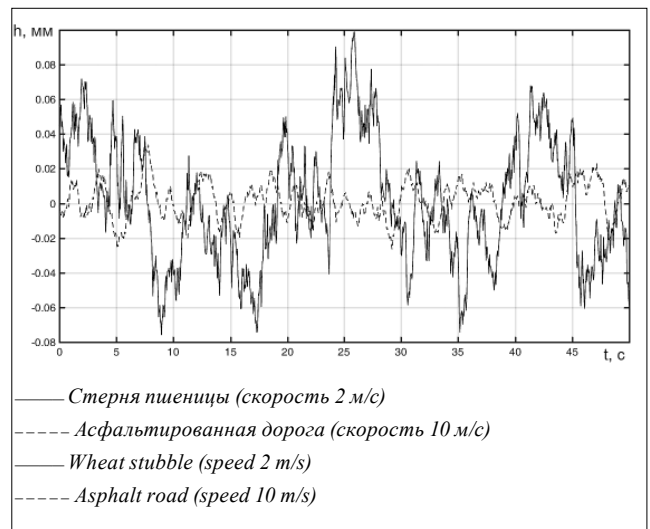


Рис. 2. Реализации высоты профиля опорных поверхностей
Fig. 2. Implementation of support surface profile heights

Для оценки соответствия полученного процесса исходным требованиям проведено сравнение корреляционной функции смоделированной реализации случайного процесса с исходной корреляционной функцией (рис. 3).

Адекватность полученных случайных процессов проверена путем сравнения заданной корреляционной функции с корреляционной функцией сгенерированного случайного процесса (табл. 2), используя среднюю арифметическую S_a и среднюю квадратичную S_x погрешность [12];

Таблица 2

Table 2

ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ И КВАДРАТИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
 NUMERICAL VALUES OF ARITHMETIC AND QUADRATIC ERROR AVERAGES

Вид опорной поверхности (фон, рельеф) The base surface type (background, relief)	Скорость, V, м/с Speed, V, m/sec	Средняя арифметическая погрешность* Arithmetic mean error*			Средняя квадратичная погрешность Mean square error		
		m = 1	m = 10	m = 50	m = 1	m = 10	m = 50
Асфальтированная дорога Asphalt road	10	0,0178	0,0084	0,0021	0,0206	0,0104	0,0027
Стерня пшеницы Wheat stubble	2	0,0151	0,0065	0,0026	0,0170	0,0085	0,0034

*m – количество реализаций
 *m – array of implementations

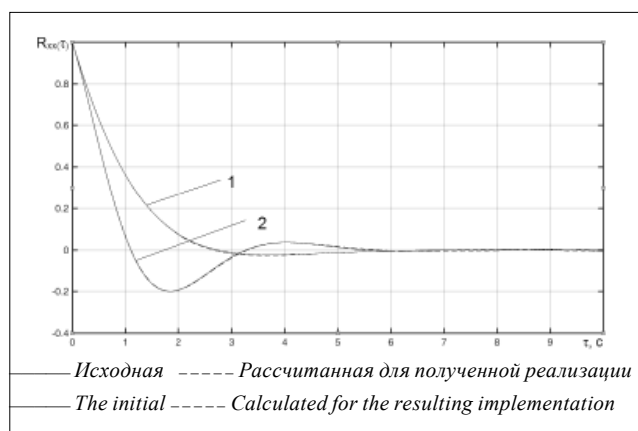


Рис. 3. Корреляционные функции: 1 – стерня пшеницы (скорость 2 м/с); 2 – асфальтированная дорога (скорость 10 м/с)
 Fig. 3. Correlation functions: 1 – wheat stubble (speed 2 m/s); 2 – Asphalt road (speed 10 m/s)

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n}; \quad S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}}$$

где x_i – экспериментальное значение; \bar{x}_i – значение, рассчитанное по функциональной модели.

Выводы

На основании анализа средних арифметических и средних квадратичных погрешностей корреляционных функций можно сделать вывод, что использованный алгоритм позволяет получить случайный процесс с заданными свойствами корреляционной функции для описания колебаний высоты профиля опорной поверхности под колесами транспортно-технологического средства с достаточно высокой степенью адекватности, используя массив реализаций, начиная с их количества $m = 50$.

При моделировании выполнения транспортно-технологическим средствами технологических операций предложенные методика и программа позволят смоделировать необходимые случайные процессы с заранее заданными свойствами.

Повышение точности воспроизведения профиля опорной поверхности как случайного процесса на этапе исследования и проектирования ТТС позволят выявить пути улучшения условий труда тракториста, повышения качества выполняемых технологических операций и долговечности транспортно-технологических средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. М.: Колос. 1981. 382 с.
2. Попов В.Б. Математическое моделирование мобильного сельскохозяйственного агрегата в режиме транспортного переезда // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2005. N3(22). С. 13-18.
3. Проектирование полноприводных колесных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. Кн. 1. 496 с.
4. Жеглов Л.Ф. Спектральный метод расчета систем поддрессоривания колесных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 150 с.
5. Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 184 с.
6. Сергиенко А.Н., Медведев Н.Г., Любарский Б.Г., Беляев С.Н., Шушляпин С.В. Методика задания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. Харків: 2013. N37. С. 185-192.
7. Рыков С.П., Бекирова Р.С., Коваль В.С. Моделирование случайного микропрофиля автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2010. N4(8). С. 33-37.
8. Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С., Гольдин Г.В., Додонов Б.М., Жигарев В.П., Кольцов В.И., Юрик В.С., Яковлев Е.И. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель. М.: Машиностроение. 1976. 535 с.
9. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио. 1971. 328 с.
10. Методы статистического моделирования в радиотехнике: Санкт-Петербург: Электросвязь. 2003. 36 с.
11. Липатов И.Н. Оценка погрешности моделирования случайного процесса с заданной корреляционной функцией

ей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления.* 2010. N4. С. 82-87.

12. Прохоров С.А. (ред.). Прикладной анализ случайных процессов. Самара: СНЦ РАН. 2007. 582 с.

REFERENCES

- Lur'e A.B. Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Statistical dynamics of agricultural aggregates]. Moscow: Kolos. 1981. 382 (In Russian)
- Popov V.B. Matematicheskoe modelirovanie mobil'nogo sel'skokhozyaystvennogo agregata v rezhime transportnogo pereezda [Mathematical modeling of a mobile agricultural unit in the transport crossing mode]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo.* 2005. N3(22). 13-18 (In Russian).
- Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin [Design of all-wheel drive vehicles]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana. 2008. Vol. 1. 496 (In Russian).
- Zheglov L.F. Spektral'nyy metod rascheta sistem podressorivaniya kolesnykh mashin [Spectral method for calculating suspension systems for wheeled vehicles]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana. 2009. 150 (In Russian).
- Kotiev G.O., Sarach E.B. Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin [Integrated suspension of highly mobile two-link tracked vehicles]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana. 2010. 184 (In Russian).
- Sergienko A.N., Medvedev N.G., Lyubarskiy B.G., Belyaev S.N., Shushlyapin S.V. Metodika zadaniya nerovnostey profilya dorogi pri modelirovanii podveski avtomobilya s rekuperatorom energii kolebaniy [Technique for specifying road profile roughness when modeling a car suspension with a vibration energy recuperator]. *Vestnik NTU «KHP». Seriya: Matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh.* Kharkiv: 2013. N37. 185-192 (In Russian).
- Rykov S.P., Bekirova R.S., Koval' V.S. Modelirovanie sluchaynogo mikroprofilya avtomobil'nykh dorog [Modelling of casual microprofile of highways]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* 2010. N4(8). 33-37 (In Russian).
- Khachaturov A.A., Afanas'ev V.L., Vasil'ev V.S., Gol'din G.V., Dodonov B.M., Zhigarev V.P., Kol'tsov V.I., Yurik V.S., Yakovlev E.I. Dinamika sistemy doroga-shina-avtomobil'-voditel' [Dynamics of the road-tire-car-driver system]. Moscow: Mashinostroenie. 1976. 535 (In Russian).
- Bykov V.V. Tsifrovoye modelirovanie v statisticheskoy radiotekhnike [Digital Simulation in Statistical Radio Engineering]. Moscow: Sovetskoye radio. 1971. 328 (In Russian).
- Metody statisticheskogo modelirovaniya v radiotekhnike [Methods of statistical modeling in radio engineering]. Sankt-Peterburg: Elektrosvyaz'. 2003. 36 (In Russian).
- Lipatov I.N. Otsenka pogreshnosti modelirovaniya sluchaynogo protsesssa s zadannoy korrelyatsionnoy funktsiey [Evaluation of the error in modeling a random process with a specified correlation function]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya.* 2010. N4. 82-87 (In Russian).
- Prokhorov S.A. (editor). Prikladnoy analiz sluchaynykh protsessov [Applied analysis of random processes]. Samara: SNTS RAN. 2007. 582 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Корнюшин Ю.П. – формулирование основных направлений исследования, проведение экспериментального исследования, формирование текста;

Лавров А.В. – литературный анализ, проведение экспериментального исследования, обработка результатов исследования;

Сидорова А.В. – литературный анализ, обработка результатов исследования, формирование текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Kornyushin Y.P. – formulation of the main research directions, conducting experiments, working on the article manuscript;

Lavrov A.V. – literature review, conducting experiments, research result processing;

Sidorova A.V. – literature review, research result processing, working on the article manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

05.04.2023

26.05.2023