

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВНОСТИ ХОДА

## STUDY OF THE INFLUENCE OF OSCILLATORY PROCESSES IN A MOBILE VEHICLE ON THE RUNNING SMOOTHNESS CHARACTERISTICS

**С.А. ПАРТКО**, к.т.н.  
**Л.М. ГРОШЕВ**, д.т.н.  
**А.Н. СИРОТЕНКО**, к.т.н.

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия,  
parlana@rambler.ru

**S.A. PARTKO**, PhD in Engineering  
**L.M. GROSHV**, DSc in Engineering  
**A.N. SIROTENKO**, PhD in Engineering

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,  
parlana@rambler.ru

Рассмотрен вопрос оптимизации динамических характеристик мобильной машины в зависимости от условий работы. Решение задач оптимизации проводилось с учетом случайного характера динамических нагрузок. Задача преобразования входного воздействия на элементы мобильной машины решалась в детерминированном аспекте с применением интегрированных критериев. В качестве меры точности введенных критериев использовалось среднеквадратическое отклонение. Минимальные значения вертикальных реакций на башмаках жатки определялась дисперсией ее колебаний, с учетом спектральной плотности неровностей агрофона. Установлено, что частотные характеристики башмаков жатки зависят и от вертикальных и продольно-угловых колебаний молотилки комбайна. Представлены критерии оптимальности для оценки рассеивания колебательных параметров машин от внешних воздействий. Обобщенный критерий оптимизации определялся исходя из независимости целевых функций и максимального квантиля нормального распределения, что позволило, в вероятностном аспекте, оценить эффективность оптимизации для сельскохозяйственных машин широкого спектра применения. Локальный оптимум определялся выражением целевых функций через элементарные функции, с учетом статистических параметров и характера распределения случайной величины. Оптимальная передаточная функция определялась исходя из минимального значения среднеквадратического отклонения целевой функции с учетом переменных по Фурье. Определение локального оптимума проведено графоаналитически по целевой функции плавности хода и по вероятностному критерию. Определено оптимальное значение относительного коэффициента затухания вертикальных колебаний корпуса молотилки, и установлена не только причина его минимизации, но и вероятность превышения допустимого уровня вибраций. Представлен метод определения передаточной функции для прогнозирования плавности хода комбайна. Оценены возможности предложенного метода оптимизации.

*Ключевые слова:* дисперсия, спектральная плотность, передаточная функция, линейное программирование, функция цели, вероятность, коэффициент вариации, квантиль распределения.

The issue of optimizing the dynamic characteristics of a mobile vehicle depending on the operating conditions is considered. The optimization problems were solved taking into account the random nature of dynamic loads. The task of transforming the input effect on the elements of the mobile machine was solved in a deterministic aspect using integrated criteria. As a measure of the accuracy of the introduced criteria, the standard deviation was used. The minimum values of vertical reactions on the header shoes were determined by the dispersion of its oscillations, taking into account the spectral density of the irregularities of the agricultural background. It was found that the frequency characteristics of the header shoes also depend on the vertical and longitudinal-angular vibrations of the combine separator. Optimality criteria are presented for assessing the dispersion of vibrational parameters of vehicles from external influences. The general optimization criterion was determined based on the independence of the objective functions and the maximum quantile of the normal distribution, which allowed, in a probabilistic aspect, to evaluate the optimization efficiency for agricultural machinery with a wide range of applications. The local optimum was determined by the expression of objective functions in terms of elementary functions, taking into account statistical parameters and the nature of the distribution of a random variable. The optimal transfer function was determined based on the minimum value of the standard deviation of the objective function taking into account the Fourier variables. The determination of the local optimum was carried out graphoanalytically by the objective function of smoothness and by the probabilistic criterion. The optimal value of the relative attenuation coefficient of vertical oscillations of the separator body was determined, the reason for its minimization and the probability of exceeding the permissible vibration level were established. A method for determining the transfer function to predict the smoothness of the combine is presented. The possibilities of the proposed optimization method are estimated.

*Keywords:* dispersion, spectral density, transfer function, linear programming, target function, probability, coefficient of variation, quantile of distribution.

## Введение

На динамические характеристики машины влияют многочисленные факторы: навесное оборудование [1, 2]; рабочие органы [3–5]; конструкция ходовой части [6–10]; микрорельеф агрофона [7–9]. Для таких динамических систем, как зерноуборочные комбайны, в качестве критерия используется целевая функция, характеризующая начальное и конечное состояние объекта. Если одному из показателей придать большую значимость, чем другим, то вводится коэффициент веса в соответствующих слагаемых [11–13].

В вариационном исчислении рассматриваются задачи в зависимости от вида функционала, который определяют для конкретного случая. Достоинство критерия в том, что он характеризует не только конечное состояние системы, но и процесс перехода от начального состояния к конечному. В ряде случаев критерий представляет собой простую математическую структуру, что облегчает задачу оптимизации [13].

Известные задачи Больца, Майера и Лангранжа при конкретных исследованиях имеют вид скалярных произведений принятого функционала на векторы, определяющие состояние системы в момент окончания процесса оптимизации [11].

В практике оптимизации встречаются задачи, в которых процесс достижения максимума функционала требует определение дополнительных ограничений. Если в системах, представленных для осуществления преобразований над входным детерминированным воздействием, применяется интегрированный критерий, то задача решается в детерминированном аспекте [12–14].

Решение задач в вероятностной постановке производится в том случае, когда функция является случайным процессом. Наиболее простой мерой точности в этом случае может быть среднеквадратическая ошибка. Примером использования метода оптимизации в детерминированном аспекте является оптими-

зация плавности хода жатки зерноуборочного комбайна. В качестве исходных параметров задается жесткость шин колес, подвески молотилки и торсиона жатки.

## Цель исследований

Разработать метод описания динамических характеристик мобильной машины в зависимости от различных условий эксплуатации и предложить эффективные пути их оптимизации.

## Материалы и методы

Для нахождения минимальных значений вертикальных реакций на башмаках жатки определена дисперсия колебаний жатки:

$$D_R = 2 \int_0^{\omega_{\max}} W_R(i\omega)^2 S_h(\omega), \quad (1)$$

где  $S_h(\omega)$  – спектральная плотность неровностей поверхности поля (определенная из экспериментов [1, 9, 14]);  $W_R(i\omega)$  – передаточная функция вертикальных реакций под башмаками жатки при возбуждении от поверхности неровности поля.

Для определения максимума выражения (1) использовалось линейное программирование в среде MathCAD [15]. С помощью табл. 1 были определены начальные приближения исходных параметров. Это позволило получить функцию цели:

$$L = \sum_{j=1}^6 D_R(c_1, c_2, c_3, k_1, k_2, k_3) \Rightarrow \min. \quad (2)$$

С помощью решаемого блока были определены значения параметров (по программе Minimize), при помощи которых нашли исходные значения ( $c_1, c_2, c_3, k_1, k_2, k_3$ ), при которых функция цели получила минимальные значения. В решающем блоке определены также все ограничения согласно табл. 1.

Представленные материалы позволили заключить, что частотные характеристики башмаков зависят не только от параметров жатки, но и от вертикальных и продольно-угловых колебаний молотилки.

Таблица 1

Исходные параметры при составлении функции цели

Суммарная радиальная жесткость шин, $\text{Нм}^{-1} \cdot 10^3$	Коэффициент сопротивления колебаний, $\text{Нсм}^{-1} \cdot 10^3$
$c_1 = 2,3$	$k_1 = 1,0$
$c_2 = 1,2$	$k_2 = 1,0$
Приведенная жесткость торсиона $c_3 = 1,0$	$k_3 = 0,5$

## Оптимизированные параметры

Суммарная радиальная жесткость шин, Нм <sup>-1</sup> ·10 <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления колебаний Нсм <sup>-1</sup> ·10 <sup>3</sup>
$c_1 = 2,27$	$k_1 = 1,45$
$c_2 = 1,44$	$k_2 = 1,43$
Приведенная жесткость торсиона $c_3 = 0,96$	$k_3 = 0,45$

Параметры системы представлены в табл. 2. С помощью программы Minimize получено поле оптимизации. Из таблицы 2 видно, что примененные параметры близки к оптимальным.

Зависимость рассеивания колебательных параметров машин от внешних воздействий целесообразно, в вероятностном аспекте, оценивать критериями оптимальности. Опишем критерий оптимальности минимумом вероятности  $P$ :

$$P\{D_R > [D_R]\} = \min; P\{D_{\dot{z}} > [D_{\dot{z}}]\} = \min, \quad (3)$$

где  $D_R = \sum \sigma_{Ri}^2$  – дисперсия нагрузки на башмаках жатки;  $D_{\dot{z}} = \sum \bar{z}_i^2$  – целевая функция плавности хода, или дисперсия ускорений колебаний корпуса молотилки комбайна;  $[D_R], [D_{\dot{z}}]$  – допускаемые значения целевых функций.

Для оптимизации колебательных параметров комбайна необходимо задаться такими параметрами, при которых квантиль нормального распределения был бы максимальным ( $u_p = \max$ ) [11]. Вероятность  $P$ , соответствующую максимальному квантилю  $u_p$ ,  $P(u_p = \max)$ , можно представить в виде:  $1 - P(u_p = \max) = \min$ . По вероятности  $1 - P(u_p = \max)$ , с учетом рассеивания динамических характеристик при различных режимах эксплуатации, можно оценить эффективность оптимизации для сельскохозяйственных машин широкого спектра применения.

С учетом выше сказанного справедливо следующее условие:

$$P\{D_{\dot{z}} > [D_{\dot{z}}]\} = \min. \quad (4)$$

Считаем, что целевые функции независимы. Для принятых условий обобщенный критерий эффективности оптимизации ходовой системы комбайна представим выражением:

$$u_p = \frac{1}{V_R} \left\{ \frac{D_P}{\bar{D}_R} - 1 \right\} + \frac{1}{V_{\dot{z}}} \left\{ \frac{D_{\dot{z}}}{\bar{D}_{\dot{z}}} - 1 \right\} = \max, \quad (5)$$

здесь  $\bar{D}_R, \bar{D}_{\dot{z}}$  – математические ожидания рассеивания целевых функций;  $V_R, V_{\dot{z}}$  – коэффициенты вариации независимых целевых функций.

Условие обобщенного критерия оптимальности запишем в следующем виде:

$$P\{D_R > [D_R]; D_{\dot{z}} > [D_{\dot{z}}]\} = \min. \quad (6)$$

Для определения локального оптимума введем элементарную случайную функцию. Выразим целевую функцию плавности хода как элементарную случайную функцию:

$$D_{\dot{z}} = \bar{D}_{\dot{z}} \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\bar{D}_{\dot{z}}$  – математическое ожидание неслучайной целевой функции;  $\varepsilon$  – нормально распределенная случайная величина.

Среднее значение случайной величины  $\varepsilon = 1$ ; с учетом этого справедливо выражение:

$$\varepsilon = 1 + u_p \cdot V_{\dot{z}},$$

где  $V_{\dot{z}}$  – коэффициент вариации вертикальных ускорений корпуса молотилки.

Найдем оптимальную передаточную функцию  $\Phi(i\omega)$ , которая обеспечивает минимальные значения среднего квадрата отклонения:

$$\bar{\varepsilon}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [h(t) - q(t)]^2 dt, \quad (8)$$

где  $h(t)$  – требуемое изменение целевой функции  $D_{\dot{z}}$ ;  $q(t)$  – возможное изменение целевой функции  $D_{\dot{z}}$ .

Представим обобщенную координату  $Z_R(t)$  в следующем виде:

$$Z_R(S) = \Phi_{12}(S)q_1(S) + \Phi_{22}(S)q_2(S). \quad (9)$$

С учетом запаздывания возмущений формула (9) будет иметь вид:

$$Z_R(S) = \Phi_{12}(S)q(S) + \Phi_{22}(S)e^{-ST} \cdot q(S), \quad (10)$$

где  $T$  – запаздывание возмущений от управляемых колес.

Передаточная функция, обеспечивающая минимум квадрата ошибки, с учетом переменных по Фурье, имеет вид:

$$\Phi(i\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(i\omega)} \int_0^{\infty} e^{-i\omega T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_{hQ}(i\omega)}{\psi(i\omega)} e^{i\omega T} d\omega, \quad (11)$$

где  $S_{\eta Q}(i\omega)$  – взаимная спектральная плотность входного и требуемого выходного воздействия;  $\psi(i\omega)$  – вспомогательная функция.

Представленный метод определения передаточной функции использовался для прогнозирования плавности хода комбайна по его целевой функции плавности.

### Результаты и обсуждение

Характер целевой функции  $D_z$  для транспортного режима представлен на рис., а. По графику определим оптимальное значение относительного коэффициента затухания вертикальных колебаний корпуса молотилки  $\psi$ . Причина его минимизации – потери энергии колебаний в шинах ходовых колес машины. Значение оптимума  $\psi_{\text{опт}}$  показано на графике. Согласно санитарным нормам, ограничивающим вибрации на рабочем месте комбайнов, из условия  $\ddot{Z}_{\text{max}} \leq 0,2q$  зададимся  $[D_z] = 4 \frac{\text{M}^2}{\text{c}^4}$  и перейдем к вероятностному критерию  $1 - P(u_p = \text{max})$ . На рис., б изображены следующие зависимости: квантиль  $u_p$  (кривая 1); вероятность  $1 - P(u_p)$  (кривая 2). Анализ представленных графических зависимостей (рис., б) и оптимального значения коэффициента затухания вертикальных колебаний корпуса молотилки  $\psi_{\text{опт}}$  выявил, что превышение допустимого уровня вибраций имеет вероятность  $1 - p(u_p = \text{max}) = 0,38$ . Это указывает на то, что локальная оптимизация только по коэффициенту  $\psi$  не эффективна, так как при  $\psi = \psi_{\text{опт}}$  уже у 38 % машин действительная целевая функция  $D_z$  превысит допустимую  $[D_z]$ , что будет отвечать уже другому условию:  $\ddot{Z}_{\text{max}} > q$ .

Оптимальную передаточную функцию поддресоривания молотилки  $\ddot{Z}(t)$ , в зависимости

от допускаемых вертикальных ускорений рабочего места механизатора, можно получить из формулы (11):

$$\ddot{Z}(t) = Vq(t),$$

где  $V$  – коэффициент поддресоривания,  $V < 1$ .

### Выводы

Применение рассмотренных методов оптимизации в детерминированном аспекте:

- не позволяет решить вопрос оптимизации всего парка машин;
- позволяют оценить эффективность оптимизации и установить процент машин, которые имеют оптимальные колебательные параметры.

### Литература

1. Грошев Л.М., Партко С.А., Сиротенко А.Н. Влияние продольно-угловых колебаний молотилки зерноуборочного комбайна на плавность хода жатки // Вестник донского гос. техн. ун. 2017. Т. 17. № 2 (89). С. 131–135.
2. Жаров В.П. Динамика и моделирование транспортно-технологических машин для сельского хозяйства // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2011 Т. 11. № 9 (60). С. 1586–1589.
3. Антибас И.Р., Савостина Т.П., Саед Б.И. Влияние параметров молотильно-сепарирующего устройства на обмолот // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 17. № 2 (89). С. 108–115.
4. Вислоусова И.Н., Лесняк О.Н. Моделирование динамики механизма очистки зерноуборочного комбайна с учетом нелинейности системы // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сборник статей 10 международной научно-практической конференции 1–3 марта 2017 г., г. Ростов-на-Дону: в рамках 20-й международной агропромышлен-

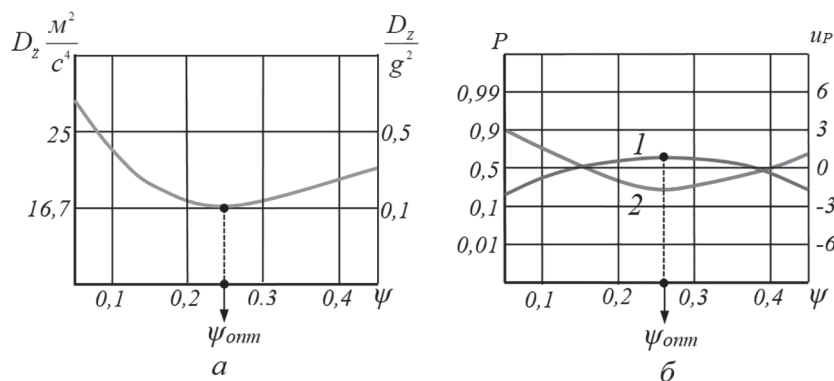


Рис. Определение локального оптимума: а) по целевой функции плавности хода; б) по вероятностному критерию

- ной выставки «Интерагромаш-2017»: Ростов н/Д, 2017. С. 61–65.
5. Вислоусова И.Н., Котов В.В., Михалев А.И. Определение характеристик внутренних силовых воздействий нелинейных динамических систем методом спектральных представлений // Сборник научных трудов научно-методической конференции, посвященной проблемам импортозамещения в АПК РФ (г. Ростов-на-Дону, г. Зерноград, п. Дивноморское, 11–17 сентября, 2016 г.). Ростов-на-Дону. Зерноград: СКНИИМЭСХ. 2016. С. 179 – 183.
  6. Troyanovskaya I., Ulanov A., Zhakov A., Voinash S. Friction Forces at the Wheel's Contact with the Ground in a Turning Vehicle // Tribology in Industry. Vol. 41. No. 2, pp. 166–171.
  7. Партко С.А. Оптимизация колебательных параметров ходовой системы уборочного комбайна // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2008. Т. 8. № 2 (37). С. 141–144.
  8. Партко С.А. О чувствительности к синхронизации и захватыванию колебаний привода колес и корпуса мобильных машин АПК // Современные технологии в машиностроении: сб. ст. XV международной научно-технической конференции. Пенза, 2011. С. 105–107.
  9. Сиротин П.В., Сапегин А.Г., Зленко С.В. Экспериментальная оценка плавности хода самоходного кормоуборочного комбайна // Труды НАМИ. 2017. № 4 (271). С. 67–74.
  10. Грошев Л.М., Партко С.А., Сиротенко А.Н., Дьяченко А.Г. Сравнение параметров разгона мобильной машины с механическим и гидромеханическим приводом // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф.: в рамках 16-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2013». Ростов-на-Дону, 2013. С. 74–76.
  11. Лурье А.В. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. М.: Колос, 1981. 382 с.
  12. Грошев Л.М., Партко С.А. Влияние вариации массово-геометрических и упруго-диссипативных характеристик мобильного агрегата на его динамическую нагруженность // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. статей 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». Ростов-на-Дону, 2017. С. 39–41.
  13. Грошев Л.М., Партко С.А., Сиротенко А.Н. Применение методов математического моделирования при исследовании динамики корпусов мобильных сельскохозяйственных машин // Научное обозрение. 2016. № 23. С. 92–95.
  14. Партко С.А., Грошев Л.М., Сиротенко А.Н., Войнаш С.А. Особенности спектров нагрузок на агрегаты мобильных машин АПК в полевых условиях при запаздывании внешних воздействий // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 2. С. 56–60.
  15. Грошев Л.М., Партко С.А., Луконин А.Ю. Расчет случайных колебаний корпуса зерноуборочного комбайна класса «Дон»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614015. № 2012611617; заявл. 07.03.2012; зарег. 28.04.2012.

## References

1. Groshev L.M., Partko S.A., Sirotenko A.N. The influence of longitudinal and angular oscillations of the separator of a combine harvester on the smoothness of the header. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-versiteta. 2017. Vol. 17. No 2 (89), pp. 131–135 (in Russ.).
2. ZHarov V.P. Dynamics and modeling of transport-technological machines for agriculture. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. Vol. 11. No 9(60), pp. 1586–1589 (in Russ.).
3. Antibas I.R., Savostina T.P., Saed B.I. The influence of the parameters of the separating device on threshing. Vest-nik Donskogo gos. tekhn. un-ta. 2017. Vol. 17. No 2 (89), pp. 108–115 (in Russ.).
4. Vislousova I.N., Lesnyak O.N. Modeling the dynamics of the cleaning mechanism of a combine harvester taking into account the nonlinearity of the system. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'sko-hozyajstvennogo mashi-nostroeniya: Sbornik statej 10 mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 1–3 marta 2017 g., g. Rostov-na-Donu. V ramkah 20-j mezhdunarodnoj agropromyshlennoj vystavki «Interagromash-2017» [State and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of the 10th International Scientific and Practical Conference, March 1-3, 2017, Rostov-on-Don. In the framework of the 20th international agricultural exhibition "Interagromash-2017".], Rostov n/D, 2017, pp. 61–65 (in Russ.).
5. Vislousova I.N., Kotov V.V., Mihalev A.I. Characterization of internal force effects of nonlinear dynamic systems by the method of spectral representations. Sbornik nauchnyh trudov nauchno-metodicheskoy konferencii, posvyash-chennoj problemam importozameshcheniya v APK RF (g. Rostov-na-Donu, g. Zernograd, p. Divnomor-

- skoe, 11–17 sentyabrya, 2016 g.) [The collection of scientific works of the scientific and methodical conference devoted to the problems of import substitution in the agro-industrial complex of the Russian Federation (Rostov-on-Don, Zerno-grad, Divnomorskoye, September 11–17, 2016)]. Rostov-na-Donu. Zernograd: SKNIIMESKH. 2016, pp. 179–183 (in Russ.).
6. I. Troyanovskaya, A. Ulanov, A. Zhakov, S. Voinash. Friction Forces at the Wheel's Contact with the Ground in a Turning Vehicle. *Tribology in Industry*. vol. 41, no. 2. pp. 166–171 (in Russ.).
  7. Partko S.A. Optimization of the vibrational parameters of the combine harvester undercarriage system. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. Vol. 8. No 2 (37), pp. 141–144 (in Russ.).
  8. Partko S.A. Sensitivity to synchronization and capturing of vibrations of the wheel drive and the housing of mobile agricultural machinery. *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii*. Sb. st. XV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy [Modern technologies in mechanical engineering. Collectin of articles of V International Scientific and Technical Conference]. Penza, 2011, pp. 105–107 (in Russ.).
  9. Sirotin P.V., Sapegin A.G., Zlenko S.V. Экспериментальная оценка плавности хода самоходного кормоубо-рочного комбайна. *Trudy NAMI*. 2017. No 4 (271), pp. 67–74 (in Russ.).
  10. Groshev L.M., Partko S.A., Sirotenko A.N., D'yachenko A.G. Comparison of acceleration parameters of a mobile vehicle with a mechanical and hydromechanical drive. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya: materialy 6-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., v ramkah 16-j Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2013»* [State and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of the 6th International Scientific and Practical Conference. In the framework of the 16th international agricultural exhibition "Interagromash-2013"]. Rostov-na-Donu, 2013, pp. 74–76 (in Russ.).
  11. Lur'e A.V. *Statisticheskaya dinamika sel'skohozyajstvennyh agregatov* [Statistical dynamics of agricultural aggregates]. Moscow: Kolos Publ., 1981. 382 p.
  12. Groshev L.M., Partko S.A. The effect of variations in mass-geometric and elastic-dissipative characteristics of a mobile unit on its dynamic loading. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya: sb. statej 10-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkah 20-j Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017»* [State and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of the 10th International Scientific and Practical Conference. In the framework of the 20th international agricultural exhibition "Interagromash-2017"]. Rostov-na-Donu, 2017, pp. 39–41 (in Russ.).
  13. Groshev L.M., Partko S.A., Sirotenko A.N. Application of mathematical modeling methods in the study of the dynamics of the bodies of mobile agricultural machinery. *Nauchnoe obozrenie*. 2016. No 23, pp. 92–95 (in Russ.).
  14. Partko S.A., Groshev L.M., Sirotenko A.N., Vojnash S.A. Features of the spectra of loads on the units of mobile agricultural machinery in the field under the delay of external influences. *Traktory i sel'hoz mashiny*. 2019. No 2, pp. 56–60 (in Russ.).
  15. Groshev L.M., Partko S.A., Lukonin A.YU. *Raschet sluchajnyh kolebanij korpusa zernouborochnogo kombajna klassa «Don»*. [Calculation of random vibrations of the body of the "Don" class combine harvester]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM*. No 2012614015. No 2012611617; zayavl. 7.03.2012; zareg. 28.04.2012.