

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ НАГРУЗОК НА АГРЕГАТЫ МОБИЛЬНЫХ МАШИН АПК В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ ЗАПАЗДЫВАНИИ ВНЕШНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ

FEATURES OF THE SPECTRA OF LOADS ON THE UNITS OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINES IN THE FIELD WHEN DELAY IN EXTERNAL INFLUENCES

С.А. ПАРТКО¹, к.т.н.
Л.М. ГРОШЕВ¹, д.т.н.
А.Н. СИРОТЕНКО¹, к.т.н.
С.А. ВОЙНАШ²

¹ ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Зерноград, Россия

² Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Рубцовск, Россия
parlana@rambler.ru

S.A. PARTKO¹, PhD in Engineering
L.M. GROSHEV¹, DSc in Engineering
A.N. SIROTENKO¹, PhD in Engineering
S.A. VOJNASH²

¹ Don State Technical University, Zernograd, Russia

² Rubtsovsk Industrial Institute (Branch) of Polzunov Altai State Technical University, Rubtsovsk, Russia, parlana@rambler.ru

Проблема выбора колебательных параметров мобильных зерноуборочных комбайнов приводит к разработке динамических моделей, обеспечивающих нормальное функционирование машин, а также к рассмотрению этих параметров в вероятностном аспекте и, следовательно, к оценке их рассеивания. Основным видом воздействий являются воздействия, создаваемые неровностью пути мобильной машины и изменением физико-механических характеристик почвы. Подобные задачи решаются с достаточной для практики точностью в линейной постановке.

В статье внешние воздействия в многомерных динамических системах представлены в матричной форме. Использование матриц спектральных плотностей при вычислении статистических характеристик при наличии взаимных связей приводит к необходимости вычислять элементы как главных, так и побочных диагоналей, что, в свою очередь, ведет к усложнению расчетов. Учет корреляционных связей между воздействиями определяет вид матрицы спектральных плотностей внешних воздействий. При вычислении статистических характеристик учет связей приводит к усложнению расчетов. Поэтому целесообразно матрицу внешних воздействий привести к диагональному виду, чтобы получить матрицы некоррелированных воздействий.

Проведенные расчеты спектральных плотностей и интенсивности колебаний для мобильных машин агропромышленного комплекса различными методами позволили установить, что одинаковые результаты получаются только для машин со слабыми функциональными связями при движении по микропрофилю поля, создающего некоррелированное внешнее воздействие. Даны рекомендации по практическому использованию расчетных формул.

Ключевые слова: матрица спектральных плотностей, некоррелированные внешние воздействия, обратная матрица, присоединенная матрица, запаздывание воздействий, параметры распределения нагрузок.

The problem of choosing the oscillatory parameters of mobile combine harvesters leads to the development of dynamic models that ensure the normal functioning of machines, as well as to consider these parameters in the probabilistic aspect and, consequently, to assess their dispersion. The main type of impact is the impact created by the unevenness of the path of the mobile machine and the change in the physical and mechanical characteristics of the soil. Such problems are solved with sufficient accuracy for practice in the linear formulation.

In the article, external influences in multidimensional dynamic systems are presented in matrix form. Matrix of spectral densities when calculation of statistical characteristics in the presence of mutual relationships lead to the need to calculate the elements of both the main and secondary diagonals, which leads to the complication of calculations. Calculation of correlations between impacts determines the form of the matrix of spectral densities of external influences. When calculating statistical characteristics, relations taken into account lead to a complication of calculations. Therefore, it is advisable to bring the matrix of external influences to a diagonal form in order to obtain matrices of uncorrelated influences.

The calculations of the spectral densities and vibrational intensities for mobile machines of the agro-industrial complex made it possible to establish that the same results are obtained only for vehicles with weak functional connections, when moving along a field micro profile creating an uncorrelated external influence. Recommendations on the practical use of calculation formulas are given.

Keywords: spectral density matrix, uncorrelated external effects, inverse matrix, adjoint matrix, delay effects, load sharing options.

Введение

При расчете динамических многомерных систем используется специальная программа [1] для ЭВМ для оценки колебаний машин агропромышленного комплекса. Программа применяется при расчете на плавность хода зерноуборочных комбайнов, расчете прочности деталей [2], оценке условий труда механизатора, выборе колебательных параметров [3, 4]. Она требует выбора динамической модели [5, 6] и конструктивных параметров машины и ее агрегатов, а также определения или назначения массово-геометрических и упруго-диссипативных характеристик системы [7].

Цель исследования

Анализ спектров нагрузок на агрегаты мобильных машин АПК в полевых условиях при запаздывании внешних воздействий.

Методы и средства проведения исследований

В общем случае внешние воздействия на машину АПК рассматриваются в виде системы с « n » функциями $q_1(t) \dots q_n(t)$, которые являются процессами изменения микронеровностей пути или изменения твердости почвы.

Наиболее простое статистическое описание внешних воздействий представляется, если они допускают стохастические ортогональные представления:

$$q_i(t) = m[q_i(t)] + \int_{-\infty}^{\infty} Q_i(\omega) \cdot \varphi_i(t, \omega) d\omega,$$

где $Q_i(\omega)$ – система случайных функций ω ; $\varphi_i(t, \omega)$ – система неслучайных функций t и параметра ω ; $m[q_i(t)]$ – математическое ожидание.

В дальнейшем полагаем, что $m[q_i(t)] = 0$.

Мобильные машины АПК в большинстве случаев – это системы с запаздыванием воздействий. Воздействия, характеризующие неровности микрорельефа поля или твердости почвы, являются однотипными и могут быть сдвинуты во времени t_0 . Кроме того, на образование корреляционных связей между воздействиями (угол поперечного наклона ψ и высота h) влияет конструкция машины (передний или задний ведущие колеса). С учетом этого матрица спектральных плотностей внешних воздействий представляется в виде [8]:

$$S_q(\omega, j\omega) = \begin{pmatrix} S_h(\omega) & S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} & c_{13}S_{h\psi}(j\omega) \\ S_h(\omega)e^{j\omega t_0} & S_h(\omega) & c_{23}S_{h\psi}(j\omega) \\ c_{31}S_{\psi h}(j\omega) & c_{32}S_{\psi h}(j\omega) & S_\psi(\omega) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $c_{13} = t$; $c_{23} = e^{-j\omega t_0}$; $c_{31} = 1$; $c_{32} = e^{j\omega t_0}$ – для машин с передними ведущими колесами, $c_{13} = e^{-j\omega t_0}$; $c_{22} = 1$; $c_{31} = e^{j\omega t_0}$; $c_{32} = 1$ – для машин с задними ведущими колесами.

Поскольку при вычислении статистических характеристик наличие взаимных связей приводит к усложнению расчетов, приведем матрицы к диагональному виду, чтобы получить матрицы некоррелированных внешних воздействий. Характеристическая матрица типа

$$S_q(\omega, j\omega) - \lambda(j\omega) \cdot E,$$

где λ – характеристическая функция; E – единичная матрица.

Матрица (1) приводится к виду:

$$S_q(\omega, j\omega) - \lambda(j\omega) \cdot E = \begin{pmatrix} S_h(\omega) - \lambda(j\omega) & S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} & c_{13}S_{h\psi}(j\omega) \\ S_h(\omega)e^{j\omega t_0} & S_h(\omega) - \lambda(j\omega) & c_{23}S_{h\psi}(j\omega) \\ c_{31}S_{\psi h}(j\omega) & c_{32}S_{\psi h}(j\omega) & S_\psi(\omega) - \lambda(j\omega) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Характеристическое уравнение представляется как:

$$a\lambda^3(j\omega) + b\lambda^2(j\omega) + c\lambda(j\omega) + d = 0. \quad (3)$$

Характеристические функции $\lambda_1(j\omega)$, $\lambda_2(j\omega)$, $\lambda_3(j\omega)$ вычислялись при помощи формул Кардано [9].

Из решения уравнения (3) определялись координаты собственных векторов $\lambda_i(j\omega)$ при $I = 1, 2, 3$ производимых линейных произведений матрицы (2).

По координатам векторов были составлены матрицы перехода к новому базису:

$$T(j\omega) = \begin{pmatrix} \eta_{11} & \eta_{21} & \eta_{31} \\ \eta_{12} & \eta_{22} & \eta_{32} \\ \eta_{13} & \eta_{23} & \eta_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

и обратная матрица:

$$T^{-1}(j\omega) = \frac{\tilde{T}(j\omega)}{|T(j\omega)|}, \quad (5)$$

где $\tilde{T}(j\omega)$ – присоединенная матрица; $|T(j\omega)|$ – определитель матрицы.

Искомая матрица была определена как:

$$S_d(j\omega) = T^{-1}(j\omega) \cdot S_q(\omega, j\omega) \cdot T(j\omega) = \text{diag} \| S_1(j\omega) \cdot S_2(j\omega) \cdot S_3(j\omega) \|, \quad (6)$$

где S_1, S_2, S_3 – спектральные плотности некоррелированных воздействий, являющиеся функциями комплексного переменного.

Решение плоской задачи нахождения диагональной матрицы (6) упрощается. При этом внешние воздействия, не приведенные к диагональному виду, имеют вид:

$$S_q(\omega, j\omega) = \begin{vmatrix} S_h(\omega) & S_h(\omega)e^{-i\omega t_0} \\ S_h(\omega)e^{i\omega t_0} & S_h(\omega) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

тогда характеристическая матрица равна:

$$S_q(\omega, j\omega) - \lambda(\omega) \cdot E = \begin{vmatrix} S_h(\omega) - \lambda(\omega) & S_h(\omega)e^{-i\omega t_0} \\ S_h(\omega)e^{i\omega t_0} & S_h(\omega) - \lambda(\omega) \end{vmatrix}, \quad (8)$$

а характеристическое уравнение:

$$\lambda^2(\omega) - 2S_h(\omega) \cdot \lambda = 0, \quad (9)$$

откуда корни $\lambda_1(\omega) = 0, \lambda_2(\omega) = 2S_h(\omega)$.

А система уравнений для определения координат собственных векторов при $\lambda_1(\omega) = 0$ имеет вид:

$$S_h(\omega)\eta_{11}(j\omega) + S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} \cdot \eta_{12}(j\omega) = 0. \quad (10)$$

Задавшись $\eta_{11} = e^{-j\omega t_0}$, находим $\eta_{12}(j\omega) = 1$.

При $\lambda_2(\omega) = 2S_h(\omega)$ рассмотренная система равна:

$$\begin{cases} -S_h(\omega) \cdot \eta_{21}(j\omega) + S_h(\omega)e^{-j\omega t_0} \cdot \eta_{22}(j\omega) = 0 \\ S_h(\omega)e^{j\omega t_0} \cdot \eta_{21}(j\omega) + S_h(\omega) \cdot \eta_{22}(j\omega) = 0, \end{cases} \quad (11)$$

а матрица перехода к новому базису имеет вид:

$$T_1(j\omega) = \begin{vmatrix} e^{-j\omega t_0} & e^{j\omega t_0} \\ -1 & e^{2j\omega t_0} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Из выражения (8) было найдено:

$$S_1(j\omega) = S_h(\omega) \cdot (1 + e^{-j\omega t_0}) = 0,$$

$$S_2(j\omega) = S_h(\omega) \cdot (1 + e^{j\omega t_0}) = 0. \quad (13)$$

Если предположить, что продольный и поперечный микропрофиль являются некоррелированными случайными процессами, то можно представить третий элемент диагональной матрицы как $S_\omega(\omega)$.

Тогда матрица (13) имеет вид:

$$S_d(j\omega) = \text{diag} \left\| S_h(\omega) \cdot (1 + e^{-j\omega t_0}); S_h(\omega) \cdot (1 + e^{j\omega t_0}); S_\omega(\omega) \right\|. \quad (14)$$

При вычислении спектральных плотностей колебаний были использованы матрицы (1), (14), а также формулы, не учитывающие корреляционные связи между воздействиями:

$$S_z(\omega) = S_h(\omega) [\Phi_{11}^2(\omega) + \Phi_{12}^2(\omega)] = 0. \quad (15)$$

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены графики спектральных плотностей вертикальных ускорений передней части молотилки зернокомбайна «Нива», из которых установлено, что ширина спектра зависит от динамических параметров машины. У зернокомбайнов, имеющих близкие частоты собственных колебаний передней и задней части молотилки, спектры можно отнести к узкополосным (см. рис. 1). Кроме того, здесь сказывается запаздывание воздействий от ходовых и управляемых колес в виде появления периодических составляющих.

О результатах расчета различными методами можно судить также по рис. 2, где пред-

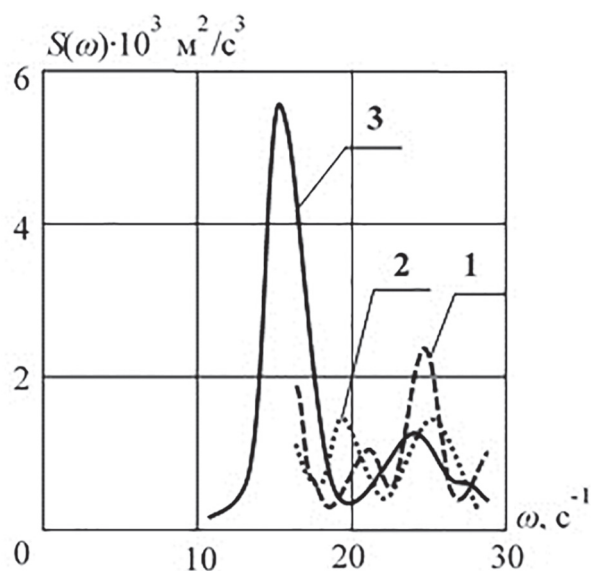


Рис. 1. Спектральные скорости колебаний при использовании по выражениям: 1 – (1), 2 – (6), 3 – (15)

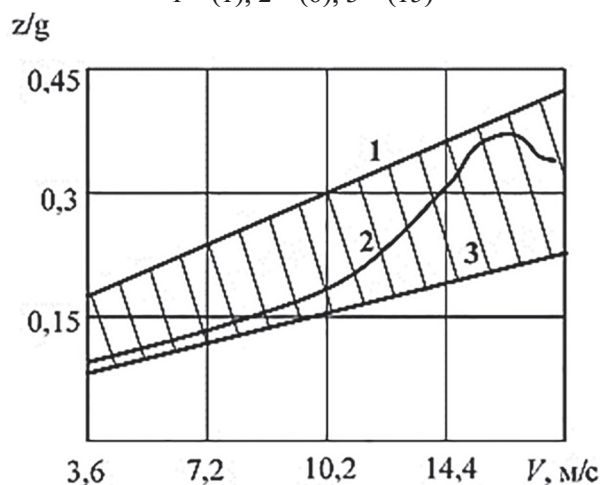


Рис. 2. Графики интенсивности колебаний при движении по микропрофилю с различным составом первностей: 1 и 3 – вдоль борозды; 2 – поперек борозды поля

ставлены графики интенсивности колебаний, вычисленные с использованием матриц (1), (6), (15). Из графиков видно, что результаты расчетов влияют на характер внешних воздействий и наличие функциональных связей в машине.

Одинаковые результаты при использовании различных методов расчетов получаются только для машин со слабыми функциональными связями при движении по микропрофилю поля, создающего некоррелированное внешнее воздействие.

Инженерные оценки динамики зернокомбайнов производилось путем вычисления дисперсий:

$$W_{ke} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{ke}(\omega) \cdot d\omega, \quad (16)$$

где ω_1, ω_2 – граничные частоты основной части спектра.

Результаты расчетов по формуле (16) представлены на рис. 3 также в виде графиков интенсивности колебаний.

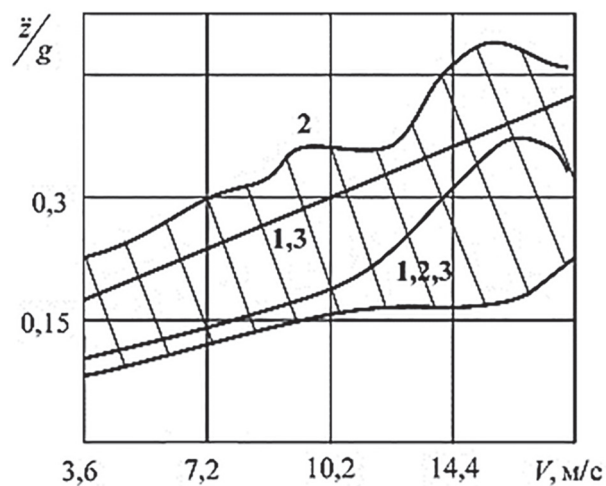


Рис. 3. Результаты расчета по формуле (16)

Среднеквадратические колебания представлены в виде графиков перегрузок $\frac{\ddot{z}}{g}$. Как видно, при движении машины по микропрофилям с различным спектральным составом неровностей интенсивность колебаний изменяется. В некоторых случаях существуют резонансные скорости движения при $V \approx 10-15$ м/с. Графики, представленные на рис. 2, 3, позволили также оценить рассеивание характеристик выходных переменных (нагрузок на агрегаты). На графиках заштрихованные области иллюстрируют рассеивание колебаний и позволяют оценить коэффициенты вариации $V(z)$. В таблице приводятся соответствующие параметры при средних скоростях движения машин.

Сравнение результатов расчетов по формулам (1), (6), (15) показано на рис. 2 и 3. Из графиков видно, что погрешность вычисления перегрузок зависит от динамических параметров машин и спектров воздействий.

Выводы

Для практических расчетов допустимо использование формул (1), (6), (15). Использование формулы (6) также допустимо, кроме случаев, когда расчеты ведутся для машин, движущихся по дорогам с низкочастотным спектральным составом неровностей, у машин с низким значением коэффициентов связи колебаний ходовой и управляемой части молотилки.

Литература

1. Расчет случайных колебаний корпуса зерноуборочного комбайна класса «Дон» / Грошев Л.М., Партко С.А., Луконин А.Ю.: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

Таблица

Параметры распределения нагрузок в агрегатах мобильных машин АПК

Тип машины	Агрофон	Скорость движения	$\frac{\ddot{z}}{g}$	V_z
СК – 5, «Нива»	стерня	0,83	0,35	0,06
	дорога	0,6	0,85	0,085
МТА Трактор К-700А, тележка 2 ПГС-4	стерня	3,8	0,45	0,095
	дорога	8,3	0,53	0,01
МТА Трактор Т-150А, комбайн ККУ-7В	стерня	1,2	0,35	0,015
	дорога	3,6	0,4	0,015
МТА Трактор Т-150А, плуг ПР-2,7	пашня	0,75	0,35	0,05

- № 2012614015 – № 2012611617; заявл. 07.03.2012; зарег. 28.04.2012.
- Грошев Л.М., Партко С.А., Дьяченко А.Г. Повышение работоспособности бортового редуктора комбайна серии «Дон» // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб.ст. VII Междунар. науч.-практ. конференции, в рамках 17-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2014». Ростов н/Д., 2014. С. 89–90.
 - Партко С.А. Оптимизация колебательных параметров ходовой системы уборочного комбайна // Вестник Донского государственного технического университета. 2008. Т. 8. № 2 (37). С. 141–144.
 - Грошев Л.М., Партко С.А., Сиротенко А.Н. Влияние продольно-угловых колебаний молотилки зерноуборочного комбайна на плавность хода жатки // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17. № 2 (89). С. 131–135.
 - Партко С.А. Разработка методики повышения работоспособности ходовой системы зерноуборочного комбайна за счет улучшения ее динамических свойств: дис. ... канд., техн. наук: 05.02.13. – машины, агрегаты и процессы (по отраслям АПК); ДГТУ. Ростов н/Д, 2012. 155 с.
 - 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.
 - 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.ст. X Междунар. юбилейной науч.-практ. конференции в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». Ростов н/Д., 2017. С. 39–41.
 - Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. 575 с.
 - Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
 - Groshev L.M., Partko S.A., D'yachenko A.G. Improving the performance of the onboard gearbox combine harvester of the «Don» series. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya: sb.st. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii, v ramkah 17-j Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2014» [State and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of VII International scientific and practical conference in the framework of 17th International Agroindustrial exhibition «Interagromash»]. Rostov n/D., 2014, pp. 89–90 (in Russ.).
 - Partko S.A. Optimization of vibrational parameters of undercarriage of harvester. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008. Vol. 8. No 2(37), pp. 141–144 (in Russ.).
 - Groshev L.M., Partko S.A., Sirotenko A.N. The influence of longitudinal – angular oscillations of the thresher of a combine harvester on the smoothness of header movement. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. Vol. 17. No 2 (89), pp. 131–135 (in Russ.).
 - Partko S.A. Razrabotka metodiki povysheniya rabotosposobnosti hodovoj sistemy zernouborochnogo kom-bajna za schet uluchsheniya ee dinamicheskikh svoystv: dis... kand., tekhn. nauk [Development of methods to improve the performance of the chassis of the combine harvester by improving its dynamic properties: Dissertation for degree of Ph.D. (Engineering)]: 05.02.13. – mashiny, agregaty i processy (po otraslyam APK), DGTU, Rostov n/D, 2012, 155 p.
 - Groshev L.M., Partko S.A., Sirotenko A.N. Application of methods of mathematical modeling in the study of the dynamics of bodies of mobile agricultural vehicles. Nauchnoe obozrenie. 2016. No 23, pp. 92–95 (in Russ.).
 - Groshev L.M., Partko S.A. The effect of variation of mass-geometric and elastic-dissipative characteristics of a mobile unit on its dynamic loading. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya: sb.st. X Mezhdunar. yubilejnoj nauch.-prakt. konferencii v ramkah 20-j Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017» [The state and prospects of development of agricultural engineering: Collection of articles of International jubilee scientific and practical conference in the framework of 20th International Agroindustrial exhibition «Interagromash»]. Rostov n/D., 2017, pp. 39–41 (in Russ.).
 - Kamke E.H. Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam [Handbook of ordinary differential equations]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 575 p.
 - Himmel'blau D. Analiz processov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods]. Moscow: Mir Publ., 1973. 957 p.

References

- Groshev L.M., Partko S.A., Lukonin A.YU. Raschet sluchajnyh kolebanij korpusa zernouborochnogo kombajna klassa «Don» [Calculation of random fluctuations in the case of a combine harvester of the «Don» class]. Svi-detel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVМ № 2012614015 – № 2012611617; zayavl. 7.03.2012 g.; zareg. 28.04.2012 g.