

УДК 631.371.06

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО АГРЕГАТА В РЕЖИМЕ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕЕЗДА

В.Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Мобильный сельскохозяйственный агрегат (МСХА), состоящий из универсального энергетического средства (УЭС) и агрегатируемой с ним рабочей машины, регулярно работает в режиме транспортного переезда.

Основным источником низкочастотных колебаний МСХА в этом случае являются неровности опорной поверхности – сельскохозяйственного фона, имеющие случайный характер. При этом профиль поля или грунтовой дороги определяется микропрофилем поверхности, индуцирующим колебания колесных движителей. Вибрация колес передается на корпус УЭС и другие элементы МСХА, что нарушает агротехнические требования, предъявляемые к технологическому процессу, и отрицательно влияет как на водителя, так и на надежность работы узлов и агрегатов МСХА.

Изменение микропрофиля представляется стационарным случайным процессом [1, 2], основными характеристиками которого являются: корреляционная функция, спектральная плотность и максимальная высота неровностей. Корреляционная функция – $R_q(\tau)$ характеризует структуру случайной функции неровности и для неё чаще всего выбираются аппроксимирующие выражения вида [2]:

$$R_q(\tau) = e^{-\alpha_2(\tau)} \cdot \cos \beta\tau, \quad (1)$$

$$R_h(\tau) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1(\tau)} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2(\tau)} \cdot \cos \beta\tau, \quad (2)$$

где α_1, α_2 и β – коэффициенты, характеризующие соответственно затухание и периодичность функции; A_1, A_2 – коэффициенты, характеризующие доли экспоненциальной и периодической составляющих, соответственно.

Числовые значения α и β зависят от типа с/х фона и скорости движения МСХА [1], поэтому для произвольной скорости они определяются по значениям, полученным из таблицы с/х фонов, составленной для скорости $V = 1$ м/с, используя следующие соотношения:

$$\alpha_{V_i} = \alpha_{V=1} \cdot V_i, \quad \beta_{V_i} = \beta_{V=1} \cdot V_i. \quad (3)$$

Параметры сельскохозяйственных фонов

Вид сельскохозяйственного фона	$\sigma_q, \text{мм}$	A_1	A_2	$\alpha_1, 1/\text{с}$	$\alpha_2, 1/\text{с}$	$\beta, 1/\text{с}$
--------------------------------	-----------------------	-------	-------	------------------------	------------------------	---------------------

Стерня пшеницы	24	–	1,0	–	0,42	0,29
Стерня кукурузы	32,2	0,7	0,3	0,25	0,60	1,57
Грунтовая дорога	21,2	–	1,0	–	0,58	0,63
Пропашное поле	21,5	–	1,0	–	0,57	0,59
Залежь	51,8	1,0	–	1,3	–	–

Применяя приведенные выражения (1), (2), (3) к типичным для УЭС с/х фонам (различные виды стерни, грунтовая дорога, залежь) и условиям работы (средние скорости и время работы), был рассчитан среднестатистический фон. Его корреляционная функция с достаточной для инженерных расчетов точностью характеризует внешние воздействия со стороны опорной поверхности на МСХА, состоящий из УЭС и навесного уборочного комбайна. В результате были определены нормированные корреляционные функции $R_2(\tau)$ – $R_5(\tau)$ для микропрофиля опорной поверхности, соответствующие движению МСХА с постоянной скоростью от 2 до 5 м/с, которые представлены на рис. 1.

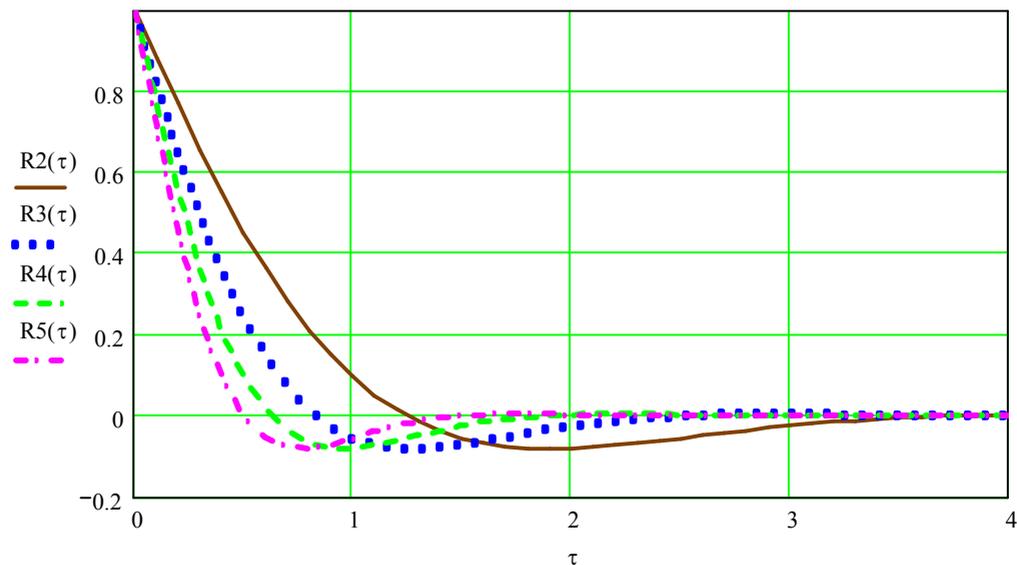


Рис. 1. Корреляционные функции неровностей среднестатистического агрофона для мобильного с/х агрегата

Спектральная плотность – наиболее полная характеристика возмущений, действующих на МСХА со стороны опорной поверхности, позволяет определить и другие числовые статистические характеристики. Например, применив прямое преобразование Фурье для корреляционной функции (1), получим соответствующую ей спектральную плотность:

$$S_q(\omega) = \sigma_q^2 \frac{2\alpha(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{[\omega^2 - (\alpha^2 + \beta^2)]^2 + 4\alpha^2\omega^2}, \quad (4)$$

где σ_q , ω – соответственно среднеквадратичная высота и частота колебаний неровностей поля.

На рис. 2 приведена спектральная плотность ординат микропрофиля, характеризующая распределение среднеквадратичных высот по частотам колебаний неровностей опорной поверхности, для скорости движения МСХА равной 2 м/с.

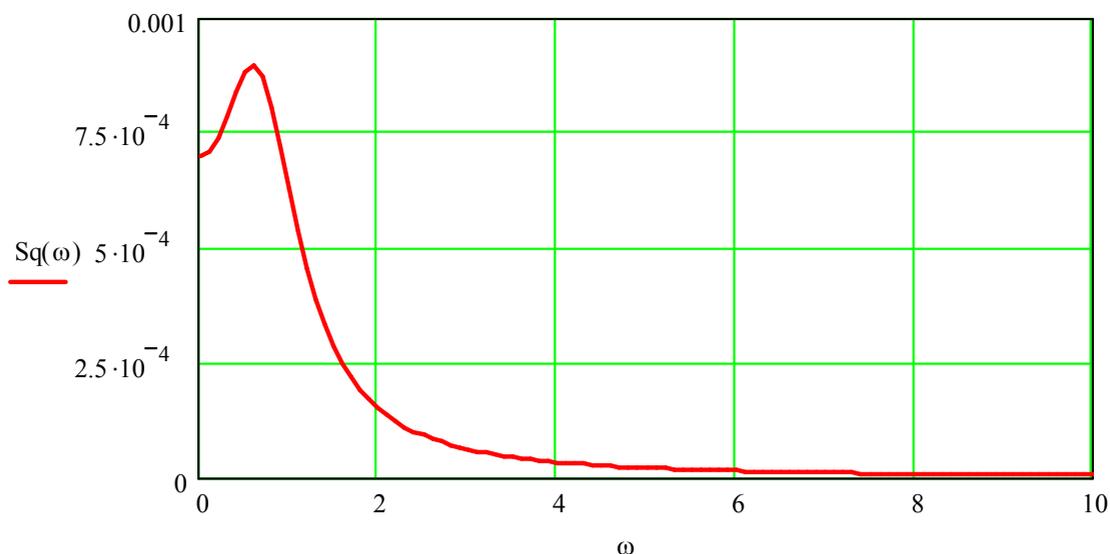


Рис. 2. Спектральная плотность микропрофиля опорной поверхности

Спектральная плотность ускорения, представляющая собой вторую производную от спектральной плотности ординат микропрофиля [2], связана с ней выражением

$$S_{\ddot{q}}(\omega) = \omega^4 S_q(\omega), \quad (5)$$

где $S_{\ddot{q}}(\omega)$ – спектральная плотность ускорения неровностей.

Распределение ординат микропрофиля подчиняется нормальному закону [1, 3], из чего следует известная зависимость («правило трех сигм») для максимальной высоты неровностей:

$$q_{\max} \approx 3\sigma_q. \quad (6)$$

На рис. 3 представлена расчетная (динамическая) схема функциональной математической модели (ФММ), имитирующей динамику транспортного переезда МСХА. Она сформирована на основе метода сосредоточенных масс [2] и включает массу МСХА (m), его момент инерции (J), а также упругие (c_1, c_2) и демпфирующие элементы k_1, k_2 , воспринимающие и смягчающие толчки со стороны с/х фона (q_1, q_2).

В процессе формирования ФММ транспортного переезда МСХА были приняты следующие ограничения: возникающие в шинах УЭС упругие и диссипативные силы пропорциональны изменению характеристик неровности (q, \dot{q}); крутильные колебания трансмиссии и сидения водителя не влияют на колебания рамы; влияние навесной машины учитывается изменением положения центра тяжести МСХА; в движении колеса сохраняют точечный, но постоянный контакт с опорной поверхностью [3].

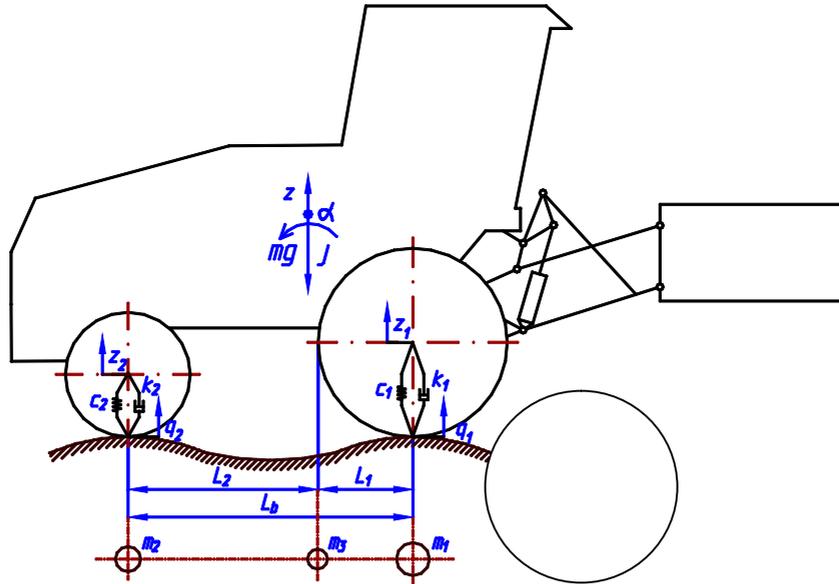


Рис. 3. Схема динамической модели МСХА в режиме транспортного переезда

Эквивалентная динамической схеме ФММ описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, сформированным на основе уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\ddot{z} + 2h \cdot \dot{z} + \omega_c^2 \cdot z = 2h \cdot \dot{q} + \omega_c^2 \cdot q, \quad (7)$$

где z – вертикальное перемещение центра тяжести МСХА; q, \dot{q} – характеристики неровности опорной поверхности; ω_c – частота собственных колебаний корпуса; h – коэффициент демпфирования.

В общем случае колебания задней и передней частей корпуса УЭС при $\varepsilon \neq 1$ (ε – коэффициент распределения подрессоренных масс) связаны между собой [1], [3] и масса МСХА распределяется на три составляющие – m_1, m_2, m_3 . Однако, в случаях, когда $0,8 \leq \varepsilon \leq 1,2$ [2], колебания передней и задней частей корпуса УЭС можно рассматривать как практически несвязанные.

В этом случае преобразованные по Лапласу при нулевых начальных условиях уравнения для передней и задней частей корпуса УЭС принимают вид:

$$(S^2 + 2h_1 \cdot S + \omega_{c1}^2) Z_1(S) = (2h_1 \cdot S + \omega_{c1}^2) Q(S); \quad (8)$$

$$(S^2 + 2h_2 \cdot S + \omega_{c2}^2) Z_2(S) = (2h_2 \cdot S + \omega_{c2}^2) Q(S) e^{-t_0 \cdot S}, \quad (9)$$

где t_0 – время переезда колесами переднего моста расстояния равного базе – L_b УЭС.

Из приведенных выражений (7), (8), (9) определяются передаточные функции – $W_z(S)$, $W_{z1}(S)$ и $W_{z2}(S)$ и соответствующие им амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) – $|W_z(j\omega)|$, $|W_{z1}(j\omega)|$, $|W_{z2}(j\omega)|$ для МСХА, а также передней и задней частей корпуса УЭС [1].

Посредством АЧХ [2] связываются спектральные плотности характеристик неровностей с/х фона и параметры вибрации корпуса УЭС:

$$S_z(\omega) = |W_z(j\omega)|^2 S_q(\omega); \quad (10)$$

$$S_{\ddot{z}}(\omega) = |W_{\ddot{z}}(j\omega)|^2 S_{\dot{q}}(\omega), \quad (11)$$

где $S_q(\omega), S_{\dot{q}}(\omega)$ – спектральные плотности характеристик неровностей; $S_{\ddot{z}}(\omega), |W_{\ddot{z}}(j\omega)|$ – спектральная плотность и АЧХ ускорений неровностей [1], соответственно.

На рис. 4 представлена спектральная плотность амплитуд вертикальных перемещений центра тяжести МСХА, имеющая выраженный максимум до 11,4 мм на частоте 8,9 рад/с.

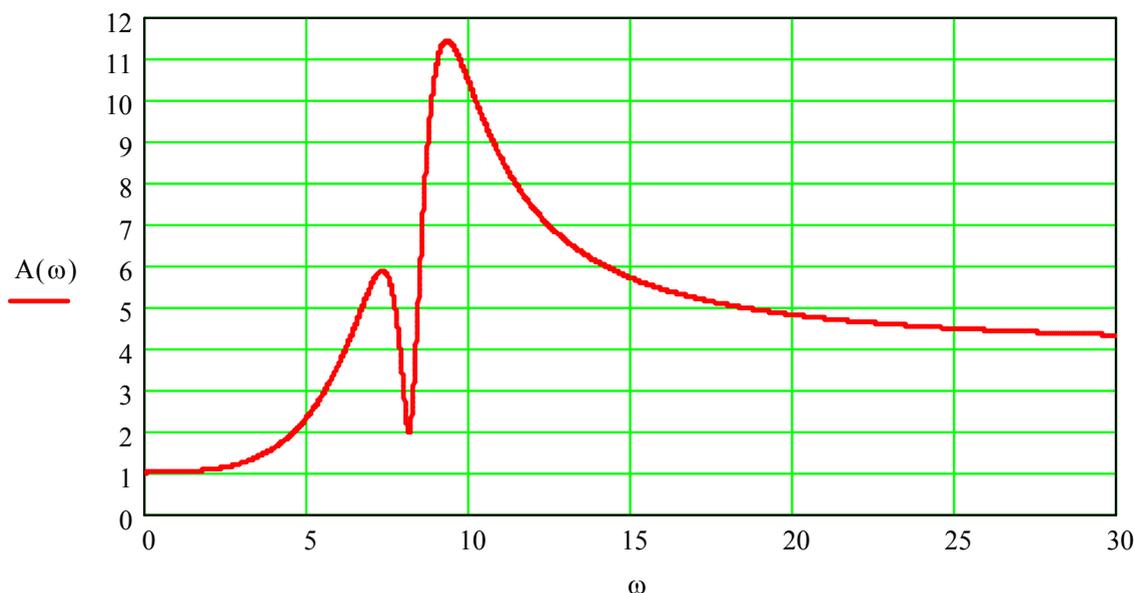


Рис. 4. Спектральная плотность амплитуд вертикальных перемещений МСХА

Дисперсии вертикальных перемещений и ускорений центра тяжести МСХА определяются по известным из [1], [2] выражениям:

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega, \quad \sigma_{\ddot{z}}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\ddot{z}}(\omega) d\omega. \quad (12)$$

Сравнение результатов расчета параметров вибраций МСХА по математической модели с записью его колебаний, полученной на комплексном стенде в РКУП ГСКБ ПО «Гомсельмаш», подтвердило адекватность сформированной модели.

Рассмотренная функциональная математическая модель транспортного переезда МСХА может быть использована для имитации равномерного движения агрегата и определения параметров вибрации колесных тракторов и агрегируемых с ними с/х орудий.

Литература

1. Гуськов, В.В. Тракторы. Часть II. Теория /В.В. Гуськов. – Мн.: Вышэйш. шк., 1977. – 384 с.: ил.
2. Барский, И.Б. Динамика трактора /И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель» /под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.: ил.

Получено 16.10.2004 г.