

**ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОБИЛЬНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО АГРЕГАТА
НА ЕГО УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАГРУЖЕННОСТЬ ЗВЕНЬЕВ МЕХАНИЗМА НАВЕСКИ**
*The Vibration Influence of the Mobile Agricultural Unit on its Steerability and on the Burden
of Linkage Mechanism*

Попов В.Б., к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой "Сельскохозяйственные машины", popov5@list.ru
Popov V.B.

Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого", Республика Беларусь
Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus

Реферат. В статье рассмотрено влияние колебаний остова УЭС290/450, как основного компонента МСХА, на звенья механизма навески, связывающего УЭС с навесным кормо-уборочным комбайном КНК-500 (FH50). Представлены расчетная схема и соответствующая ей функциональная математическая модель, причем последняя, будучи преобразована по Лапласу, обеспечивает возможность получения среднеквадратичных значений ускорений для характерных точек МСХА. Ускорение FH50 в процессе транспортного переезда по пересеченной местности колеблется около значения равного ускорению свободного падения. Его максимальные значения, возникающие при преодолении вероятных единичных неровностей на 12-58%, выше расчетных, полученных при подъеме КНК-500 из рабочего в транспортное положение. Силы инерции, догружающие FH50 и механизм навески, одновременно и регулярно воздействуют на мост управляемых колес, снижая уровень управляемости МСХА.

Summary. *The vibration influence of the framework of the multipurpose power device as a main component of the mobile agricultural unit on the sections of the linkage mechanism connecting the multipurpose power device 290/450 with the mounted forage harvester (FH50) is considered in the paper. The design diagram and the respective functional mathematical model are presented while the latter one being Laplace transformed provides the possibility of producing root-mean-square values of acceleration for characteristic points of the mobile agricultural device. The acceleration of FH50 during the transportation over the cross-country is variable relative to the value of free fall acceleration. Its maximum values occurring during passing probable single asperities are by 12-58 % higher than the calculated ones produced during the lifting of the FH50 from the operating to transport position. Inertia forces additionally loading FH50 and the linkage mechanism at the same time regularly act on the steering axle reducing the level of the mobile agricultural unit steerability.*

Ключевые слова: универсальное энергетическое средство, мобильный сельскохозяйственный агрегат, подъемно-навесное устройство, механизм навески, навесной кормоуборочный комбайн, ускорение свободного падения, управляемость

Key words: *multipurpose power device, mobile agricultural unit, lifting-and-attached device, linkage mechanism, mounted forage harvester, free fall acceleration, steerability.*

Введение. Основным источником низкочастотных колебаний универсального энергетического средства (УЭС) 290/450 [1], как и сформированного на его основе мобильного сельскохозяйственного агрегата (МСХА), являются неровности микропрофиля опорной поверхности, индуцирующие колебания колесных движителей УЭС [2]. При оценке уровня колебаний обычно учитывают вертикальные поступательные и продольные угловые колебания мобильного энергетического средства [2 - 6], оказывающие наибольшее влияние на плавность его хода.

Вибрация от колес УЭС 290/450 передается на его корпус и навесную машину – КНК-500 [7], что влечет за собой рост нагрузки на механизме навески (МН) подъемно-навесного устройства (ПНУ) с одной стороны и снижение уровня управляемости МСХА с другой. Неровности опорной поверхности носят главным образом случайный характер, регулярно воздействуя на колеса МСХА и формируя условия для нагружения корпуса УЭС и связанной с ним навесной машины.

Цель работы - оценка влияния колебаний КНК-500, возникающих в процессе транспортного переезда МСХА, на звенья механизма навески ПНУ УЭС 290/450 и управляемость МСХА при экстремальных внешних воздействиях.

Формализованное описание процесса колебаний При составлении расчетной схемы транс-

портного переезда МСХА были приняты следующие допущения:

- колебания МСХА рассматриваются в продольной вертикальной плоскости его движения.
- КНК-500 в транспортном положении считается жестко соединенной с корпусом УЭС 290/450, её влияние учитывается изменениями положения центра тяжести МСХА и момента инерции МСХА;
- возникающие в шинах УЭС 290/450 упругие и диссипативные силы пропорциональны изменению характеристик неровности (q, \dot{q}) опорной поверхности;
- колебания трансмиссии и сидения водителя не влияют на колебания УЭС 290/450, так как они малы;
- в движении колеса сохраняют точечный, но постоянный контакт с опорной поверхностью;
- колебания осей заднего и переднего мостов УЭС и МСХА считаются несвязанными.

С учетом принятых допущений схема динамической модели УЭС 290/450 с КНК-500 в транспортном положении представляет колебательную систему с двумя степенями свободы (рис. 1).

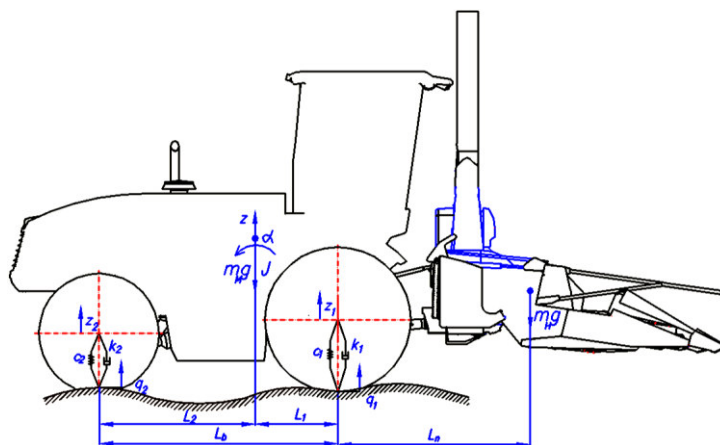


Рисунок 1 - Динамическая модель мобильного сельскохозяйственного агрегата в режиме транспортного переезда

Функциональная математическая модель (ФММ), имитирующая динамику транспортного переезда (рис. 1), формируется на основе уравнения Лагранжа II рода [2] и описывает вынужденные колебания МСХА. Она включает массу МСХА (m), его момент инерции (J), а также упругие (c_1, c_2) и демпфирующие элементы k_1, k_2 шин, воспринимающие толчки со стороны сельскохозяйственного фона (q_1, q_2).

Эквивалентная динамической схеме ФММ транспортного переезда в общем случае описывается дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами:

$$\ddot{z}_1 + 2h_1\dot{z}_1 + \omega_{c1}^2 z_1 = 2h_1\dot{q}_1 + \omega_{c1}^2 q_1; \quad (1)$$

$$\ddot{z}_2 + 2h_2\dot{z}_2 + \omega_{c2}^2 z_2 = 2h_2\dot{q}_2 + \omega_{c2}^2 q_2. \quad (2)$$

где z_i – вертикальные перемещения характерных точек МСХА; q, \dot{q} – характеристики неровности опорной поверхности; ω_{ci} – частоты собственных колебаний характерных точек корпуса УЭС; h_i – коэффициенты демпфирования.

Вертикальные колебания z_1 и z_2 сопровождаются соответствующими перемещениями центра тяжести навесной машины z_{S6} и центра крепления балласта $z_{гр}$.

Важным компоновочным параметром как УЭС, так и МСХА, в зависимости от которого выбирается его расчетная схема, является коэффициент распределения подрессоренных масс:

$$\varepsilon = \rho^2 / L_1 \cdot L_2, \quad \rho = \sqrt{J / M}.$$

где ρ – радиус инерции подрессоренного шинами корпуса УЭС и связанной с ним КНК-500; L_1, L_2 – расстояния от осей заднего и переднего мостов УЭС до центра тяжести МСХА; J, M – момент инерции и масса МСХА.

Если значение радиуса инерции находится в пределах $0.8 \leq \varepsilon \leq 1.2$, то колебания осей заднего и переднего мостов УЭС или МСХА можно считать несвязанными [2 - 6].

С учетом сделанных ранее допущений о пропорциональности упругих и диссипативных сил изменению характеристик неровности, можем исследовать их как линейные. В результате для определения параметров колебаний МСХА вместо интегрирования дифференциальных уравнений можно использовать аппарат передаточных функций [8].

Преобразованные по Лапласу при нулевых начальных условиях уравнения для независимых друг от друга передней и задней частей корпуса УЭС принимают вид:

$$(S^2 + 2h_1S + \omega_{c1}^2)Z_1(S) = (2h_1S + \omega_{c1}^2)Q_1(S); \quad (3)$$

$$(S^2 + 2h_2S + \omega_{c2}^2)Z_2(S) = (2h_2S + \omega_{c2}^2)Q_2(S). \quad (4)$$

Из приведенных выражений определяются соответствующие передаточные функции (ПФ) – $W_{z1}(S)$ и $W_{z2}(S)$. И в частности для заднего ведущего моста ПФ принимает вид:

$$W_{z1}(S) = \frac{2h_1S + \omega_{c1}^2}{S^2 + 2h_1S + \omega_{c1}^2} = \frac{b_1S + 1}{a_1^2S^2 + b_1S + 1}, \quad (7)$$

где $a_1 = 1/\omega_{c1}$; $b_1 = 2h_1/\omega_{c1}^2$.

ПФ для переднего ведущего моста имеет аналогичный структурный вид:

$$W_{z2}(S) = \frac{2h_2S + \omega_{c2}^2}{S^2 + 2h_2S + \omega_{c2}^2} = \frac{b_2S + 1}{a_2^2S^2 + b_2S + 1}. \quad (8)$$

Наиболее распространенным тестовым воздействием на динамические звенья является единичное ступенчатое воздействие. В качестве такового нами принята максимально вероятная высота неровностей – стерня кукурузы [2]:

$$q_{\max} \approx 3\sigma_q. \quad (9)$$

Из справочных данных для стерни кукурузы имеем $q_{\max} \approx 0,096$ м. На рис. 2 и 3 представлены нормированные переходные характеристики колебаний соответственно заднего и переднего мостов, как компонент собственно УЭС (сплошная линия) и МСХА (пунктир).

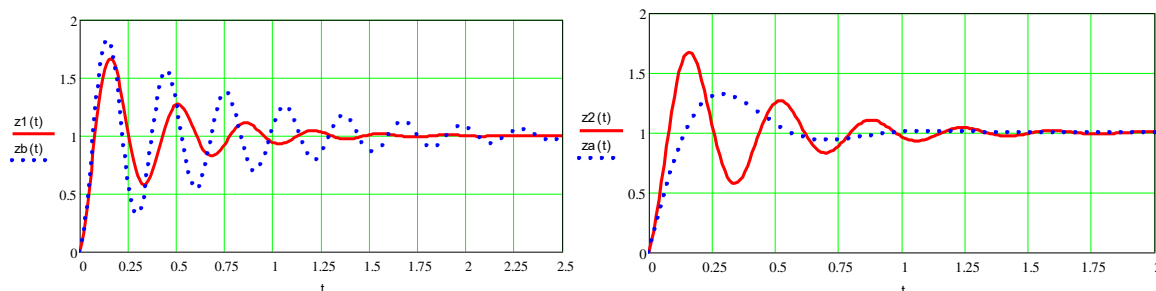


Рисунок 2

- (а) Нормированная переходная характеристика колебаний заднего моста УЭС-290/450 и МСХА
- (б) Нормированная переходная характеристика колебаний переднего моста УЭС-290/450 и МСХА

Для колебаний заднего моста переход от УЭС к МСХА сопровождается небольшим ростом перегуливания (на 10,45 %) и существенным ростом колебательности переходного процесса, что более чем в два раза увеличивает время регулирования.

Для колебаний переднего моста при переходе от УЭС к МСХА характерен обратный процесс – уменьшение перегуливания (на 26,6 %) и существенного демпфирования переходного процесса, что более чем в полтора раза сокращает время регулирования.

В реальности, как уже ранее отмечалось, источником низкочастотных колебаний МТА в основном являются неровности опорной поверхности - сельскохозяйственного фона (СХФ), имеющие случайный характер.

Характеристики вынужденных колебаний как УЭС, так и МСХА определяются сочетанием свойств динамической модели и закона изменения внешних воздействий. Такую комбинацию удобнее исследовать, если в качестве характеристики динамической модели принять ее амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а воздействие задавать спектральной плотностью случайной функции СХФ.

Таким образом, посредством АЧХ связываются спектральные плотности характеристик неровностей СХФ и параметры вибрации корпуса УЭС:

$$S_{z_1}(\omega) = A_{z_1}(\omega)^2 S_{q_1}(\omega); \quad S_{z_2}(\omega) = A_{z_2}(\omega)^2 S_{q_2}(\omega); \quad (10)$$

$$S_{\ddot{z}_1}(\omega) = A_{\ddot{z}_1}(\omega)^2 S_{\ddot{q}_1}(\omega); \quad S_{\ddot{z}_2}(\omega) = A_{\ddot{z}_2}(\omega)^2 S_{\ddot{q}_2}(\omega), \quad (11)$$

где $S_q(\omega), S_{\ddot{q}}(\omega)$ – спектральные плотности характеристик неровностей СХФ; $A_{z_1}(\omega), A_{z_2}(\omega)$ – АЧХ перемещений для заднего и переднего мостов от неровностей; $S_{z_1}(\omega), S_{z_2}(\omega)$ – спектральные плотности характеристик неровностей от заднего и переднего мостов, $A_{\ddot{z}_1}(\omega), A_{\ddot{z}_2}(\omega)$ – АЧХ ускорений от неровностей.

Из теории автоматического управления [8] известно, что АЧХ динамического звена равна модулю его передаточной функции, т.е.

$$A_{z_i}(\omega) = |W_{z_i}(j\omega)|; \quad A_{\ddot{z}_i}(\omega) = |W_{\ddot{z}_i}(j\omega)|,$$

Необходимо получить соответствующие АЧХ $|W_{z_i}(j\omega)|, |W_{\ddot{z}_i}(j\omega)|$ для передней и задней частей корпуса УЭС. В качестве примера выполним эту операцию для заднего моста и в выражении его передаточной функции (8) заменим S на $j\omega$.

$$W_{z_1}(j\omega) = \frac{b_1 j\omega + 1}{a_1^2 j^2 \omega^2 + b_1 j\omega + 1}. \quad (12)$$

Для определения АЧХ – $|W_{z_1}(j\omega)|$ необходимо выделить действительную и мнимую части в числителе и знаменателе правой части выражения (12), а затем избавиться от j в знаменателе полученной дробно-рациональной функции:

$$W_{z_1}(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega);$$

$$W_{z_1}(j\omega) = \frac{U_1 + jV_1}{U_2 + jV_2} \cdot \frac{(U_2 - jV_2)}{(U_2 - jV_2)} = \frac{U_1 U_2 + V_1 V_2}{U_2^2 + V_2^2} + j \frac{U_2 V_1 - U_1 V_2}{U_2^2 + V_2^2}.$$

Определим значения для компонент полученного выражения:

$$U_1(\omega) = 1; \quad V_1(\omega) = b_1 \omega;$$

$$U_2(\omega) = 1 - a_1^2 \omega^2; \quad V_2(\omega) = b_1 \omega;$$

$$U_1 U_2 = 1 - a_1^2 \omega^2; \quad V_1 V_2 = b_1^2 \omega^2;$$

$$U_2 V_1 = b_1 \omega - b_1 a_1^2 \omega^3 = b_1 \omega (1 - a_1^2 \omega^2); \quad U_1 V_2 = b_1 \omega;$$

$$U_2^2 = 1 - 2a_1^2 \omega^2 + a_1^4 \omega^4; \quad V_2^2 = b_1^2 \omega^2;$$

$$U(\omega) = \frac{U_1 U_2 + V_1 V_2}{U_2^2 + V_2^2} = \frac{1 - a_1^2 \omega^2 + b_1^2 \omega^2}{1 - 2a_1^2 \omega^2 + a_1^4 \omega^4 + b_1^2 \omega^2} = \frac{1 + (b_1^2 - a_1^2) \omega^2}{1 + (b_1^2 - 2a_1^2) \omega^2 + a_1^4 \omega^4};$$

$$V(\omega) = \frac{U_2 V_1 - U_1 V_2}{U_2^2 + V_2^2} = -\frac{a_1^2 \omega^3}{1 + (b_1^2 - 2a_1^2) \omega^2 + a_1^4 \omega^4}.$$

В результате определим модуль ПФ заднего ведущего моста, т. е. найдем его АЧХ:

$$|W_{z1}(j\omega)| = \sqrt{U(\omega)^2 + jV(\omega)^2};$$

$$A_{z1}(\omega) = |W_{z1}(j\omega)| = \sqrt{\left(\frac{1 + (b_1^2 - a_1^2) \omega^2}{1 + (b_1^2 - 2a_1^2) \omega^2 + a_1^4 \omega^4}\right)^2 + \left(\frac{a_1^2 \omega^3}{1 + (b_1^2 - 2a_1^2) \omega^2 + a_1^4 \omega^4}\right)^2}. \quad (13)$$

Модуль ПФ для переднего моста определяется аналогично. АЧХ колебаний заднего (сплошная) и переднего (пунктир) мостов УЭС-290/450 представлены на рисунке 3.

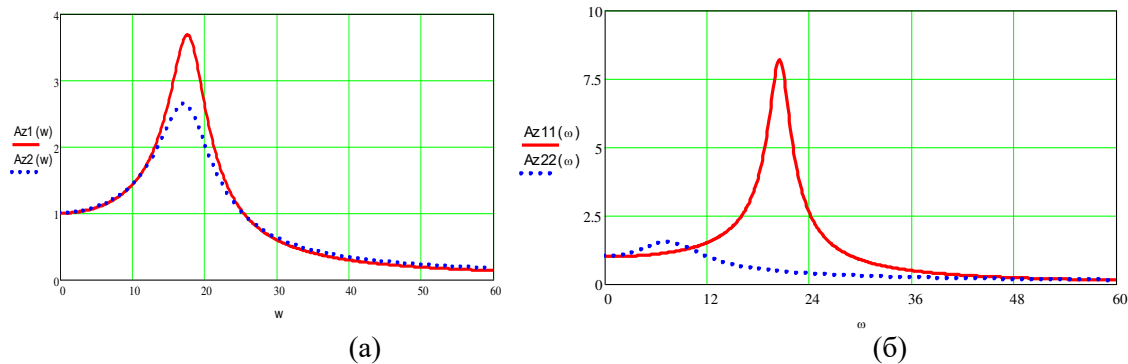


Рисунок 3 – (а) АЧХ колебаний (перемещений) заднего и переднего ведущих мостов УЭС-290/450
- (б) АЧХ колебаний (перемещений) заднего и переднего ведущих мостов МСХА

У сформированного из УЭС-290/450 и КНК-500 МСХА изменяются соотношения у части внутренних (массово-упругих) параметров. В конечном итоге это влечет за собой изменение значений коэффициентов в уравнениях (1) и (2), а, следовательно, и в передаточных функциях (7) и (8). Сравнение изменений, возникающих при переходе от УЭС к МСХА, свидетельствует о росте максимума АЧХ у заднего моста и его уменьшении у переднего, при этом частота собственных колебаний переднего моста существенно уменьшается, а заднего – немного увеличивается.

Все это согласуется с характером изменений, возникающих в соответствующих нормированных переходных характеристиках (см. рис. 2).

Модули передаточных функций $|W_{z1}(j\omega)|$, $|W_{z2}(j\omega)|$ ускорений находим, умножая соответствующие модули передаточных функций перемещений на ω^2 [2]. В результате получим АЧХ ускорений заднего и переднего мостов в составе УЭС и в составе МСХА, которые представлены на рисунке 4.

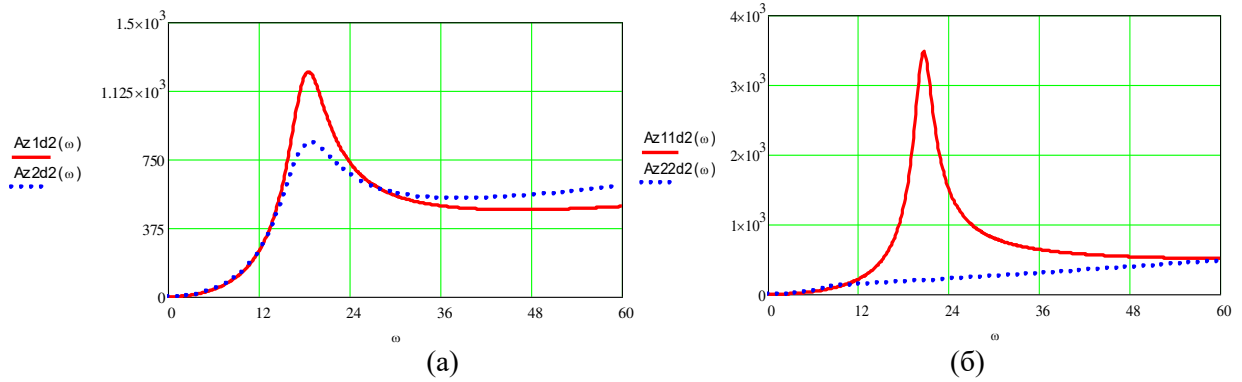


Рисунок 4 - (а) АЧХ колебаний (ускорений) заднего и переднего ведущих мостов УЭС-290/450
 - (б) АЧХ колебаний (ускорений) заднего и переднего ведущих мостов МСХА

Рассчитав спектральные плотности параметров колебаний заднего и переднего мостов УЭС по известным из [2] выражениям, можно определить дисперсии (и соответствующие среднеквадратичные отклонения) вертикальных перемещений для заднего и переднего мостов в составе УЭС и МСХА:

$$\sigma_{Zi}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{Zi}(\omega) d\omega, \quad (14)$$

где σ_{Zi} – среднеквадратичное вертикальное перемещение заднего (переднего) моста УЭС.

Дисперсии вертикальных ускорений характерных точек УЭС и МСХА по аналогии с (14) определяются по известному из [2] выражению

$$\sigma_{\ddot{z}_i}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\ddot{z}_i}(\omega) d\omega, \quad (15)$$

где $\sigma_{\ddot{z}_i}$ – среднеквадратичное ускорение характерной точки.

Среднеквадратичные вертикальные перемещения заднего и переднего мостов УЭС можно заменить среднеквадратичным вертикальным перемещением центра тяжести УЭС и его угловыми колебаниями относительно центра упругости в продольной плоскости. Центр тяжести у МСХА – S' смещен относительно центра тяжести УЭС – S (рис. 5), вертикальное расположение которого совпадает с общим для УЭС и МСХА центром упругости, поэтому:

$$z_0 = \frac{z_1 \cdot l_{22} + z_2 \cdot l_{11}}{L_6} \quad \alpha = (z_2 - z_1) / L_6.$$

Среднеквадратичные линейная скорость центра тяжести МСХА и угловая скорость его колебаний относительно центра упругости определяются как результат дифференцирования вышеприведенных выражений по независимой переменной t :

$$\dot{z}_0 = \frac{\dot{z}_1 \cdot l_{22} + \dot{z}_2 \cdot l_{11}}{L_6} \quad \dot{\alpha} = (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) / L_6. \quad (16)$$

Повторное дифференцирование по независимой переменной исходных параметров колебаний, описывающих плоское движение центра тяжести МСХА, дает нам выражения для его среднеквадратичных линейного и углового ускорений:

$$\ddot{z}_0 = \frac{\ddot{z}_1 \cdot l_{22} + \ddot{z}_2 \cdot l_{11}}{L_6} \quad \ddot{\alpha} = (\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1) / L_6. \quad (17)$$

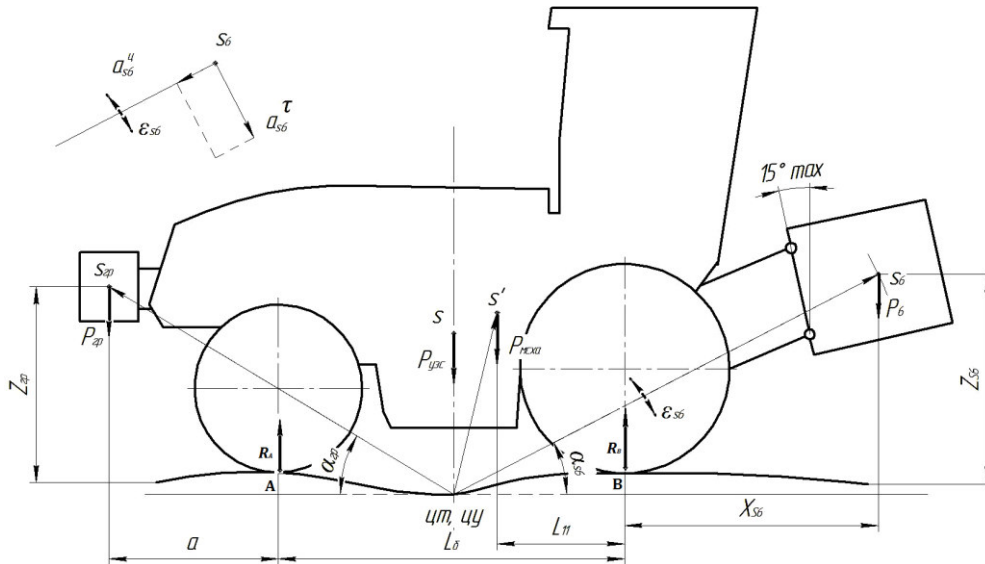


Рисунок 5 - Схема для определения параметров плоских колебаний характерных точек МСХА

Колебания мостов УЭС однозначно связаны с колебаниями его центра тяжести и центра тяжести МСХА и далее через механизм навески с колебаниями центра тяжести КНК-500 и грузов балласта (рис. 5). Таким образом, среднеквадратичные ускорения, совершающих плоское движение характерных точек МСХА, определяются по известному из теоретической механики [9] выражению

$$\ddot{z}_{Si} = \ddot{a}_{ц.т.} + \ddot{a}_{Si}^n + \ddot{a}_{Si}^{\tau}, \quad (18)$$

где $\ddot{a}_{ц.т.}$ – среднеквадратичное ускорение центра тяжести МСХА - \ddot{z}_0 ; \ddot{a}_{Si}^n , \ddot{a}_{Si}^{τ} – соответственно нормальное и тангенциальное среднеквадратичные ускорения соответствующей характерной точки.

Среднеквадратичные линейное и угловое ускорения центра тяжести МСХА определяются по выражениям (17). Нормальные и тангенциальные среднеквадратичные ускорения характерных точек определяются по известным из [9] выражениям:

$$\ddot{a}_{Si}^n = \dot{\alpha}_{Si}^2 L_{Si} \sin \beta_{Si}; \quad \ddot{a}_{Si}^{\tau} = \ddot{\alpha}_{Si} L_{Si} \sin \beta_{Si}, \quad (19)$$

где $\dot{\alpha}_{Si}$ и $\ddot{\alpha}_{Si}$ – соответственно среднеквадратичные угловые скорость и ускорения характерных точек; L_{Si} – расстояние от центра упругости до характерной точки; β_{Si} – угол, образуемый L_{Si} с горизонтом.

Соответственно среднеквадратичные угловые скорость и ускорение характерных точек определяются по выражениям:

$$\dot{\alpha}_{срп} = \dot{\alpha} \frac{L_{срп}}{L_{S'}}; \quad \dot{\alpha}_{S6} = \dot{\alpha} \frac{L_{S6}}{L_{S'}}; \quad \ddot{\alpha}_{срп} = \ddot{\alpha} \frac{L_{срп}}{L_{S'}}; \quad \ddot{\alpha}_{S6} = \ddot{\alpha} \frac{L_{S6}}{L_{S'}}.$$

В процессе движения МСХА в центрах тяжести КНК-500 и грузов балласта имеют место динамические нагрузки, которые определяют колебательный характер воздействий на звенья механизма навески с одной стороны и перераспределение нагрузки на передний управляемый и задний мосты УЭС с другой.

Для оценки влияния кинематического возбуждения со стороны опорной поверхности на динамику процесса транспортного переезда на базе сформированной ФММ был выполнен вычислительный эксперимент [10], результаты которого приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 - Результаты вычислительного эксперимента (параметры колебаний)

ТО	V [км/час]	σ_{z1} [см]	σ_{z2} [см]	σ_{z0} [см]	$\sigma_{z_{s6}}$ [м]	$\ddot{\sigma}_{z1}$ [м/с ²]	$\ddot{\sigma}_{z2}$ [м/с ²]	$\ddot{\sigma}_{z0}$ [м/с ²]	$\ddot{\alpha}_0$ [рад/с ²]	$\ddot{\alpha}_{s6}$ [рад/с ²]	\ddot{Z}_s/g [-]	\ddot{Z}_{tp}/g [-]	\ddot{Z}_{s6}/g [-]	ΔR [%]
УЭС	10,8	3,29	3,29	3,29	–	0,678	0,679	0,679	0	–	–	–	–	–
МСХА	10,8	3,24	3,86	3,38	3,381	0,663	0,839	0,703	0,0569	0,1523	0,072	0,105	0,117	27,41
УЭС	14,4	3,50	3,50	3,50	–	1,404	1,395	1,396	0,094	–	–	–	–	–
МСХА	14,4	3,39	4,12	3,56	3,564	1,281	1,035	1,225	0,0758	0,203	0,1249	0,131	0,186	28,02
УЭС	18,0	3,87	3,83	3,85	–	3,233	2,911	3,102	0	–	–	–	–	–
МСХА	18,0	3,64	4,10	3,75	3,751	2,582	1,053	2,232	0,446	1,194	0,2273	0,256	0,5821	14,19

Примечание. ТО – технический объект; V – скорость движения ТО; σ_{z1} , σ_{z2} , σ_{z0} , $\sigma_{z_{s6}}$ – среднеквадратичные вертикальные колебания (перемещения) соответственно заднего и переднего мостов УЭС, центров тяжести МСХА и навесной машины – КНК-500; α_0 , α_{s6} – продольные угловые колебания центров тяжести МСХА и КНК-500; $\ddot{\sigma}_{z1}$, $\ddot{\sigma}_{z2}$, $\ddot{\sigma}_{z0}$, $\ddot{\alpha}_{s6}$ – среднеквадратичные вертикальные ускорения заднего и переднего мостов УЭС, центров тяжести МСХА и КНК-500; \ddot{Z}_s/g , \ddot{Z}_{tp}/g , \ddot{Z}_{s6}/g – среднеквадратичные вертикальные ускорения характерных точек МСХА в долях от ускорения свободного падения; ΔR – управляемость УЭС и МСХА.

Таблица 2 - Результаты вычислительного эксперимента (колебания силовых параметров)

V [км/час]	$P_{МСХА}^{дин}$ [кН]	% от $P_{МСХА}^{стат}$	$R_A^{дин}$ [кН]	% от $R_A^{стат}$	$R_B^{дин}$ [кН]	% от $R_B^{стат}$	ΔR [%]	$P_{гр}^{дин}$ [кН]	% от $P_{гр}^{стат}$	$P_{УЭС}^{дин}$ [кН]	% от $P_{УЭС}^{стат}$	$P_6^{дин}$ [кН]	% от $P_6^{стат}$
0*	187,0	100	35,0	100	152,0	100	28	14,0	100	125,0	100	48,0	100
10,8 $Z_B \leq Z_A$	201,11	107,54	34,27	97,93	166,84	109,76	27,41	13,96	99,78	133,7	106,96	53,44	111,34
10,8 $Z_B \geq Z_A$	181,52	97,07	33,63	96,11	147,89	97,29	26,9	15,98	114,13	116,31	93,04	49,23	102,57
14,4 $Z_B \leq Z_A$	211,36	113,04	35,0	100	176,36	116,02	28,0	14,36	102,6	140,31	112,25	56,71	118,15
14,4 $Z_B \geq Z_A$	177,8	95,08	31,28	89,4	146,52	96,39	25,02	17,07	121,9	109,69	87,75	51,05	106,35
18,0 $Z_B \leq Z_A$	237,43	126,77	17,74	50,7	219,69	144,52	14,19	9,16	65,43	152,87	122,29	75,40	157,09
18,0 $Z_B \geq Z_A$	164,21	87,81	45,55	130,17	118,67	78,07	36,44	25,08	179,15	97,73	77,87	42,01	87,51

Примечание. 0* – в первой строке таблицы представлены выходные параметры для неподвижного МСХА (статика).

$P_{МСХА}^{дин}$ – вес (сила тяжести) МСХА; $R_A^{дин}$, $R_B^{дин}$ – силы реакции на движителях соответственно переднего и заднего мостов УЭС; $P_{гр}^{дин}$, $P_{УЭС}^{дин}$, $P_6^{дин}$ – силы тяжести, действующие в соответствующих характерных точках МСХА (центров тяжести балласта, УЭС, навесной машины); % от $P_{МСХА}^{стат}$ – доля динамического значения силового параметра в % от его значения в статике.

В табл. 2 представлены результаты расчета основных силовых параметров МСХА, отражающие размах их колебаний при движении с соответствующей установившейся скоростью.

Заключение. Из полученных результатов расчетов, выполненных на базе функциональной математической моделей транспортного переезда УЭС 290/450 и МСХА можно сделать следующие выводы:

1. Переход от УЭС 290/450 к МСХА, т. е. навеска КНК-500 и грузов балласта, сопровождается существенным перераспределением статической нагрузки (массы) на переднем и заднем мостах УЭС. При этом управляемость МСХА в статике равна 28 %, т. е. превышает нормативную (16 % от эксплуатационной массы) и запас по управляемости составляет 12 %.

2. Перераспределение массы по опорам при переходе от УЭС к МСХА изменяет частоты их собственных колебаний: так собственная частота колебаний заднего ведущего моста возрастает от 18,16 до 20,59 рад/с, а переднего ведущего моста уменьшается с 17,89 до 8,47 рад/с.

3. С возрастанием скорости транспортного переезда растет и амплитуда (размах) колебаний силовых параметров. На скорости 18 км/ч это влечет за собой возможность возникновения потери

управляемости МСХА, так как она может оказаться ниже нормы (14,19 %).

4. При транспортной скорости 18 км/ч нагрузка на звенья МН колеблется в диапазоне от 87,5 до 158 % от веса навесной машины, что необходимо учитывать в качестве весьма вероятных циклических нагрузок при выборе параметров звеньев МН.

5. Задний мост ведущих колес, воспринимающий в статике 152 кН, что составляет 81,28 % от веса МСХА, остается наиболее уязвимым и в динамике, когда при движении со скоростью от 7,2 до 18 км/ч колебания нагрузки составят от 118,6 до 219,6 кН.

Библиографический список

1. Универсальное энергетическое средство УЭС-290/450 «ПОЛЕСЬЕ»: инструкция по эксплуатации // РКУП «ГСКБ», 2009. – 133 с.
2. Бойков, В.П. Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Теория / В.П. Бойков [и др.]. – Минск: Новое знание, 2012. – 543 с.
3. Лурье, А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А.Б. Лурье. – М.: Колос, 1981. – 382 с.
4. Кутьков, Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства : учеб. для студентов высш. учеб. заведений/ Г.М. Кутьков. – М.: КолосС, 2004. – 504 с.: ил.
5. Скотников, В.А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля : учеб. и учеб. пособия для вузов / В.А. Скотников, А.А. Мащенко, А.С. Солонский; под ред. В.А. Скотникова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с. : ил.
6. Барский, И.Б. Динамика трактора / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
7. Комбайн навесной кормоуборочный КНК-500 «ПАЛЕССЕ FH50»: инструкция по эксплуатации. – Гомель: РКУП «ГСКБ», 2010. – 118 с.
8. Макаров, И.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) / И.М. Макаров, Б.М. Менский – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
9. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Динамика: учеб. для высш. техн. учеб. заведений / А.А. Яблонский. – 4-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1971. – 488 с.: ил.
10. Попов, В.Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В.Б. Попов - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – 252 с.: ид.

References

1. *Universal'noe energeticheskoe sredstvo UES-290/450 «POLES'E»: instruksiya po ekspluatatsii // RKUP «GSKB», 2009. – 133 s.*
2. *Boykov, V.P. Mnogotsel'evye gusenichnyye i kolesnyye mashiny. Teoriya / V.P. Boykov [i dr.]. – Minsk : Novoe znanie, 2012. – 543 s.*
3. *Lur'e, A.B. Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov / A.B. Lur'e. – M. : Kolos, 1981. – 382 s.*
4. *Kut'kov, G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva : ucheb. dlya studentov vyssh. ucheb. zavedeniy/ G.M. Kut'kov. – M. : KolosS, 2004. – 504 s. : il.*
5. *Skotnikov, V.A. Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya : ucheb. i ucheb. posobiya dlya vuzov / V.A. Skotnikov, A.A. Mashchenskiy, A.S. Solonskiy ; pod red. V.A. Skotnikova. – M. : Agropromizdat, 1986. – 383 s. : il.*
6. *Barskiy, I.B. Dinamika traktora / I.B. Barskiy, V.Ya. Anilovich, G.M. Kut'kov. – M. : Mashinostroenie, 1973. – 280 s.*
7. *Kombayn navesnoy kormouborochnyy KNK-500 «PALESSE FH50» : instruksiya po ekspluatatsii. – Gomel' : RKUP «GSKB», 2010. – 118 s.*
8. *Makarov, I.M. Lineynye avtomaticheskie sistemy (elementy teorii, metody rascheta i spravochnyy material) / I.M. Makarov, B.M. Menskiy – M. : Mashinostroenie, 1982. – 504 s.*
9. *Yablonskiy, A.A. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. Dinamika: ucheb. dlya vyssh. tekhn. ucheb. zavedeniy / A.A. Yablonskiy. – 4-e izd., dop. – M. : Vyssh. shk., 1971. – 488 s.: il.*
10. *Popov, V.B. Matematicheskoe modelirovanie pod'emno-navesnykh ustroystv mobil'nykh energeticheskikh sredstv / V.B. Popov - Gomel': GGTU im. P.O. Sukhogo, 2016. – 252 s.: id.*