

УДК 519.87:630*332.3

Д. А. Кононович, С. Е. Арико, С. П. Мохов, М. К. Асмоловский
Белорусский государственный технологический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА МАШИН ДЛЯ СБОРА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

В статье представлена разработанная математическая модель работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, позволяющая осуществлять агрегатирование навесного и прицепного технологического оборудования. Математическая модель дает возможность в отдельности оценить динамическую нагруженность в узлах базового шасси и технологического оборудования, устойчивость при выполнении технологических операций, установить изменение опорных реакций в зависимости от места установки технологического оборудования для сбора лесосечных отходов, производить оценку тяговых и сцепных свойств и проходимости с целью оптимизации компоновки комплекса машин. Также математическая модель описывает процесс взаимодействия машины для транспортировки лесосечных отходов с предметом труда и позволяет производить оценку устойчивости лесной машины при выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Для анализа перераспределения опорных реакций, возникающих усилий и нагрузок, действующих на базовое шасси и технологическое оборудование, задается микропрофиль опорной поверхности движения с представленными в нем различными длинами и высотами неровности. В статье приведены результаты моделирования и построены графики зависимостей угловых перемещений в продольной и поперечной плоскостях и вертикальное перемещение комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, а также установлены зависимости изменения опорных реакций под колесами базового шасси и полуприцепа.

Ключевые слова: математическая модель, комплекс машин, лесосечные отходы, технологическое оборудование, микропрофиль, препятствие, воздействие.

D. A. Kononovich, S. Ye. Ariko, S. P. Mokhov, M. K. Asmolovskiy
Belarusian State Technological University

MATHEMATICAL MODEL OF WORK OF THE COMPLEX OF MACHINES FOR COLLECTION AND TRANSPORTATION OF FORESTRY WASTES

The article presents the developed mathematical model of the operation of a complex of machines for collecting and transporting logging waste, which allows for the aggregation of mounted and trailed technological equipment. The mathematical model makes it possible to individually assess the dynamic loading in the nodes of the base chassis and technological equipment, the stability during technological operations, establish the change in the support reactions depending on the installation site of the technological equipment for collecting logging waste, to evaluate the traction and coupling properties and throughput in order to optimize layout of a complex of machines. The mathematical model also describes the process of interaction of a machine for transporting logging waste with an object of labor and allows us to evaluate the stability of a forest machine during loading and unloading operations. For the analysis of the redistribution of support reactions, the arising forces and loads acting on the base chassis and technological equipment, a microprofile of the support surface of the movement with various lengths and heights of unevenness presented in it is set. The article presents the simulation results and graphs of the dependences of angular displacements in the longitudinal and transverse planes and the vertical movement of a set of machines for collecting and transporting logging waste, as well as the dependences of changes in support reactions under the wheels of the base chassis and semitrailer are established.

Key words: mathematical model, complex of machines, forestry wastes, technological equipment, microprofile, let, impact.

Введение. Процесс механизированного сбора лесосечных отходов в валы на лесосеке и их дальнейшая транспортировка сопровождается значительными динамическими нагрузками, связанными с технологическими особенностями заготовки такого вида древесного сырья.

Осуществляя челночные движения по лесосеке, машина для сбора лесосечных отходов воспринимает различные динамические нагрузки от пней, корней, камней, ям и иных неровностей волока. При движении по волоку с открытыми бортами с выполнением погрузки лесосечных

отходов кроме рассмотренных нагрузок возникают и значительные инерционные нагрузки. Указанные нагрузки негативно влияют на прочность конструкции лесной машины и ее топливную экономичность, воздействуют на оператора. Для снижения их отрицательного влияния требуется проведения ряда теоретических и экспериментальных исследований. Их неотъемлемой частью является создание подробной математической модели комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, которая позволяет производить оценку характера возмущающих воздействий на базовый трактор, а также разрабатывать рекомендации по выбору рациональной компоновки технологического оборудования с базовым трактором на основе снижения динамических нагрузок [1–3].

Основная часть. На рис. 1 приведена расчетная схема динамической системы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов.

Данная схема имеет девять степеней свободы. Положение проектируемого комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов определяется следующими обобщенными координатами: вертикальным перемещением центра тяжести машины и полуприцепа соответственно Z_1, Z_2 , угловыми перемещениями центра тяжести φ_1 и φ_2 и переднего моста

машины φ_3 , угловыми перемещениями центра тяжести полуприцепа φ_4 и φ_5 и балансиров колес полуприцепа φ_6 и φ_7 .

Модель (рис. 1) комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов описывается восемью сосредоточенными массами. Схема включает массу базового трактора, массу навесного устройства с технологическим оборудованием для сбора лесосечных отходов, массу полуприцепа, массу технологического оборудования полуприцепа, массу колонны, стрелы, рукояти, массу грейфера. К массе базового трактора приведена масса переднего моста. Особенностью данной модели является рассмотрение динамики комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов в зависимости от внешних воздействий на технологическое оборудование при выполнении технологических операций, оценки общей компоновки базового трактора с технологическим оборудованием на основании оценки распределения опорных реакций. Модель позволяет также рассматривать динамику базового шасси как без технологического оборудования, так и с установленным технологическим оборудованием на переднем бруске трактора или на задней гидравлической навеске, оценивать устойчивость машины при выполнении погрузочно-разгрузочных и транспортных операций.

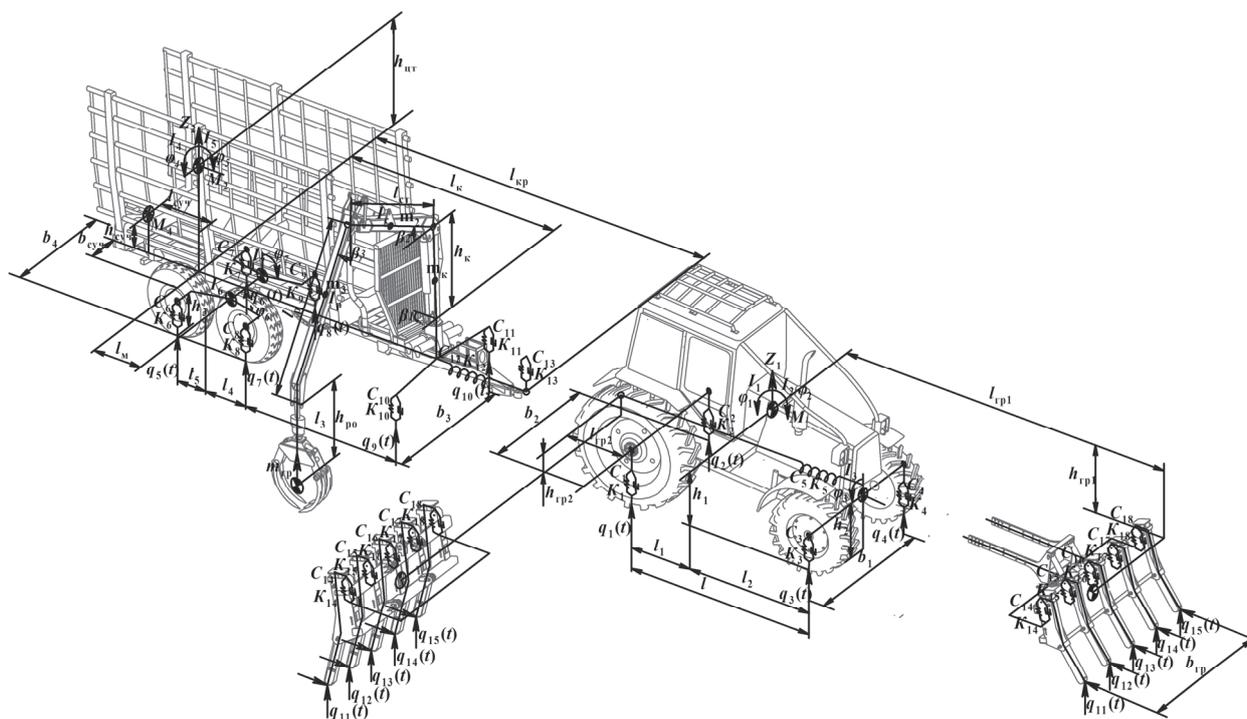


Рис. 1. Расчетная схема математической модели комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов

Для составления системы дифференциальных уравнений, описывающих колебательные процессы, которые происходят с комплексом машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, использовали уравнение Лагранжа второго рода (формула (1)):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно; R – диссипативная функция Релея; q_i – обобщенная координата; Q_i – внешние обобщенные силы.

В расчетной динамической схеме работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов приняты следующие обозначения: $c_1, c_2, c_3, c_4, c_6, c_7, c_8, c_9, k_1, k_2, k_3, k_4, k_{ш6}, k_{ш7}, k_{ш8}, k_{ш9}$ – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) шин; c_5, c_{12}, k_5, k_{12} – крутильная жесткость (Н/м) и коэффициенты демпфирования (Н·с/м) в месте соединения базового трактора с передним мостом и полуприцепом соответственно; $c_{14}, c_{15}, c_{16}, c_{17}, c_{18}, k_{14}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{18}$ – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) пружин технологического оборудования для сбора лесосечных отходов; $c_{10}, c_{11}, k_{10}, k_{11}$ – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) аутригеров; c_{13}, k_{13} – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) в месте соединения полуприцепа с базовым трактором; b_1, b_2 – расстояния между передней и задней осью базового шасси, м; b_3, b_4 – расстояния между балансирами колес полуприцепа и аутригерами соответственно, м; h_1, h_2 – высоты от опорной поверхности до центра тяжести базового шасси и полуприцепа соответственно, м; $b_{суч}, h_{суч}$ – ширина и высота расположения центра тяжести пачки лесосечных отходов, м; l_1, l_2 – расстояния от задней и передней оси базового шасси до центра тяжести, м; l_3 – расстояние от аутригеров до балансира колес полуприцепа, м; l_4, l_5 – расстояния от оси балансира до центра колес, м; l_m – расстояние от центра оси балансира до массы полуприцепа, м; $l_k, l_{ст}, l_p$ – длины колонны, стрелы и рукояти гидроманипулятора соответственно, м; $l_{суч}$ – расстояние от места соединения дышла полуприцепа до центра массы полуприцепа с технологическим оборудованием, м; l_k – расстояние от колонны гидроманипулятора до массы полуприцепа, м; $l_{р1}, l_{р2}$ – расстояния от центра масс базового шасси до центра масс технологического оборудования для сбора лесосечных отходов, установленного спереди или сзади соответственно, м; $h_{р0}$ – расстояние от центра массы грейфера с лесосечными отходами до места соединения с рукоятью, м; M_1, M_2, M_3 – массы базового шасси,

полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов и технологического оборудования для сбора лесосечных отходов с навесной системой соответственно, Н; M_4 – масса лесосечных отходов на грузовой платформе, Н; m_k, m_c, m_p – массы колонны, стрелы и рукояти гидроманипулятора соответственно, Н; $m_{тр}$ – масса грейфера гидроманипулятора, Н; I_1, I_3, I_4 – моменты инерции центра тяжести базового шасси, переднего моста базового шасси и полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов в поперечной плоскости соответственно, кг·м²; I_2, I_5, I_6, I_7 – моменты инерции центра тяжести базового шасси, полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов и балансиров полуприцепа в продольной плоскости соответственно, кг·м²; $q_1(t), q_2(t), q_3(t), q_4(t), q_5(t), q_6(t), q_7(t), q_8(t), q_9(t)$ – функция микропрофиля поверхности движения, м [4–7].

Выражения, по которым определяются кинетическая, потенциальная энергии и диссипативная функция Релея рассматриваемого комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, имеют следующий вид:

$$K = \frac{1}{2} (M_1 Z_1^2 + M_2 Z_2^2 + M_3 Z_1^2 + M_4 Z_2^2 + m_k Z_2^2 + m_c Z_2^2 + m_p Z_2^2 + m_1 Z_2^2 + I_1 \varphi_1^2 + I_2 \varphi_2^2 + I_3 \varphi_3^2 + I_4 \varphi_4^2 + I_5 \varphi_5^2 + I_6 \varphi_6^2 + I_7 \varphi_7^2 + I_{тр1} \varphi_1^2 + I_{тр2} \varphi_2^2)$$

$$\begin{aligned} \Pi = & (M_1 \cdot g \cdot Z_1 + M_2 \cdot g \cdot Z_2 + m_k \cdot g \cdot [Z_2 - \varphi_5 \cdot l_k] + m_c \cdot g \times \\ & \times [Z_2 - \varphi_4 \cdot \frac{l_{ст}}{2} \cdot \cos \beta_2 \cdot \sin \beta_1 - \varphi_5 \cdot (l_k - \frac{l_{ст}}{2} \cdot \cos \beta_2 \cdot \cos \beta_1)]) + \\ & + m_p \cdot g \cdot \left[\left[Z_2 - \varphi_4 \cdot \left(l_{ст} \cdot \cos \beta_1 + \frac{l_p}{2} \cdot \sin \beta_3 \right) \right] \cdot \sin \beta_1 - \right. \\ & \left. - \varphi_5 \cdot \left[l_k - \left(l_{ст} \cdot \cos \beta_2 + \frac{l_p}{2} \cdot \sin \beta_3 \right) \cdot \cos \beta_1 \right] + m_1 \cdot g \cdot [Z_2 - \varphi_4 \times \right. \\ & \times (l_{ст} \cdot \cos \beta_1 + l_p \cdot \sin \beta_3) \cdot \sin \beta_1 - \varphi_5 \cdot (l_k - (l_{ст} \cdot \cos \beta_2 + l_p \cdot \sin \beta_3) \times \\ & \times \cos \beta_1)] + M_4 \cdot g \cdot (Z_2 - \varphi_4 \cdot b_{суч} + \varphi_5 \cdot l_{суч}) + M_3 \cdot g \cdot Z_1 - M_3 \cdot g \times \\ & \times l_{р1} \cdot \varphi_2 + \frac{c_1 \cdot \lambda_1^2}{2} + \frac{c_2 \cdot \lambda_2^2}{2} + \frac{c_3 \cdot \lambda_3^2}{2} + \frac{c_4 \cdot \lambda_4^2}{2} + \frac{c_5 \cdot \lambda_5^2}{2} + \frac{c_6 \cdot \lambda_6^2}{2} + \\ & + \frac{c_7 \cdot \lambda_7^2}{2} + \frac{c_8 \cdot \lambda_8^2}{2} + \frac{c_9 \cdot \lambda_9^2}{2} + \frac{c_{10} \cdot \lambda_{10}^2}{2} + \frac{c_{11} \cdot \lambda_{11}^2}{2} + \frac{c_{12} \cdot \lambda_{12}^2}{2} + \frac{c_{13} \cdot \lambda_{13}^2}{2} + \\ & \left. + \frac{c_{14} \cdot \lambda_{14}^2}{2} + \frac{c_{15} \cdot \lambda_{15}^2}{2} + \frac{c_{16} \cdot \lambda_{16}^2}{2} + \frac{c_{17} \cdot \lambda_{17}^2}{2} + \frac{c_{18} \cdot \lambda_{18}^2}{2} \right); \end{aligned}$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot (k_1 \cdot \lambda_1^2 + k_2 \cdot \lambda_2^2 + k_3 \cdot \lambda_3^2 + k_4 \cdot \lambda_4^2 + k_5 \cdot \lambda_5^2 + k_6 \cdot \lambda_6^2 + k_7 \cdot \lambda_7^2 + k_8 \cdot \lambda_8^2 + k_9 \cdot \lambda_9^2 + k_{10} \cdot \lambda_{10}^2 + k_{11} \cdot \lambda_{11}^2 + k_{12} \cdot \lambda_{12}^2 + k_{13} \cdot \lambda_{13}^2 + k_{14} \cdot \lambda_{14}^2 + k_{15} \cdot \lambda_{15}^2 + k_{16} \cdot \lambda_{16}^2 + k_{17} \cdot \lambda_{17}^2 + k_{18} \cdot \lambda_{18}^2).$$

Величины деформаций соответствующих элементов в вертикальной плоскости определялись так:

$$\lambda_1 = Z_1 - \frac{b_2}{2} \cdot \varphi_1 + l_1 \cdot \varphi_2 - q_1(t);$$

$$\lambda_2 = Z_1 + \frac{b_2}{2} \cdot \varphi_1 + l_1 \cdot \varphi_2 - q_2(t);$$

$$\lambda_3 = Z_1 - \frac{b_1}{2} \cdot \varphi_3 - l_2 \cdot \varphi_2 - q_3(t);$$

$$\lambda_4 = Z_1 + \frac{b_1}{2} \cdot \varphi_3 - l_2 \cdot \varphi_2 - q_4(t);$$

$$\lambda_5 = \varphi_3 - \varphi_1;$$

$$\lambda_6 = Z_2 - \frac{b_4}{2} \cdot \varphi_4 - l_m \cdot \varphi_5 + l_5 \cdot \varphi_6 - q_5(t);$$

$$\lambda_7 = Z_2 + \frac{b_4}{2} \cdot \varphi_4 - l_m \cdot \varphi_5 + l_5 \cdot \varphi_7 - q_6(t);$$

$$\lambda_8 = Z_2 - \frac{b_4}{2} \cdot \varphi_4 - l_m \cdot \varphi_5 + l_4 \cdot \varphi_6 - q_7(t);$$

$$\lambda_9 = Z_2 + \frac{b_4}{2} \cdot \varphi_4 - l_m \cdot \varphi_5 - l_4 \cdot \varphi_7 - q_8(t);$$

$$\lambda_{10} = Z_2 - \frac{b_3}{2} \cdot \varphi_4 - l_k \cdot \varphi_5 - q_9(t);$$

$$\lambda_{11} = Z_2 + \frac{b_3}{2} \cdot \varphi_4 - l_k \cdot \varphi_5 - q_{10}(t);$$

$$\lambda_{12} = \varphi_4 - \varphi_1;$$

$$\lambda_{13} = -Z_2 + l_{rp} \cdot \varphi_5 + Z_1 + \varphi_2 \cdot (l_{rp} + l_1);$$

$$\lambda_{14} = -Z_1 + l_{rp1} \cdot \varphi_2 + \varphi_1 \cdot \frac{b_{rp}}{2} + q_{11}(t);$$

$$\lambda_{15} = -Z_1 + l_{rp1} \cdot \varphi_2 + \varphi_1 \cdot \frac{b_{rp}}{4} + q_{12}(t);$$

$$\lambda_{16} = -Z_1 + l_{rp1} \cdot \varphi_2 + q_{13}(t);$$

$$\lambda_{17} = -Z_1 + l_{rp1} \cdot \varphi_2 - \varphi_1 \cdot \frac{b_{rp}}{4} + q_{14}(t);$$

$$\lambda_{18} = -Z_1 + l_{rp1} \cdot \varphi_2 - \varphi_1 \cdot \frac{b_{rp}}{2} + q_{15}(t).$$

Далее подставляя выражения деформаций в уравнение Лагранжа второго рода, осуществлялось дифференцирование по переменным, имеющимся в расчетной схеме. Решение системы дифференциальных уравнений производилось с помощью математического программного обеспечения MathCad 15 [8].

Микропрофиль поверхности движения задавался с помощью аппроксимации значений

высот, снятых с реальной поверхности волока. Учитывая то, что на лесосеке во время движения комплекс машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов переезжает различные препятствия (пни, корни, камни, ямы, поваленные деревья и т. д.), моделирование процесса движения формировалось с различными высотами этих неровностей.

Решение математической модели производилось с помощью метода Рунге – Кутты 4-го порядка. Результатом решения математической модели являются матрицы отклонений каждой степени свободы и их первых производных [9–12].

Вертикальные перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа при движении по установленному микропрофилю с переездом единичной неровности представлены на рис. 2.

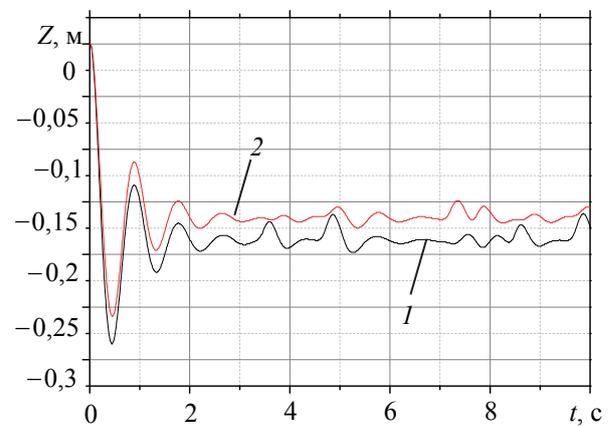


Рис. 2. Вертикальные перемещения базового шасси (1) и полуприцепа (2)

Процесс движения комплекса машин начался с 3-й секунды. Переезд единичных неровностей левым колесом базового шасси осуществляется на 3,3-й секунде, а на 4,4-й секунде задним левым колесом. Колеса балансирующей тележки осуществляют переезд единичной неровности на участке в диапазоне 7,0–8,3 с.

Угловые перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа в поперечной плоскости представлены на рис. 3.

При переезде единичной неровности корпус базового шасси в поперечной плоскости отклоняется на 1,94°, а корпус полуприцепа – на 1,3°.

Угловые перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа в продольной плоскости представлены на рис. 4.

При переезде единичной неровности базовым шасси его корпус отклоняется в продольной плоскости на 1,14°, а корпус полуприцепа – на 0,4°, это связано с тем, что балансирующая тележка имеет возможность качания в продольной плоскости, что обеспечивает сглаживание неровности.

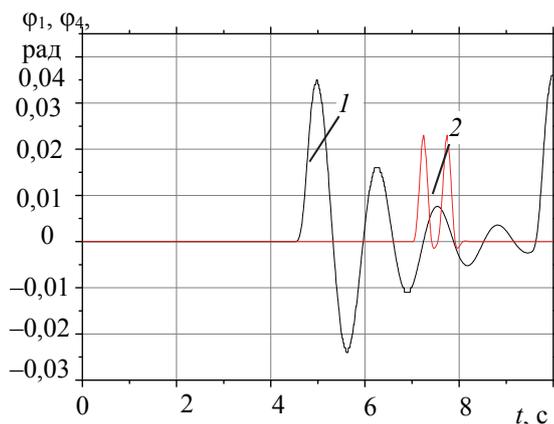


Рис. 3. Угловые перемещения базового шасси (1) и полуприцепа (2) в поперечной плоскости

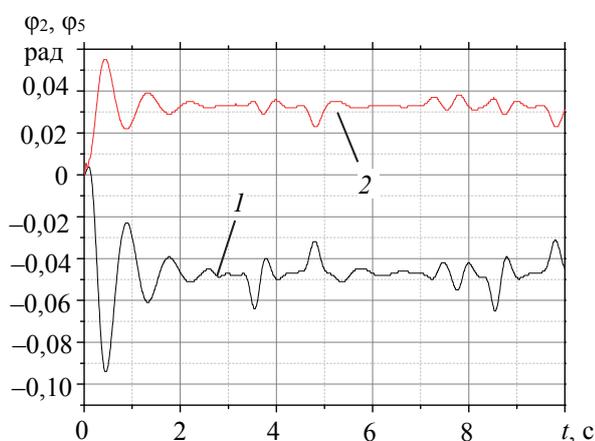


Рис. 4. Угловые перемещения базового шасси (1) и полуприцепа (2) в продольной плоскости

Перераспределение опорных реакций под колесами комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов при движении по микропрофилю с неровностями высотой 0,1 м представлены на рис. 5.

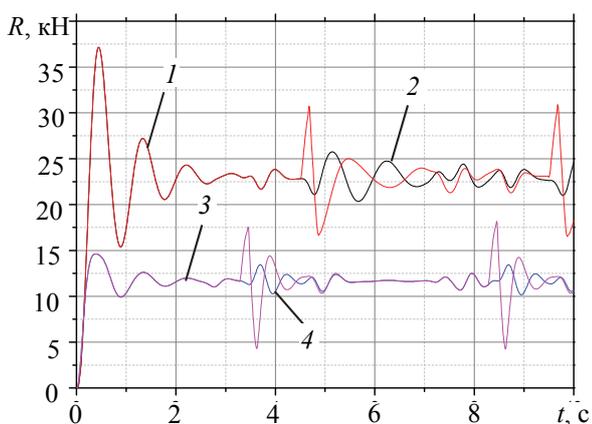


Рис. 5. Изменение опорных реакций под колесами базового шасси:

- 1, 2 – изменение опорных реакций под задними правым и левым колесами соответственно;
3, 4 – изменение опорных реакций под передними правым и левым колесами соответственно

В соответствии с приведенной зависимостью при переезде единичной неровности передним левым и задним левым колесами динамическая реакция достигает 17,5 и 30,7 кН соответственно (рис. 5). При преодолении этого же препятствия колесами балансирующей тележки динамическая реакция достигает 21 кН (рис. 6).

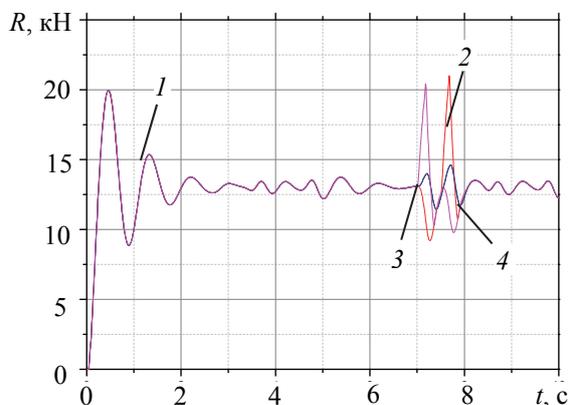


Рис. 6. Изменение опорных реакций под колесами балансирующей тележки полуприцепа:

- 1, 2 – изменение опорных реакций под задним и передним правыми колесами балансира соответственно; 3, 4 – изменение опорных реакций под задним и передним правым и левым колесами соответственно

Для определения динамической нагруженности рам и отдельных элементов базового шасси и полуприцепа при преодолении порогового препятствия целесообразным является применение коэффициентов динамичности, которые определялись отношением максимальной динамической реакции при преодолении препятствия к статической реакции [13–15].

В результате моделирования установлено, что при переезде препятствия высотой 0,1 м левым бортом коэффициенты динамичности составили под передним левым колесом базового шасси – 1,48; задним левым колесом базового шасси – 1,34; под левыми колесами балансира – 1,59. Под колесами правого борта без преодоления препятствия коэффициенты динамичности составили под передним колесом базового шасси – 1,1; задним колесом базового шасси – 1,15; под колесами балансира – 1,1.

Заключение. Разработана математическая модель комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов для оценки динамической нагруженности в продольной и поперечной плоскостях. Она позволяет производить выбор базового шасси машины для сбора лесосечных отходов и оценивать компоновочные решения по установке технологического оборудования, а также получить данные по распределению величин опорных реакций при выполнении технологических операций.

Список литературы

1. Жуков А. В. Теория лесных машин. Минск: БГТУ, 2001. 640 с.
2. Леонов Е. А., Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 40–44.
3. Симанович В. А., Кононович Д. А., Исаченков В. С. Влияние динамической нагруженности на эксплуатационные показатели колесных лесных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 54–57.
4. Клоков Д. В., Турлай И. В. Модели работы лесных машин с учетом надежности // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 66–67.
5. Мохов С. П., Симанович В. А., Арико С. Е. Оценка влияния внешних силовых факторов на процесс падения дерева // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 28–31.
6. Лой В. Н., Германович А. О. Моделирование работы самоходной рубильной машины с автономным двигателем // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 18–21.
7. Голякевич С. А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 72–78.
8. Арико С. Е. Математическая модель работы харвестерной машины 4К4 // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 113–117.
9. Симанович В. А. Оценка динамического нагружения колесных лесных машин на эксплуатационных режимах работы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 122–125.
10. Голякевич С. А. Математическая модель для оценки нагруженности несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 65–71.
11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Нагруженность несущей конструкции харвестера при выполнении технологических операций // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 27–30.
12. Симанович В. А., Пищов М. Н., Смяян А. И. Особенности эксплуатационных режимов нагружения лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 77–78.
13. Симанович В. А., Исаченков В. С., Бобрович В. А. Оценка динамической нагруженности трелевочной системы «колесный трактор – пачка деревьев» // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 74–76.
14. Пищов С. Н. Математическая модель колебаний форвардера 6К6 повышенной грузоподъемности // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 52–55.
15. Исаченков В. С., Симанович В. А. Математическая модель колесной трелевочной машины // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 75–81.

References

1. Zhukov A. V. *Teoriya lesnykh mashin* [The theory of forest machines]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 640 p.
2. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klokov D. V. Mathematical model of the chipper machine taking into account its technical failures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 31–35 (In Russian).
3. Simanovich V. A., Kononovich D. A., Isachenkov V. S. The impact of dynamic loading on the performance of wheeled forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 54–57 (In Russian).
4. Klokov D. V., Turlay I. V. Reliability models of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 66–67 (In Russian).
5. Mokhov S. P., Simanovich V. A., Ariko S. Ye. Assessment of the influence of external force factors on the process of tree fall. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 28–31 (In Russian).
6. Loy V. N., Germanovich A. O. Modeling the work of a self-propelled chipper with an autonomous engine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 18–21 (In Russian).
7. Golyakevich S. A. Modeling the work of a self-propelled chipper with an autonomous engine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 72–78 (In Russian).

8. Ariko S. Ye. The mathematical model of the harvester 4W4. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue 18, pp. 113–117 (In Russian).

9. Simanovich V. A. Evaluation of the dynamic loading of wheeled forest machines at operational operating modes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue 18, pp. 122–125 (In Russian).

10. Golyakevich S. A. A mathematical model for assessing the load bearing structures of multi-operational forestry machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 65–71 (In Russian).

11. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. The load bearing structure of the harvester during technological operations. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 27–30 (In Russian).

12. Simanovich V. A., Pishchov M. N., Smeyan A. I. Features of operational modes of loading of forest modular machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 77–78 (In Russian).

13. Simanovich V. A., Isachenkov V. S., Bobrovich V. A. Evaluation of the dynamic loading of the skidding system “wheeled tractor – a pack of trees”. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 74–76 (In Russian).

14. Pishchov S. N. Mathematical model of oscillations of a forwarder 6W6 of increased carrying capacity. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 52–55 (In Russian).

15. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Mathematical model of a skidder. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 75–81 (In Russian).

Информация об авторах

Кононович Денис Александрович – ассистент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: denkon_92@mail.ru

Арико Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Мохов Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

Асмоловский Михаил Корнеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: asmika59@mail.ru

Information about the authors

Kononovich Denis Aleksandrovich – Assistant Lecturer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: denkon_92@mail.ru

Ariko Sergey Yevgen'evich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Mokhov Sergey Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Asmolovskiy Mikhail Korneevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asmika59@mail.ru

Поступила 25.03.2020