

УДК 630*377.4

В. С. Исаченков, С. Е. Арико, В. А. Симанович
Белорусский государственный технологический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕСНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ МАШИНЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Увеличение производительности колесных трелевочных машин может быть достигнуто совершенствованием технологического оборудования. Такими изменениями можно добиться перераспределения нагрузок на несущие системы в процессе движения и снизить динамическую нагруженность машин, увеличив их производительность и долговечность.

Основным путем дальнейшего развития технологического оборудования колесных трелевочных машин является совмещение нескольких вариантов, правильный подбор конструкции которых обусловлен природно-климатическими условиями лесозаготовок.

В статье представлена математическая модель движения колесной трелевочной машины с комбинированным технологическим оборудованием, которое состоит из прицепного и навесного модулей. Она позволила провести теоретическую оценку динамической нагруженности основных элементов конструкции колесной трелевочной машины и комбинированного технологического оборудования при различных вариантах перераспределения пачки древесного сырья, что дает возможность увеличить производительность колесной трелевочной машины при работе на почвогрунтах со слабой несущей способностью от 7 до 17%.

Ключевые слова: математическая модель, колесная трелевочная машина, технологическое оборудование.

Для цитирования: Исаченков В. С., Арико С. Е., Симанович В. А. Математическая модель колесной трелевочной машины с комбинированным технологическим оборудованием // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 149–154.

V. S. Isachenkov, S. Ye. Ariko, V. A. Simanovich
Belarusian State Technological University

MATHEMATICAL MODEL OF SKIDDER WITH COMBINED TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

An increase in the productivity of wheeled skidders can be achieved by improving technological equipment. With such changes, it is possible to achieve a redistribution of loads on the supporting systems in the process of movement and to reduce the dynamic loading of machines, increasing their productivity and durability.

The main way of further development of technological equipment for wheeled skidders is the combination of several options, the correct selection of the design of which is due to the natural and climatic conditions of logging.

The article presents a mathematical model of the movement of a wheeled skidder with combined technological equipment, which consists of trailed and mounted modules. It made it possible to carry out a theoretical assessment of the dynamic loading of the main structural elements of a wheeled skidder and combined technological equipment with various options for redistributing a pack of wood raw materials, which makes it possible to increase the productivity of a wheeled skidder when working on soils with a weak bearing capacity from 7 to 17%.

Key words: mathematical model, skidder, technological equipment.

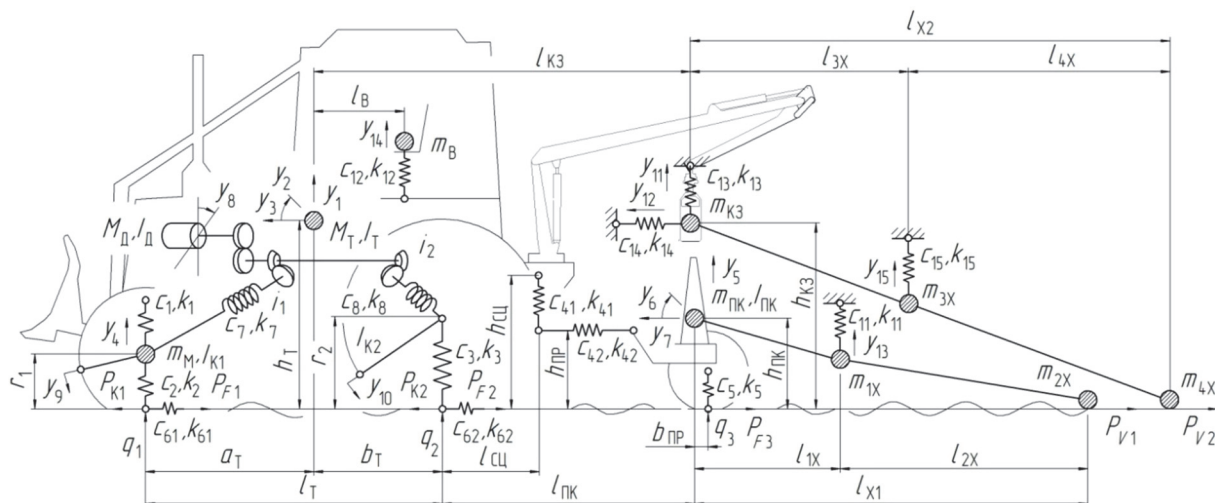
For citation: Isachenkov V. S., Ariko S. Ye., Simanovich V. A. Mathematical model of skidder with combined technological equipment. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2022, no. 1 (252), pp. 149–154 (In Russian).

Введение. Процесс лесозаготовки включает в себя взаимосвязанные последовательные операции, такие как валка деревьев, обрезка сучьев, при необходимости, трелевка и последующая вывозка древесного сырья потребителям.

Для значительной части лесосечного фонда, расположенного на почвогрунтах со слабой несущей способностью, остается открытым вопрос целесообразного способа трелевки, который должен

включать в себя холостой ход трелевочной машины, формирование пачки хлыстов или сортиментов, рабочий ход и разгрузку пачки на погрузочном пункте.

В Республике Беларусь в указанных условиях работы на заготовке древесного сырья в настоящее время используются колесные трелевочные машины (КТМ) с канатно-чокерным технологическим оборудованием.



Расчетная схема динамической системы КТМ с ТОК

Для преодоления участка трелевочных или магистральных волоков со слабой несущей способностью почвогрунта при буксовании для этих машин во время рабочего хода используется прием сброса пачки с последующим ее подтаскиванием [1, 2].

Основным методом теоретических исследований в настоящее время является разработка математических моделей движения специальных транспортных средств на основе методов системного подхода и синтеза, которые широко применяются для техники различного назначения [3–11].

Для решения поставленной задачи предлагается изменить конструкцию технологического оборудования, которая позволила бы значительно снизить энергетические потери во время преодоления участков со слабой несущей способностью почвогрунта, тем самым увеличить рейсовую нагрузку и производительность КТМ.

В представленной работе рассматривается динамическая система, в которой технологическое оборудование КТМ рассматривается как совокупность двух модулей: навесного и прицепного. Навесной модуль состоит из манипулятора с клещевым захватом (НКЗ), а прицепной модуль состоит из зажимного коника, где в качестве опорной системы выбрана одноосная тележка (ПКН).

Основная часть. Основные принципы построения расчетной схемы и составления математической модели движения КТМ, оснащенной комбинированным технологическим оборудованием (ТОК), имеют допущения, аналогичные математическому аппарату, представленному в работах [12–14]. Они предполагают нахождение независимых, изменяющихся во времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс, входящих в систему, при рассмотрении переходных и установившихся режимов движения.

На рисунке приведена расчетная схема динамической системы КТМ с ТОК, имеющая пятнадцать

степеней свободы, описывающих колебания системы в продольной вертикальной плоскости.

Положение КТМ с ТОК определяется следующими обобщенными координатами: вертикальным (y_1), угловым (y_2) и продольным (y_3) перемещением центра тяжести КТМ; вертикальным (y_4) перемещением центра тяжести переднего моста КТМ; вертикальным (y_5), угловым (y_6) и продольным (y_7) перемещением центра тяжести ПКН; углом поворота (y_8) коленчатого вала двигателя; углами поворота передних (y_9) и задних (y_{10}) колес КТМ; вертикальным (y_{11}) и горизонтальным (y_{12}) перемещением дискретной массы НКЗ; вертикальным (y_{13}) перемещением дискретной массы нижней пачки длинномерного груза; вертикальным перемещением (y_{14}) центра тяжести водителя и сиденья; вертикальным перемещением (y_{15}) дискретной массы верхней пачки длинномерного груза.

Для расчетной схемы и описывающих ее уравнений приняты следующие параметры:

– массы, кг: M_T – масса КТМ; m_M – подрессоренная масса переднего моста КТМ; m_B – подрессоренная масса оператора и сиденья; $m_{ПКН}$ – подрессоренная масса ПКН с дискретной массой нижней пачки длинномерного груза; m_{1X} и m_{2X} – дискретные массы нижней пачки длинномерного груза; $m_{НК}$ – подрессоренная масса НКЗ с дискретной массой верхней пачки длинномерного груза; m_{3X} и m_{4X} – дискретные массы верхней пачки длинномерного груза;

– моменты инерции, кг·м²: I_D – момент инерции вращающихся масс двигателя и ведущих частей сцепления; $I_{Д}$ – момент инерции вращающихся масс двигателя и ведущих частей сцепления; I_{K1} , I_{K2} – моменты инерции элементов трансмиссии и колес КТМ, приведенные к их осям; I_T – момент инерции КТМ; $I_{ПКН}$ – момент инерции ПКН;

– коэффициенты жесткости, Н/м, и сопротивления, Н·с/м: c_1 , k_1 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления переднего моста КТМ;

c_2, k_2 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления шин колес переднего моста КТМ; c_3, k_3 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления шин колес заднего моста КТМ;

– $c_{41}, k_{41}, c_{42}, k_{42}$ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной жесткости и сопротивления сцепки КТМ с ПКН; c_5, k_5 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления шин колес ПКН; $c_{61}, k_{61}, c_{62}, k_{62}$ – коэффициенты горизонтальной жесткости и сопротивления шин и почвогрунта, приведенные к точкам контакта колес КТМ и дорожного полотна; c_7, k_7, c_8, k_8 – коэффициенты угловой жесткости и сопротивления валов привода переднего и заднего мостов КТМ; c_{11}, k_{11} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления нижней пачки длинномерного груза; c_{12}, k_{12} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления подвески сиденья оператора; $c_{13}, k_{13}, c_{14}, k_{14}$ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной жесткости и сопротивления узла связи НКЗ с КТМ; c_{15}, k_{15} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления верхней пачки длинномерного груза;

– геометрические параметры, м: r_1, r_2 – радиусы качения шин колес КТМ; l_T – длина базы КТМ; a_T, b_T, h_T – координаты центра тяжести КТМ; l_B – координата центра тяжести водителя и сидения относительно центра тяжести КТМ; l_{X1} и l_{X2} – длины пачек нижнего и верхнего длинномерного материала соответственно; l_{1X}, l_{2X} и l_{3X}, l_{4X} – координаты центра тяжести пачек длинномерного материала, нижнего и верхнего соответственно; $l_{ПК}, h_{ПК}$ – координаты центра тяжести ПКН относительно дорожного полотна и заднего моста КТМ; $l_{СЦ}, h_{СЦ}, h_{ПР}$ – координаты точек сцепки КТМ и ПКН; $b_{ПР}$ – смещение оси относительно центра тяжести ПКН; $l_{К3}$ и $h_{К3}$ – координаты центра тяжести НКЗ относительно центра тяжести КТМ и дорожного полотна; q_1, q_2 и q_3 – текущие значения ординат микропрофили неровностей дорожного полотна под шинами колес КТМ и ПКН;

– силовые параметры, Н: P_{K1}, P_{K2} – касательные силы тяги, развиваемые на колесах КТМ; P_{F1}, P_{F2} и P_{F3} – силы сопротивления шин колес КТМ и ПКН соответственно; P_{V1} и P_{V2} – сила сопротивления волочению нижней и верхней пачек длинномерного груза соответственно;

– i_1, i_2 – передаточные числа приводов переднего и заднего мостов КТМ;

– M_D – крутящий момент двигателя, Н·м.

Вывод дифференциальных уравнений движения осуществлялся традиционным энергетическим методом исходя из уравнений Лагранжа второго рода с последующей проверкой по анализу равновесия действующих сил и моментов [15].

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в модели движения КТМ с ТОК, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 = & [-c_1(y_1 + a_T y_2 - y_4) - c_3(y_1 - b_T y_2 - q_2) + \\ & + c_{12}(y_{14} + l_B y_2 - y_1) - c_{13}(y_1 - l_{K3} y_2 - y_{11}) - \\ & - c_{41}(y_1 - (b_T + l_{СЦ})y_2 - y_5 - (l_{ПК} - l_{СЦ})y_6) - \\ & - k_1(\dot{y}_1 + a_T \dot{y}_2 - \dot{y}_4) - k_3(\dot{y}_1 - b_T \dot{y}_2 - \dot{q}_2) + \\ & + k_{12}(\dot{y}_{14} + l_B \dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_{13}(\dot{y}_1 - l_{K3} \dot{y}_2 - \dot{y}_{11}) - \\ & - k_{41}(\dot{y}_1 - (b_T + l_{СЦ})\dot{y}_2 - \dot{y}_5 - (l_{ПК} - l_{СЦ})\dot{y}_6)] / M_T; \\ \ddot{y}_2 = & [-a_T c_1(y_1 + a_T y_2 - y_4) + b_T c_3(y_1 - b_T y_2 - q_2) + \\ & + (l_{K3} + l_{3X})l_{4X} c_{15}(y_{11} - (l_{K3} + l_{3X}) \times \\ & \times l_{4X} y_2 / l_{X2} - y_{15}) / l_{X2} + (b_T + l_{СЦ})c_{41} \times \\ & \times (y_1 - (b_T + l_{СЦ})y_2 - y_5 - (l_{ПК} - l_{СЦ})y_6) - \\ & - (h_T - h_{СЦ})c_{42}(y_3 + (h_T - h_{СЦ})y_2 - \\ & - y_7 - (h_{ПК} - h_{ПР})y_6) + \\ & + (h_T - r_1)c_{61}(y_3 - (h_T - r_1)y_2 - r_1 y_9) + \\ & + (h_T - r_2)c_{62}(y_3 - (h_T - r_2)y_2 - r_2 y_{10}) - \\ & - l_B c_{12}(y_{14} + l_B y_2 - y_1) - l_B k_{12}(\dot{y}_{14} + l_B \dot{y}_2 - \dot{y}_1) - \\ & - a_T k_1(\dot{y}_1 + a_T \dot{y}_2 - \dot{y}_4) - b_T k_3(\dot{y}_1 - b_T \dot{y}_2 - \dot{q}_2) - \\ & + (l_{K3} + l_{3X})l_{4X} k_{15}(\dot{y}_{11} - \dot{y}_{15} - (l_{K3} + l_{3X}) \times \\ & \times l_{4X} \dot{y}_2 / l_{X2}) / l_{X2} + (b_T + l_{СЦ})k_{41} \times \\ & \times (\dot{y}_1 - (b_T + l_{СЦ})\dot{y}_2 - \dot{y}_5 - (l_{ПК} - l_{СЦ})\dot{y}_6) - \\ & - (h_T - h_{СЦ})k_{42}(\dot{y}_3 + (h_T - h_{СЦ})\dot{y}_2 - \\ & - \dot{y}_7 - (h_{ПК} - h_{ПР})\dot{y}_6) + \\ & + (h_T - r_1)k_{61}(\dot{y}_3 - (h_T - r_1)\dot{y}_2 - r_1 \dot{y}_9) + \\ & + (h_T - r_2)k_{62}(\dot{y}_3 - (h_T - r_2)\dot{y}_2 - r_2 \dot{y}_{10})] / I_T; \\ \ddot{y}_3 = & [-c_{42}(y_3 + (h_T - h_{СЦ})y_2 - y_{16} - (h_1 - h_2)y_{15}) - \\ & - c_{61}(y_3 - (h_T - r_1)y_2 - r_1 y_9) - \\ & - c_{62}(y_3 - (h_T - r_2)y_2 - r_2 y_{10}) - \\ & - c_{14}(y_3 - y_{12} + (h_T - h_{K3})y_2) - \\ & - k_{14}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{12} + (h_T + h_{K3})\dot{y}_2) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -k_{42}(\dot{y}_3 + (h_T - h_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_2 - \dot{y}_{16} - (h_1 - h_2)\dot{y}_{15}) - \\
& \quad - k_{61}(\dot{y}_3 - (h_T - r_1)\dot{y}_2 - r_1\dot{y}_9) - \\
& \quad - k_{62}(\dot{y}_3 - (h_T - r_2)\dot{y}_2 - r_2\dot{y}_{10}) + \\
& + P_{F1} + P_{F2} - P_{K1} - P_{K2} / (M_T + m_M + m_B); \\
\ddot{y}_4 & = [c_1(y_1 + a_T y_2 - y_4) - c_2(y_4 - q_1) + \\
& + k_1(\dot{y}_1 + a_T \dot{y}_2 - \dot{y}_4) - k_2(\dot{y}_4 - \dot{q}_1)] / m_M; \\
\ddot{y}_5 & = [c_{41}(y_1 - (b_T + l_{\text{ЦЦ}})y_2 - y_5 - (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})y_6) - \\
& \quad - c_5(y_5 - b_{\text{ПР}}y_6 - q_3) - \\
& \quad - c_{11}(y_5 - l_{1X}l_{2X}y_6/l_{X1} - y_{13}) + \\
& + k_{41}(\dot{y}_1 - (b_T + l_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_2 - \dot{y}_5 - (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_6) - \\
& \quad - k_5(\dot{y}_5 - l_4\dot{y}_6 - \dot{q}_3) - \\
& \quad - k_{11}(\dot{y}_5 - l_{1X}l_{2X}\dot{y}_6/l_{X1} - \dot{y}_{13})] / m_{\text{ПК}}; \\
\ddot{y}_6 & = [b_{\text{ПР}}c_5(y_5 - b_{\text{ПР}}y_6 - q_3) + \\
& + l_{1X}l_{2X}c_{11}(y_{14} - l_{1X}l_{2X}y_6/l_{X1} - y_{13}) / l_{X1} + \\
& + (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})c_{41}(y_1 - (b_T + l_{\text{ЦЦ}})y_2 - \\
& \quad - y_5 - (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})y_6) + \\
& + (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})c_{42}(y_3 + (h_T - h_{\text{ЦЦ}})y_2 - \\
& \quad - y_7 - (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})y_6) + \\
& + b_{\text{ПР}}k_5(\dot{y}_5 - b_{\text{ПР}}\dot{y}_6 - \dot{q}_3) + \\
& + l_{1X}l_{2X}k_{11}(\dot{y}_5 - l_{1X}l_{2X}\dot{y}_6/l_{X1} - \dot{y}_{13}) / l_{X1} + \\
& + (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})k_{41}(\dot{y}_1 - (b_T + l_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_2 - \\
& \quad - \dot{y}_5 - (l_{\text{ПК}} - l_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_6) + \\
& + (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})k_{42}(\dot{y}_3 + (h_T - h_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_2 - \dot{y}_7 - \\
& \quad - (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})\dot{y}_6) / l_{X1}] / I_{\text{ПК}}; \\
\ddot{y}_7 & = [c_{42}(y_3 + (h_T - h_{\text{ЦЦ}})y_2 - y_7 - (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})y_6) + \\
& \quad + k_{42}(\dot{y}_3 + (h_T - h_{\text{ЦЦ}})\dot{y}_2 - \\
& \quad - \dot{y}_7 - (h_{\text{ПК}} - h_{\text{ПР}})\dot{y}_6) + P_{F3} + \\
& \quad + P_{V1}] / (m_{\text{ПК}} + m_{1X} + m_{2X}); \\
\ddot{y}_8 & = [c_7(y_9 - y_8/i_1) / i_1 + k_7(\dot{y}_9 - \dot{y}_8/i_1) / i_1 +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + c_8(y_{10} - y_8/i_2) / i_2 + \\
& + k_8(\dot{y}_{10} - \dot{y}_8/i_2) / i_2 - M_{\text{Д}}] / I_{\text{Д}}; \\
\ddot{y}_9 & = [r_1c_{61}(y_3 - (h_T - r_1)y_2 - r_1y_9) + \\
& \quad + r_1k_{61}(\dot{y}_3 - (h_T - r_1)\dot{y}_2 - r_1\dot{y}_9) - \\
& \quad - c_7(y_9 - y_8/i_1) - k_7(\dot{y}_9 - \dot{y}_8/i_1)] / I_{K1}; \\
\ddot{y}_{10} & = [r_2c_{62}(y_3 - (h_T - r_2)y_2 - r_2y_{10}) + \\
& \quad + r_2k_{62}(\dot{y}_3 - (h_T - r_2)\dot{y}_2 - r_2\dot{y}_{10}) - \\
& \quad - c_8(y_{10} - y_8/i_2) - k_8(\dot{y}_{10} - \dot{y}_8/i_2)] / I_{K2}; \\
\ddot{y}_{11} & = [c_{13}(y_1 - l_{K3}y_2 - y_{11}) + k_{13}(\dot{y}_1 - l_{K3}\dot{y}_2 - \dot{y}_{11}) - \\
& \quad - c_{15}(y_{11} - (l_{K3} + l_{3X})l_{4X}y_2/l_{X2} - y_{15}) - \\
& \quad - k_{15}(\dot{y}_{11} - \dot{y}_{15} - (l_{K3} + l_{3X})l_{4X}\dot{y}_2/l_{X2})] / m_{K3}; \\
\ddot{y}_{12} & = [c_{14}(y_3 - y_{12} + (h_T - h_{K3})y_2) + \\
& \quad + k_{14}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{12} + (h_T + h_{K3})\dot{y}_2) + \\
& \quad + P_{V2}] / (m_{K3} + m_{3X} + m_{4X}); \\
\ddot{y}_{13} & = [c_{11}(y_5 - l_{1X}l_{2X}y_6/l_{X1} - y_{13}) + \\
& \quad + k_{11}(\dot{y}_5 - l_{1X}l_{2X}\dot{y}_6/l_{X1} - \dot{y}_{13})] / m_{1X}; \\
\ddot{y}_{14} & = [-c_{12}(y_{14} + l_B y_2 - y_1) - \\
& \quad - k_{12}(\dot{y}_{14} + l_B \dot{y}_2 - \dot{y}_1)] / m_B; \\
\ddot{y}_{15} & = [c_{15}(y_{11} - y_{15} - (l_{K3} + l_{3X})l_{4X}y_2/l_{X2}) + \\
& \quad + k_{15}(\dot{y}_{11} - \dot{y}_{15} - (l_{K3} + l_{3X})l_{4X}\dot{y}_2/l_{X2})] / m_{3X}.
\end{aligned}$$

В уравнениях приняты следующие упрощения: первые производные (скорости) обобщенных координат обозначаются \dot{y}_i ; вторые производные (ускорения) обозначаются \ddot{y}_i .

Основными возмущающими воздействиями внешнего и внутреннего характера, влияющими на динамику КТМ, являются неровности дорожного полотна и крутящий момент двигателя.

Возмущающие воздействия внешнего характера были представлены в виде дискретных массивов микропрофилей неровностей дорожного полотна, которые задаются с помощью значений ординат, снятых с наиболее характерных опытных реальных участков. Эти массивы выражаются как функция времени с учетом запаздывания задних колес КТМ и ПКН по отношению к передним.

Для рассматриваемой динамической системы КТМ принята модель двигателя, в которой M_d является функцией от частоты вращения коленчатого вала, а выбор значений крутящего момента производился по регуляторной характеристике. Возможность движения КТМ определялась уравнением тягового баланса.

Посредством математического аппарата на основе системы высокоуровневого программирования MATLAB 7.11.0 (R2010b) были получены матрицы численных значений отклонений степеней свободы модели, первые и вторые производные этих отклонений в соответствующие им моменты времени протекания процесса. Была проведена теоретическая оценка динамической нагруженности основных элементов конструкции КТМ и ТОК. Исследованиями доказано, что при распределении рейсовой нагрузки между предлагаемыми прицепным и навесным модулями ТОК в соотношении 1,5 : 1,0 производительность КТМ может быть увеличена на 7%, при соотношении 2,2 : 1,0 – на

12%, а при соотношении 3,4 : 1,0 – на 17% в сравнении с производительностью аналогичных выпускаемых КТМ с канатно-чokerным технологическим оборудованием за счет сокращения технологического цикла работы.

Результаты проведенной работы позволяют сделать вывод о целесообразности применения ТОК для КТМ при работе на почвогрунтах со слабой несущей способностью.

Заключение. Разработанная математическая модель движения колесной трелевочной машины с комбинированным технологическим оборудованием позволила провести теоретическую оценку динамической нагруженности основных элементов конструкции колесной трелевочной машины и комбинированного технологического оборудования при различных вариантах перераспределения пачки древесного сырья, что дает возможность увеличить производительность колесной трелевочной машины при работе на почвогрунтах со слабой несущей способностью от 7 до 17%.

Список литературы

1. Вырко Н. П. Сухопутный транспорт леса. Минск: БГТУ, 2003. 438 с.
2. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Практикум. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.
3. Протас П. А., Клоков Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 4–5. С. 256–260. DOI: 10.12737/71110.
4. Кононов А. М. Исследование реализации тягово-сцепных качеств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Беларуси: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Горки: БСХА, 1974. 41 с.
5. Соколова В. А., Петров И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. 1962. Вып. 54. С. 64–72.
6. Хайлис Г. А. К теории качения пневматического колеса // Тракторы и сельхозмашины. 1963. № 3. С. 5–7.
7. Симанович В. А., Демидов В. А., Клоков Д. В. Колеса и шины лесных и лесотранспортных машин. Минск: БГТУ, 2005. 84 с.
8. Симанович В. А., Исаченков В. С. Оценка тягово-сцепных свойств трелевочных тракторов с усовершенствованной конструкцией несущей системы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 116–119.
9. Омелянов А. Е. О применении пневматических колес на сельхозмашинах // Сельхозмашина. 1948. № 5. С. 15–18.
10. Ульянов Н. А. Теория самоходных землеройно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1969. 520 с.
11. Алексейчик Н. А., Будько Ю. В., Терехов Б. А. Повышение проходимости сельскохозяйственных машин. Минск: Урожай, 1979. 139 с.
12. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чokerного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 39–42.
13. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 23–27.
14. Исаченков В. С., Арико С. Е., В. А. Симанович В. А. К вопросу выбора параметров технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 218–223.
15. Маркеев А. П. Теоретическая механика. М.: Черо, 1999, 572 с.

References

1. Vyrko N. P. *Sukhoputnyy transport lesa* [Forest land transport]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 438 p. (In Russian).
2. Matveyko A. P., Klokov D. V., Protas P. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot. Praktikum* [Technology and equipment for logging and landing works. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2013, 199 p. (In Russian).

3. Protas P. A., Klokov D. V. Analytical study of the interaction of wheel skidder with a bundle of stems and portage. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Recent research trends of the XXI century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 4–5, pp. 256–260. DOI: 10.12737/7110 (In Russian).
4. Kononov A. M. *Issledovaniye realizatsii tyagovo-stsepynykh kachestv i agrotekhnicheskoy prokhodimosti kolesnykh traktorov na suglinistykh pochvakh Belarusi. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the realization of traction-coupling qualities and agrotechnical patency of wheeled tractors on loamy soils in Belarus. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Gorki, BSHA Publ., 1974. 41 p. (In Russian).
5. Sokolova V. A., Petrov I. P. Study of the interaction of an arched wheel with a supporting surface. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 1962, issue. 54, pp. 64–72 (In Russian).
6. Haylis G. A. To the theory of the rolling of a pneumatic wheel. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 1963, no. 3, pp. 5–7 (In Russian).
7. Simanovich V. A., Demidov V. A., Klokov D. V. *Kolesa i shiny lesnykh i lesotransportnykh mashin* [Wheels and tires forestry and transport machine]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 84 p. (In Russian).
8. Simanovich V. A., Isachenkov V. S. Evaluation of traction characteristics skidders with advanced design support system. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 116–119 (In Russian).
9. Omelyanov A. E. On the use of pneumatic wheels on agricultural machines. *Selkhoz mashina* [Agricultural machinery], 1948, no 5, pp. 15–18 (In Russian).
10. Ul'yanov N. A. *Teoriya samokhodnykh zemleroyno-transportnykh mashin* [Theory of self-propelled earth-moving machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1969, 520 p. (In Russian).
11. Alekseichik N.A., Budko Yu. V., Terekhov B. A. *Povysheniye prokhodimosti sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Raising the passability of agricultural machines]. Minsk, Urozhay Publ., 1979, 139 p. (In Russian).
12. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Rope-choker trailed implements determination of parameters. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 39–42 (In Russian).
13. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Substantiation of the parameters of tow technology equipment wheeled skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 23–27 (In Russian).
14. Isachenkov V. S., Ariko S. Ye., Simanovich V. A. On the question of choosing the parameters of the technological equipment of skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 218–223 (In Russian).
15. Markeyev A. P. *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical Mechanics]. Moscow, Chero Publ., 1999. 572 p. (In Russian).

Информация об авторах

Исаченков Владимир Сергеевич – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.isachenkov@belstu.by.

Арико Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, 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

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

Information about the authors

Isachenkov Vladimir Sergeevich – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Ariko Sergey Yevgen'evich – PhD (Engineering), Associate Professor, 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

Simanovich Vasily Antonovich – PhD (Engineering), Associate Professor, 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: lmitlz@belstu.by

Поступила 18.10.2021