

УДК 630\*377.4

**В. С. Исаченков**, ассистент (БГТУ);**В. А. Симанович**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАНАТНО-ЧОКЕРНОГО ПРИЦЕПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В статье представлены математические модели движения колесной трелевочной машины при различном компоновочном решении канатно-чокерного прицепного технологического оборудования. Проведена оценка динамической нагруженности колесной трелевочной машины. Обоснованы весовые и геометрические параметры прицепного технологического оборудования.

The paper presents the mathematical model of the skidding wheel machines with different layout solution cant-chalkier trailing technological equipment. The estimation of dynamic loading of wheel skidding car. Substantiated by weight and the geometric parameters of trailer manufacturing of equipment.

**Введение.** Условия эксплуатации лесных транспортных средств можно отнести к постоянно изменяющимся процессам динамического характера, природа возникновения и функционирования которых во времени зависит от внешних и внутренних факторов. В настоящее время этап проектирования колесных агрегатных машин характеризуется многообразием их конструкций, позволяющих выполнять различные технологические операции и приемы с предметом труда. Выбор основных параметров лесных машин на стадии проектирования связан с динамическими явлениями в узлах и агрегатах транспортного средства [1].

Поставленная задача может быть решена разработкой математического аппарата синтеза динамических звеньев, входящих в систему. Выбор расчетно-кинематических и весовых параметров сравниваемых систем может быть проведен на основе анализа показателей, оказывающих преимущественное влияние на динамику поведения всей транспортной системы [2]. В качестве таких показателей в работе нами взяты статистические величины вертикальных ускорений в центре тяжести прицепного модуля, водителя и сиденья.

Выбор расчетной схемы транспортного средства для исследования показателей эксплуатационного характера и эргономических величин в центре тяжести канатно-чокерного прицепного технологического оборудования (КЧПТО), водителя и сиденья проводился на моделях, имеющих принципиальное конструктивное отличие. В качестве основной модели принимался базовый трактор МТЗ-82.1 с серийным трелевочным технологическим оборудованием, дооснащенным осями качения.

**Математические модели процесса движения колесной трелевочной машины с прицепным технологическим оборудованием.** Принципы построения расчетных схем и допущения при составлении математических моделей движения колесной трелевочной машины

(КТМ) с КЧПТО аналогичны математическому аппарату, представленному в работе [3], и предполагает нахождение независимых, изменяющихся во времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс машины при рассмотрении переходных и установившихся режимов движения. Расчетные динамические схемы определяются следующими обобщенными координатами: вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести тягового трактора –  $y_1, y_2, y_3$ ; вертикальным перемещением центра тяжести переднего моста тягового трактора –  $y_4$ ; вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести прицепного технологического оборудования –  $y_5, y_6, y_7$ ; углом поворота колесчатого вала двигателя –  $y_8$ ; углами поворота колес тягового трактора –  $y_9$  и  $y_{10}$ ; вертикальными и продольными перемещениями дискретных масс пачки деревьев –  $y_{11}, y_{12}, y_{13}$ ; вертикальным перемещением центра тяжести водителя и сиденья –  $y_{14}$ ; угловым перемещением балансирной тележки осей ПТО –  $y_{15}$ .

В расчетные схемы (рис. 1) входят следующие параметры:  $M_d$  – момент двигателя;  $I_d$  – момент инерции вращающихся масс двигателя и ведущих частей сцепления;  $I_{K1}$  и  $I_{K2}$  – моменты инерции элементов трансмиссии и соответственно колес тягового трактора;  $I_T$  и  $I_{Ц}$  – моменты инерции тягового трактора и прицепного трелевочного оборудования;  $I_B$  – момент инерции балансирной тележки осей ПТО;  $M_T$  – масса тягового трактора;  $m_M$  – подрессоренная масса переднего моста тягового трактора;  $m_{Ц}$  – масса прицепного трелевочного оборудования;  $m_1, m_2$  и  $m_3$  – дискретные массы пачки хлыстов;  $m_B$  – подрессоренная масса водителя и сиденья;  $c_2, k_2$  и  $c_3, k_3$  – вертикальная жесткость и сопротивление шин переднего и заднего мостов тягового трактора;  $c_{41}, k_{41}$  и  $c_{42}, k_{42}$  – вертикальная и горизонтальная жесткость и сопротивление сцепки тягового трактора и прицепа;  $c_{51}, k_{51}, c_{52}, k_{52}, c_{53}$  и  $k_{53}$  – вертикальные жесткости и сопротивления

шин осей прицепного технологического оборудования;  $c_{61}$ ,  $k_{61}$  и  $c_{62}$ ,  $k_{62}$  – продольные жесткости и сопротивления шин и почвогрунта, приведенные к точкам контакта колес соответственно переднего и заднего мостов трактора с опорной поверхностью;  $c_7$ ,  $k_7$  и  $c_8$ ,  $k_8$  – угловая жесткость и сопротивление валов привода переднего и заднего мостов тягового трактора;  $c_9$ ,  $k_9$  и  $c_{10}$ ,  $k_{10}$  – продольная и вертикальная жесткость и сопротивление узла связи пачки с трактором;  $c_{11}$  и  $k_{11}$  – вертикальная жесткость и сопротивление пачки хлыстов;  $c_{12}$  и  $k_{12}$  – вертикальная жесткость и сопротивление сиденья водителя;  $i_1$  и  $i_2$  – передаточные числа приводов переднего и заднего мостов тягового трактора;  $a$ ,  $b$  и  $h_T$  – координаты центра тяжести тягового трактора;  $l_B$  – горизонтальная координата центра тяжести водителя;  $l_{ш}$ ,  $h_1$  – координаты центра тяжести прицепного трелевочного оборудования;  $l_{сц}$ ,  $h_{сц}$ ,  $h_2$  – координаты точек сцепки тягового трактора и прицепа;  $L_X$  – длина пачки хлыстов;  $l_1$ ,  $l_2$  – координаты центра тяжести пачки древесины;  $l_3$  – расстояние от оси прицепного трелевочного оборудования до горизонтальной координаты точки касания комлевой части пачки в щит;  $l_4$  – расстояние от горизонтальной координаты оси до центра тяжести

прицепного трелевочного оборудования;  $l_6$ ,  $l_7$  – расстояния от горизонтальных координат осей до центра тяжести прицепного трелевочного оборудования;  $l_8$  – расстояние от центра тяжести прицепного трелевочного оборудования до горизонтальной координаты точки касания комлевой части пачки в щит;  $l_9$  – расстояние от горизонтальной координаты центра балансирной тележки до центра тяжести ПТО;  $l_{10}$  и  $l_{11}$  – плечи балансирной тележки осей ПТО,  $l_{12}$  – расстояние от горизонтальной координаты третьей оси до центра тяжести ПТО;  $h_3$  – расстояние от опорной поверхности до канатоведущего ролика арки;  $h_4$  – расстояние от опорной поверхности до точки касания комлевой части пачки в щит прицепного трелевочного оборудования;  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  – радиусы качения колес тягового трактора и шин оси прицепного трелевочного оборудования;  $P_{K1}$  и  $P_{K2}$  – касательные силы тяги передних и задних колес трактора;  $P_{F1}$ ,  $P_{F2}$ ,  $P_{F3}$ ,  $P_{F4}$ , и  $P_{F5}$  – силы сопротивления качению колес тягового трактора и шин осей прицепного трелевочного оборудования;  $P_V$  – сила сопротивления волочения пачки;  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$  и  $q_5$  – текущие значения неровностей под колесами тягового трактора и осей прицепного трелевочного оборудования.

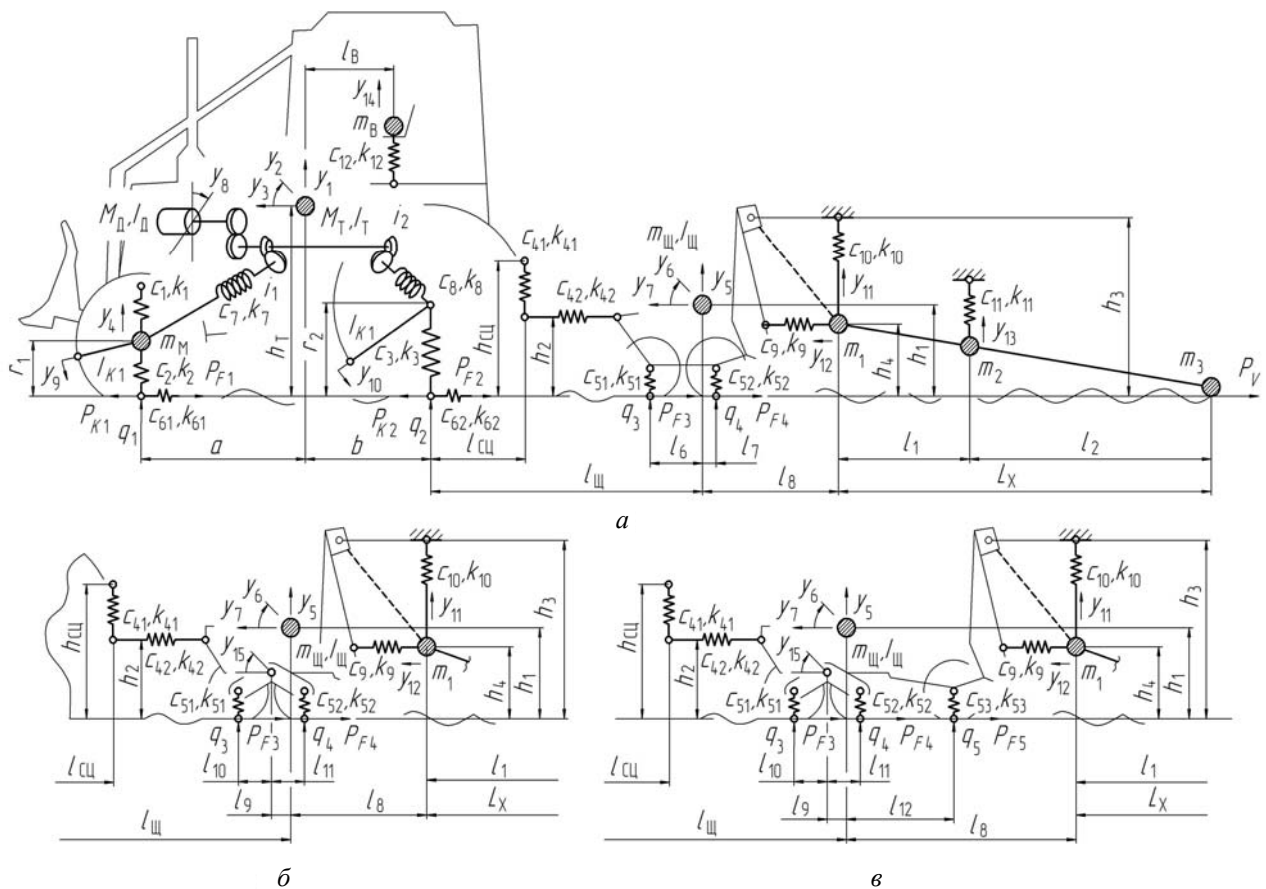


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы колесной трелевочной машины, оснащенной канатно-чокерным прицепным технологическим оборудованием

Для описания исследуемых динамических систем были взяты массово-геометрические параметры, моменты инерции, силы сопротивления и касательные силы тяги, аналогичные работе [3].

На рис. 1 приведены расчетные схемы динамической системы КТМ с КЧПТО различных компоновочных решений, разработанные с учетом ряда принятых допущений, на основе анализа ее конструкции и кинематики движения звеньев:

*a* – двухосное КЧПТО (схема имеет четырнадцать степеней свободы);

*б* – КЧПТО на двухосной балансирной тележке (схема имеет пятнадцать степеней свободы);

*в* – трехосное КЧПТО (схема имеет пятнадцать степеней свободы).

Разработанный математический аппарат дал возможность получить в системе высокоуровневого программирования *MatLab R2006a* матрицы численных значений отклонений степеней свободы моделей, первые производные этих отклонений и соответствующие им моменты времени протекания процесса, что позволило определить все необходимые параметры оценки динамической нагруженности КТМ, оснащенной различным по компоновочному решению КЧПТО (для одноосного КЧПТО математический аппарат представлен в работе [3]).

Изменения вертикальных ускорений по времени в центре тяжести КЧПТО определялись по следующим зависимостям:

а) для одноосного КЧПТО:

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_5 = & \left[ c_{41} (Y_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) Y_2 - Y_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) Y_6) + \right. \\ & + k_{41} (\dot{Y}_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_6) - \\ & - c_5 (Y_5 - l_4 Y_6 - Q_3) - k_5 (\dot{Y}_5 - l_4 \dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - c_{10} (Y_5 - (l_4 + l_3) Y_6 - Y_{11}) - \\ & \left. - k_{10} (\dot{Y}_5 - (l_4 + l_3) \dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}) \right] / m_{\text{ш}}; \end{aligned}$$

б) для двухосного КЧПТО:

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_5 = & \left[ c_{41} (Y_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) Y_2 - Y_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) Y_6) + \right. \\ & + k_{41} (\dot{Y}_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_6) - \\ & - c_{51} (Y_5 + l_6 Y_6 - Q_3) - c_{52} (Y_5 - l_7 Y_6 - Q_4) - \\ & - k_{51} (\dot{Y}_5 + l_6 \dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - k_{52} (\dot{Y}_5 - l_7 \dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - c_{10} (Y_5 - l_8 Y_6 - Y_{11}) - k_{10} (\dot{Y}_5 - l_8 \dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}) \left. \right] / m_{\text{ш}}; \end{aligned}$$

в) для КЧПТО на балансирной тележке:

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_5 = & \left[ c_{41} (Y_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) Y_2 - Y_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) Y_6) + \right. \\ & + k_{41} (\dot{Y}_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_6) - \\ & - c_{51} (Y_5 + l_{10} Y_{15} + (l_9 + l_{10}) Y_6 - Q_3) - \\ & - c_{52} (Y_5 - l_{11} Y_{15} + (l_9 - l_{11}) Y_6 - Q_4) - \\ & - k_{51} (\dot{Y}_5 + l_{10} \dot{Y}_{15} + (l_9 + l_{10}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - k_{52} (\dot{Y}_5 - l_{11} \dot{Y}_{15} + (l_9 - l_{11}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - c_{53} (Y_5 - l_{12} Y_6 - Q_5) - k_{53} (\dot{Y}_5 - l_{12} \dot{Y}_6 - \dot{Q}_5) - \\ & - c_{10} (Y_5 - l_8 Y_6 - Y_{11}) - k_{10} (\dot{Y}_5 - l_8 \dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}) \left. \right] / m_{\text{ш}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - k_{51} (\dot{Y}_5 + l_{10} \dot{Y}_{15} + (l_9 + l_{10}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - c_{52} (Y_5 - l_{11} Y_{15} + (l_9 - l_{11}) Y_6 - Q_4) - \\ & - k_{52} (\dot{Y}_5 - l_{11} \dot{Y}_{15} + (l_9 - l_{11}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - c_{10} (Y_5 - l_8 Y_6 - Y_{11}) - k_{10} (\dot{Y}_5 - l_8 \dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}) \left. \right] / m_{\text{ш}}; \end{aligned}$$

в) для трехосного КЧПТО:

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_5 = & \left[ c_{41} (Y_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) Y_2 - Y_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) Y_6) + \right. \\ & + k_{41} (\dot{Y}_1 - (b + l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - (l_{\text{ш}} - l_{\text{ЦЦ}}) \dot{Y}_6) - \\ & - c_{51} (Y_5 + l_{10} Y_{15} + (l_9 + l_{10}) Y_6 - Q_3) - \\ & - k_{51} (\dot{Y}_5 + l_{10} \dot{Y}_{15} + (l_9 + l_{10}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - c_{52} (Y_5 - l_{11} Y_{15} + (l_9 - l_{11}) Y_6 - Q_4) - \\ & - k_{52} (\dot{Y}_5 - l_{11} \dot{Y}_{15} + (l_9 - l_{11}) \dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - c_{53} (Y_5 - l_{12} Y_6 - Q_5) - k_{53} (\dot{Y}_5 - l_{12} \dot{Y}_6 - \dot{Q}_5) - \\ & - c_{10} (Y_5 - l_8 Y_6 - Y_{11}) - k_{10} (\dot{Y}_5 - l_8 \dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}) \left. \right] / m_{\text{ш}}. \end{aligned}$$

Изменение вертикальных ускорений центра тяжести водителя и сидения по времени определялось по формуле

$$\ddot{Y}_{14} = [-c_{12} (Y_{14} - Y_1 + l_B Y_2) - k_{12} (\dot{Y}_{14} - \dot{Y}_1 + l_B \dot{Y}_2)] / m_B.$$

В данных уравнениях заглавные буквы степеней свободы означают полученные при моделировании матрицы результатов, обработка которых позволила построить графики нормированных спектральных плотностей ускорений центра тяжести КЧПТО, центра тяжести водителя и сиденья, и их изменение в зависимости от параметров применяемого технологического оборудования (рис. 2, 3).

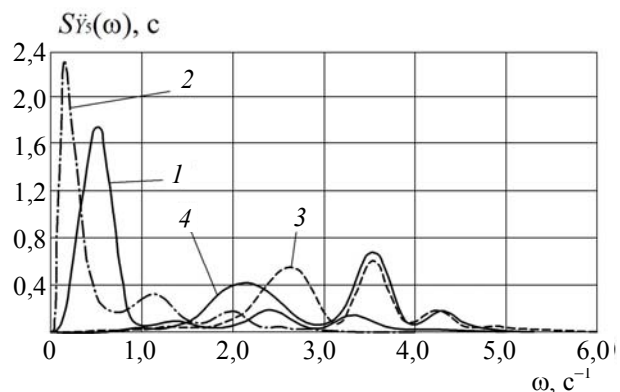


Рис. 2. Нормированные спектральные плотности вертикальных ускорений центра тяжести КЧПТО при движении по трелевочному волоку: 1 – одноосное; 2 – двухосное; 3 – на балансирной тележке; 4 – трехосное

Результаты моделирования динамических процессов для различных конструктивных схем прицепного звена проводились при транспортировке пачки деревьев объемом 1,0 м³ и скорости перемещения 4,26 км/ч по микропрофилю

трелевочного волока, характеристики которого определялись методами математической статистики.

На рис. 2 представлены нормированные спектральные плотности ускорения центра тяжести КЧПТО для различных компоновочных решений оборудования.

Для одноосной конструкции максимум нормированной спектральной плотности проявляется при частоте  $0,5 \text{ с}^{-1}$  и достигает значения  $1,73 \text{ с}$ . В то же время максимум спектральной плотности для двухосной системы проявляется при частоте  $0,22 \text{ с}^{-1}$ . Процесс снижения статистических величин ускорений затухает более интенсивно для одноосной системы.

В случае применения балансирной тележки в прицепном модуле максимумы спектральных плотностей ускорений проявляются дважды при частоте  $2,68 \text{ с}^{-1}$  и  $3,51 \text{ с}^{-1}$ . Трехосная конструкция прицепного оборудования имеет более растянутый частотный диапазон, максимумы которого проявляются при частоте  $2,10 \text{ с}^{-1}$  и  $3,53 \text{ с}^{-1}$ .

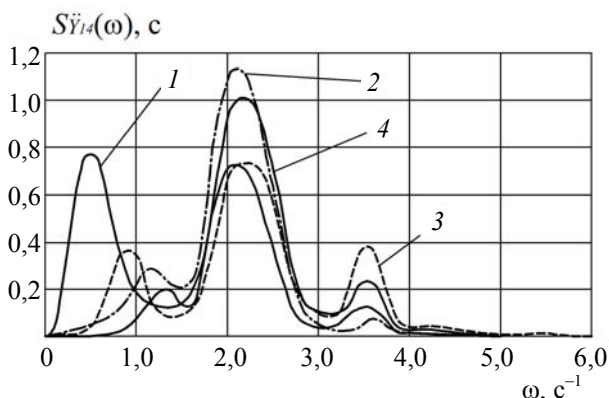


Рис. 3. Нормированные спектральные плотности вертикальных ускорений центра тяжести водителя и сиденья при движении по трелевочному волоку:

1 – одноосное; 2 – двухосное;

3 – на балансирной тележке; 4 – трехосное

Из графиков нормированных спектральных плотностей ускорения центра тяжести водителя и сиденья (рис. 3) видно, что максимальные значения лежат в диапазоне частот от  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3,5 \text{ с}^{-1}$  и проявляются трижды.

Частотные диапазоны и абсолютные величины максимумов спектральных плотностей ускорения центра тяжести водителя и сиденья зависят от изменения количества и соединения опорных осей КЧПТО. При увеличении количества опорных осей с одной до двух происходит смещение частотного диапазона в сторону увеличения с  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $2,2 \text{ с}^{-1}$ , при этом абсолютный максимум увеличивается в  $1,51$  раза. Замена одной опорной оси на балансирную тележку приводит к тому, что частотный диапазон смещается в сторону увеличения до  $2,3 \text{ с}^{-1}$ , где просматривается пиковое значение, при этом абсолютный максимум уменьшается в  $1,08$  раза. Увеличение количества опорных осей в КЧПТО до трех приводит к изменениям в максимальных значениях спектральной плотности в сторону увеличения в  $1,43$  раза.

Весовые и геометрические размеры КЧПТО были определены изменением входящих в динамическую систему параметров, которые влияют на процессы движения КТМ по трелевочному волоку. За критерий оптимизации были приняты значения максимумов спектральных плотностей.

**Заключение.** Результаты математического моделирования позволили определить диапазон варьирования параметров канатно-чокерного прицепного технологического оборудования: масса –  $0,5 \dots 0,9 \text{ т}$ ; высота центра тяжести –  $0,7 \dots 1,1 \text{ м}$ ; расстояние от заднего колеса тягача до центра тяжести –  $0,8 \dots 1,1 \text{ м}$ ; длина подвеса пачки хлыстов –  $0,4 \dots 0,6 \text{ м}$ ; расстояние от центра тяжести до центра балансирной тележки –  $0,3 \dots 0,1 \text{ м}$ ; расстояние плеч балансирной тележки –  $0,65 \dots 0,75 \text{ м}$ .

#### Литература

1. Жуков, А. В. Теория лесных машин / А. В. Жуков. – Минск: БГТУ, 2001. – 640 с.
2. Силаев, А. А. Спектральная теория подпрессоривания транспортных машин / А. А. Силаев. – М.: Машиностроение, 1972. – 192 с.
3. Исаченков, В. С. Математическая модель колесной трелевочной машины / В. С. Исаченков, В. А. Симанович // Труды БГТУ. – 2011. – № 2 (140): Лесная и деревообраб. пром-сть. – С. 75–81.

Поступила 16.03.2012