

УДК (UDC) 62-236.58

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХАРВЕСТЕРА, ОСНАЩЕННОГО КАНАТНОЙ
АНКЕРНОЙ СИСТЕМОЙ, ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ
РАБОТ НА КРУТОМ СКЛОНЕDYNAMIC MODEL OF A HARVESTER EQUIPPED WITH A ROPE ANCHOR
SYSTEM DURING LOGGING OPERATIONS ON A STEEP SLOPEЛагереv А.В.¹, Лагереv И.А.², Макулина А.В.¹
Lagerev A.V.¹, Lagerev I.A.², Makulina A.V.¹¹ – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)² – Кубанский государственный технологический университет (Краснодар, Россия)¹ – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)² – Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

Аннотация. Эффективность использования лесозаготовительных машин для производства работ на горных или холмистых территориях, характеризующихся наличием крутых склонов, зависит от многих факторов, в числе которых приоритетную роль играют количественные параметры динамического состояния как самого харвестера, так и анкерной системы для обеспечения безопасной эксплуатации указанных технологических машин. В данной статье рассматривается комплексная пространственная динамическая модель, объединяющая в общую взаимосвязанную систему все основные компоненты моделируемого явления, включая непосредственно харвестер с установленным на нем гидравлическим манипулятором, перемещаемый в пространстве сортимент, анкерную систему в составе анкерных каната и лебедки, анкерное дерево для крепления анкерного каната и грунт опорной поверхности. Динамическая математическая модель такой шестикомпонентной системы включает 35 обобщенных координат, определяющих линейные и угловые смещения центров масс перечисленных компонентов системы. Построенная с использованием метода Лагранжа II рода система из 35-ти дифференциальных уравнений решалась методом Рунге-Кутты IV порядка. Для этой цели была разработана компьютерная программа, описание которой содержится в статье. Применительно к базовому варианту моделируемой системы с количественными исходными характеристиками, ориентированными на характеристики трехосного колесного харвестера с колесной формулой 6К6, были проведены расчеты колебательных процессов для динамических параметров, определяющих нагруженность анкерной системы и безопасность эксплуатации харвестера в процессе манипулирования сортаментом.

Ключевые слова: харвестер, динамическая модель, анкерный канат, анкерное дерево, вибрационные характеристики.

Abstract. The efficiency of using logging machines for work in mountainous or hilly areas characterized by the presence of steep slopes depends on many factors, among which the quantitative parameters of the dynamic state of both the harvester itself and the anchor system play a priority role to ensure the safe operation of these technological machines. This article considers a complex spatial dynamic model that combines into a common interconnected system all the main components of the simulated phenomenon, including directly a harvester with a hydraulic manipulator mounted on it, a movable assortment in space, an anchor system consisting of an anchor rope and a winch, an anchor tree for attaching an anchor rope and the soil of the support surface. The dynamic mathematical model of such a six-component system includes 35 generalized coordinates that determine the linear and angular displacements of the mass centers of the listed system components. A system of 35 differential equations constructed using the Lagrange's equation was solved by the 4-th-order Runge-Kutta method. For this purpose, a computer program has been developed, the description of which is contained in the article. In relation to the basic version of the simulated system with quantitative initial characteristics focused on the characteristics of a three-axle wheeled harvester with a 6K6 wheel formula, calculations of oscillatory processes for dynamic parameters determining the loading of the anchor system and the safety of harvester operation in the process of assortment manipulation were carried out.

Keywords: harvester, dynamic model, anchor rope, anchor tree, vibration characteristics.

<i>Дата получения статьи:</i>	06.05.2024	†	<i>Date of manuscript reception:</i>	06.05.2024
<i>Дата принятия к публикации:</i>	11.09.2024	†	<i>Date of acceptance for publication:</i>	11.09.2024
<i>Дата публикации:</i>	25.09.2024	†	<i>Date of publication:</i>	25.09.2024

Сведения об авторах:

Лагерев Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», *e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

Макулина Анна Васильевна – аспирант ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: annahimich14@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>

Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor at Kuban State Technological University, *e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

Anna V. Makulina – Postgraduate at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: annahimich14@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук № МД-1543.2022.4

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. MD-1543.2022.4

1. Введение

Истощение доступных, спелых, равнинных эксплуатационных лесов в Сибири и на Дальнем Востоке, то есть в регионах, которые некогда назывались лесоизбыточными регионами Российской Федерации, привело к необходимости вовлечения в промышленное производство лесов, произрастающих на склонах гор, сопок и холмисто-рядовых рельефов [1, 2].

Значительные площади спелого древо-стоя сосредоточены в удаленных районах со слабо развитой транспортной инфраструктурой, на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов, в местах с частичным наличием сильно слабонесущих, переувлажненных грунтов, заболоченности и топей. Больше всего лесо-эксплуатационных территорий с сильно переувлажненными и заболоченными участками находится в Республике Саха (Якутия) и Хабаровском крае [1]. Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древо-

стой, сосредоточены на крутых склонах, которые в нижней своей части часто соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками).

Ведущие компании-производители машин для сортиментной заготовки – Ponsse, John Deere, Komatsu – предлагают свои технические решения, которые существенно повышают эффективность работы техники при работе на склонах. Прежде всего – это установка специальной лебедки [1, 3-6]. Лебедка позволяет зацепиться тросом за верх склона и помогает машине перемещаться по склону. Она стабильно держит тросом машину на уклоне, не дает пробуксовывать трансмиссии и позволяет экономить топливо. Длина троса лебедки у Ponsse составляет 350 м, у Komatsu: на харвестерах – 325 м, на форвардерах – 425 м. Диаметр троса у лебедок составляет 14-15 мм [1]. Лебедка существенно помогает и при работе машин на склонах в зимний период, когда из-за снега и наледи склон, вдобавок ко всему, становится еще и скользким.

Исследованию рабочих процессов и динамики лесных машин посвящено достаточ-

но большое число работ, в частности, [7-12]. В качестве метода исследований динамической нагруженности в большинстве работ принято математическое моделирование с использованием двух- и трехмассовых расчетных схем.

Также известны отдельные исследования в области изучения рабочих процессов машин для лесозаготовки на крутых склонах [13-16]. Однако количество таких работ не велико. Это связано с тем, что объемы лесозаготовки на крутых склонах ранее были не существенными в силу наличия более пригодных лесов на равнинной местности. Поэтому и вопросам создания специальных машин исследователи и инженеры не уделяли должного внимания.

Эффективность использования лесозаготовительных машин для производства работ на горных или холмистых территориях, характеризующихся наличием крутых склонов, зависит от многих факторов, в числе которых приоритетную роль играют количественные параметры динамического состояния как самого харвестера, так и анкерной системы для обеспечения безопасной эксплуатации указанных технологических машин. Однако в настоящее время публикации о

проведенных научных исследованиях, связанных с моделированием или экспериментальным изучением специфики формирования динамического состояния харвестеров при проведении лесозаготовительных работ на крутых склонах, достаточно редки. В числе таких исследований можно назвать, например, работы [17-19].

2. Модели и методы

Динамический анализ харвестера, оснащенного канатной анкерной системой, при проведении им лесозаготовительных работ на крутом склоне выполнялся на примере трехосного колесного харвестера с колесной формулой 6К6. Подобную конструкцию в настоящее время имеют харвестеры таких ведущих фирм-производителей лесной техники, как Амкодор (Беларусь) [6, 20], John Deere (Канада) [21], Logset, Ponsse и бывшая Valmet (Финляндия) [22, 23], Ecolog (Швеция) [24].

Динамическая математическая модель шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» применительно к трехосному колесному харвестеру с колесной формулой 6К6 показана на рис. 1.

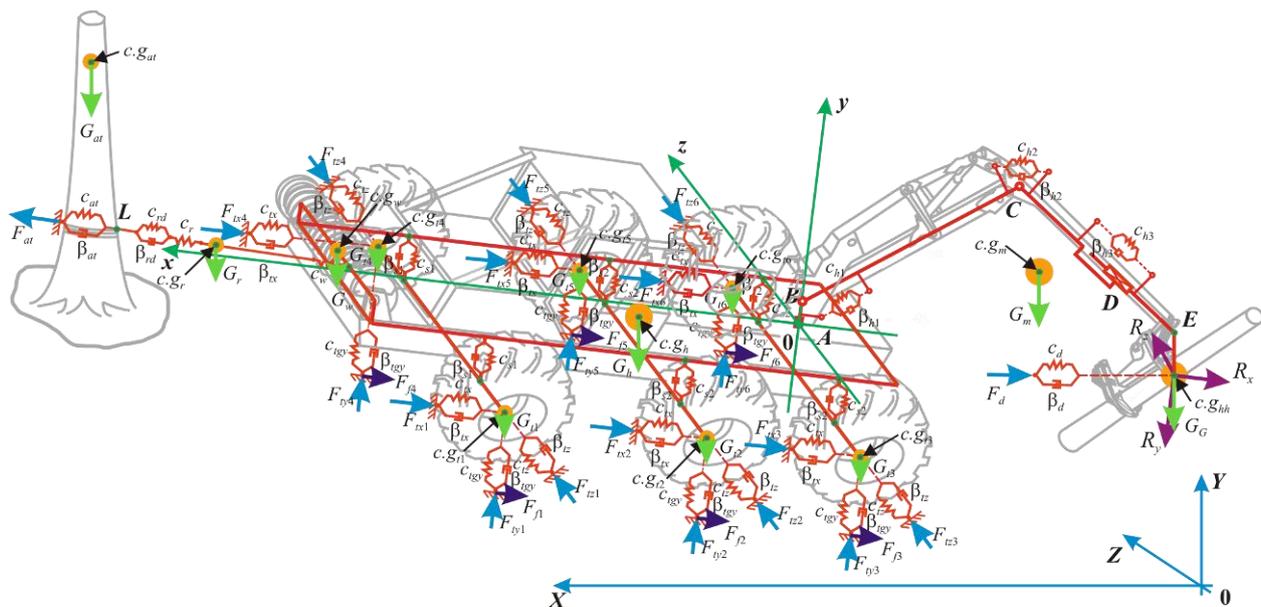


Рис. 1. Динамическая математическая модель шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт»

Указанная математическая модель построена для неподвижного харвестера с неразрезной несущей рамой, закрепленного на крутом склоне с помощью одноответвеного анкерного каната и предназначена для моделирования его динамики в процессе манипулирования сортиментом с помощью штатного гидравлического манипулятора.

Металлоконструкция несущей рамы харвестера рассматривается в виде набора континуальных жестких стержней. Ее характеристики выражаются погонным весом g_f , моментом инерции сечений EJ_f , длиной и шириной рамы L_f и D_f . Суммарный вес несущей рамы, включая вес кабины, силовой установки и вспомогательного оборудования, а также подвески и колесных пар составляет полный вес харвестера G_h .

Оси колесных пар рассматриваются в виде континуальных жестких стержней, соединенных с несущей рамой одностипными подвесками, которые обладают конечной жесткостью только в вертикальном направлении. Динамические характеристики подвесок выражаются коэффициентами жесткости c_s и коэффициентами вязкого сопротивления β_s , причем в качестве динамической модели подвесок принята модель Кельвина-Фойгта [25].

Колеса харвестера рассматриваются в виде одностипных вязко-упругих элементов весом G_t . В качестве динамической модели колес принята модель Кельвина-Фойгта [25]. Их динамические характеристики выражаются коэффициентами жесткости материала шин в продольном c_{tx} , радиальном c_{ty} и поперечном c_{tz} направлениях деформации шин, а также коэффициентами вязкого сопротивления материала шин в указанных направлениях β_{tx} , β_{ty} и β_{tz} [25, 26].

Металлоконструкция манипулятора харвестера рассматривается в виде набора континуальных упругих стержней, которые по длине i -го стержня ξ_i ($\xi_i \in [0; L_i]$) могут иметь как постоянное, так и переменное поперечное сечение. Их характеристики выражаются погонным весом g_i или $g_i(\xi_i)$, мо-

ментами инерции сечений при изгибе в вертикальном направлении EJ_{iv} или $EJ_{iv}(\xi_i)$, моментами инерции сечений при изгибе в поперечном направлении EJ_{ic} или $EJ_{ic}(\xi_i)$ и длиной отдельных стержней L_i : $g_1(0 \leq \xi_1 \leq L_1)$, $g_2(0 \leq \xi_2 \leq L_2)$, $g_3(0 \leq \xi_3 \leq L_3)$ и $g_4(0 \leq \xi_4 \leq L_4)$; $EJ_1(0 \leq \xi_1 \leq L_1)$, $EJ_2(0 \leq \xi_2 \leq L_2)$, $EJ_3(0 \leq \xi_3 \leq L_3)$ и $EJ_4(0 \leq \xi_4 \leq L_4)$. Характеристики гидродвигателя механизма движения i -го звена манипулятора, в качестве которого преимущественно используются силовые гидроцилиндры, выражаются коэффициентами жесткости c_{hi} и вязкого сопротивления β_{hi} [22, 29], причем в качестве динамической модели гидроцилиндров принята модель Кельвина-Фойгта [25].

Металлоконструкция анкерной лебедки рассматривается в виде континуальных упругих стержней. Ее характеристики выражаются суммарным весом самой лебедки и находящегося на барабане части анкерного каната G_w и коэффициентом жесткости в продольном направлении c_w .

Анкерный канат рассматривается в виде гибкой нити постоянного поперечного сечения диаметром d_r , погонным весом g_r и переменной длины $L_r \in [L_{r,\min}; L_{r,\max}]$, имеющей естественное статическое провисание в пролете между анкерным деревом и анкерной лебедкой в зависимости от натяжения. Его характеристики выражаются весом G_r , переменной величины и коэффициентом жесткости c_r [30].

Анкерное дерево рассматривается в виде континуального упругого стержня переменного поперечного сечения. Его характеристики выражаются плотностью древесины (в зависимости от породы дерева) ρ_{at} , высотой L_{at} , весом G_{at} , приложенным к центру масс дерева на его продольной оси на высоте H_{at} от поверхности грунта, а также коэффициентами жесткости c_{at} и вязкого сопротивления β_{at} древесины [32-33]. В качестве динами-

ческой модели материала анкерного дерева принята модель Кельвина-Фойгта [25].

Грунт опорной поверхности рассматривается как вязкоупругий континуум, физико-механические свойства которого зависят от типа и состояния грунта и количественно выражаются коэффициентами жесткости c_{gr} и вязкого сопротивления β_{gr} в вертикальном направлении [27]. В качестве динамической модели материала грунта принята модель Кельвина-Фойгта [25].

Для построения системы дифференциальных уравнений 2-го порядка, характеризующих динамику шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» в обобщенных координатах, был использован подход на основе уравнений Лагранжа II рода [34]. В общей сложности модель характеризуется 35-ю степенями свободы и соответствующими им 35-ю обобщенными координатами. В их число включены следующие:

- q_1, q_2, q_3 - перемещения центра масс харвестера в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;
- q_4, q_5, q_6 - поворот конструкции харвестера относительно точки, совпадающей с центром масс, вокруг осей локальной системы координат x, y и z ;
- q_7, q_8, q_9 - перемещения центра масс гидравлического манипулятора в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;
- q_{10}, q_{11}, q_{12} - перемещения совместного центра масс рабочего органа и сортимента в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;
- q_{13} - качание рабочего органа и сортимента относительно точки, совпадающей с центром масс, относительно оси локальной системы координат z ;
- q_{14}, q_{15}, q_{16} - перемещения центра масс левого колеса переднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;
- q_{17}, q_{18}, q_{19} - перемещения центра масс левого колеса среднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;

- q_{20}, q_{21}, q_{22} - перемещения центра масс левого колеса заднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;

- q_{23}, q_{24}, q_{25} - перемещения центра масс правого колеса переднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;

- q_{26}, q_{27}, q_{28} - перемещения центра масс правого колеса среднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;

- q_{29}, q_{30}, q_{31} - перемещения центра масс правого колеса заднего моста в направлении осей локальной системы координат x, y и z ;

- q_{32} - перемещение центра масс анкерной лебедки в направлении оси локальной системы координат x ;

- q_{33}, q_{34} - перемещения центра масс анкерного каната в направлении осей локальной системы координат x и y ;

- q_{35} - перемещение центра масс анкерного дерева в направлении оси локальной системы координат x .

Для определения обобщенных сил Q_i , соответствующих выбранным обобщенным координатам q_i , использовался алгоритм, изложенный в [35] и позволяющий учесть действие сил различной природы, которые необходимо учесть при построении динамической модели шестикомпонентной системы, - как потенциальных (сил тяжести и упругости элементов системы), так и диссипативных (сил трения между колесами харвестера и грунтом и вязкого сопротивления при деформировании элементов системы).

Для каждой i -й обобщенной силы определялась сумма работ δA всех сил, учитываемых в геометрической модели «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт», на i -м обобщенном возможном перемещении δq_i при условии равенства 0 остальных обобщенных возможных перемещений:

$$\delta A = \delta A(G_h) + \delta A(G_m) + \delta A(G_G) + \delta A(G_w) + \delta A(G_r) + \delta A(G_{at}) + \delta A(R_x) + \delta A(R_y) + \delta A(R_z) + \delta A(F_r) + \\ + \delta A(F_w) + \delta A(F_d) + \delta A(F_{at}) + \sum_{k=1}^{k=6} [\delta A(G_{tk}) + \delta A(F_{txk}) + \delta A(F_{tyk}) + \delta A(F_{tzk}) + \delta A(F_{fk}) + \delta A(F_{sk})], \quad (1)$$

где F_r - упругая сила, возникающая при растяжении анкерного каната; F_w - упругая сила, возникающая при изгибе металлоконструкции анкерной лебедки; R_x, R_y, R_z - проекции действующих в процессе работы харвестера эксплуатационных нагрузок (веса харвестерной головки и сортимента, центробежных и тангенциальных сил инерции) на координатные оси x, y и z ; F_d - вязкоупругая сила, создаваемая демпфером харвестерной головки для уменьшения ее раскачивания; F_{at} - вязкоупругая сила, возникающая при изгибе анкерного дерева; $F_{txk}, F_{tyk}, F_{tzk}$ - вязкоупругие силы, возникающие при деформировании k -го колеса харвестера вдоль координатных осей x, y и z ; F_{sk} - вязкоупругая сила, создаваемая k -й подвеской харвестера.

Обобщенная сила Q_i равна коэффициенту при δq_i . В связи с тем, что анкерный канат обеспечивает передачу нагрузки только в одном направлении (при растяжении), некоторые обобщенные силы имеют различное математическое выражение в зависимости от направления соответствующих им обобщенных возможных перемещений.

$$T = \frac{G_h + G_m + G_G + G_w}{2g} \sum_{k=1}^{k=3} \dot{q}_k^2 + \frac{J_{hx}}{2} \dot{q}_4^2 + \frac{J_{hy}}{2} \dot{q}_5^2 + \frac{J_{hz}}{2} \dot{q}_6^2 + \frac{G_m + G_G}{2g} \sum_{k=7}^{k=9} \dot{q}_k^2 + \\ + \frac{G_G}{2g} \sum_{k=10}^{k=12} \dot{q}_k^2 + \frac{J_{Gz}}{2} \dot{q}_{13}^2 + \frac{G_t}{2g} \sum_{k=14}^{k=31} \dot{q}_k^2 + \frac{G_w}{2g} \dot{q}_{32}^2 + \frac{G_r}{2g} \sum_{k=33}^{k=34} \dot{q}_k^2 + \frac{G_{at}}{2g} \dot{q}_{35}^2,$$

где J_{hx}, J_{hy}, J_{hz} - моменты инерции харвестера при повороте относительно координатных осей x, y и z ; J_{Gz} - момент инерции сортимента совместно с харвестерной головкой при качании относительно координатной оси z ; g - ускорение свободного падения.

Применительно к рассматриваемой динамической модели система уравнений Лагранжа II рода

Применяя последовательно выражение (1) для всех обобщенных возможных перемещений δq_i , учитываемых в динамической математической модели, были построены требуемые расчетные зависимости для определения обобщенных сил Q_i ($1 \leq i \leq 35$).

Полная кинетическая энергия шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» выражается следующей зависимостью, учитывающей индивидуальные вклады кинетической энергии характерных элементов указанной системы – харвестера T_h , манипулятора T_m , сортимента вместе с харвестерной головкой T_G , колес T_t , анкерной лебедки T_w , анкерного каната T_r и анкерного дерева T_{at} :

$$T = T_h + T_m + T_G + T_t + T_w + T_r + T_{at} \quad (2)$$

или

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad i \in [1; 35]$$

вследствие того, что полная кинетическая энергия системы T согласно выражению (2) не зависит от положения ее характерных элементов и, следовательно,

$$\frac{\partial T}{\partial q_i} = 0$$

для $i \in [1; 35]$, принимает следующий вид:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = Q_i, \quad i \in [1; 35] \quad (3)$$

или в развернутой форме:

$$(G_{h,sum} + G_w) \ddot{q}_k = gQ_k, \quad k = 1, 2, 3;$$

$$J_{hmz} \ddot{q}_4 = Q_4;$$

$$J_{hmy} \ddot{q}_5 = Q_5;$$

$$J_{hmz} \ddot{q}_6 = Q_6;$$

$$(G_m + G_G) \ddot{q}_k = gQ_k, \quad k = 7, 8, 9;$$

$$G_G \ddot{q}_k = gQ_k, \quad k = 10, 11, 12;$$

$$J_{Gz} \ddot{q}_{13} = Q_{13};$$

$$G_i \ddot{q}_k = gQ_k, \quad k \in [14; 31];$$

$$G_w \ddot{q}_{32} = gQ_{32};$$

$$G_r \ddot{q}_k = gQ_k, \quad k = 33, 34;$$

$$G_{at} \ddot{q}_{35} = gQ_{35}$$

при начальных условиях (при $\tau = \tau_0 = 0$)

$$q_i(\tau_0) = q_{i,0}, \quad i \in [1; 12] \text{ и } i \in [14; 35]; \quad (4)$$

$$q_{13}(\tau_0) = \alpha_s; \quad (5)$$

$$\dot{q}_i(\tau_0) = \dot{q}_{i,0}, \quad i \in [1; 35], \quad (6)$$

где J_{hmz} , J_{hmy} , J_{hmz} - суммарные моменты инерции харвестера и манипулятора при повороте относительно осей x , y и z ; J_{Gz} - момент инерции харвестерной головки с сортиментом при повороте относительно оси z .

На основе решения системы дифференциальных уравнений (3) могут быть определены дополнительные параметры, характеризующие динамику моделируемой шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт»:

- динамическое усилие натяжения анкерного каната:

$$S_r(\tau) = S_{r0} + c_r [q_{35}(\tau) - q_{32}(\tau)];$$

- динамическое напряжение растяжения анкерного каната:

$$\sigma_r(\tau) = \frac{S_r(\tau)}{f_r};$$

- динамический коэффициент запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию:

$$n_r(\tau) = \frac{[T_r]}{\sigma_r(\tau)};$$

- динамический коэффициент запаса работоспособности по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево:

$$n_{at}(\tau) = \frac{a_{at} d_{1,3} + b_{at} - \Delta_{at}}{S_r(\tau) \cos \psi_L};$$

- модуль динамического смещения центра масс харвестера:

$$|q_h|(\tau) = \sqrt{q_1^2(\tau) + q_2^2(\tau) + q_3^2(\tau)};$$

- модуль динамического смещения центра масс манипулятора:

$$|q_{man}|(\tau) = \sqrt{q_7^2(\tau) + q_8^2(\tau) + q_9^2(\tau)};$$

- модуль динамического смещения центра масс харвестерной головки:

$$|q_{hh}|(\tau) = \sqrt{q_{10}^2(\tau) + q_{11}^2(\tau) + q_{12}^2(\tau)},$$

где S_{r0} - усилие предварительного натяжения анкерного каната (в начальный момент времени τ_0); c_r - коэффициент продольной жесткости анкерного каната; f_r - суммарная площадь поперечного сечения проволок анкерного каната, определяемая типом каната; $[T_r]$ - разрывное усилие анкерного каната, определяемая его типом [36, 37]; $d_{1,3}$ - диаметр анкерного дерева на высоте 1,3 м от поверхности грунта; a_{at} , b_{at} , Δ_{at} - параметры уравнения регрессии для расчета критического усилия опрокидывания анкерного дерева [38].

Динамическая математическая модели шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» учитывает, что в процессе манипулирования сортиментом при неподвижном положении харвестера возможна как совместная, так и индивидуальная работа механизмов движения звеньев манипулятора, которая обеспечивает:

- поворот колонны q_{m1} вокруг вертикальной оси y ;

- поворот стрелы q_{m2} в вертикальной плоскости;

- поворот рукоятки q_{m3} в вертикальной плоскости;

- выдвижение телескопируемого звена q_{m4} ;

- вращение харвестерной головки q_{m5} вокруг вертикальной оси Y .

В рассматриваемой модели принято допущение о том, что закон изменения координаты k -го движения во времени $q_{mk}(\tau)$ подчиняется кусочно-линейному закону изменения скорости движения $\dot{q}_{mk}(\tau)$ с тремя характерными периодами:

- периодом разгона от начального значения скорости $\dot{q}_{mk} = 0$ до конечного значения

$$\dot{q}_{mk} = \dot{q}_{st,k};$$

- периодом установившегося движения с постоянной скоростью $\dot{q}_{mk} = \dot{q}_{st,k} = const$;

- периодом торможения от начального значения скорости $\dot{q}_{mk} = \dot{q}_{st,k}$ до конечного значения $\dot{q}_{mk} = 0$.

Графики законов скоростей с указанием характерных количественных параметров приведены на рис. 2. Каждый закон $\dot{q}_{mk}(\tau)$ количественно характеризуется следующими пятью параметрами, требующими их задания:

- моментами времени начала $\tau_{b,k}$ и окончания $\tau_{e,k}$ k -го движения;

- ускорениями разгона $\ddot{q}_{a,k}$ и торможения $\ddot{q}_{d,k}$;

- скоростью установившегося движения $\dot{q}_{st,k}$.

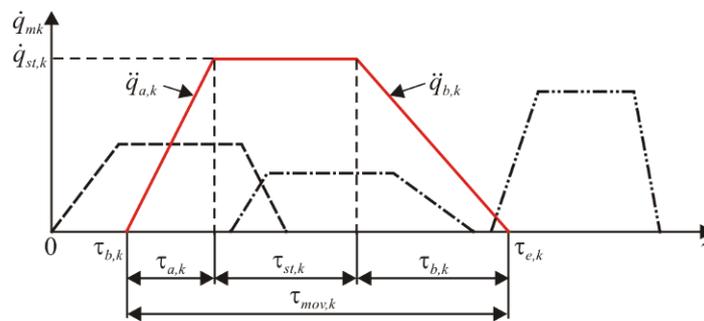


Рис. 2. Расчетные графики законов скоростей звеньев манипулятора

Остальные параметры законов движения могут быть определены с помощью следующих выражений:

- продолжительность движения

$$\tau_{mov,k} = \tau_{e,k} - \tau_{b,k};$$

- продолжительность периодов разгона, торможения и установившегося движения

$$\tau_{a,k} = \dot{q}_{st,k} / \ddot{q}_{a,k};$$

$$\tau_{d,k} = \dot{q}_{st,k} / |\ddot{q}_{d,k}|;$$

$$\tau_{st,k} = \tau_{mov,k} - \tau_{a,k} - \tau_{d,k}.$$

Тогда координата k -го звена при перемещении из своего начального положения $q_{mk,0}$, занимаемого в момент времени $\tau_{b,k}$, в произвольный момент времени $\tau \in [\tau_{b,k}; \tau_{e,k}]$ будет определяться зависимостями:

• направление перемещения звена совпадает с возрастанием координаты q_{mk} :

- при $\tau \in [\tau_{b,k}; \tau_{b,k} + \tau_{a,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} + 0,5\ddot{q}_{a,k}(\tau - \tau_{b,k})^2;$$

- при $\tau \in [\tau_{b,k} + \tau_{a,k}; \tau_{e,k} - \tau_{d,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} + 0,5\ddot{q}_{a,k}\tau_{a,k}^2 + \dot{q}_{st,k}(\tau - \tau_{b,k} - \tau_{a,k});$$

- при $\tau \in [\tau_{e,k} - \tau_{d,k}; \tau_{e,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} + 0,5\ddot{q}_{a,k}\tau_{a,k}^2 + \dot{q}_{st,k}(\tau - \tau_{a,k}) - 0,5|\ddot{q}_{d,k}|(\tau - \tau_{b,k} - \tau_{a,k} - \tau_{st,k})^2;$$

• направление перемещения звена совпадает с уменьшением координаты q_{mk} :

- при $\tau \in [\tau_{b,k}; \tau_{b,k} + \tau_{a,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} - 0,5\ddot{q}_{a,k}(\tau - \tau_{b,k})^2;$$

- при $\tau \in [\tau_{b,k} + \tau_{a,k}; \tau_{e,k} - \tau_{d,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} - 0,5\ddot{q}_{a,k}\tau_{a,k}^2 - \dot{q}_{st,k}(\tau - \tau_{b,k} - \tau_{a,k});$$

- при $\tau \in [\tau_{e,k} - \tau_{d,k}; \tau_{e,k}]$

$$q_{mk} = q_{mk,0} - 0,5\ddot{q}_{a,k}\tau_{a,k}^2 + \dot{q}_{st,k}(\tau - \tau_{a,k}) + 0,5|\ddot{q}_{d,k}|(\tau - \tau_{b,k} - \tau_{a,k} - \tau_{st,k})^2.$$

При назначении количественных параметров закона перемещения k -го звена манипулятора необходимо учитывать возмож-

ные граничные значения координаты q_{mk} , лимитируемые параметрами кинематической схемы манипулятора. Если направление перемещения звена совпадает с возрастанием координаты q_{mk} , то должно выполняться условие:

$$q_{mk}(\tau = \tau_{e,k}) \leq q_{k0} + \Delta q_k,$$

а если направление перемещения звена совпадает с уменьшением координаты q_{mk} , то условие:

$$q_{mk}(\tau = \tau_{e,k}) \geq 0,$$

где q_{k0} - начальная граничная координата k -го звена манипулятора; Δq_k - интервал изменения координаты k -го звена манипулятора.

Практическая реализация представленной динамической математической модели требует знания значительного числа количественных параметров, характеризующих свойства ее структурных элементов. Частично эти параметры являются неизменяемыми исходными данными, изначально задаваемыми при проведении динамического расчета, а частично – вычисляемыми данными, значения которых определяются до начала расчета, или переменными данными, значения которых требуют постоянной коррекции в процессе проведения расчета.

Для интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка (3) при начальных условиях (4) - (6), определяющих динамику шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт», целесообразно использовать метод Рунге-Кутты 4-го порядка [39, 40].

Исходную систему из 35-ти обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка (3) вида

$$\ddot{q}_i = g_i(\tau, q_1, \dots, q_{35}, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_{35}), \quad i \in [1; 35]$$

используя обозначения $r_i = \dot{q}_i$, можно свести к системе из 70-ти обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка вида:

$$\dot{r}_i = g_i(\tau, q_1, \dots, q_{35}, r_1, \dots, r_{35}), \quad i \in [1; 35]$$

$$\dot{q}_i = r_i \quad i \in [1; 35]$$

при начальных условиях

$$q_i(\tau_0) = q_{i,0}, \quad i \in [1; 35];$$

$$r_i(\tau_0) = r_{i,0} = \dot{q}_{i,0}, \quad i \in [1; 35].$$

Для произвольного последующего ($k+1$)-го момента времени работы харвестера ($k = 1, 2, \dots$) решение указанной системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка находится согласно зависимостям метода Рунге-Кутты 4-го порядка:

$$r_{i,k+1} = r_{i,k} + (K_{i,1} + 2K_{i,2} + 2K_{i,3} + K_{i,4})\Delta\tau/6;$$

$$q_{i,k+1} = q_{i,k} + (L_{i,1} + 2L_{i,2} + 2L_{i,3} + L_{i,4})\Delta\tau/6,$$

где $\Delta\tau$ - шаг по времени при интегрировании дифференциальных уравнений; $K_{i,j}$, $L_{i,j}$ - коэффициенты, выражаемые зависимостями:

$$K_{i,1} = g_i(\tau_k; q_{i,k}; r_{i,k});$$

$$K_{i,2} = g_i\left(\tau_k + \frac{\Delta\tau}{2}; q_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}L_{i,1}; r_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}K_{i,1}\right);$$

$$K_{i,3} = g_i\left(\tau_k + \frac{\Delta\tau}{2}; q_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}L_{i,2}; r_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}K_{i,2}\right);$$

;

$$K_{i,4} = g_i(\tau_k + \Delta\tau; q_{i,k} + \Delta\tau L_{i,3}; r_{i,k} + \Delta\tau K_{i,3});$$

$$L_{i,1} = r_{i,k};$$

$$L_{i,2} = r_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}K_{i,1};$$

$$L_{i,3} = r_{i,k} + \frac{\Delta\tau}{2}K_{i,2};$$

$$L_{i,4} = r_{i,k} + \Delta\tau K_{i,3}.$$

Разработанная динамическая математическая модель шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» применительно к трехосному колесному харвестеру с колесной формулой 6К6 была реализована в компьютерной программе «Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне», исходный текст которой написан на языке Pascal. Структура программы включает в себя головную программу

Dynamics_of_Harvester_with_Rope_Anchoring и 9 подпрограмм типа Procedure:

- AccDyn - вычисление ускорений обобщенных координат \ddot{q}_i в произвольный момент времени работы харвестера;

- *DetIntegral* - вычисление интеграла при расчете коэффициента жесткости анкерного дерева;

- *DetMinSr* - расчет минимально допустимого усилия натяжения анкерного каната $[S_r]_{\min}$;

- *ForceMoment* - расчет сил R_x , R_y и R_z от сортамента в произвольный момент времени работы харвестера;

- *ForceQi* - расчет обобщенных сил Q_i в произвольный момент времени работы харвестера;

- *KinematPar* - расчет кинематических параметров движения звеньев манипулятора в произвольный момент времени работы харвестера;

- *LeftPart* - вычисление правой части системы уравнений Рунге-Кутты IV-го порядка;

- *Motion* - расчет количественных параметров динамического состояния моделируемой системы на основе алгоритма решения системы дифференциальных уравнений 1-го порядка методом Рунге-Кутты IV-го порядка;

- *ParamDet* - расчет вычисляемых исходных параметров математической модели в произвольный момент времени работы харвестера.

Результатом выполнения компьютерной программы является нахождение с постоянным шагом $\Delta\tau$ законов изменения во времени динамических параметров шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» на протяжении временного интервала технологической операции манипулирования сортиментом.

В число расчетных данных входят такие параметры, как:

- пространственное положение, скорости и ускорения, которые определяют 35 характерных перемещений и углов поворота q_i , устанавливающих состояние харвестера и анкерной системы в дискретные моменты времени, а именно $q_i(\tau)$, $\dot{q}_i(\tau)$, $\ddot{q}_i(\tau)$;

- текущие координаты $q_{mj}(\tau)$, скорости $\dot{q}_{mj}(\tau)$ и ускорения $\ddot{q}_{mj}(\tau)$ звеньев манипу-

лятора ($j = 1, \dots, 5$) в дискретные моменты времени;

- ключевые параметры динамической системы в дискретные моменты времени, а именно: динамическое усилие натяжения анкерного каната $S_r(\tau)$, динамическое напряжение растяжения анкерного каната $\sigma_r(\tau)$, динамический коэффициент запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию $n_r(\tau)$, динамический коэффициент запаса работоспособности по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево $n_{at}(\tau)$, модуль динамического смещения центра масс харвестера $|q_h|(\tau)$, модуль динамического смещения центра масс манипулятора $|q_{man}|(\tau)$, модуль динамического смещения центра масс харвестерной головки $|q_{hh}|(\tau)$;

- силы, действующие на сортимент в процессе его перемещения, в проекциях на оси системы координат xuz $R_x(\tau)$, $R_y(\tau)$, $R_z(\tau)$ и модуль силы $R_{\text{mod}}(\tau)$ в дискретные моменты времени;

- координаты центра масс динамической системы в целом в системе координат xuz $x_{sum}(\tau)$, $y_{sum}(\tau)$ и $z_{sum}(\tau)$ в дискретные моменты времени;

- координаты центра масс манипулятора в системе координат xuz $x_m(\tau)$, $y_m(\tau)$ и $z_m(\tau)$ в дискретные моменты времени;

- коэффициенты жесткости манипулятора в направлении осей системы координат xuz $c_{mx}(\tau)$, $c_{my}(\tau)$ и $c_{mz}(\tau)$ в дискретные моменты времени;

- суммарные моменты инерции ходовой части харвестера, гидравлического манипулятора и анкерной лебедки при повороте относительно координатных осей x , y и z $J_{hx}(\tau)$, $J_{hy}(\tau)$ и $J_{hz}(\tau)$ в дискретные моменты времени;

- минимальные $q_{i,\min}$, максимальные $q_{i,\max}$ значения и амплитуды $q_{i,a} = 0,5|q_{i,\max} - q_{i,\min}|$ характерных перемещений и углов поворота q_i на протяжении

временного интервала манипулирования сортиментом;

- минимальные и максимальные значения, амплитуды ключевых параметров динамической системы на протяжении временного интервала манипулирования сортиментом, а именно: динамического усилия натяжения анкерного каната $S_{r,\min}$, $S_{r,\max}$, $S_{r,a}$; динамического напряжения растяжения анкерного каната $\sigma_{r,\min}$, $\sigma_{r,\max}$, $\sigma_{r,a}$; динамического коэффициента запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию $n_{r,\min}$, $n_{r,\max}$, $n_{r,a}$; динамического коэффициента запаса работоспособности по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево $n_{at,\min}$, $n_{at,\max}$, $n_{at,a}$; модуля динамического смещения центра масс харвестера $|q_h|_{\min}$, $|q_h|_{\max}$, $|q_h|_a$; модуля динамического смещения центра масс манипулятора $|q_{man}|_{\min}$, $|q_{man}|_{\max}$, $|q_{man}|_a$; модуля динамического смещения центра масс харвестерной головки $|q_{hh}|_{\min}$, $|q_{hh}|_{\max}$, $|q_{hh}|_a$.

3. Обсуждение результатов моделирования

С целью верификации предложенной динамической модели шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» и результатов расчета с помощью компьютерной программы «Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне» были выполнены исследования базового («эталонного») варианта моделируемой фи-

зической системы. В качестве базового варианта был принят вариант харвестера с колесной формулой 6К6. В качестве прототипа использовался колесный харвестер Амкодор 2562 производства ОАО «АМКОДОР»-управляющая компания холдинга» (Беларусь) [6, 20].

В качестве моделируемого движения манипулятора была принята совокупность движений отдельных звеньев, обеспечивающая проведение технологической операции по перемещению сортимента от места валки исходного дерева, расположенного на продольной оси харвестера (совпадает с координатной осью x), до места формирования пачки хлыстов, расположенного перпендикулярно продольной оси харвестера (совпадает с координатной осью z).

Указанная совокупность движений включает движения звеньев манипулятора в следующей последовательности:

- 1) подъем стрелы из начального нижнего положения;
- 2) поворот колонны из начального продольного положения;
- 3) выдвигание телескопируемого звена из начального максимально задвинутого положения;
- 4) опускание рукояти из начального верхнего положения.

Количественные параметры, характеризующие перечисленные отдельные движения звеньев манипулятора приведены в табл. 1. На рис. 3 и 4 показаны графики изменения во времени кинематических параметров отдельных движений – координат пространственного положения звеньев, их скоростей и ускорений.

Таблица 1

Параметры движений звеньев манипулятора при перемещении сортимента

Наименование параметра	Значение параметра для звена			
	1	2	3	4
Число периодов движения звена	2	3	3	3
Момент времени начала движения, с	1,0	0,0	3,0	2,0
Координата положения звена в начальный момент, град (м)	0	10	60	0
Момент времени окончания движения, с	7,00	3,75	7,33	8,00
Координата положения звена в конечный момент, град (м)	90	40	0	1,0

Окончание табл. 1

Наименование параметра	Значение параметра для звена			
	1	2	3	4
Продолжительность движения, с	6,00	3,75	4,33	6,00
Интервал изменения координаты положения звена, град (м)	+90	+30	-60	1,0
Скорость установившегося движения, град/с (м/с)	40	10	20	0,2
Продолжительность периода установившегося движения, с	-	2,25	1,67	4,00
Ускорение при разгоне, град/с ² (м/с ²)	10	10	15	0,2
Продолжительность периода разгона, с	3,00	1,00	1,33	1,0
Ускорение при торможении, град/с ² (м/с ²)	-10	-20	-15	-0,2
Продолжительность периода торможения, с	3,00	0,50	1,33	1,0
Максимальная скорость, град/с	30	-	-	-
Момент времени достижения максимальной скорости, с	4,0	-	-	-

Примечание: Размерность параметра, указанная в скобках, относится к звену 4.

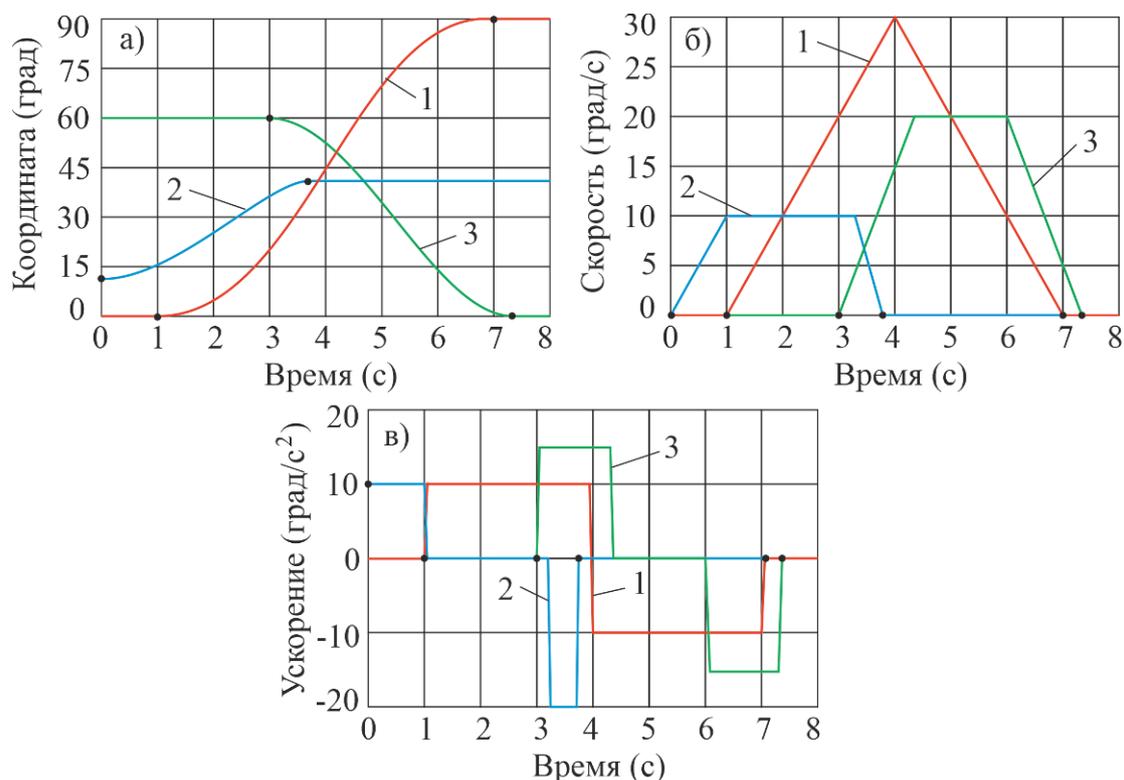


Рис. 3. Кинематические параметры движения поворотных звеньев манипулятора на протяжении временного интервала манипулирования сортиментом: а – координаты пространственного положения звеньев; б – угловые скорости звеньев; в – угловые ускорения звеньев (1 – колонна; 2 – стрела; 3 – рукоять; точками на графиках отмечены моменты начала и окончания движения соответствующего звена)

Общая продолжительность указанного моделируемого движения манипулятора при работе харвестера составляет 8 с. В течение указанного промежутка времени было проведено моделирование динамического пове-

дения шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт».

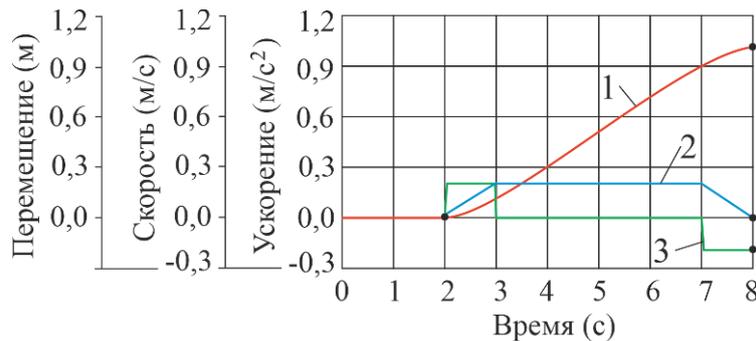


Рис. 4. Кинематические параметры поступательного движения телескопируемого звена манипулятора на протяжении временного интервала манипулирования сортиментом:
 1 – координата пространственного положения звена; 2 – линейная скорость звена;
 3 – линейное ускорение звена (точками на графиках отмечены моменты начала и окончания движения звена)

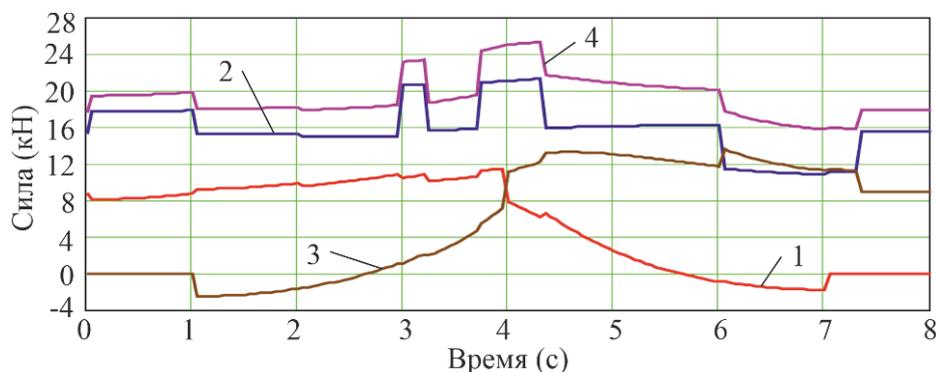


Рис. 5. Графики изменения во времени модуля эксплуатационных сил, действующих на рабочий орган харвестера, и их проекций: 1 – проекция на ось x ; 2 – проекция на ось y ;
 3 – проекция на ось z ; 4 – модуль эксплуатационных сил

На рис. 5 приведены графики изменения во времени модуля эксплуатационных сил, действующих на рабочий орган харвестера, и их проекций на оси локальной системы координат харвестера xuz при перемещении сортиamenta применительно к базовому варианту. Наибольшее значение этих сил наблюдается приблизительно в интервале времени от 3,7 до 4,3 с, т.е. при движении трех звеньев – колонны, рукоятки и телескопируемого звена.

На последующих рис. 6 - 9 показана динамика основных характеристик базового варианта харвестера и его анкерной системы при перемещении сортиamenta согласно моделируемого движения манипулятора (табл. 1). В связи с весьма малым временным шагом при интегрировании системы дифференциальных уравнений (3) $\Delta t = 0,0001$ с на этих рисунках приведены результаты расчета для четырех

временных интервалов, каждый из которых имеет длительность 0,05 с:

- интервал 0,50 ... 0,55 с показывает динамику соответствующей характеристики в начальном периоде движения манипулятора (движение выполняет только одно звено – стрела);

- интервал 3,20 ... 3,25 с показывает динамику соответствующей характеристики в период, когда движение совершают все четыре звена манипулятора совместно;

- интервал 4,1 ... 4,15 с показывает динамику соответствующей характеристики в период, в котором наблюдается максимальное значение по модулю эксплуатационной нагрузки на рабочий орган харвестера (рис. 5) и движение совершают три звена совместно – колонна, рукоятка и телескопируемое звено;

- интервал 7,50 ... 7,55 с показывает динамику соответствующей характеристики в

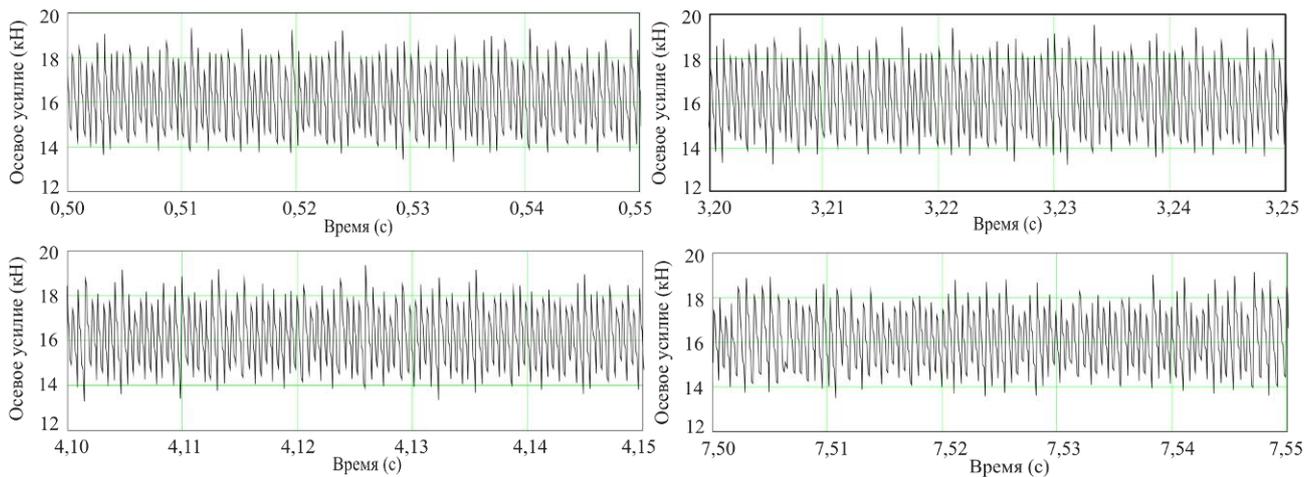


Рис. 6. Динамика осевого растягивающего усилия в анкерном канате в пределах четырех характерных промежутков времени перемещения сортимента

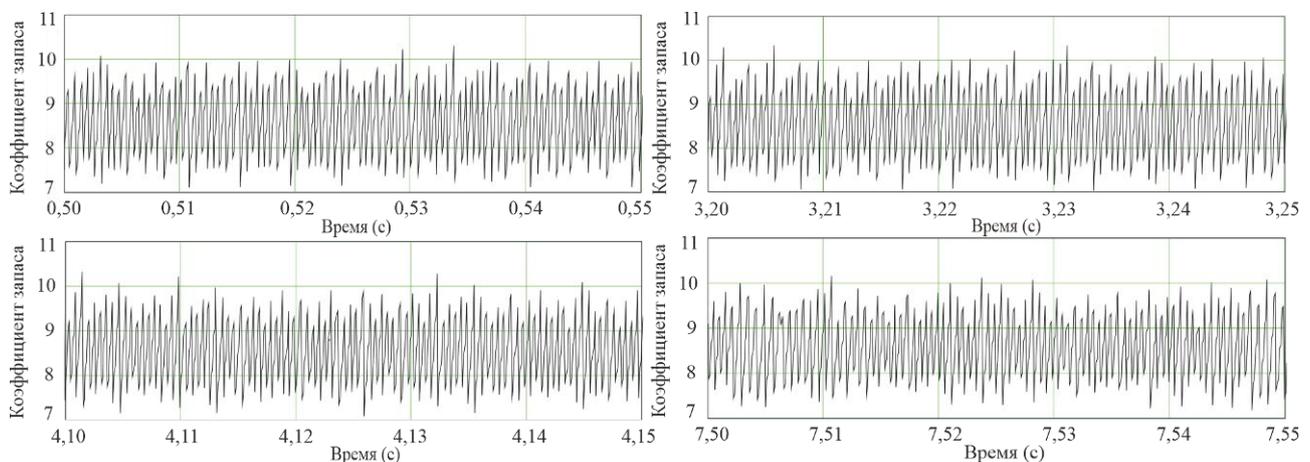


Рис. 7. Динамика коэффициента запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию в пределах четырех характерных промежутков времени перемещения сортимента

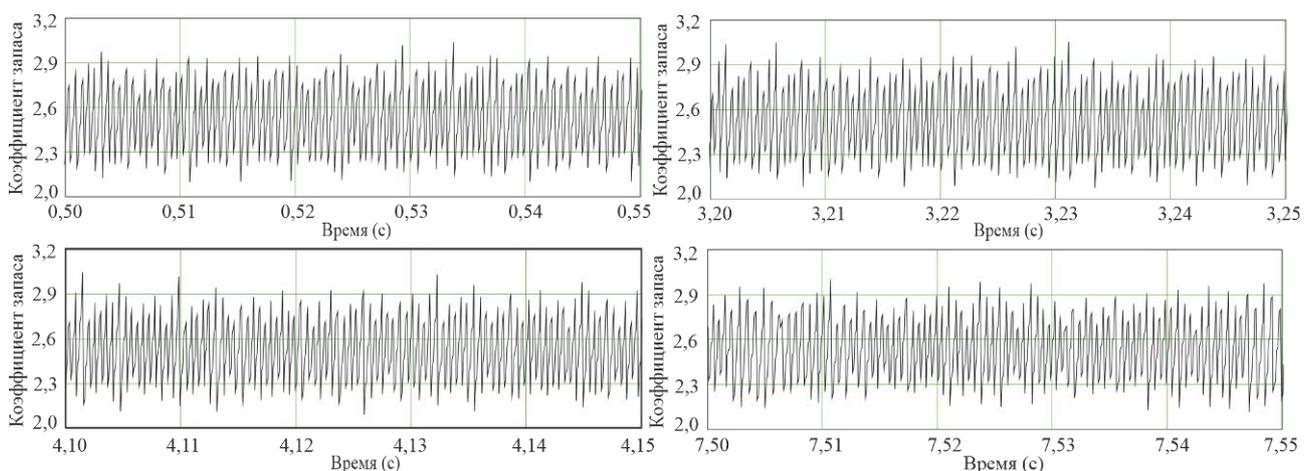


Рис. 8. Динамика коэффициента запаса работоспособности по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево в пределах четырех характерных промежутков времени перемещения сортимента

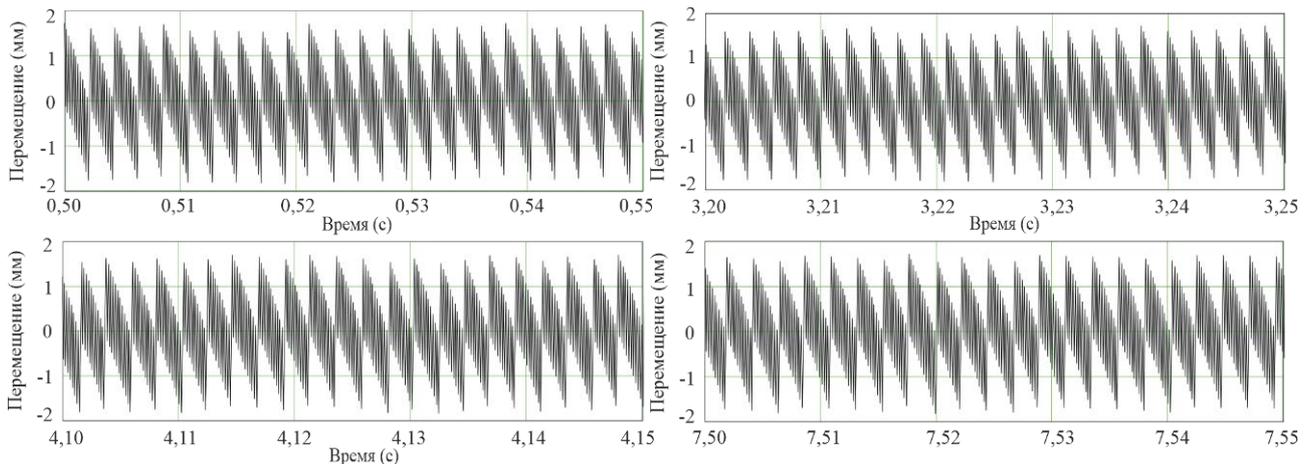


Рис. 9. Динамика перемещения центра масс анкерного дерева (обобщенная координата динамической модели q_{35}) в пределах четырех характерных промежутков времени перемещения сортимента

конечном периоде движения манипулятора (движение выполняет только одно звено – телескопируемое звено).

4. Заключение

В данной статье была рассмотрена комплексная пространственная динамическая модель, объединяющая в общую взаимосвязанную систему все основные компоненты моделируемого явления, включая непосредственно харвестер с установленным на нем гидравлическим манипулятором, перемещаемый в пространстве сортимент, анкерную систему в составе анкерных каната и лебедки, анкерное дерево для крепления анкерного каната и грунт опорной поверхности.

Данная динамическая модель объединила все компоненты, определяющие динамическое поведение комплексной шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт», и позволила выполнить мате-

матическое моделирование рабочего процесса трехосного колесного харвестера при его эксплуатации на крутом склоне во время манипулирования сортиментом. Предложенные подходы могут быть также распространены на харвестеры с другой колесной формулой и с другими особенностями конструкции, в частности, конструкции несущей рамы.

Динамическая модель позволяет учесть и, соответственно, проанализировать большое число количественных конструктивных и режимных параметров, которые характеризуют динамическое поведение и нагруженность как самого харвестера и установленного на нем манипулятора, так и структурных элементов анкерной системы. Поэтому перспективным направлением дальнейших исследований динамики харвестеров при лесозаготовке на крутых склонах является проведение такого анализа с целью разработки практических рекомендаций по проектированию эффективных и надежных анкерных систем.

Список литературы

1. Григорьев И.В., Куницкая О., Рудов С., Каляшов В., Тамби А. Лесозаготовительные машины для работы на склонах // Бюллетень ассоциации «Лестех». 2020. №1. С. 4-9.
2. Комплексная механизация лесозаготовок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lsdinfo.org/kompleksnaya-mexanizaciya-lesozagotovok> (дата обраще-

References

1. Grigorev I.V., Kunitskaya O., Rudov S., Kalyashov V., Tambi A. Lesozagotovitelnye ma-shiny dlya raboty na sklonakh. *Bulletenij assotsiatsii «Lestekh»*, 2020, No., pp. 4-9. (In Russian)
2. Kompleksnaya mekhanizatsiya lesozagotovok. Available at: <https://lsdinfo.org/kompleksnaya-mexanizaciya-lesozagotovok> (In Russian)

ния: 16.05.2024).

3. Berkett H., Visser R. Measuring Slope of Forestry Machines on Steep Terrain // *Future Forests Research*. 2012. HTN05-02.

4. Visser R. Stampfer K. Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015. Vol. 36. № 2. P. 321-331.

5. Holzfeind T., Visser R., Chung W., Holzleitner F., Erber G. Development and Benefits of Winch-Assist Harvesting // *Current Forestry Reports*. 2020. № 6. P. 201–209.

6. Густенев Е.С., Каракулько Н.Н., Красик М.Б., Макаревич А.Л., Полубятко А.А., Самущенко Л.А. Харвестеры АМКОДОР 2561, АМКОДОР 2562. Руководство по эксплуатации 2561.00.00.000 РЭ / 2562.00.00.000 РЭ. Минск: ОАО «АМКОДОР»-управляющая компания холдинга», 2017. 227 с.

7. Ермолев В.П., Виногоров Г.К. Механика воздействия машин на лесные почвы // *Лесная промышленность*. 1995. №3. С. 27-29.

8. Павлов А.И. Нагруженность гидроприводов лесосечных машин. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. 212 с.

9. Александров В.А. Основы проектирования лесозаготовительных машин и оборудования. Ухта: УГТУ, 2007. 283 с.

10. Базаров С.М., Соловьев А.Н. Оценка динамических критериев эффективности лесных машин // *Вестник КрасГАУ*. 2014. №1. С. 140-147.

11. Лагереv И.А. Моделирование динамики специального манипулятора лесной машины с канатным приводом рукояти // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2015. №3. С. 381-384.

12. Лагереv А.В., Макулина А.В., Лагереv И.А. Влияние конструктивных характеристик манипулятора харвестера на оптимальные размеры рабочей зоны // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2024. № 2. С. 111-123. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-02-111-123

13. Sessions J., Leshchinsky B., Chung W., Boston K., Wimer J. Theoretical Stability and Traction of Steep Slope Tethered Feller-

3. Berkett H., Visser R. Measuring Slope of Forestry Machines on Steep Terrain. *Future Forests Research*, 2012, HTN05-02.

4. Visser R. Stampfer K. Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2015, Vol. 36, No.2, pp. 321-331.

5. Holzfeind T., Visser R., Chung W., Holzleitner F., Erber G. Development and Benefits of Winch-Assist Harvesting. *Current Forestry Reports*, 2020, No.6, pp. 201–209.

6. Gustenev E.S., Karakulko N.N., Krasik M.B., Makarevich A.L., Polubyatko A.A., Samu-thenko L.A. Kharvestery АМКОДОР 2561, АМКОДОР 2562. Rukovodstvo po ekspluatatsii 2561.00.00.000 REh / 2562.00.00.000 REh. Minsk, ОАО «АМКОДОР»-upravlyayushchaya kompaniya kholdinga», 2017. 227 p. (In Russian)

7. Ermolev V.P., Vinogorov G.K. Mekhanika vozdeystviya mashin na lesnye pochvy. *Lesnaya promyshlennost*, 1995, No.3, pp. 27-29. (In Russian)

8. Pavlov A.I. *Nagruzhennost gidroprivodov lesechnykh mashin* [Loading of hydraulic drives of cutting machines]. Yjoshkar-Ola, MarGTU, 2004. 212 p. (In Russian)

9. Aleksandrov V.A. *Osnovy proektirovaniya lesozagotovitelnykh mashin i oborudovaniya* [Fundamentals of the design of logging machines and equipment]. Ukhta, UGTU, 2007. 283 p. (In Russian)

10. Bazarov S.M., Solovev A.N. Otsenka dinamicheskikh kriteriev effektivnosti lesnykh mashin. *Vestnik KrasGAU*, 2014, No.1, pp. 140-147. (In Russian)

11. Lagerev I.A. Simulation of the dynamics of a special manipulator of a forest machine with a rope-driven handle. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, No.3, pp. 381-384. (In Russian)

12. Lagerev A.V., Makulina A.V., Lagerev I.A. The influence of the harvester manipulator design characteristics on the working area optimal size. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, No.2, pp. 111-123. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-02-111-123 (In Russian)

13. Sessions J., Leshchinsky B., Chung W.,

Bunchers // *Forest Science*. 2017. Vol. 63. N 2. P. 192–200.

14. Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K., Höller N., Kanzian C. Monitoring Cable Tensile Forces of Winch-Assist Harvester and Forwarder Operations in Steep Terrain // *Forests*. 2018. Vol. 9. N 2. P. 53.

15. Рудов С.Е., Григорьев И.В. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2021. №6. С. 121-134.

16. Mergl V., Kašpárek J. Verifying the Lifting and Slewing Dynamics of a Harvester Crane with Possible Levelling When Operating on Sloping Grounds // *Forests*. 2022. Vol. 13. N 2. P. 357.

17. Химич А.В., Лагереv И.А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 2. С. 159-164. DOI 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164.

18. Лагереv И.А., Химич А.В., Шкурманова С.С. Подходы к имитационному моделированию рабочих процессов канатной лесозаготовительной машины для работы на склонах // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 2. С. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130

19. Химич А.В. Оценка прочности опоры анкерного каната машины для лесозаготовки на склоне // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2023. №1. С. 112-120.

20. Федоренчик А.С., Герман А.А., Протас П.А. Лесные машины «Амкодор». Минск: БГТУ, 2013. 240 с.

21. John Deere CA | Products & Services Information [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.deere.ca/en/index.html> (дата обращения: 16.05.2024).

22. Ponsse [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ponsse.com/#/> (дата обращения: 16.05.2024).

23. Logset Russia - Логсет Россия - официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим

Boston K., Wimer J. Theoretical Stability and Traction of Steep Slope Tethered Feller-Bunchers. *Forest Science*, 2017, Vol. 63, No.2, pp. 192–200.

14. Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K., Höller N., Kanzian C. Monitoring Cable Tensile Forces of Winch-Assist Harvester and Forwarder Operations in Steep Terrain. *Forests*, 2018, Vol. 9, No.2, pp. P. 53.

15. Rudov S.E., Grigorev I.V. Modelirovanie vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvogrun-tom pri rabote na sklonakh. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*, 2021, No.6, pp. 121-134. (In Russian)

16. Mergl V., Kašpárek J. Verifying the Lifting and Slewing Dynamics of a Harvester Crane with Possible Levelling When Operating on Sloping Grounds. *Forests*, 2022, Vol. 13, No.2, pp. 357.

17. Khimich A.V., Lagerev I.A. The dynamic loading study of a mobile transport and technological machine, placed on a slope. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 159-164. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164 (In Russian)

18. Lagerev I.A., Khimich A.V., Shkurmanova S.S. Approaches to simulation modeling of working processes of a rope logging machine for working on slopes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130 (In Russian)

19. Khimich A.V. The strength assessment of the anchor rope support of the machine for logging on the slope *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.1, pp. 112-120. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-112-120 (In Russian)

20. Fedorenchik A.S., German A.A., Protas P.A. *Lesnye mashiny «Amkodor»* [Amkodor forest machines]. Minsk, BGTU, 2013. 240 p. (In Russian)

21. *John Deere CA | Products & Services Information* [site]. Available at: <https://www.deere.ca/en/index.html> (accessed 16 May 2024).

22. *Ponsse* [site]. Available:

доступа: <https://logset.pro/> (дата обращения: 16.05.2024).

24. Ecolog [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecolog-international.com/> (дата обращения: 16.05.2024).

25. Meyers M. Chawla K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 580 p.

26. Pracejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford: Elsevier Ltd., 2006. 642 p.

27. Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин / Дисс. ... доктора техн. наук: 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2020. 319 с.

28. Лагереv И.А., Лагереv А.В. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов. Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. 196 с. DOI: 10.5281/zenodo.1202224

29. Лагереv А.В., Мильто А.А., Лагереv И.А. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин. Брянск: РИО БГТУ, 2015. 186 с. DOI: 10.5281/zenodo.1199651

30. Иванченко Ф.К., Бондарев В.С., Колесник Н.П., Барабанов В.Я. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев: Вища школа, 1978. 518 с.

31. Борисевич С.А. Динамические модели ствола дерева и их применение к эксплуатационной оценке нагруженности лесозаготовительных машин / Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Минск: БНТУ, 2015. 24 с.

32. Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Ч. 1. Минск: БГТУ, 2015. 127 с.

33. Глебов И.Т. Физика древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 80 с.

34. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика. Москва: Высшая школа, 1977. 430 с.

35. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.2. Динамика. Москва: Физматгиз, 1961. 616 с.

<https://www.ponsse.com/#/> (accessed 16 May 2024).

23. Logset Russia - Logset Rossiya - ofitsialnyy sayt [site]. Available: <https://logset.pro/> (accessed 16 May 2024) (In Russian)

24. Ecolog [site]. Available at: <https://ecolog-international.com/> (accessed 16 May 2024).

25. Meyers M. Chawla K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 580 p.

26. Pracejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford, Elsevier Ltd., 2006. 642 p.

27. Khitrov E.G. Comprehensive justification of the parameters and operating modes of forest machinery propellers. Diss. Dr. Sci. (Engineering). Voronezh, 2020. 319 p. (In Russian)

28. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Dinamika trekhzvennykh gidravlicheskiy kranov-manipulyatorov* [Dynamics three-tier hydraulic crane-manipulators]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2012. 196 p. DOI: 10.5281/zenodo.1202224 (In Russian) ISBN 978-5-89838-608-5.

29. Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskiy krano-manipulyatornykh ustanovok mobilnykh mashin* [Dynamic and mechanical analysis of hydraulic crane-manipulating installations of mobile machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 186 p. DOI: 10.5281/zenodo.1199651 (In Russian)

30. Ivanchenko F.K., Bondarev V.S., Kolesnik N.P., Barabanov V.Ya. *Raschety gruzopodemnykh i transportiruyushchikh mashin* [Calculations of lifting and transporting machines]. Kiev, Vishcha shkola, 1978. 518 p. (In Russian)

31. Borisevich S.A. Dynamic models of the tree trunk and their application to the operational assessment of the logging machines load. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Minsk, 2015. 24 p. (In Russian)

32. Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R. *Osnovy proektirovaniya lesnykh mashin i sistemy av-tomatizirovannogo proektirovaniya. Ch. I.* [Fundamentals of designing forest machines and computer-aided design systems. Part

36. Кошкин А.П., Трифанов Г.Д. Канаты для подъемных установок. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. 107 с.
37. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: 10.5281/zenodo.1311913.
38. Жук А.Ю. Критические усилия опрокидывания деревьев береговой зоны водохранилищ при использовании их в качестве опор канатной системы устройств для сбора и транспортировки древесины // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 12. С. 258-263.
39. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Москва: Наука, 1967. 368 с.
40. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers. Prentice-Hall: Pearson Education Canada, 1979.
- 1]. Minsk, BGTU, 2015. 127 p. (In Russian)
33. Glebov I.T. *Fizika drevesiny* [Physics of wood]. Ekaterinburg, UGLTU, 2018. 80 p. (In Russian)
34. Yablonskiy A.A. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. Ch. II. Dinamika [The course of theoretical mechanics. Part II. Dynamics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1977. 430 p. (In Russian)
35. Bat M.I., Dzhanelidze G.Yu., Kelzon A.S. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zada-chakh. T.2. Dinamika* [Theoretical mechanics in examples and problems. Vol. 2. Dynamics]. Moscow, Fizmatgiz, 1961. 616 p. (In Russian)
36. Koshkin A.P., Trifanov G.D. *Kanaty dlya podemnykh ustanovok* [Ropes for lifting installations]. Perm, PNIPU, 2014. 107 p. (In Russian)
37. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311913 (In Russian)
38. Zhuk A.Yu. Kriticheskie usiliya oprokidyvaniya derevev beregovoy zony vodokhranilishch pri ispolzovanii ikh v kachestve opor kanatnoy sistemy ustroystv dlya sbora i transportirovki drevesiny. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, No.12, pp. 258-263. (In Russian)
39. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Chislennyye metody analiza* [Numerical methods of analysis]. Moscow, Nauka, 1967. 368 p. (In Russian)
40. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers. Prentice-Hall, Pearson Education Canada, 1979.