

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 139–147.

Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 139–147.

Научная статья

УДК 629.014.5

DOI: 10.51318/FRET.2025.95.4.013

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МНОГОСЕКЦИОННЫХ АКТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Евгений Евгеньевич Баженов¹, Денис Олегович Чернышев²,
Евгений Александрович Семенов³

¹ Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

^{2,3} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹ st194@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5457-1000>

² olegch@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>

³ Stuning-mg@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос по созданию платформ технологических и транспортных машин, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами, касающимися их подвижности. Одним из путей создания таких машин являются активные сочлененные транспортные системы. На этапе проектирования таких систем необходимо учитывать особенности функционирования машин в сложных условиях. Разработка математической модели движения сочлененной многосекционной транспортной системы для лесных дорог позволяет на этапе проектирования значительно снизить время и материальные средства на проведение доводочных испытаний. Предложена математическая модель движения активной сочлененной многокомплектной транспортной системы для лесных дорог. Данная модель позволяет проводить анализ динамических взаимодействий элементов сочлененной машины между собственными секциями и с опорной поверхностью. Стохастический подход к представлению характеристик факторов системы уравнений позволяет использовать модель в качестве основы для формирования алгоритма управления системой распределения силовых потоков между движителями сочлененной многокомплектной машины.

Ключевые слова: модель движения, активная система, сочлененная машина, многосекционная машина, углы Крылова

Для цитирования: Баженов Е. Е., Чернышев Д. О., Семенов Е. А. Математическое моделирование движения многосекционных активных транспортных систем // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 139–147.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF MOVEMENT OF MULTI-SECTIONAL ACTIVE TRANSPORT SYSTEMS

Evgeny E. Bazhenov¹, Denis O. Chernyshev², Evgeny A. Semenov³

¹ Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Yekaterinburg, Russia

^{2,3} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹ st194@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5457-1000>

² olegch@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>

³ Stuning-mg@mail.ru

Abstract. The issue of creating platforms for technological and transport machines with enhanced operational properties related to their mobility is considered. One of the ways to create such machines is through active articulated transport systems. At the design stage of such systems, it is necessary to take into account the peculiarities of the functioning of machines in difficult conditions. The development of a mathematical model of the movement of an articulated multi-section transport system for forest roads allows to significantly reduce the time and material resources for carrying out finishing tests at the design stage. A mathematical model of the movement of an active articulated multi-component transport system for forest roads is proposed. This model makes it possible to analyze the dynamic interactions of the elements of an articulated machine between its own sections and with the support surface. The stochastic approach to the representation of the characteristics of the factors of the system of equations allows using the model as the basis for the formation of a control algorithm for the distribution of power flows between the propellers of an articulated multi-component machine.

Keywords: movement model, active system, articulated machine, multi-section machine, Krylov angles

For citation: Bazhenov E. E., Chernyshev D. O., Semenov E. A. Mathematical modeling of movement of multi-sectional active transport systems // Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 139–147.

Введение

В настоящее время древесина широко используется почти во всех сферах и областях народного хозяйства.

Леса, как возобновляемый ресурс, являются природной гордостью нашей страны, занимают 49 % территории и составляют около 20 % всех лесов мира (рис. 1).

Лесная промышленность Российской Федерации имеет ведущие позиции и в общемировом масштабе. Если рассматривать вопрос объема лесозаготовок, то следует отметить, что страна входит в пятерку лидирующих стран мира.

Развитие лесного комплекса в нашей стране имеет определяющее значение, так как напрямую

связано с экономическим развитием страны. Заготовка древесины идет согласно Лесному кодексу Российской Федерации, принятому Государственной Думой в 2006 г. Данный Кодекс с 01.01.2025 вступил в силу с рядом изменений (Лесной кодекс, 2006).

В 2018 г. Министерством природы, Минпромторгом и Рослесхозом разработана и утверждена Правительством РФ «Стратегия развития лесного комплекса РФ до 2030 года» «с целью обеспечения роста сектора лесной экономики; внедрения инновационных процессов при использовании, охране, защите и воспроизводстве лесов, а также выполнения международных обязательств РФ по вопросам лесопользования» (Стратегия развития лесного

комплекса РФ до 2030 года, 2021). Все перечисленное выше подразумевает поднятие эффективности лесовосстановления в РФ, создание привлекательности для открытия новых производств и выхода на внешний рынок.

В последнее время наблюдается освоение лесных территорий с непростым рельефом (холмами, склонами гор и т. д.), что напрямую связано с истощением равнинных территорий эксплуатационных лесов (рис. 2).

Понятно, что машинная заготовка древесины, на осложненных рельефах имеет свои как технические, так и технологические сложности.

Для успешной реализации утвержденной Стратегии развития лесного комплекса есть прямая необходимость в использовании универсальной техники, многооперационных машин специального назначения.

Стоит отметить, что при проведении лесозаготовительных работ «перспективным направлением является эксплуатация полноприводных транспортных машин на основе активных сочлененных транспортных систем, в конструкции которых имеется постоянный или полупостоянный шарнир, позволяющий совершать более резкие повороты и развороты» (Платонов, 1989).

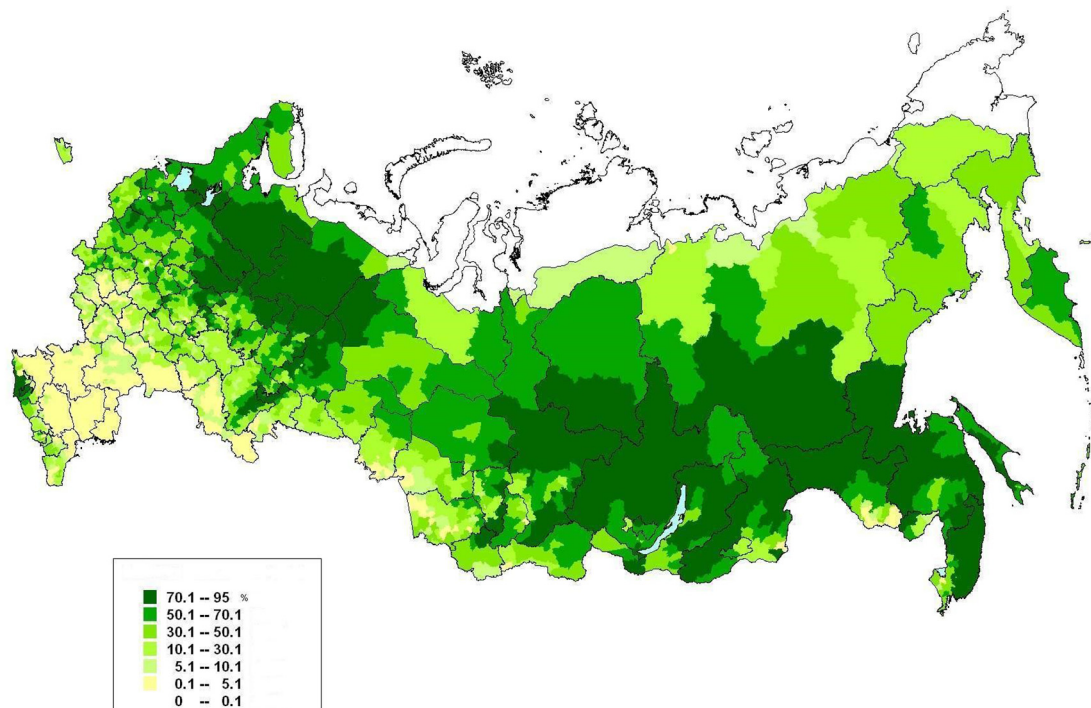


Рис. 1. Леса на карте РФ

Fig. 1. Forests on the map of the Russian Federation



Рис. 2. Лесозаготовительные работы на склонах гор

Fig. 2. Logging operations on mountain slopes

Данные сочлененные транспортные системы имеют большое число степеней свободы (рис. 3).

Использование сочлененных транспортных и технологических машин лесного назначения позволяет решить много задач, которые возникают при проведении лесозаготовительных работ при разных погодных условиях и различном состоянии дорог (зимние дороги, грунтовые, распутица и др.).

На сегодняшний день улучшение эксплуатационных свойств транспортных систем – вопрос действительно актуальный и перспективный.

Направления для совершенствования следующие:

- во-первых, это увеличение производительности;
- во-вторых, это повышение экономических и экологических показателей;

– в-третьих, это повышение эксплуатационной надежности машин;

– в-четвертых, это усовершенствование и автоматизация систем управления транспортными системами и целый комплекс других работ теоретической и экспериментальной направленности.

Описывая математически процесс движения обозначенных систем, внимание следует уделять обособленному движению первой и второй секций, заменяя узел сочленения (УС) между ними силой взаимодействия. Проекции реакций связи общего для разных секций УС будут равны по модулю и противоположны по направлению. То есть взаимодействие между секциями заменяется равнодействующими силой и моментом, спроецированными на соответствующие оси координат (Баженов, Вьюхин, 2010).



Рис. 3. Специальная техника при лесозаготовительных работах
Fig. 3. Special equipment for logging operations

Методы

Работа основана на методе математического моделирования на основе комплекса существующих теоретических и практических сведений.

Результаты и их обсуждение

Создадим модель непрямолинейного движения сочлененной транспортной машины без учета приложенной силы в узле крепления технологического оборудования, поэтому усилие P_c принимаем равным нулю (Павлов, Кувшинов, 2011; Полунган, 2009).

Рассмотрим движение обособленной секции сочлененной машины как свободное движение твердого тела, аппроксимируемого параллелограммом (рис. 4). Перемещение рассматривается относительно неподвижной системы координат (НСК) $O_1X_1Y_1Z_1$, связанной с опорной поверхностью. В НСК формируется модель внешних условий движения транспортной системы, а точка O_1 является точкой начала отсчета траектории движения машины (Тарасик, 2004; Дхир, Санкар, 1997). В качестве полюса примем точку O , которая одновременно является центром масс (ЦМ) тела.

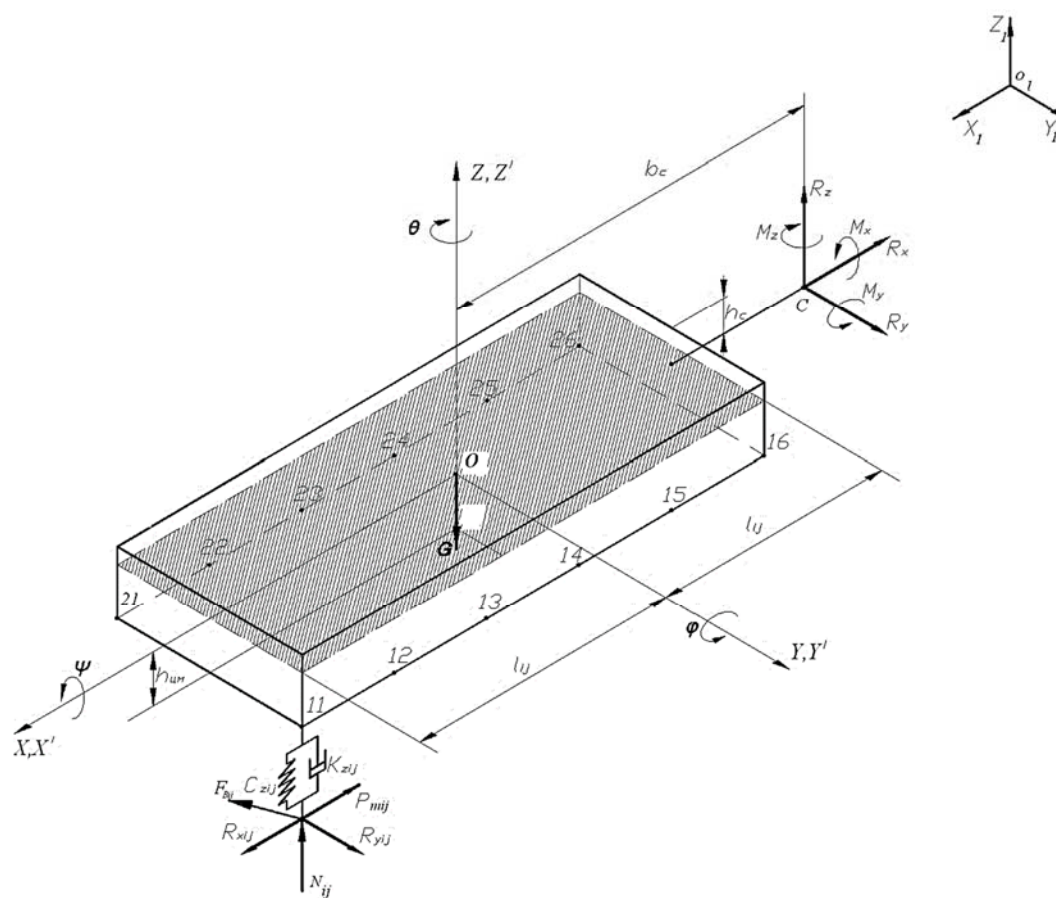


Рис. 4. Силы, действующие на обособленную секцию транспортной системы

Fig. 4. Forces acting on a separate section of the transport system

Разместим на схеме оси двух декартовых систем координат – $OX'Y'Z'$ и $OXYZ$. Подвижная система координат (ПСК) $OXYZ$ жестко связана с рассматриваемым телом. Оси X, Y, Z проходят через ЦМ, совпадают с осями симметрии материального тела и являются главными осями (Ватанабе, Китано, 1996).

Оси $OX'Y'Z'$ при движении тела перемещаются вместе с ЦМ поступательно. Таким образом, в системе отсчета $O_1X_1Y_1Z_1$ положение тела будет известно, если будут известны координаты ЦМ и углы Крылова — Эйлера θ, ψ, φ по отношению к осям $OX'Y'Z'$ (рис. 5).

Исходя из этого, уравнения движения свободного твердого тела, позволяющие найти его положение в системе отсчета $O_1X_1Y_1Z_1$ в любой момент времени, имеют вид (Кручинин, 2013)

$$\begin{cases} x_{O1} = f_1(t), & y_{O1} = f_2(t), & z_{O1} = f_3(t); \\ \varphi = f_4(t), & \psi = f_5(t), & \theta = f_6(t). \end{cases} \quad (1)$$

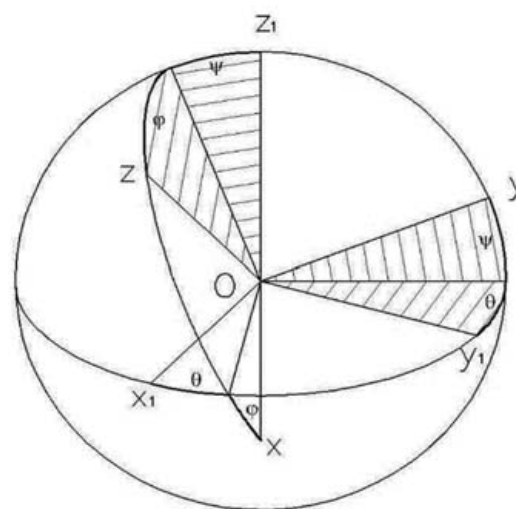


Рис. 5. Углы Крылова

Fig. 5. Krylov Angles

Теорема об изменении количества движения системы дает возможность охарактеризовать движение ЦМ (Вонг, Чيانг, 2001; Сетинч и др., 2015).

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \sum \vec{F}^e. \quad (2)$$

В проекциях на ПСК теорема будет иметь вид

$$\vec{Q} = m \vec{v}_O = m(v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}), \quad (3)$$

где i, j, k – единичные орты векторов ПСК;
 v_O – ЦМ.

После дифференцирования уравнение (3) будет иметь вид

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = m \left[\frac{dv_x}{dt} \vec{i} + v_x \frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j} + v_y \frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{dv_z}{dt} \vec{k} + v_z \frac{d\vec{k}}{dt} \right], \quad (4)$$

где

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{\omega} \vec{i}, \quad \frac{d\vec{j}}{dt} = \vec{\omega} \vec{j}, \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{\omega} \vec{k}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = m \left[\frac{dv_x}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j} + \frac{dv_z}{dt} \vec{k} + \underbrace{\vec{\omega} (v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k})}_{\vec{v}_O} \right]. \quad (6)$$

Учитывая, что

$$\vec{\omega} \vec{v}_O = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix},$$

движение ЦМ будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{dQ_x}{dt} = m \frac{dv_x}{dt} + m(\omega_y v_z - \omega_z v_y) = \sum F_x^e, \\ \frac{dQ_y}{dt} = m \frac{dv_y}{dt} + m(\omega_z v_x - \omega_x v_z) = \sum F_y^e, \\ \frac{dQ_z}{dt} = m \frac{dv_z}{dt} + m(\omega_x v_y - \omega_y v_x) = \sum F_z^e. \end{cases} \quad (7)$$

Используя теорему об изменении кинетического момента механической системы, составим дифференциальные уравнения движения твердого тела при вращательном движении вокруг центра масс (Новиков, 2020; Юрченко, 2016). Учитывая,

что оси ПСК являются главными, то уравнения будут иметь вид динамических уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = \sum M_x^e, \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z) \omega_z \omega_x = \sum M_y^e, \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = \sum M_z^e. \end{cases} \quad (8)$$

Углы Крылова – Эйлера θ, ψ, ϕ как функция времени представляют закон вращательного движения тела. Таким образом, к системе уравнений нужно добавить динамические уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = -\frac{\omega_x \sin \phi}{\cos \psi} + \frac{\omega_z \cos \phi}{\cos \psi}, \\ \dot{\psi} = \omega_x \cos \phi + \omega_z \sin \phi, \\ \dot{\phi} = \omega_x \frac{\sin \phi \sin \psi}{\cos \psi} + \omega_y - \omega_z \frac{\cos \phi \sin \psi}{\cos \psi}. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая движения обособленной секции проекции на ПСК, будет иметь вид

$$\begin{cases} m \dot{v}_x + m(\omega_y v_z - \omega_z v_y) = G_x + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 P f_{xij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 P m_{xij} + R_x, \\ m \dot{v}_y + m(\omega_z v_x - \omega_x v_z) = G_y + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 P f_{yij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 P m_{yij} + R_y, \\ m \dot{v}_z + m(\omega_x v_y - \omega_y v_x) = G_z + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 N_{zij} + R_z, \\ J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_x (P f_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_x (P m_{ij}) + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_x (N_{ij}) + M_x (R_y), \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_y (P f_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_y (P m_{ij}) + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_y (N_{ij}) + M_y (R_x) + M_y (R_z), \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_z (P f_{ij}) + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 M_z (P m_{ij}) + M_z (R_y), \end{cases} \quad (10)$$

где $P f_{ij}$ – сила сопротивления движению i -го колеса j -й секции;

$P m_{ij}$ – сила взаимодействия между опорной поверхностью и i -м колесом j -й секции;

N_{ij} – нормальная реакция опорной поверхности под i -м колесом j -й секции;

R – равнодействующая сил в узле сочленения.

Для формализации движения свободного твердого тела и определения его положения по отношению к неподвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ в любой момент времени введем уравнения перехода из ПСК (OXYZ) в НСК ($O_1X_1Y_1Z_1$). Такими уравнениями являются элементы матрицы направляющих косинусов (Динг и др., 2016). Матрицу получают последовательным поворотом ПСК относительно НСК на углы Крылова – Эйлера θ , ψ , φ соответственно.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $A_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ – координаты вектора в НСК;

$A = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ – координаты вектора в ПСК;

$B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ – матрица направляющих косинусов.

Уравнения направляющих косинусов имеют вид

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \theta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \sin \theta, \\ a_{12} &= -\cos \psi \sin \theta, \\ a_{13} &= \sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi \sin \theta, \\ a_{21} &= \sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi \sin \psi, \\ a_{22} &= \cos \psi \cos \theta, \\ a_{23} &= \sin \varphi \sin \theta - \sin \psi \cos \varphi \cos \theta, \\ a_{33} &= \cos \psi \cos \varphi. \end{aligned} \quad (12)$$

Переход из НСК в ПСК:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = B^T \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Аналогично составляется система уравнений для второй и последующих секций сочлененной транспортной системы. Полученная система уравнений является неопределенной. Для раскрытия неопределенности в систему необходимо ввести уравнения состояния, в качестве которых могут выступать уравнения, описывающие буксование колес относительно опорной поверхности, и уравнения увода колес (Баженов, 2009; Баженов, 2010).

Выводы

Полученная математическая модель дает возможность находить положение активной сочлененной транспортной системы и каждого из ее звеньев относительно опорной поверхности в любой момент времени и учитывать динамические взаимодействия элементов машины с опорной поверхностью. Сбалансированность производственного и экологического эффектов от применения полноприводных транспортных машин на основе использования активных сочлененных транспортных систем лесного назначения является важным действующим фактором при вопросе эффективности управления качеством лесных работ.

Работы по улучшению эксплуатационных свойств транспортных систем лесного назначения способствуют поднятию производительности при проведении лесозаготовительных и лесовосстановительных работ, что, в свою очередь, поднимает эффективность лесохозяйственных и лесозаготовительных мероприятий.

Список источников

- Баженов Е. Е. Транспортные и технологические системы. Екатеринбург : УГТУ УПИ, 2009. 174 с.
- Баженов Е. Е., Вьюхин А. В. Применение сочлененных транспортных систем в добывающих отраслях национальной экономики // Грузовик : науч.-техн. журнал. 2010. № 4. С. 34–38.
- Баженов Е. Е. Теории сочлененных транспортных систем. Екатеринбург : УрФУ, 2010. 257 с.
- Ватанабе К., Китано М. Исследование проходимости сочлененных гусеничных машин. Ч. 1 : Теоретический и экспериментальный анализ // Механика. 1996. № 23. С. 69–83.

- Вонг Ю., Чианг С. Общая теория скольжения гусеничных машин на твердой почве // Автомобильная инженерия. 2001. № 215. С. 343–355.
- Динг Х., Микарик С., Хи Ю. Проектирование активной системы управления прицепом для сочлененных тяжелых грузовиков с несколькими прицепами с использованием моделирования в реальном времени // Труды Института инженеров-механиков. 2016. № 227. С. 643–655.
- Дхир А., Санкар С. Аналитическая модель для динамического моделирования гусеничных автомобилей повышенной проходимости // Динамика транспортных систем. 1997. № 27. С. 37–63.
- Кручинин И. Н. Модульный принцип построения динамических моделей движения транспортных средств // Материалы международной научно-практической конференции. Т. 2. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2013. С. 239–248.
- Лесной кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения: 20.04.2025).
- Новиков В. В. Динамика движения. Линейная теория подрессоривания : учеб. пособие. Волгоград : ВолгГТУ, 2020. 160 с.
- Павлов В. В. Кувшинов В. В. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Чебоксары, 2011. 430 с.
- Платонов В. Ф. Полноприводные автомобили. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
- Полунгян А. А. Проектирование полноприводных колесных машин. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 488 с.
- Сетинч М., Градисар М., Томат Л. Оптимизация планирования проекта шоссе с использованием модифицированного генетического алгоритма // Математическое программирование и исследование операций. 2015. № 64. С. 687–707.
- Стратегия развития лесного комплекса РФ до 2030 года : Постановление Правительства РФ от 11.02.2021 г. № 312-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf> (дата обращения: 20.04.2025).
- Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем. М. : ДизайнПро, 2004. 640 с.
- Юрченко В. М. Самоходные транспортные машины. Тягачи на пневмоколесном ходу для демонтажа (монтажа) механизированных комплексов. Кемерово : КузГТУ, 2016. 74 с.

References

- Bazhenov E. E. Theory of articulated transport systems. Yekaterinburg : UrFU, 2010. 257 p.
- Bazhenov E. E. Transport and technological systems. Yekaterinburg : USTU-UIP, 2009. 174 p.
- Bazhenov E. E., Vyukhin A. V. Application of articulated transport systems in extractive industries of the national economy // Truck : Scientific and Technical Journal. 2010. № 4. P. 34–38. (In Russ.)
- Dhir A., Sankar S. Analytical model for dynamic modeling of tracked off-road vehicles // Dynamics of Transport Systems. 1997. № 27. P. 37–63. (In Russ.)
- Ding H., Mikarik S., Hee Y. Designing an active trailer control system for articulated heavy trucks with multiple trailers using real-time modeling // Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. 2016. № 227. P. 643–655. (In Russ.)
- Forest Code of the Russian Federation : Federal Law of dated 04.12.2006 № 200-FZ. URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (accessed 20.04.2025).
- Kruchinin I. N. The modular principle of constructing dynamic models of vehicle movement // Materials of the International scientific and practical conference. Vol. 2. Perm : PNRPU Publishing House, 2013. P. 239–248. (In Russ.)
- Novikov V. V. Dynamics of movement. Linear theory of springing : textbook. Volgograd : VolgSTU, 2020. 160 p.

- Pavlov V. V., Kuvshinov V. V.* Theory of movement of multi-purpose tracked and wheeled vehicles. Cheboksary, 2011. 430 p.
- Platonov V. F.* Four-wheel drive cars. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1989. 312 p.
- Polungyan A. A.* Design of four-wheel drive wheeled vehicles. Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2009. 488 p.
- Setinch M., Gradisar M., Tomat L.* Optimization of highway project planning using a modified genetic algorithm // Mathematical Programming and Operations Research. 2015. № 64. P. 687–707. (In Russ.)
- Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation dated 02.11.2021 № 312-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/> (accessed 20.04.2025).
- Tarasik V. P.* Mathematical modeling of technical systems. Moscow : DesignPro, 2004. 640 p.
- Watanabe K., Kitano M.* Investigation of the patency of articulated tracked vehicles. Part 1: Theoretical and experimental analysis // Mechanics. 1986. № 23. P. 69–83. (In Russ.)
- Wong Yu., Chiang S.* The general theory of sliding tracked vehicles on solid ground // Automotive Engineering. 2001. № 215. P. 343–355. (In Russ.)
- Yurchenko V. M.* Self-propelled transport vehicles. Pneumatic-wheeled tractors for dismantling (mounting) mechanized complexes. Kemerovo : KuzSTU, 2016. 74 p.

Информация об авторах

Е. Е. Баженов – доктор технических наук, профессор;
Д. О. Чернышев – кандидат технических наук, доцент;
Е. А. Семенов – аспирант.

Information about the authors

E. E. Bazhenov – Doctor of technical sciences, Professor;
D. O. Chernyshev – Candidate of technical sciences, Associate Professor;
E. A. Semenov – postgraduate student.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; принята к публикации 20.05.2025.
The article was submitted 29.04.2025; accepted for publication 20.05.2025.
