

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИКЛАДНОГО ПАКЕТА RECURDYN

MATHEMATICAL MODELING OF THE MOVEMENT OF A TRACKED VEHICLE USING THE RECURDYN APPLICATION PACKAGE

В.И. ПОДДУБНЫЙ, д.т.н.

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, poddubny@list.ru

V.I. PODDUBNYI, DSc in Engineering

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia,
poddubny@list.ru

Математическое моделирование движения позволяет на стадии проектирования произвести оценку влияния конструктивных и эксплуатационных параметров гусеничных машин на их работоспособность, определить качественные и количественные показатели работы, рассмотреть вопросы управляемости. Применение программы RecurDyn с библиотекой специализированных пакетов расширения позволяет получить математическую модель машины, учитывающую ее конструкцию с задаваемой степенью детализации. С использованием пакетов расширения Professional и библиотеки Track(HM) пакета расширения Toolkit разработана модель гусеничной машины с торсионной подвеской, позволяющая проводить симуляцию стандартных маневров на различных опорных поверхностях. В пакете расширения CoLink реализована модель управления, обеспечивающая движение гусеничной машины по задаваемой траектории. За основу при разработке модели управления движением принята методика, основанная на прогнозировании положения машины через заданное время прогноза. В качестве управления принята разность скоростей забегающей и отстающей гусениц, обеспечивающая движение по задаваемой траектории. Разность скоростей ΔV определяется с использованием PID-регулирования по величинам бокового отклонения машины от задаваемой траектории и углового отклонения продольной оси машины от касательной к траектории в прогнозируемом положении. Модель управления позволяет симулировать движение машины с дифференциалом и планетарным механизмом поворота. Проведено моделирование движения по круговой траектории и маневра «змейка». Имитировалось движение гусеничной машины с планетарным механизмом поворота по твердой опорной поверхности с коэффициентом трения 0,7.

На основании результатов моделирования сделан вывод об адекватности математической модели гусеничной машины и работоспособности представленной модели управления движением. Разработанная модель позволяет симулировать различные маневры гусеничной машины для оценки устойчивости движения и управляемости, определять рациональные параметры гусеничного движителя по результатам моделирования движения при различных высотах неровностей и скоростях движения.

Ключевые слова: математическое моделирование, гусеничная машина, мехатронная система, прикладной пакет RecurDyn, модель управления движением.

Для цитирования: Поддубный В.И. Математическое моделирование движения гусеничной машины с использованием прикладного пакета RecurDyn // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 6. С. 68–75.
DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-68-75

Mathematical modeling of motion allows at the design stage to assess the impact of the design and operational parameters of tracked vehicles on their performance, determine the qualitative and quantitative performance indicators, and consider controllability issues. The use of the RecurDyn application with a library of specialized extension packages allows to obtain a mathematical model of the vehicle, taking into account its design with a specified degree of detail. A model of a tracked vehicle with a torsion bar suspension was developed using the Professional extension packs and the Track (HM) library of the Toolkit extension package. It allows simulating standard maneuvers on various supporting surfaces. The CoLink extension package implements a control model that ensures the movement of the tracked vehicle along a given trajectory. The basis for the development of the motion control model is a technique based on predicting the position of the vehicle after a given forecast time. As a control, the speed difference between the leading and lagging tracks was adopted. It ensures movement along a given trajectory. The difference in speeds ΔV is determined using PID – regulation by the values of the lateral deviation of the vehicle from the given trajectory and the angular deviation of the longitudinal axis of the vehicle from the tangent to the trajectory in the predicted position. The control model allows to simulate the movement of a vehicle with a differential and a planetary rotation mechanism. The simulation of movement along a circular trajectory and the snake maneuver was carried out. The movement of a tracked vehicle with a planetary steering mechanism on a solid support surface with a friction 0.7 coefficient was simulated.

Based on the simulation results, a conclusion about the adequacy of the mathematical model of the tracked vehicle and the performance of the presented motion control model was made. The developed model allows simulating various maneuvers of a tracked vehicle to assess the stability of movement and controllability, to determine the rational parameters of the tracked mover based on the results of simulation of movement at various heights of irregularities and speeds of movement.

Keywords: mathematical modeling, tracked vehicle, mechatronic system, RecurDyn application package, motion control model.

Cite as: Poddubny V.I. Mathematical modeling of the movement of a tracked vehicle using the RecurDyn application package. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 6, pp. 68–75 (in Russ.). DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-68-75

Введение

Значительное влияние на вертикальную и боковую динамику гусеничной машины оказывают движитель и система подрессоривания. Важнейшей научной задачей является определение их рациональных параметров, обеспечивающих допустимый уровень вертикальных колебаний и устойчивость движения по траектории в задаваемом интервале скоростей. Решению задач вертикальной динамики гусеничной машины посвящены работы [1–3]. Вопросы управляемости и определения критической по заносу скорости рассмотрены в работах [4–6]. Как было отмечено в работе [6], в связи с тем, что улучшение качества современных систем подрессоривания позволило практически снять ограничение средней скорости по плавности хода, актуальным стал вопрос управляемости гусеничных машин при ее колебаниях.

Определение рациональных параметров гусеничных машин и оценка устойчивости и управляемости могут быть произведены на основании рассмотрения результатов математического моделирования их движения. Следовательно, при создании современных гусеничных машин важным этапом является разработка их механико-математических моделей и последующее математическое моделирование для предварительной оценки их работоспособности, определения степени влияния различных конструктивных и эксплуатационных параметров на качественные и количественные показатели их работы.

Математическая модель при этом должна быть адекватна реальной гусеничной машине, учитывать взаимодействие ее отдельных составных частей между собой и с окружающей средой. В этом случае происходит появление дополнительных степеней свободы и усложнение модели. Использование уравнений Лагранжа 2-го рода при разработке механико-математических моделей систем предоставляется целесообразным для получения дифференциальных уравнений движения относительно несложных механических систем с небольшим количеством степеней свободы. При большом количестве степеней свободы задача существенно усложняется и увеличивается вероятность ошибки в аналитических расчетах.

В большинстве случаев современные машины представляют собой сложные мехатронные (компьютерно-управляемые) системы.

Поэтому необходимо введение в математическую модель машины алгоритмов управления для осуществления задаваемого движения. Такие возможности предоставляют специализированные пакеты Matlab-SimMechanik [7], CAMeL-View [8], Dymola [9] и другие. Для получения математической модели механической системы, адекватной реальному объекту, желательно описание контактных взаимодействий тел системы между собой и окружением.

Прикладной пакет RecurDyn [10] использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и наиболее полно соответствует современным требованиям разработчиков механико-математических моделей мехатронных систем. Он содержит собственную библиотеку специализированных пакетов расширения, позволяющих разрабатывать математические модели автомобильной, тракторной техники, робототехнических систем, включать в состав твердотельных систем конечноэлементные модели гибких тел и поверхностей.

Цель исследований

Разработка механико-математической модели гусеничной машины и модели управления ее движением в RecurDyn для моделирования стандартных маневров.

Материалы и методы

С использованием пакетов расширения Professional и библиотеки Track(HM) пакета расширения Toolkit была разработана 3D-модель гусеничной машины, изображенная на рис. 1. Модель позволяет симулировать различные маневры гусеничной машины для оценки устойчивости движения и управляемости, определять рациональные параметры

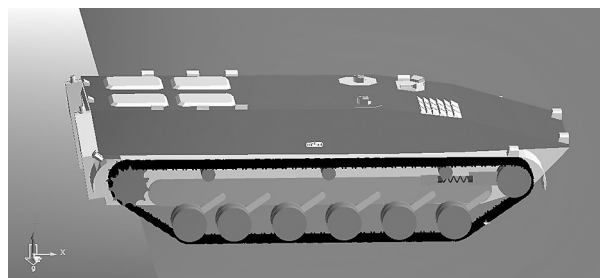


Рис. 1. 3D-модель гусеничной машины с торсионной подвеской

Fig. 1. 3D-model of a tracked vehicle with torsion bar suspension

гусеничного движителя и системы поддрессоривания по результатам моделирования движения при различных высотах неровностей и скоростях движения.

В качестве примера при исследовании принято: поддрессоренная масса машины 30000 кг, моменты инерции относительно осей, проходящих через центр масс $J_x = 24728 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_y = 100300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $J_z = 91343 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Значения коэффициентов жесткости (Stiffness Coefficient) и демпфирования (Damping Coefficient) резино-металлических шарниров (РМШ) в радиальном (Radial) и угловом (Rotation) относительно продольной оси симметрии Z шарнира направлениях для трака шириной 460 мм были определены расчетным путем на основании экспериментальных исследований, представленных в работах [11, 12]. Остальные значения были приняты равными по умолчанию в RecurDyn (рис. 2).

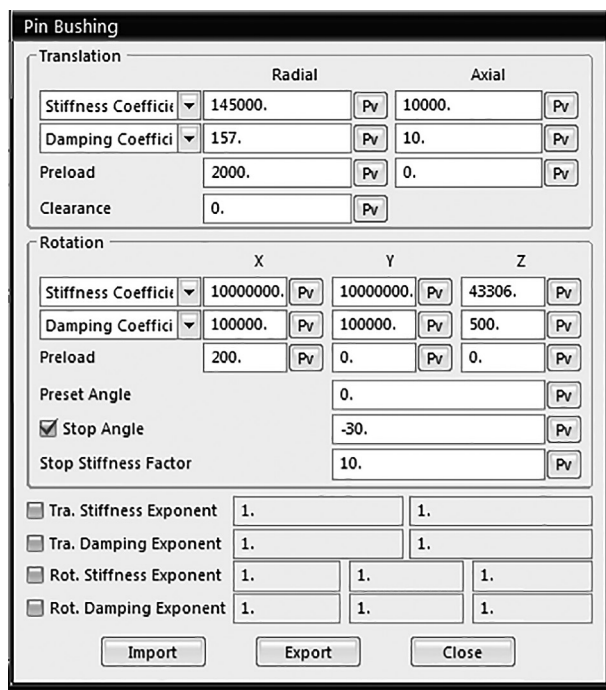


Рис. 2. Диалоговое окно RecurDyn с параметрами РМШ

Fig 2. The RecurDyn dialog box with silentblock parameters

По методике, изложенной в работах [1, 13], были определены расчетные значения коэффициентов жесткости и демпфирования для подвески с вертикальными упругими элементами, обеспечивающие высокую плавность хода быстроходной машины. Для определения коэффициента угловой жесткости торсионов

в RecurDyn было проведено моделирование плавного опускания гусеничной машины с вертикальными упругими элементами с расчетными значениями коэффициентов жесткости и определены усилия в упругих элементах (нагрузка на каток) и ход подвески под статическим действием веса машины. По задаваемому углу отклонения балансира при нулевой закрутке торсиона, радиусу балансира и найденным величинам хода подвески и нагрузки на каток были определены угол закрутки торсиона и величина его упругого момента. Коэффициент угловой жесткости торсиона был принят равным отношению упругого момента торсиона к углу его закрутки и составляет 47754 Н·м/рад. Амортизаторы соединены с балансирами первого, второго, пятого и шестого катков. Величина коэффициента демпфирования амортизаторов была определена исходя из соотношения между расчетными значениями коэффициентами жесткости и демпфирования для вертикальной пружинной подвески и равна 6826 Н·м/сек⁻¹.

Нормальные силы в контакте траков гусеницы с опорой принимаются пропорциональными деформации опоры и скорости ее изменения. Боковые и продольные силы определяются как произведение нормальной силы на текущее значение динамического коэффициента трения скольжения $f_{\text{дин}}$, задаваемого в функции от скорости скольжения трака и значения максимального коэффициента трения Friction Coefficient. Параметры контакта трака гусеницы с опорной поверхностью (коэффициент жесткости опоры – Spring Coefficient, демпфирования – Damping Coefficient и максимальное значение коэффициента трения – Friction Coefficient) были приняты по умолчанию в RecurDyn и представлены на рис. 3.

Зависимость динамического коэффициента трения скольжения для твердой опорной поверхности с максимальным значением коэффициента трения 0,7 от скорости скольжения изображена на рис. 4.

Разработанная модель была применена для оценки вертикальной динамики гусеничной машины. Было проведено математическое моделирование прямолинейного движения по синусоидальному макропрофилю резонансной частоты при различных высотах неровностей и скоростях движения. Результаты моделирования подтвердили работоспособность модели и корректность определенных расчетным образом параметров системы поддрессоривания [14].

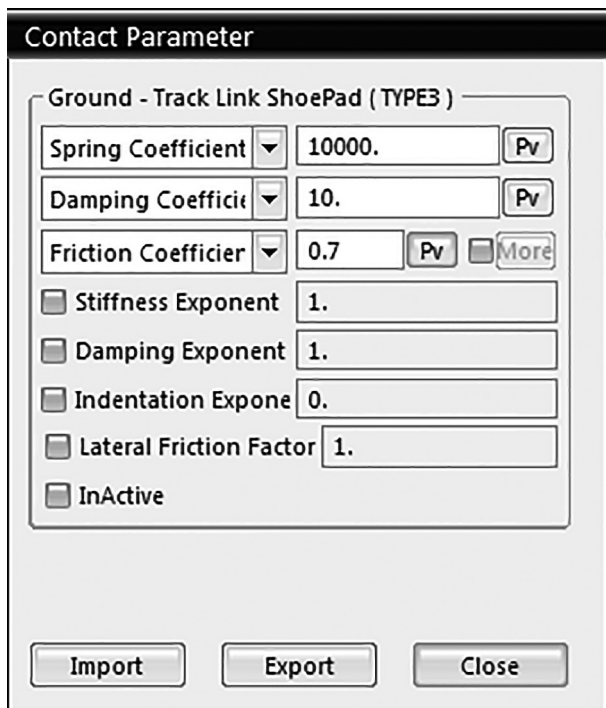


Рис. 3. Диалоговое окно с параметрами контакта трака с твердой опорной поверхностью

Fig. 3. The dialog box with parameters for track contact with a solid support surface

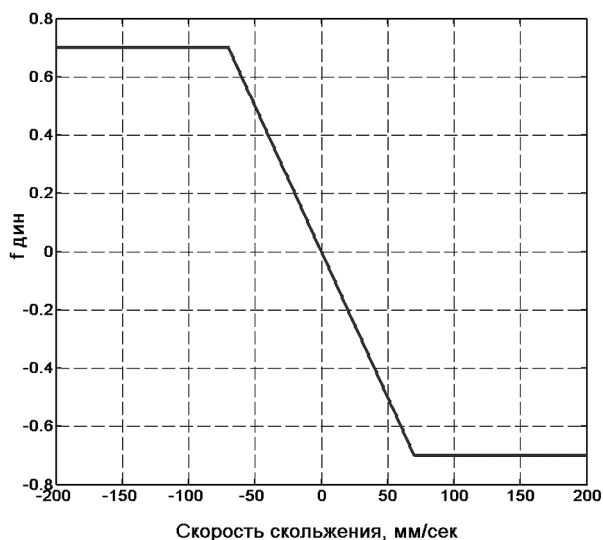


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента трения скольжения от скорости скольжения

Fig. 4. The dependence of the dynamic coefficient of sliding friction on the sliding speed

Для исследования стандартных маневров машины, таких как переставка, змейка, движение по круговой траектории, с использованием инструментальных средств пакета расширения CoLink была разработана модель, реализующая движение гусеничной машины по за-

даваемой траектории. Вследствие сложности визуального восприятия топология модели не приводится.

Входами модели являются кинематические параметры машины: координаты центра масс и проекции его скорости на неподвижные координатные оси (Y – вертикальная, X – продольная, Z – поперечная), угловая скорость и угол поворота корпуса машины относительно вертикальной оси Y . Кинематические параметры при моделировании предоставляет механико-математическая модель машины в RecurDyn.

Для определения закона управления предлагается следующая методика. За основу принимается модель водителя с прогнозированием положения машины через задаваемое время прогноза T_p [15]. Водитель оценивает величину отклонения от желаемой траектории Δy от точки, находящейся на расстоянии $L_p = T_p \cdot v_x$ по курсу гусеничной машины ГМ (рис. 5).

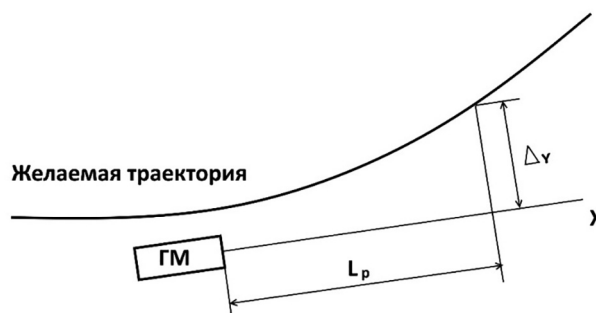


Рис. 5. Модель водителя

Fig. 5. Driver model

По величине отклонения определяется разность скоростей забегающей и отстающей гусениц, обеспечивающая движение по задаваемой траектории:

$$\Delta V = K \Delta y (t - t_d).$$

где K – коэффициент усиления; t_d – запаздывание водителя.

Коэффициент усиления по рекомендациям принимается равным 5, время запаздывания – 0,1 сек.

Недостатком данной модели является то, что предлагаемое управление не обеспечивает расположение продольной оси машины по касательной к траектории в прогнозируемом положении. С целью устранения этого недостатка предлагается дополнительно осуществлять управление, обеспечивающее поворот продольной оси машины для движения ее по касательной к траектории.

Для определения разности скоростей ΔV в этом случае применяется PID-регулирование:

$$\Delta V = K_p \delta_\varphi + K_d \omega + K_I \int \delta_\varphi,$$

где K_p , K_d , K_I – пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты; δ_φ – угол между осью симметрии машины в текущем положении и касательной к траектории в прогнозируемом положении; ω – угловая скорость машины относительно вертикальной оси.

Логичным представляется одновременное осуществление коррекции бокового и углового отклонений машины. Разность скоростей при этом определяется выражением:

$$\Delta V = K \Delta_y (t - t_d) + K_p \delta_\varphi + K_d \omega + K_I \int \delta_\varphi.$$

Подбор рациональных значений коэффициентов PID-регулятора осуществлялся по результатам вычислительного эксперимента. Моделировался маневр «переставка». В качестве критерия рациональности значений коэффициентов было принято среднеквадратичное отклонение центра масс машины от задаваемой траектории. По результатам моделирования коэффициенты были приняты равными: пропорциональный $K_p = 50$, дифференциальный $K_d = 5$ и интегральный $K_I = 1$. Результаты моделирования других маневров подтвердили корректность подобранных значений коэффициентов.

Модель позволяет реализовывать управление движением гусеничной машиной с дифференциальным или планетарным механизмами поворота. При повороте машины с дифференциальным механизмом скорость забегающей гусеницы увеличивается на $\Delta V/2$, отстающей – уменьшается на эту же величину. Для машины с планетарным механизмом поворота скорость забегающей гусеницы сохраняется равной задаваемой, скорость отстающей уменьшается на величину ΔV .

Текущие значения ΔV , преобразованные в приращения угловой скорости ведущих звездочек $\Delta\omega$, подаются на вход модели машины в RecurDyn. Задаваемые значения угловых скоростей звездочек левой и правой гусеницы реализуются подачей на звездочки крутящего момента, определяемого встроенной в RecurDyn функцией «motion», обеспечивающей задаваемое значение угловой скорости звездочки.

Модель позволяет проводить симуляцию маневров «смена полосы движения», «змейка» (дви-

жение по синусоидальной траектории), «движение по окружности задаваемого радиуса».

Траектории «змейка» и «смена полоса движения» в CoLink-модели задаются табличным способом, при определении отклонений гусеничной машины от круговой траектории используется аналитическое описание окружности задаваемого радиуса. Угол, составляемый касательной к траектории с продольной осью X в прогнозируемом положении машины, определяется по координатам точек траектории в ближайшей окрестности задаваемого положения для табличного способа и с использованием аналитического уравнения окружности – для круговой траектории. Угловое отклонение δ_φ определяется как разность найденного угла и текущего угла поворота корпуса машины относительно вертикальной оси Y . Отклонение от задаваемой траектории Δ_y находится по координатам прогнозного положения машины и координатам его задаваемого положения.

Результаты и обсуждение

Моделировалось движение по твердой опорной поверхности. На рис. 6 приведена траектория гусеничной машины при задаваемом движении по окружности радиуса 25 м со скоростью 20 км/ч. При движении обеспечивалось постоянное значение скорости левой забегающей гусеницы и подтормаживалась правая гусеница (планетарный механизм поворота).

На рис. 7 представлена зависимость от времени крутящих моментов на левой и правой звездочках для обеспечения задаваемого кругового движения, на рис. 8 – скорости левой и правой гусениц. На рис. 9 изображены задаваемая и действительная траектории при выполнении маневра «змейка». Отклонение машины от задаваемой траектории не превышает 5 см. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности математической модели гусеничной машины и работоспособности представленной модели управления движением с прогнозированием положения машины через заданное время.

Выводы

С использованием прикладного пакета RecurDyn и пакета расширения Colink разработана мехатронная модель гусеничной машины для моделирования стандартных маневров. Проведено моделирование движения машины по круговой траектории и выполне-

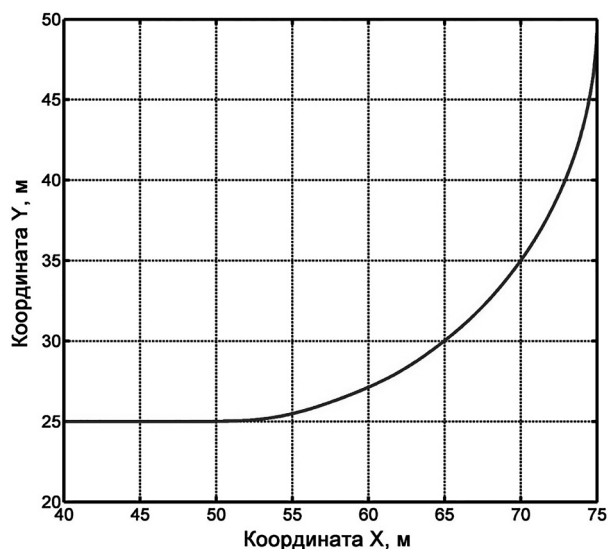


Рис. 6. Траектория при задаваемом движении по окружности радиуса 25 м

Fig. 6. The trajectory for a given movement along a circle with a radius of 25 meters

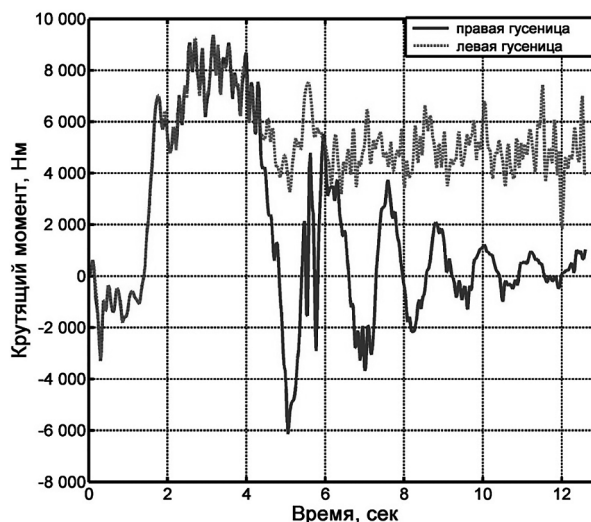


Рис. 7. Крутящий момент на правой и левой ведущих звездочках

Fig. 7. The torque on the right and left drive sprockets

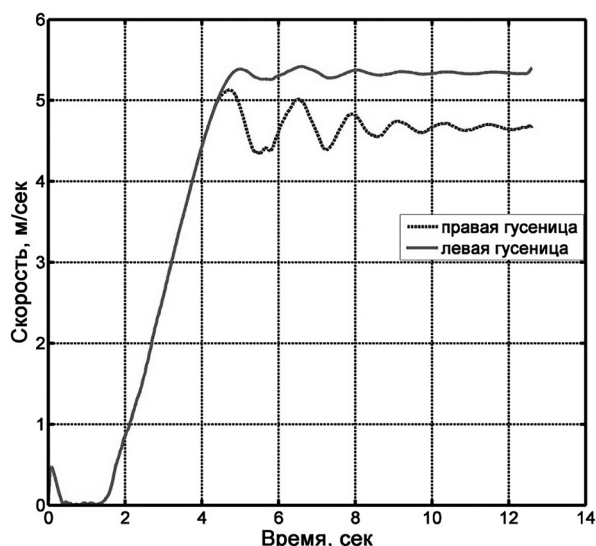


Рис. 8. Скорости левой и правой гусеницы

Fig. 8. Left and right track speeds

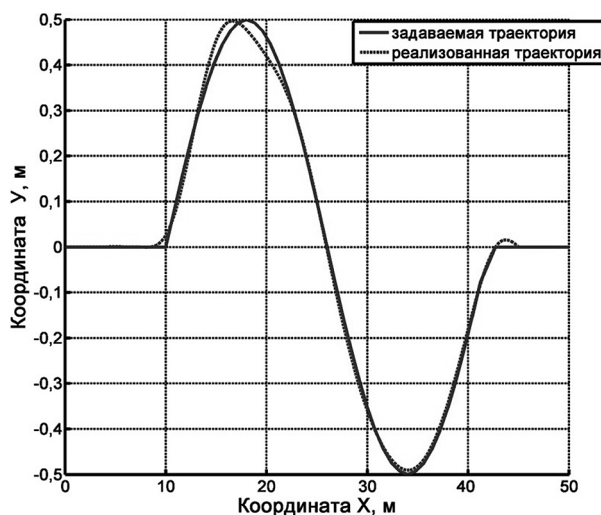


Рис. 9. Задаваемая и реализованная траектории при выполнении маневра «змейка»

Fig. 9. Set and implemented trajectory when performing the snake maneuver

ние маневра «змейка» на твердой опорной поверхности со скоростью 20 км/ч. Результаты математического моделирования подтвердили адекватность модели гусеничной машины и работоспособность модели управления, основанной на прогнозировании положения машины через задаваемое время.

Разработанная модель позволяет симулировать различные маневры гусеничной машины, по результатам моделирования движения при различных высотах неровностей и скоростях движения определять рациональные па-

раметры гусеничного движителя и системы поддрессирования, оценивать вертикальную динамику гусеничной машины. В перспективе предполагается использование разработанной модели для определения эффективности гусеничного движителя по критерию неспадания гусеницы при движении с различными скоростями на разных опорных поверхностях.

Литература

1. Дмитриев А.А., Чобиток В.А., Тельминов А.В. Теория и расчет нелинейных систем поддрессори-

- вания гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1976. 207 с.
2. Котиев Г.О. Прогнозирование эксплуатационных свойств систем поддрессоривания военных гусеничных машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2000, 25 с.
 3. Савочкин В.А., Шарипов В.М., Смирнов И.А., Шишанов С.М., Тарасова Л.И. Метод выбора рациональных параметров системы поддрессоривания быстроходной гусеничной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 3. С. 18–21.
 4. Ягубов В.Ф., Стрелков А.Г., Шапкин А.Н. Анализ управляемого криволинейного движения быстроходных гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 4. С. 12–18.
 5. Наумов В.Н., Машков К.Ю., Пехтерев А.А., Рубцов В.И. Алгоритм предотвращения неуправляемого движения гусеничных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1 (186). С. 29–42.
 6. Наказной О.А. Аналитическая зависимость критической по заносу скорости быстроходной гусеничной машины от ее колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/973.html>
 7. Дьяконов В.П. Матлаб 6.5+Simulink 4/5. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. 768 с.
 8. Поддубный В.И., Павлюк А.С., Поддубная М.Л. Разработка мехатронных моделей механических систем с использованием прикладного пакета CAMEL-View // Ползуновский вестник. 2013. № 4/3. С. 110–116.
 9. Поддубный В.И., Трехтлер А., Йекер К.П., Харченко Е., Варкентин А. Моделирование активной подвески для автомобиля повышенной проходимости и оценка возможности ее использования для снижения нагрузки на колесо с поврежденной шиной // Мехатроника автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 47–50.
 10. Поддубный В.И., Поддубная М.Л. Разработка математических моделей механических систем с использованием прикладного пакета RecurDyn // Ползуновский вестник. 2015. № 1. С. 57–62.
 11. Коростелев С.А., Нечаев К.С., Бокин Д.П. Влияние режимов нагружения на механические характеристики материала резиновых элементов РМШ гусеничного движителя // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 1 (51). С. 46–52.
 12. Коростелев С.А., Целищев В.А., Каширский Д.Ю. Экспериментальное определение характеристик резиновых элементов РМШ гусеничного движителя // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 146–150.
 13. Сергеев Л.В. Теория танка. М.: Издание академии бронетанковых войск, 1973. 495 с.
 14. Поддубный В.И., Трехтлер А., Варкентин А., Крюгер М. Механико-математическая модель гусеничной машины для разработки инновационного движителя и системы поддрессоривания // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 46–50.
 15. Универсальный механизм 7.0. Моделирование динамики гусеничных машин. Руководство пользователя. 2012. URL: http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/18_um_caterpillar.pdf (дата обращения 30.03.2020).
- ### References
1. Dmitriyev A.A., Chobitok V.A., Tel'minov A.V. Teoriya i raschet nelineynykh sistem podressorivaniya gusenichnykh mashin [Theory and calculation of non-linear suspension systems for tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1976. 207 p.
 2. Kotiyev G.O. Prognozirovaniye ekspluatatsionnykh svoystv sistem podressorivaniya voyennykh gusenichnykh mashin: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Forecasting the performance properties of suspension systems for military tracked vehicles: Dissertation for Degree of DrSc in Engineering]. Moscow, 2000, 25 p.
 3. Savochkin V.A., Sharipov V.M., Smirnov I.A., Shishanov S.M., Tarasova L.I. Method for choosing rational parameters of the suspension system of a high-speed tracked vehicle. Traktory i sel'khoz-mashiny. 2015. No 3, pp. 18–21 (in Russ.).
 4. Yagubov V.F., Strelkov A.G., Shapkin A.N. Analysis of the controlled curvilinear motion of high-speed tracked vehicles. Traktory i sel'khoz-mashiny. 2012. No 4, pp. 12–18 (in Russ.).
 5. Naumov V.N., Mashkov K.Yu., Pekhterev A.A., Rubtsov V.I. Algorithm for preventing uncontrolled movement of caterpillar robots. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki. 2017. No 1 (186), pp. 29–42 (in Russ.).
 6. Nakaznoy O.A. Analytical dependence of the critical skid speed of a high-speed tracked vehicle on its oscillations. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 2013, vyp. 10 (in Russ.). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/973.html>
 7. D'yakonov V.P. Matlab 6.5+Simulink 4/5 [Matlab 6.5+Simulink 4/5]. Moscow: SOLON-Press Publ., 2002. 768 p.
 8. Poddubnyy V.I., Pavlyuk A.S., Poddubnaya M.L. Development of mechatronic models of mechanical systems using the CAMEL-View application.

- Polzunovskiy vestnik. 2013. No 4/3, pp. 110–116 (in Russ.).
9. Poddubnyy V.I., Trekhtler A., Yyeker K.P., Kharchenko Ye., Varkentin A. Modeling an active suspension for a cross-country vehicle and assessing the possibility of using it to reduce the load on a wheel with a damaged tire. *Mekhatronika avtomatizatsiya, upravleniye*. 2013. No 9. pp. 47–50 (in Russ.).
 10. Poddubnyy V.I., Poddubnaya M.L. Development of mathematical models of mechanical systems using the RecurDyn application package. *Polzunovskiy vestnik*. 2015. No 1, pp. 57–62 (in Russ.).
 11. Korostelev S.A., Nechayev K.S., Bokin D.P. Influence of loading modes on the mechanical characteristics of the material of the rubber elements of the silentblock of caterpillar mover. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2009. No 1 (51), pp. 46–52 (in Russ.).
 12. Korostelev S.A., Tselishchev V.A., Kashirskiy D.Yu. Experimental determination of the characteristics of the rubber elements of the silentblock caterpillar mover. *Polzunovskiy vestnik*. 2012. No 1/1, pp. 146–150 (in Russ.).
 13. Sergeev L.V. *Teoriya tanka [Tank theory]*. Moscow: Izdaniye akademii bronetankovykh voysk Publ., 1973. 495 p.
 14. Poddubnyy V.I., Trekhtler A., Varkentin A, Kryuger M. Mechanical and mathematical model of a tracked vehicle for the development of an innovative propulsion and suspension system. *Vestnik mashinostroyeniya*. 2017. No 3, pp. 46–50 (in Russ.).
 15. Universal'nyy mekhanizm 7.0. Modelirovaniye dinamiki gusenichnykh mashin. *Rukovodstvo pol'zovatelya [Mechanism 7.0. Modeling the dynamics of tracked vehicles. User guide.]*. 2012. URL: http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/18_um_caterpillar.pdf (accessed: 30.03.2020).