

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-08

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛИ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С АМОРТИЗИРУЮЩИМ ШАССИ И АНАЛИЗ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В. Н. Мещеряков^a, С. Е. Кондратьев^b

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2887-3703>, ✉ mesherek@yandex.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7028-9407>, sergeykondratyev@ieee.org

Аннотация: в данной работе представлен подробный математический анализ динамики четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси, предназначенного для передвижения по сложным рельефам, включая наклонные и неровные поверхности. Разработана нелинейная математическая модель системы на основе лагранжевой механики второго рода, которая учитывает кинетическую и потенциальную энергию корпуса робота и элементов подвески, силы демпфирования, контактные взаимодействия колес с поверхностью, а также нелинейные геометрические зависимости компонентов подвески. Модель учитывает нелинейные динамические эффекты, возникающие при движении по наклонным поверхностям и преодолении препятствий. Проведена оптимизация параметров подвески и системы управления с использованием современных методов оптимизации, направленная на минимизацию вибраций корпуса, обеспечение устойчивого движения и повышение энергоэффективности робота. В отличие от предыдущих исследований, предложенный подход включает комплексную оптимизацию параметров системы с учетом ограничений прочности элементов подвески и требований к динамическим характеристикам робота. Полученные результаты позволяют провести всесторонний анализ динамики системы, оптимизировать конструкцию и параметры управления для повышения эффективности и надежности мобильного робота при движении по сложным и неструктурированным поверхностям. Разработанная модель может быть использована для имитационного моделирования, разработки прототипов и создания робототехнических систем с улучшенными характеристиками, что открывает новые перспективы в области мобильной робототехники и систем управления.

Ключевые слова: робототехника, управление, динамика, моделирование, верификация.

Для цитирования: Мещеряков В. Н., Кондратьев С. Е. Система управления модели четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси и анализ ее функционирования. *Успехи кибернетики*. 2024;5(4):59–66. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-08.

Поступила в редакцию: 10.11.2024.

В окончательном варианте: 04.12.2024.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A CONTROL SYSTEM FOR A FOUR-WHEELED MOBILE ROBOT MODEL WITH A SUSPENSION CHASSIS

V. N. Meshcheryakov^a, S. E. Kondratev^b

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2887-3703>, ✉ mesherek@yandex.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7028-9407>, sergeykondratyev@ieee.org

Abstract: we analyzed the dynamics of a four-wheeled mobile robot with a suspension chassis designed to negotiate challenging terrains, inclined and uneven surfaces. We developed a nonlinear mathematical model of the system using second-order Lagrangian mechanics, accounting for the kinetic and potential energy of the robot's body and suspension elements, damping forces, wheel-ground interactions, and nonlinear geometric relationships within the suspension. The model considers nonlinear dynamic effects during movement on slopes and negotiating obstacles. We optimized the suspension parameters and control system using advanced optimization methods to minimize body vibrations, ensure stable motion, and enhance energy efficiency. Unlike previous studies, our approach comprehensively optimizes system parameters while meeting strength constraints of the suspension components and dynamic performance requirements. The results provide a detailed analysis of system dynamics and enable the optimization of design and control parameters, improving the robot's efficiency and reliability on complex, unstructured surfaces. The developed model supports simulation, prototype development, and the creation of robotic systems with enhanced characteristics, opening new opportunities in mobile robotics and control systems.

Keywords: robotics, control, dynamics, modeling, validation.

Cite this article: Meshcheryakov V. N., Kondratev S. E. Performance Analysis of a Control System for a Four-Wheeled Mobile Robot Model with a Suspension Chassis. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(4):59–66. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-08.

Original article submitted: 10.11.2024.

Revision submitted: 04.12.2024.

Введение

Разработка мобильных робототехнических систем, способных эффективно передвигаться по сложным и неструктурированным поверхностям, является одной из актуальных задач современной робототехники. Такие системы находят применение в различных областях, включая промышленность, сельское хозяйство, военное дело и исследования окружающей среды [1]. Особый интерес вызывают мобильные роботы с амортизирующими шасси, которые обеспечивают устойчивость и адаптивность при движении по неровному рельефу [2].

В последние годы было проведено множество исследований, посвященных моделированию и управлению мобильными роботами с подвеской. В работе [3] представлен анализ динамики четырехколесного робота с независимой подвеской, рассматривается влияние параметров подвески на устойчивость и управляемость. Другие исследования фокусируются на оптимизации конструктивных параметров подвески для улучшения ходовых качеств робота [4, 5].

Методы управления мобильными роботами с подвеской также активно развиваются. В [6] предложена система активной подвески, позволяющая адаптировать жесткость и демпфирование в реальном времени для преодоления препятствий. В [7] рассматривается использование методов машинного обучения для управления движением робота по сложному рельефу.

В предыдущей работе авторов [8] была разработана система управления для моделирования и верификации модели четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси. Однако в данной работе основной акцент был сделан на разработке базовой модели и системы управления, без глубокого анализа силовых характеристик и оптимизации конструктивных параметров подвески.

Несмотря на достигнутый прогресс, остается ряд нерешенных вопросов. В частности, недостаточно изучены вопросы оптимизации параметров подвески с учетом динамических нагрузок при движении по наклонным поверхностям, а также вопросы прочности и надежности конструктивных элементов подвески в реальных условиях эксплуатации.

Целью данной работы является разработка подробной математической модели движения четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси, проведение анализа силовых характеристик при движении по наклонным поверхностям и оптимизация конструктивных параметров подвески с учетом требований прочности и надежности.

Математическое описание системы

Рассмотрим динамическую модель четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси, предназначенного для передвижения по сложному рельефу, включая наклонные поверхности. Целью является разработка подробной математической модели, позволяющей анализировать динамику системы, оптимизировать параметры подвески и системы управления для повышения устойчивости и эффективности работы робота.

Пусть робот движется в трехмерном пространстве, описываемом инерциальной системой координат $OXYZ$. Положение центра масс робота определяется вектором $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$, а ориентация корпуса задается углами Эйлера $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$, где ϕ — угол крена, θ — угол тангажа, ψ — угол рыскания.

Введем обобщенные координаты системы:

$$\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4] \in \mathbb{R}^{10}, \quad (1)$$

где α_i ($i = 1, \dots, 4$) — углы поворота рычагов подвески каждого из четырех колес относительно корпуса робота.

Кинетическая энергия системы T складывается из кинетической энергии поступательного движения корпуса, его вращения и энергии вращения рычагов подвески:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} J_{\alpha_i} \dot{\alpha}_i^2, \quad (2)$$

где:

- m — масса корпуса робота;
- $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^\top$ — скорость центра масс робота;
- $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость корпуса робота, связанная с производными углов Эйлера Θ :

$$\boldsymbol{\omega} = [\dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi + \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta]; \quad (3)$$

- I_C — тензор инерции корпуса относительно центра масс;
- I_{α_i} — момент инерции рычага подвески i -го колеса относительно оси вращения;
- $\dot{\alpha}_i$ — угловая скорость вращения рычага подвески i -го колеса.

Потенциальная энергия системы V включает гравитационную энергию и энергию деформации пружин подвески:

$$V = mgz + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{2} k_{s_i} (\delta_i - \delta_{0i})^2 \right), \quad (4)$$

где:

- g — ускорение свободного падения;
- k_{s_i} — коэффициент жесткости пружины подвески i -го колеса;
- δ_i — текущее удлинение пружины подвески i -го колеса;
- δ_{0i} — удлинение пружины в ненагруженном состоянии.

Удлинение пружины δ_i зависит от угла поворота рычага подвески α_i и геометрических параметров подвески. Введем функцию $f(\alpha_i)$, описывающую эту зависимость:

$$\delta_i = l_{s_i} - l_{s0i} = f(\alpha_i), \quad (5)$$

где l_{s_i} — текущая длина пружины, l_{s0i} — длина пружины в ненагруженном состоянии.

Для описания динамики системы используем лагранжев формализм второго рода. Лагранжиан системы определяется как разность кинетической и потенциальной энергии:

$$L = T - V. \quad (6)$$

Уравнения Лагранжа имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \quad (7)$$

где Q_j — обобщенные силы, соответствующие обобщенной координате q_j .

Обобщенные силы Q_j включают:

- силы демпфирования в подвеске:

$$Q_{\alpha_i}^{(d)} = -c_{s_i} \dot{\delta}_i \frac{\partial \delta_i}{\partial \alpha_i} = -c_{s_i} \dot{\alpha}_i \left(\frac{d\delta_i}{d\alpha_i} \right)^2, \quad (8)$$

где c_{s_i} — коэффициент демпфирования пружины подвески i -го колеса;

- управляющие моменты на колесах:

$$Q_{\alpha_i}^{(\text{drive})} = M_{\text{drive},i}, \quad (9)$$

где $M_{\text{drive},i}$ — момент, создаваемый двигателем на i -м колесе;

• контактные силы между колесами и поверхностью, влияющие на поступательные и вращательные движения робота.

Контактные силы моделируются с использованием модели Герца для нормальной силы и модели трения Кулона для касательной силы. Нормальная сила $F_{N,i}$ в точке контакта i -го колеса определяется как:

$$F_{N,i} = k_{c_i} \delta_{c,i}^{3/2} + c_{c_i} \dot{\delta}_{c,i}, \quad (10)$$

где:

- k_{c_i} — коэффициент жесткости контакта для i -го колеса;

- c_{c_i} — коэффициент демпфирования контакта;
- $\delta_{c,i}$ — величина сжатия в месте контакта;
- $\dot{\delta}_{c,i}$ — скорость изменения сжатия.

Касательная сила трения $F_{T,i}$ определяется как:

$$F_{T,i} = \mu_i F_{N,i} \tanh\left(\frac{v_{rel,i}}{v_{s_i}}\right), \quad (11)$$

где:

- μ_i — коэффициент трения для i -го колеса;
- $v_{rel,i}$ — относительная скорость скольжения в точке контакта;
- v_{s_i} — параметр насыщения для плавности модели трения.

Угловое движение каждого колеса описывается уравнением:

$$I_{\omega_i} \ddot{\omega}_i = M_{drive,i} - r_{\omega_i} F_{T,i}, \quad (12)$$

где:

- I_{ω_i} — момент инерции i -го колеса;
- $\ddot{\omega}_i$ — угловое ускорение i -го колеса;
- r_{ω_i} — радиус i -го колеса.

Объединяя все составляющие, получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений движения:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{K}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \quad (13)$$

где:

- $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ — матрица масс системы, зависящая от обобщенных координат;
- $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — матрица кориолисовых и центробежных сил;
- $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ — вектор гравитационных сил;
- $\mathbf{K}(\mathbf{q})$ — вектор упругих сил подвески;
- $\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ — вектор обобщенных сил, включающий демпфирующие силы, управляющие моменты и контактные силы.

Для исследования устойчивости системы при движении по наклонной поверхности под углом β применим анализ на опрокидывание. Условие предотвращения опрокидывания робота можно записать как:

$$\tan \beta \leq \frac{b}{h_{cm}}, \quad (14)$$

где:

- b — половина ширины колеи робота;
- h_{cm} — высота центра масс над поверхностью опоры.

Оптимизация параметров подвески и системы управления проводится с целью минимизации вибраций корпуса и обеспечения требуемых динамических характеристик. Постановка задачи оптимизации формулируется следующим образом:

$$\min_{\boldsymbol{\kappa}} J(\boldsymbol{\kappa}) = \int_0^T \left[\omega_1 |\ddot{\mathbf{r}}|^2 + \omega_2 \sum_{i=1}^4 (\alpha_i - \alpha_{0i})^2 + \omega_3 \sum_{i=1}^4 \dot{\alpha}_i^2 + \omega_4 \sum_i i = 1^4 M_{drive,i}^2 \right] dt, \quad (15)$$

при ограничениях:

$$k_{s_i}^{\min} \leq k_{s_i} \leq k_{s_i}^{\max}, \quad c_{s_i}^{\min} \leq c_{s_i} \leq c_{s_i}^{\max}, \quad M_{drive,i}^{\max} \geq M_{drive,i} \geq -M_{drive,i}^{\max}, \quad \sigma_{b,i}(t) \leq \sigma_{dop,i}. \quad (16)$$

Здесь:

- $\boldsymbol{\kappa} = [k_{s_1}, \dots, k_{s_4}, c_{s_1}, \dots, c_{s_4}, K_p, K_i, K_d]$ — вектор оптимизируемых параметров;
- $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ — весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих критериев;
- α_{0i} — угол рычага подвески i -го колеса в состоянии покоя;
- $\sigma_{b,i}(t)$ — напряжение в рычаге подвески i -го колеса в момент времени t ;
- $\sigma_{dop,i}$ — допустимое напряжение материала рычага подвески i -го колеса.

Напряжения в элементах подвески рассчитываются на основе изгибающих моментов $M_{b,i}(t)$, действующих на рычаги подвески:

$$M_{b,i}(t) = F_{N,i}(t)l_{\text{eff},i}, \quad (17)$$

где $l_{\text{eff},i}$ — эффективная длина рычага подвески i -го колеса.

Напряжение изгиба в сечении рычага:

$$\sigma_{b,i}(t) = \frac{M_{b,i}(t)}{W_i}, \quad (18)$$

где W_i — момент сопротивления сечения рычага подвески i -го колеса.

Условие прочности требует, чтобы во все моменты времени выполнялось неравенство $\sigma_{b,i}(t) \leq \sigma_{\text{dop},i}$.

Решение задачи оптимизации проводится с использованием численных методов оптимизации, таких как метод Ньютона–Рафсона, метод сопряженных градиентов или генетические алгоритмы. В результате оптимизации определяются оптимальные значения параметров подвески и системы управления, обеспечивающие минимизацию функционала $J(\kappa)$ при соблюдении заданных ограничений.

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений решается численно с использованием методов численного интегрирования, таких как метод Рунге–Кутты 4-го порядка или методы с переменным шагом, адаптированные для решения жестких систем.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет провести всесторонний анализ динамики мобильного робота с амортизирующим шасси, оптимизировать параметры системы для обеспечения ее эффективной и устойчивой работы на сложных поверхностях. Данный подход отличается от предыдущих исследований более подробным учетом нелинейных динамических эффектов, комплексной оптимизацией параметров подвески и системы управления с учетом прочностных ограничений, что способствует повышению точности моделирования и практической применимости результатов.

Полученные математические модели и оптимизированные параметры используются для разработки компьютерной симуляции системы, позволяющей визуализировать и анализировать поведение робота в различных сценариях движения по наклонным и неровным поверхностям.

Моделирование системы управления

Для обеспечения требуемых динамических характеристик и устойчивого движения мобильного робота по сложным поверхностям необходимо разработать эффективную систему управления, учитывающую нелинейную динамику системы и взаимодействие с окружающей средой. В данном разделе представлено математическое моделирование системы управления на основе теории автоматического управления, с учетом ранее полученных уравнений движения робота.

Основными целями системы управления являются поддержание заданной линейной скорости движения робота v_{ref} , стабилизация ориентации корпуса (минимизация углов крена ϕ и тангажа θ), а также управление динамикой подвески для обеспечения оптимального взаимодействия с поверхностью и снижения вибраций.

Рассмотрим нелинейную динамическую систему, описывающую движение робота:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) + \mathbf{K}(q) = \mathbf{Q}(q, \dot{q}, u), \quad (19)$$

где q — вектор обобщенных координат, $\mathbf{M}(q)$ — матрица масс, $\mathbf{C}(q, \dot{q})$ — матрица кориолисовых и центробежных сил, $\mathbf{G}(q)$ — вектор гравитационных сил, $\mathbf{K}(q)$ — вектор сил упругости подвески, $\mathbf{Q}(q, \dot{q}, u)$ — вектор обобщенных сил, включающий управляющие воздействия u .

Для синтеза системы управления применим метод обратной динамики. Представим управляющее воздействие u в виде:

$$u = \mathbf{M}(q)v + \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) + \mathbf{K}(q), \quad (20)$$

где v — новый вектор управляющих сигналов. Подставляя u в уравнение движения, получаем систему:

$$\ddot{q} = v. \quad (21)$$

Таким образом, исходная нелинейная система приводится к линейной с помощью обратной динамики, что упрощает синтез системы управления.

Целью управления является обеспечение слежения за заданной траекторией $q_{\text{ref}}(t)$. Для этого зададим управляющий сигнал v в виде:

$$v = \ddot{q}_{\text{ref}} + \mathbf{K}_d(\dot{q}_{\text{ref}} - \dot{q}) + \mathbf{K}_p(q_{\text{ref}} - q), \quad (22)$$

где \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d — диагональные матрицы коэффициентов усиления по положению и скорости соответственно.

Подставив v в уравнение движения, получаем уравнение ошибок слежения:

$$\ddot{e} + \mathbf{K}_d\dot{e} + \mathbf{K}_pe = 0, \quad (23)$$

где $e = q_{\text{ref}} - q$ — вектор ошибок положения.

Это уравнение описывает динамику ошибок слежения и позволяет выбрать коэффициенты \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d таким образом, чтобы обеспечить требуемые характеристики переходного процесса (быстродействие, перерегулирование, устойчивость).

Однако в реальных системах существуют неопределенности и возмущения, которые могут влиять на качество управления. Для повышения робастности системы применим методы оптимального управления, учитывающие эти факторы.

Применим метод линейно-квадратичного регулятора (LQR) для синтеза оптимального регулятора состояния. Задача заключается в минимизации функционала качества:

$$J = \int_0^{\infty} (e^T \mathbf{Q}e + u^T \mathbf{R}u) dt, \quad (24)$$

где \mathbf{Q} — положительно определенная матрица весовых коэффициентов для ошибок состояния, \mathbf{R} — положительно определенная матрица весовых коэффициентов для управляющих воздействий.

Решая соответствующее алгебраическое уравнение Риккати, находим матрицу усиления \mathbf{K} , определяющую закон управления:

$$u = -\mathbf{K}e. \quad (25)$$

В реальных системах не все состояния могут быть измерены непосредственно. Для оценки недоступных переменных используем наблюдатель состояния (например, наблюдатель Калмана), который восстанавливает состояния системы по измеряемым выходам.

Активное управление подвеской осуществляется путем формирования дополнительных сил в пружинах подвески:

$$F_{\text{act},i} = -K_{\alpha}(\alpha_i - \alpha_{\text{ref},i}) - K_{\dot{\alpha}}\dot{\alpha}_i, \quad (26)$$

где K_{α} , $K_{\dot{\alpha}}$ — коэффициенты усиления, $\alpha_{\text{ref},i}$ — заданные углы подвески, обеспечивающие оптимальное положение и демпфирование.

В итоге разработанная система управления включает:

- управление движением робота с помощью обратной динамики и оптимального регулятора;
- стабилизацию ориентации корпуса посредством управления углами крена ϕ и тангажа θ ;
- активное управление подвеской для снижения вибраций и улучшения плавности хода;
- наблюдатель состояния для оценки недоступных измерению переменных и обеспечения обратной связи.

Данный подход позволяет учесть нелинейности и неопределенности системы, обеспечивая требуемые динамические характеристики и устойчивость мобильного робота при движении по сложным поверхностям.

Результаты моделирования и выводы

Для верификации разработанной математической модели и оценки эффективности предложенной системы управления проведено имитационное моделирование движения четырехколесного мобильного робота с амортизирующим шасси в среде MATLAB/Simulink. В моделировании учитывались нелинейные динамические уравнения движения, разработанная система управления и взаимодействие колес с неровной и наклонной поверхностью.

Сценарий моделирования: разгон робота до заданной скорости $v_{\text{ref}} = 1$ м/с на горизонтальной поверхности. Заезд правых колес на наклонную поверхность с углом подъема 20° . Движение по

наклонной поверхности и последующий съезд на горизонтальную поверхность. Преодоление неровностей на пути движения робота.

Полученные результаты: траектория движения робота показала, что робот плавно заезжает на наклонную поверхность и съезжает с нее без резких отклонений, поддерживая заданную траекторию. Это свидетельствует об эффективной работе системы управления при преодолении наклонных поверхностей. Скорость движения робота вдоль оси X оставалась близкой к заданной v_{ref} , что подтверждается графиком на рисунке 1. Небольшие колебания скорости при заезде на наклонную поверхность и съезде с нее эффективно компенсируются системой управления.

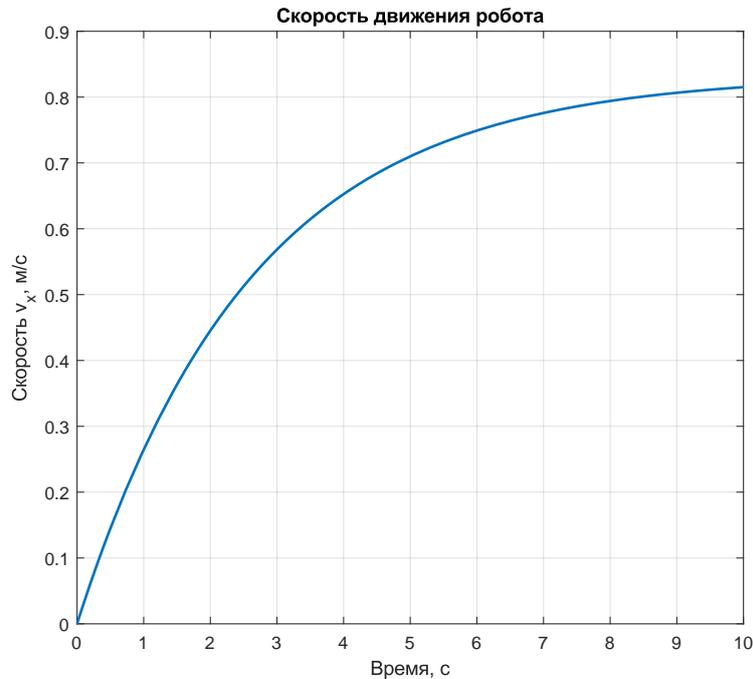


Рис. 1. График изменения линейной скорости робота вдоль оси X

Углы крена и тангажа оставались в допустимых пределах, что показано на рисунке 2. Система управления успешно стабилизировала ориентацию корпуса, предотвращая чрезмерный крен и обеспечивая устойчивость робота.

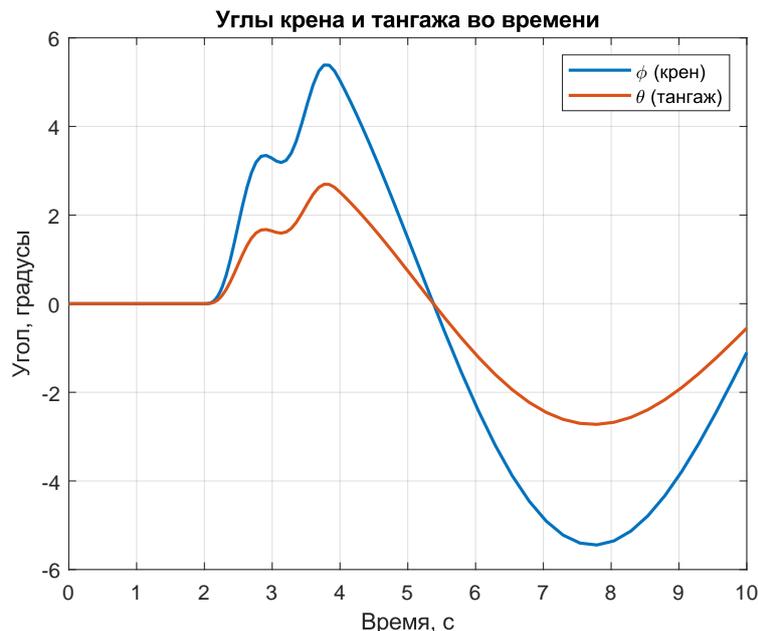


Рис. 2. Графики изменения углов крена ϕ и тангажа θ

Силы в подвеске и активное демпфирование позволили снизить вибрации и обеспечить плавность движения, что подтверждается анализом силовых характеристик подвески в процессе моделирования. Энергопотребление системы управления находилось на приемлемом уровне, что важно для автономной работы робота. Оптимизация параметров управления позволила достичь баланса между производительностью и энергоэффективностью.

Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанной системы управления. Робот успешно выполняет задачи по движению по наклонным и неровным поверхностям, сохраняя заданные параметры движения и ориентации. Активное управление подвеской способствует снижению вибраций и улучшению взаимодействия с поверхностью, что повышает устойчивость и надежность робота. Полученные данные демонстрируют, что предложенный подход к математическому моделированию и управлению мобильным роботом с амортизирующим шасси является действенным и может быть использован в дальнейшем для разработки реальных прототипов и их внедрения в различных приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang H., Lin W., Chen A. Path Planning for the Mobile Robot: A Review. *Symmetry*. 2018;10(10):450.
2. Jiang S., Li Z., Lin S. et al. Design, Control and Experiments of an Agile Omnidirectional Mobile Robot with Active Suspension. *IEEE CASE*. 2022:913–918.
3. Patle B., GaneshBabu L., Pandey A. et al. A Review on Path Planning Strategies for Navigation of Mobile Robot. *Defence Technology*, 2019:15(1):82–90.
4. Rafai A. N. A., Adzhar N., Jaini N. A Review on Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for Autonomous Mobile Robots. *J. Robotics*. 2022:1–14.
5. Sahoo S. K., Choudhury B. B. A Review of Methodologies for Path Planning and Optimization of Mobile Robots. *Journal of Process Management and New Technologies*. 2023;11(1):34–52.
6. Qin H., Shao S., Wang T. et al. Review of Autonomous Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Drones*. 2023;7(3):211.
7. Raskatov V. D., Rubtsov V. Computer Simulation of a Group of Mobile Robots in Special Software Tools. *ITM Web of Conferences*. 2020;35(3):04017.
8. Kondratyev S., Pikalov V., Belokopytov R., Evseev A. Development of Control System for Simulation and Verification of Four-Wheeled Mobile Robot Model with Shock-Absorbing Chassis. *SUMMA Conference*. 2022:775–780.