

УДК 531.36 : 534.1

А.С. Андреев, Е.А. Кудашова

О МОДЕЛИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОЛЕСНОГО РОБОТА С ОМНИ-КОЛЕСАМИ¹

Андреев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, окончил механико-математический факультет Ташкентского государственного университета. Декан факультета математики и информационных технологий УлГУ, заведующий кафедрой «Информационная безопасность и теория управления». Имеет статьи, учебные пособия, монографию в области теории устойчивости и управления движением механических систем. [e-mail: AndreevAS@ulsu.ru].

Кудашова Екатерина Алексеевна, окончила факультет математики и информационных технологий УлГУ. Младший научный сотрудник управления научных исследований УлГУ. Имеет статьи в области управления движением механических систем. [e-mail: katherine.kudashova@yandex.ru].

Аннотация

В настоящее время требования к моделированию и исследованию динамики самоуправляемых робототехнических систем достаточно высоки. В целях достижения дополнительной маневренности и эффективности управления разрабатываются новейшие колесные мобильные роботы с омни-колесами, способные перемещаться в любом направлении без разворота. Эти особенности приобретаются ценой увеличения сложности конструкции и повышенной сложности законов управления. Наибольшее распространение в настоящее время получили трех- и четырехколесные мобильные роботы с роликонесущими колесами.

В статье решена задача теоретического построения управления, обеспечивающего стабилизацию произвольного программного движения трехколесного робота с омни-колесами. Разработана компьютерная модель, позволяющая провести анализ эффективности обоснованного управления. Для разработки модели используется методика численного моделирования, при которой непрерывная модель приводится к соответствующей дискретной модели. Практическое применение предложенного алгоритма отыскания стабилизирующего управления для механических систем рассмотрено на примере стабилизации движения трехколесного робота.

Ключевые слова: математическое моделирование, трехколесный робот, стабилизация, управление, дискретизация.

ON MODELING THE CONTROL STRUCTURE OF THE OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT

Aleksandr Sergeevich Andreev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Tashkent State University; Dean of the Faculty of Mathematics and Information Technologies at Ulyanovsk State University; Head of the Department of Information Security and Control Theory of Ulyanovsk State University; an author of articles, textbooks, and a monograph in the field of stability theory and the motion control of mechanical systems. e-mail: AndreevAS@ulsu.ru.

Ekaterina Alekseevna Kudashova, graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies of Ulyanovsk State University; Junior Researcher at the Department of Scientific Research of Ulyanovsk State University; an author of articles in the field of the motion control of mechanical systems. e-mail: katherine.kudashova@yandex.ru.

Abstract

Nowadays, requirements to modeling and researching self-directed robotic systems are extremely high. In order to improve maneuverability and control efficiency, new mobile robots with omni-wheels are developed. Such robots are able to move in either direction without turning around. They have these features due to the fact of increase of construction and control rules complexity. Three- and four-wheeled mobile robots with roller-carrying wheels have become more widespread.

The article deals with the problem of theoretical control establishing to provide arbitrary program motion of three-wheeled robots with omni-wheels. The computer model of valid control efficiency analysis was developed. For developing this model,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-08482).

the numerical modeling method that turns the continuous model into the corresponding numerical one was used. Practical application of the introduced stabilizing control algorithm for mechanical systems was demonstrated by the example of three-wheeled robot motion stabilization.

Keywords: mathematical modeling, three-wheeled robot, stabilization, control, digitization.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению динамики и управления движением роботов с колесами «omnidirectional» посвящены работы [1–8] и другие. На колесах робота такой конструкции закреплены ролики, оси вращения которых лежат в плоскости колес, что позволяет осуществлять движение в любом направлении без предварительного разворота, что, в свою очередь, значительно повышает маневренность робота.

Колеса управляются независимо посредством двигателей постоянного тока. Исследования, проведенные в статье, основываются на применении прямого метода Ляпунова и его развития [9, 10].

В настоящей работе дано описание аналитического и численного решения задачи стабилизации программного движения мобильного робота с тремя роликонесущими колесами. Полученные результаты дополняют и развивают результаты работ [11, 12] и отличаются простотой проверки условий стабилизации и движения, а также применимостью законов управления при больших начальных отклонениях от программного движения и при неточно известных массо-инерционных параметрах системы.

1 Постановка задачи

Основой ряда типов колесных роботов является следующая математическая модель (рис. 1).

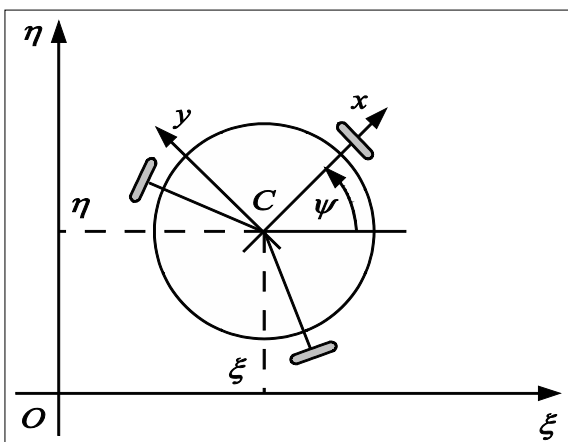


Рис. 1. Конструкция колесного робота

Робот представляется как платформа, которая может перемещаться по горизонтальной поверхности на трех колесах. Углы между осями колес составляют 120°. На колесах закреплены ролики, оси вращения которых лежат в плоскости колес. При наличии подобных колес платформа может двигаться в любом направлении, с любой ориентацией. Движение экипажа происходит без проскальзывания под действием моментов, развиваемых тремя независимыми электродвигателями постоянного тока. Движение такой системы описывается следующими уравнениями:

$$L(t, \dot{q}, \ddot{q}) = P(\psi)U(t, q, \dot{q}), \tag{1}$$

$$L = \begin{pmatrix} m\ddot{\xi} + h\dot{\xi} + m_d\dot{\psi}\dot{\eta} \\ m\ddot{\eta} + h\dot{\eta} - m_d\dot{\psi}\dot{\xi} \\ I\ddot{\psi} \end{pmatrix},$$

$$P = \begin{pmatrix} \sin \psi & \sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\cos \psi & -\cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\psi + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -a & -a & -a \end{pmatrix},$$

$$U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix},$$

где ξ и η – координаты центра масс платформы в неподвижной декартовой системе координат $O\xi\eta$;

ψ – угол поворота платформы вокруг вертикали, отсчитываемой от оси $O\xi$;

$u = (u_1, u_2, u_3)^T$ – управляющие напряжения, подаваемые на электродвигатели постоянного тока;

a – расстояние от центра масс платформы до центра каждого колеса:

$$m = m_0 + 3m_1 \left(1 + \frac{r_1^2}{2r^2}\right), \quad m_d = \frac{3m_1 r_1^2}{2r^2},$$

$$I_s = m_0 \rho_0^2 + 3m_1 \left(\rho_1^2 + a^2 \left(1 + \frac{2r_1^2}{r^2}\right) \right), \quad n = \frac{3c_v}{2r^2}.$$

Здесь m_0 – масса платформы, m_1 – масса колеса, ρ_0, ρ_1 – соответственно радиусы инерции платформы и колеса относительно вертикальной оси, проходящей через их центры масс,

r – радиус колеса, r_1 – радиус инерции колеса относительно оси вращения,

c_v – коэффициент момента противозлектродвижущей силы.

Положим, что программное движение робота описывается следующими функциями:

$$\xi = \xi_0(t), \quad \eta = \eta_0(t), \quad \psi = \psi_0(t). \tag{2}$$

Искомое управление определим из двух компонент $U = U^0 + U^*$ в следующем виде:

$$U(t, q, \dot{q}) = U^0(t, q, \dot{q}) + U^*(t, q, \dot{q}) = P^{-1}(\psi_0(t)) \cdot L^0(t) + P^{-1}(\psi(t)) \cdot V(t),$$

где

$$L^0(t) = \begin{pmatrix} m\ddot{\xi}_0(t) + h\dot{\xi}_0(t) + m_d\dot{\eta}_0(t)\dot{\psi}_0(t) \\ m\ddot{\eta}_0(t) + h\dot{\eta}_0(t) - m_d\dot{\xi}_0(t)\dot{\psi}_0(t) \\ 2a^2h\dot{\psi}_0(t) \end{pmatrix},$$

$$V(t) = \begin{pmatrix} -k_1(\dot{\xi}(t) - \dot{\xi}_0(t)) - k_2(\xi(t) - \xi_0(t)) \\ -k_1(\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_0(t)) - k_2(\eta(t) - \eta_0(t)) \\ -k_3(\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0(t)) - k_4(\psi(t) - \psi_0(t)) \end{pmatrix}.$$

Первая составляющая U^0 управления обеспечивает выполнимость заданного программного движения, вторая – его стабилизацию.

Задача стабилизации программного движения (2) робота состоит в нахождении закона управления $U = U^0 + U^*$, при котором решение (2) системы (1) будет равномерно асимптотически устойчиво.

2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ

Аналитическое решение задачи стабилизации основано на применении определенно-положительной функции Ляпунова

$$V = \frac{1}{2} \left(m \left((\dot{\xi} - \dot{\xi}_0(t))^2 + (\dot{\eta} - \dot{\eta}_0(t))^2 \right) + I \left(\dot{\psi} - \dot{\psi}_0(t) \right)^2 + \left(k_2 (\xi - \xi_0(t))^2 + k_2 (\eta - \eta_0(t))^2 + k_4 (\psi - \psi_0(t))^2 \right) \right).$$

Производная этой функции по времени является определенно-отрицательной по $(\dot{\xi} - \dot{\xi}_0(t), (\dot{\eta} - \dot{\eta}_0(t)), (\dot{\psi} - \dot{\psi}_0(t)))$ при условиях

$$(\xi_1)^2 + (\eta_1)^2 \leq \frac{4(h + k_1)(2a^2h + k_2)}{m_d^2},$$

$$\xi_1 = \max(\dot{\xi}_0(t)), \eta_1 = \max(\dot{\eta}_0(t)).$$

В соответствии с теоремами из [9, 10] получаем, что условие достаточно для стабилизации любого программного движения.

Для численного анализа процесса стабилизации программного движения (2) разработана программа компьютерного моделирования движения робота. Программа предназначена для моделирования управляемого движения трехколесного робота по заданной траектории. Она разработана на языке Java SE 7u75 и представляет собой самостоятельное приложение для работы на ПК с требованиями к ОС: Windows XP, Windows 7, Windows 8, Linux 3.1 и выше. Приложение включает в себя формы ввода желаемого движения робота, начальных условий, дополнительных коэффициентов в трех форматах: текстовым файлом, заданием траектории графически, вводом функций,

зависящих от времени. Результатом работы программы является графическое представление траекторий моделируемого и заданного движений робота.

Отличительными особенностями приложения являются:

- математический пакет собственной разработки;
- модуль ввода математических формул;
- максимальная интерактивность: внесенные пользователем изменения незамедлительно обрабатываются;
- адаптивная графика: векторный движок собственной разработки обеспечивает качественное отображение на любых устройствах.

При переходе непосредственно к математическому моделированию пользователю предлагается задать параметры системы, параметры управления, а также начальные значения координат и скоростей робота либо согласиться с предложенными.

Следующим этапом работы с программой является задание движения робота одним из следующих способов:

1. Аналитически ввести функции, описывающие движение робота.
2. Задать траектории движения графически.
3. Загрузить файлы с массивами данных.

После задания траектории движения робота одним из описанных способов в правой части приложения выводятся следующие графики:

- график $\xi(t), \xi_0(t)$ первой координаты центра масс платформы (рис. 2);

- график $\eta(t), \eta_0(t)$ второй координаты центра масс платформы (рис. 3);

- график $\psi(t), \psi_0(t)$ угла поворота платформы (рис. 4);

- график траектории центра масс платформы на фазовой плоскости (рис. 5);

- график $\dot{\xi}(t), \dot{\xi}_0(t)$ проекции скорости центра масс платформы на ось ξ (рис. 6);

- график $\dot{\eta}(t), \dot{\eta}_0(t)$ проекции скорости центра масс платформы на ось η (рис. 7);

- график $\dot{\psi}(t), \dot{\psi}_0(t)$ угловой скорости платформы (рис. 8);

- график модулей отклонений скоростей робота от программных скоростей $|\dot{\xi}(t) - \dot{\xi}_0(t)|, |\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_0(t)|, |\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0(t)|$ (рис. 9).

На графиках ниже приведены результаты численного моделирования со следующими параметрами системы:

$$m = 20 \text{ кг}, m_d = 3 \text{ кг}, I = 3.76 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, a = 0.2 \text{ м},$$

$$\Delta m = 1 \text{ кг}, T = 0.05 \text{ с}, h = 1.6 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, R = 2 \text{ м},$$

$$\omega = 0.5 \text{ с}^{-1}.$$

Функции, описывающие желаемое движение робота, выбраны следующие:

$$\xi_0(t) = R \cos(\omega t), \eta_0(t) = R \sin(\omega t), \psi_0(t) = \omega t,$$

а начальные не малые отклонения:

$$\xi_0^0 = 0.5, \eta_0^0 = 1, \psi_0^0 = 0.1, \dot{\xi}_0^0 = 0.1, \dot{\eta}_0^0 = 0.1,$$

$$\dot{\psi}_0^0 = 0.1.$$

Получены соответствующие параметры управления: $k_1 = 1, k_2 = 0.3, k_3 = 0.5, k_4 = 0.8$. В моделируемом случае обратная к исходной матрица $P^{-1}(\psi_0(t))$ имеет вид:

$$P^{-1}(\psi_0(t)) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2\sin(\psi_0(t)) & -2\cos(\psi_0(t)) & -\frac{1}{a} \\ \sqrt{3}\cos(\psi_0(t)) - \sin(\psi_0(t)) & \sqrt{3}\sin(\psi_0(t)) + \cos(\psi_0(t)) & -\frac{1}{a} \\ -\sqrt{3}\cos(\psi_0(t)) - \sin(\psi_0(t)) & -\sqrt{3}\sin(\psi_0(t)) - \cos(\psi_0(t)) & -\frac{1}{a} \end{pmatrix}.$$

Первое слагаемое в управлении $U(t, q, \dot{q}) = P^{-1}(\psi_0(t) = \omega t) \cdot L^0(\omega t) + P^{-1}(\psi(t)) \cdot V(t)$ принимает вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{3}\sin(\omega t) & -\frac{2}{3}\cos(\omega t) & -\frac{1}{3a} \\ \frac{\sqrt{3}}{3}\cos(\omega t) - \frac{1}{3}\sin(\omega t) & \frac{\sqrt{3}}{3}\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\cos(\omega t) & -\frac{1}{3a} \\ -\frac{1}{3}\sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{3}\cos(\omega t) & -\frac{\sqrt{3}}{3}\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\cos(\omega t) & -\frac{1}{3a} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -m\omega^2 R \cos(\omega t) - h\omega R \sin(\omega t) + md\omega^2 R \cos(\omega t) \\ -m\omega^2 R \sin(\omega t) + h\omega R \cos(\omega t) + md\omega^2 R \sin(\omega t) \\ 2a^2 h\omega \end{pmatrix} = -\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2(R+a)h\omega \\ (\sqrt{3}mR\omega - \sqrt{3}mR\omega d - hR + 2ah)\omega \\ (\sqrt{3}mR\omega d - \sqrt{3}mR\omega - hR + 2ah)\omega \end{pmatrix}.$$

Результаты численного моделирования поведения системы представлены на графиках ниже (рис. 2–9). При проведении моделирования шаг Δ_c дискретизации для системы выбран равным шагу Δ_y дискретизации управления ($h = \Delta_c = \Delta_y = 0.01$).

Для решения задачи численного дифференцирования был выбран пятиточечный регулярный шаблон

$H_{5,i} = (x_{i-2}, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2})$, для которого формулы четвертого порядка для первых производных имеют вид

$$\hat{f}'_{i,c} = \frac{1}{12h} (f_{i-2} - 8f_{i-1} + 8f_{i+1} - f_{i+2}), \text{ с погрешностью вычислений } \left(\frac{h^4}{30} M_{5,i} \right).$$

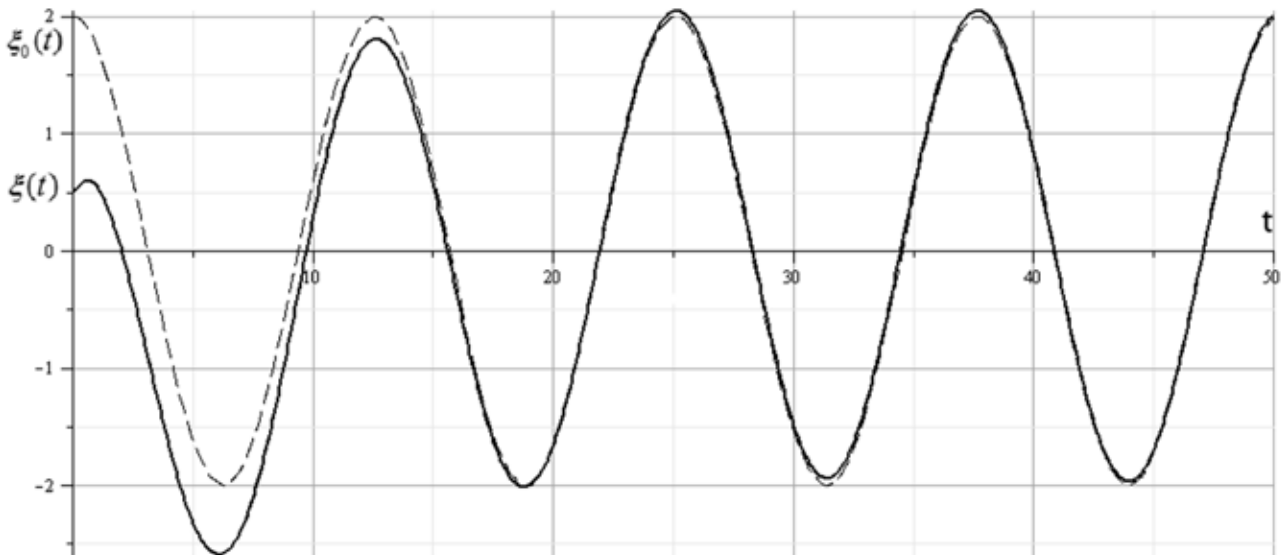


Рис. 2. График первой координаты центра масс платформы. Непрерывная кривая $\xi(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая кривая – программное движение $\xi_0(t) = R\cos(\omega t)$. Время моделирования $t_{max} = 50$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

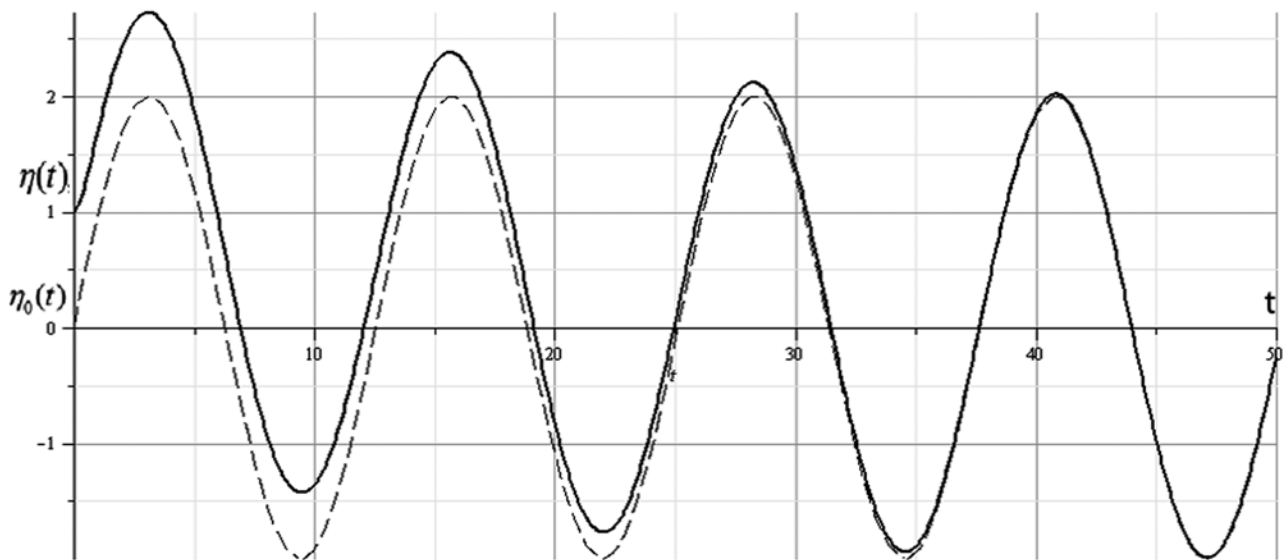


Рис. 3. График второй координаты центра масс платформы. Непрерывная кривая $\eta(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая кривая – программное движение $\eta_0(t) = R \sin(\omega t)$. Время моделирования $t_{max} = 50$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

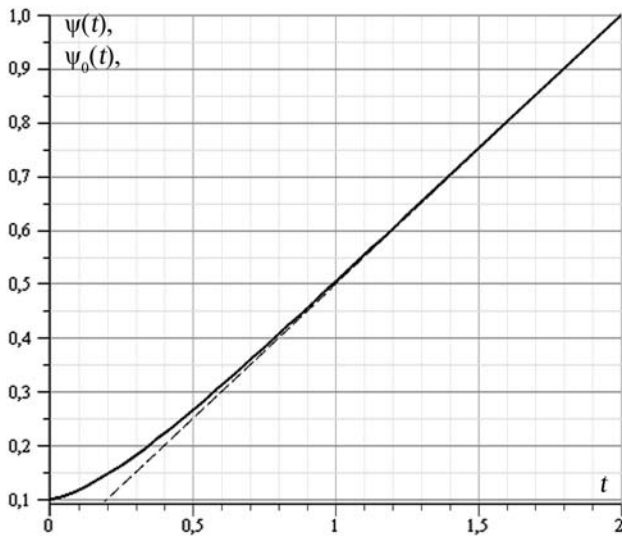


Рис. 4. График угла поворота платформы. Непрерывная кривая $\psi(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая линия – программное движение $\psi_0(t) = \omega t$. Время моделирования $t_{max} = 2$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

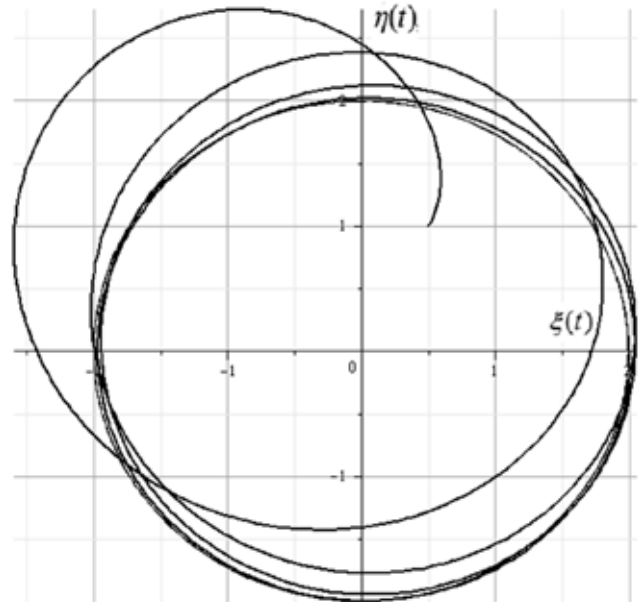


Рис. 5. График траектории центра масс платформы на фазовой плоскости. Черная кривая $\eta(\xi(t))$ – стабилизируемая компонента. Время моделирования $t_{max} = 20$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

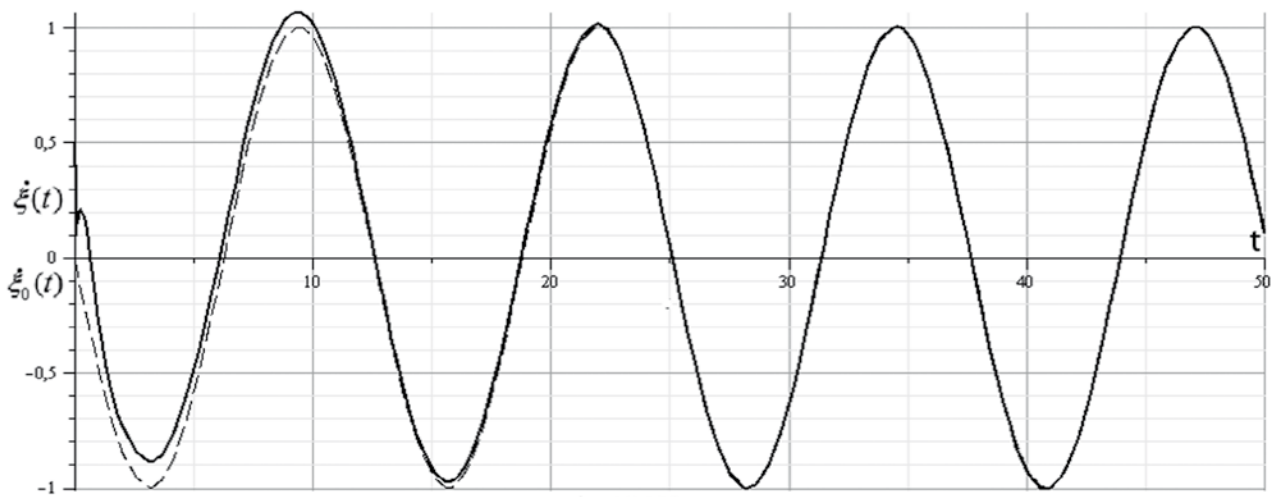


Рис. 6. График проекции скорости центра масс платформы на ось ξ . Непрерывная кривая $\dot{\xi}(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая кривая – программное движение $\dot{\xi}_0(t) = -R\omega \sin(\omega t)$. Время моделирования $t_{max} = 50$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

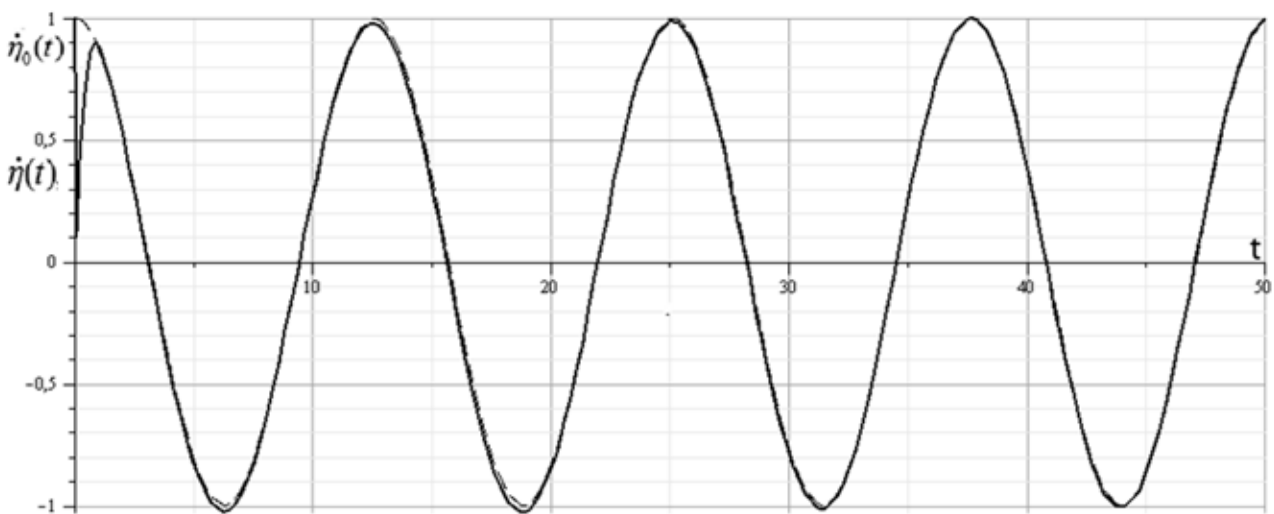


Рис. 7. График проекции скорости центра масс платформы на ось η . Непрерывная кривая $\dot{\eta}(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая кривая – программное движение $\dot{\eta}_0(t) = R\omega \cos(\omega t)$. Время моделирования $t_{max} = 50$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

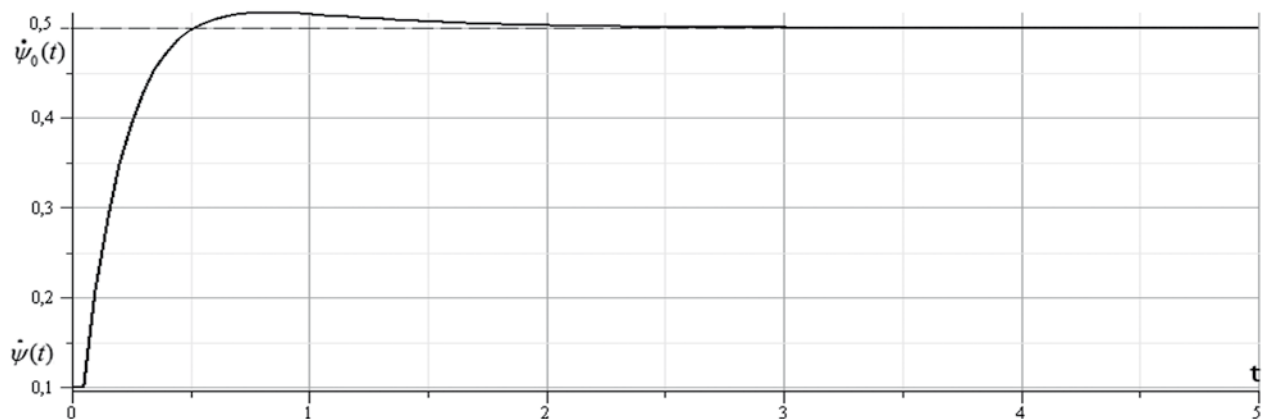


Рис. 8. График угловой скорости платформы. Непрерывная кривая $\dot{\psi}(t)$ – стабилизируемая компонента, штриховая линия – программное движение $\dot{\psi}_0(t) = \omega$. Время моделирования $t_{max} = 5$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

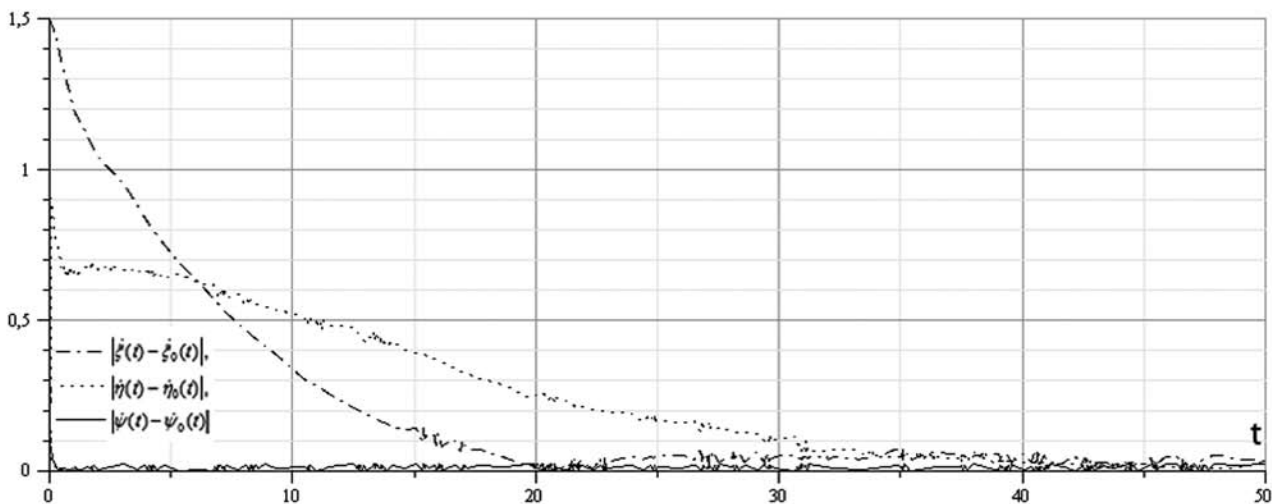


Рис. 9. График модулей отклонений скоростей робота от программных скоростей

$|\dot{\xi}(t) - \dot{\xi}_0(t)|, |\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_0(t)|, |\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0(t)|$. Время моделирования $t_{max} = 50$, шаг дискретизации $\Delta_c = \Delta_y = 0.01$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано описание созданной авторами программы компьютерного моделирования движения трехколесного мобильного робота с омни-колесами. Представлены результаты решения задачи о стабилизации программного движения такой механической системы с помощью описанной программы. На основе полученных графиков моделируемого движения можно судить о качестве выбранного управления и скорости выхода робота на желаемую траекторию. Полученные результаты подтверждают теоретически обоснованную авторами ранее методику синтеза управления движением рассматриваемой механической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М. О движении мобильного робота с роликонесущими колесами // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 6. – С. 142–149.
2. Velasco-Villa M., B. del-Muro-Cuellar and Alvarez-Aguirre A. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation, Athene-Greece, July 27–29, 2007.
3. Зобова А.А., Татаринов Я.В. Свободное и управляемое движение некоторой модели экипажа с роликонесущими колесами // Вест. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. – 2008. – № 6. – С. 62–66.
4. Liu Y., Zhu J.J., Williams I.R.L., Wu J. Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – V. 56. – pp. 461–479.
5. Vazques J.A., Velasco-Villa M. Path-Tracking Dynamical Model Based Control of an Omnidirectional Mobile Robot // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”. Seoul, Korea, July 6–11, 2008. – pp. 5365–5373.

6. Huang H.C., Tsai C.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”. Seoul, Korea, July 6–11, 2008. – pp. 5383–5388.

7. Мартыненко Ю.Г. Устойчивость стационарных движений мобильного робота с роликонесущими колесами и смещенным центром масс // Прикладная математика и механика. – 2010. – Т. 74, Вып. 4. – С. 610–619.

8. Караваев Ю.Л., Трефилов С.А. Дискретный алгоритм управления по отклонению мобильным роботом с омниколесами // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 1. – С. 91–100.

9. Андреев А.С. Об асимптотической устойчивости и неустойчивости нулевого решения неавтономной системы // Прикладная математика и механика. – 1984. – Т. 48, Вып. 2. – С. 225–232.

10. Андреев А.С., Перегудова О.А. К методу сравнения в задачах об асимптотической устойчивости // Докл. РАН. – 2005. – Т. 400, № 5. – С. 621–624.

11. Кузьмин А.В., Моторина Д.Ю., Перегудова О.А. Программная реализация алгоритма построения управления мобильным колесным роботом при учете проскальзывания колес // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 67–70.

12. Андреев А.С., Кудашова Е.А., Раков С.Ю. Синтез непрерывного и кусочно-постоянного управления движением колесного мобильного робота // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 97–100.

REFERENCES

1. Martynenko Yu.G., Formalskiy A.M. O dvizhenii mobilnogo robota s rolikonesushchimi kolesami [On the Motion of a Mobile Robot with Roller-Carrying Wheels]. *Izv. RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of Computer and Systems Sciences International], 2007, no. 6, pp. 142–149.

2. Velasco-Villa M., B. del-Muro-Cuellar and Alvarez-Aguirre A. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot. *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation*, Athene-Greece, July 27-29, 2007.

3. Zobova A.A., Tatarinov Ya.V. Svobodnoe i upravliaemoe dvizhenie nekotoroi modeli ekipazha s rolíkonesushchimi kolesami [Free and Controlled Motion of a vehicle with Roller-Carrying Wheels]. *Vest. MGU. Ser. 1. Matematika, mekhanika* [Journal 'Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika], 2008, no. 6, pp. 62–66.

4. Liu Y., Zhu J.J., Williams II R.L., Wu J. Omnidirectional mobile robot controller based on trajectory linearization. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, vol. 5, pp. 461–479.

5. Vazques J.A., Velasco-Villa M. Path-Tracking Dynamical Model Based Control of an Omnidirectional Mobile Robot, *Proceedings of the 17th World Congress 'The International Federation of Automatic Control'*. Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp. 5365–5373.

6. Huang H.C., Tsai C.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties. *Proceedings of the 17th World Congress 'The International Federation of Automatic Control'*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp. 5383–5388.

7. Martynenko Yu.G. Ustoichivost statsionarnykh dvizhenii mobilnogo robota s rolíkonesushchimi kolesami i smeshchennym tsentrom mass [Stability of Steady Motions of a Mobile Robot with Roller-Carrying Wheels and a Displaced Centre of Mass]. *Prikladnaia matematika i mekhanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 2010, vol. 74, Iss. 4, pp. 610–619.

8. Karavaev Yu.L., Trefilov S.A. Diskretnyi algoritm upravleniia po otkloneniiu mobilnym robotom s omníkolesami [Deviation Based Discrete Control Algorithm for Omni-Wheeled Mobile Robot]. *Nelineinaiia dinamika* [Russian Journal of Nonlinear Dynamics], 2013, vol. 9, no. 1, pp. 91–100.

9. Andreev A.S. Ob asimptoticheskoi ustoichivosti i neustoichivosti nulevogo resheniia neavtonomnoi sistemy [On Asymptotical Stability and Unstability of Zero Solution for a Nonautonomous System]. *Prikladnaia matematika i mekhanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1984, vol. 48, Iss. 2, pp. 225–232.

10. Andreev A.S., Peregudova O.A. K metodu sravneniia v zadachakh ob asimptoticheskoi ustoichivosti [On Comparison Method for the Asymptotical Stability Problem]. *Dokl. RAN* [Proc. of the Academy of Sciences of the Russian Federation], 2005, vol. 400, no. 5, pp. 621–624.

11. Kuzmin A.V., Motorina D.Yu., Peregudova O.A. Programmnaia realizatsiia algoritma postroeniia upravleniia mobilnym kolesnym robotom pri uchete proskalzyvaniia koles [Program Implementation of Control Synthesis Algorithm for Mobile Wheeled Robot with Wheel Slip]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya* [The Volga Region Scientific and Engineering Bulletin], 2011, no. 4, pp. 67–70.

12. Andreev A.S., Kudashova E.A., Rakov S.Yu. Sintez nepreryvnogo i kusochno-postoiannogo upravleniia dvizheniem kolesnogo mobilnogo robota [Synthesis of Continuous and Piecewise Constant Motion Controls of Wheeled Mobile Robots]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya* [The Volga Region Scientific and Engineering Bulletin], 2014, no. 5, pp. 97–100.