

УДК 531.36 : 534.1

А.С. Андреев, С.Ю. Раков

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВУХЗВЕННЫМ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ ПИ-РЕГУЛЯТОРА¹

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].

Раков Станислав Юрьевич, окончил факультет математики и информационных технологий УлГУ. Младший научный сотрудник управления научных исследований УлГУ. Имеет статьи в области управления движением механических систем. [e-mail: rakov.stanislav@gmail.com].

Аннотация

В статье решена задача о стабилизации программного движения двухзвеного манипулятора на подвижном основании путем построения ПИ-регулятора. Манипулятор состоит из двух однородных звеньев, соединенных шарниром. В схвате второго звена расположен перемещаемый груз. Подвижное основание совершает поступательное перемещение в горизонтальной плоскости. Звенья манипулятора также движутся в горизонтальной плоскости. Таким образом, манипулятор совершает плоские движения. Движения манипулятора описываются системой двух уравнений Лагранжа второго рода. В работе предложен закон управления, осуществляющий стабилизацию заданного программного движения в виде пропорционально-интегральной зависимости для случая, когда основание манипулятора совершает заданное нестационарное движение. Задача стабилизации программного движения решена для линеаризованной модели. Для численного моделирования была применена созданная авторами программа, позволяющая строить ПИ-управление для различных механических систем. Найдено численное решение полученной системы интегро-дифференциальных уравнений с нестационарными коэффициентами. Построены соответствующие графики для координат звеньев манипулятора, подтверждающие теоретические результаты.

Ключевые слова: двухзвеноый манипулятор, стабилизация, программное движение, ПИ-управление, подвижное основание.

ON CONTROL OF TWO-LINK ROBOTIC MANIPULATOR ON THE BASE OF PI-CONTROLLER

Aleksandr Sergeevich Andreev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Tashkent State University; Head 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.

Stanislav Iurievich Rakov, graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies of Ulyanovsk State University; Junior Researcher of Scientific Research Center of Ulyanovsk State University; an author of articles in the field of the motion control of mechanical systems. e-mail: rakov.stanislav@gmail.com.

Abstract

The article deals with the problem of two-link robotic manipulator program motions stabilization on a movable base by creating a PI-controller. The manipulator consists of two homogeneous links connected by a joint. A moving load is placed in the second link gripper. A movable base makes a translational motion in the horizontal plane. The links of the manipulator are also moving in the horizontal plane. Thus, the manipulator performs planar motion. The manipulator motions are described by the system of Lagrange equations of the second kind. The paper presents a control law carrying out stabilization of the given program motion as a proportional-integral dependence on condition that the base of the manipulator performs

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

predetermined unsteady motion. The problem of program motion stabilization has been solved for the linearized model. For the numerical simulation a new program that allows providing PI-control for the various mechanical systems was used. A numerical solution of the resulting system of integral-differential equations is found. A numerical solution of the received system of integral-differential equations with abnormal indices is found. The corresponding graphs for the coordinates of the manipulator links proving the theoretical results are built.

Key words: two-link manipulator, stabilization, program motion, pi-control, movable base.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение в промышленности имеют манипуляционные роботы, т. е. роботы, имитирующие действия человеческих рук в процессе трудовой деятельности. Синтез систем управления манипуляционными роботами требует изучения в качестве объектов управления сложных многосвязных механических систем [1]. Развитие теории исполнительных систем роботов ставит новые проблемы перед теоретической механикой, вычислительной математикой, теорией алгоритмов. Эти проблемы порождаются, прежде всего, неизбежным внедрением современной, главным образом цифровой, вычислительной техники как в разработку систем управления роботами, так и в сами процессы управления роботами в реальном масштабе времени.

В настоящей работе исследуется задача о стабилизации программного движения двухзвенного манипулятора на основании, совершающем заданное нестационарное поступательное движение в горизонтальной плоскости.

В работе [2] на основе принципа декомпозиции решена задача об отслеживании заданной траектории двухзвенного манипулятора на подвижном основании. В работах [3–5] решена задача о стабилизации программного движения двухзвенного манипулятора с применением вектор-функции Ляпунова и системы сравнения. При этом актуальна проблема построения новых законов управления, простых по структуре, позволяющих решать задачи стабилизации для широкого класса нестационарных программных движений.

В настоящей статье с использованием результатов [6] дано новое решение задачи синтеза управления движением двухзвенного манипулятора на подвижном основании на основе пропорционально-интегральной зависимости, которое обеспечивает стабилизацию заданного программного движения.

1 Постановка задачи

Рассмотрим расположенный на горизонтальной плоскости манипулятор, представляющий собой механическую систему, состоящую из незакрепленного подвижного основания и двух однородных жестких звеньев (рис. 1). Первое звено соединено с подвижным основанием и со вторым звеном при помощи идеальных цилиндрических шарниров. Груз совершает в рассматриваемой плоскости перемещение при помощи схвата, зафиксированного на конце второго звена в точке, в отсутствие действия силы тяжести. Оси обоих шарниров направлены вертикально, а трение в узлах звеньев отсутствует. Размеры груза и схвата несущественны по сравнению с размерами звеньев, суть – материальные точки.

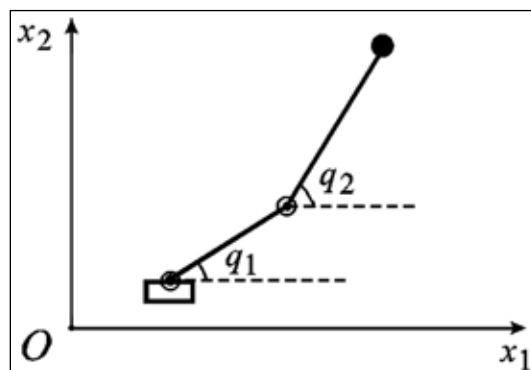


Рис. 1. Двухзвенный манипулятор на подвижном основании

В качестве обобщенных координат примем углы поворотов звеньев. Пусть функции $x_1(t)$ и $x_2(t)$ описывают положения центра масс основания в инерциальной системе координат. Уравнения Лагранжа, описывающие движение данной системы, имеют вид

$$\begin{cases} h_1 \ddot{q}_1 + h_3 \cos(q_1 - q_2) \ddot{q}_2 + h_3 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_2^2 + \\ + h_4 (\ddot{x}_2 \cos q_1 - \ddot{x}_1 \cos q_1) = U_1, \\ h_2 \ddot{q}_2 + h_3 \cos(q_1 - q_2) \ddot{q}_1 + h_3 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_1^2 + \\ + h_5 (\ddot{x}_2 \cos q_2 - \ddot{x}_1 \cos q_2) = U_2, \end{cases} \quad (1)$$

со следующими массово-геометрическими характеристиками манипулятора: m_1, m_2 и l_1, l_2 – массы и длины первого и второго звеньев соответственно, m_3 – масса груза, которые связаны с параметрами системы соотношениями

$$\begin{aligned} h_1 &= \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) l_1^2, & h_2 &= \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) l_2^2, \\ h_3 &= \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_1 l_2, & h_4 &= \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1, \\ h_5 &= \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2. \end{aligned}$$

В векторно-матричном виде математическая модель (1) манипулятора может быть представлена следующим уравнением:

$$H(q) \ddot{q} + P(t, q, \dot{q}) = U, \quad (2)$$

где $q = (q_1, q_2)'$ – вектор обобщенных координат рассматриваемой механической системы, матрица инерции $H(q)$ и вектор $P(t, q, \dot{q})$ имеют соответственно вид

$$H(q) = \begin{pmatrix} h_1 & h_3 \cos(q_1 - q_2) \\ h_3 \cos(q_1 - q_2) & h_2 \end{pmatrix},$$

$$P(t, q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} h_3 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_2^2 + h_4 (\ddot{x}_2 \cos q_1 - \ddot{x}_1 \cos q_1) \\ h_3 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_1^2 + h_5 (\ddot{x}_2 \cos q_2 - \ddot{x}_1 \cos q_2) \end{pmatrix}$$

Пусть $q^0(t) = (q_1^0(t), q_2^0(t))$ – заданное программное движение системы (2). Составим уравнения возмущенного движения. Уравнения динамики манипулятора являются нелинейными, поэтому с целью упрощения процесса моделирования используем метод линеаризации системы

$$\ddot{y} = (H^{-1}(q)) \left(h_3 \sin(q_1^0 - q_2^0) (y_1 - y_2) \begin{bmatrix} \ddot{q}_2^0 \\ \ddot{q}_1^0 \end{bmatrix} - h_3 \left(\sin(q_1^0 - q_2^0) \begin{bmatrix} 2\dot{y}_2 \dot{q}_2^0 \\ 2\dot{y}_1 \dot{q}_1^0 \end{bmatrix} + \cos(q_1^0 - q_2^0) (y_1 - y_2) \begin{bmatrix} (\dot{q}_2^0)^2 \\ (\dot{q}_1^0)^2 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} h_4 y_1 (\ddot{x}_2 \sin q_1^0 + \ddot{x}_1 \cos q_1^0) \\ h_5 y_2 (\ddot{x}_2 \sin q_2^0 + \ddot{x}_1 \cos q_2^0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \right)$$

Задача стабилизации программного движения может быть решена на основе пропорционально-интегрального закона управления вида

$$U_i = k_{i1} q_i(t) + k_{i2} \int_0^t e^{-\alpha(t-s)} q_i(s) ds. \quad (3)$$

2 ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Численное моделирование процесса стабилизации при управлении (3) было осуществлено с помощью созданной соавтором программы [7] при следующих параметрах системы:

$$m_1 = 20 \text{ кг}, m_2 = 10 \text{ кг}, m_3 = 5 \text{ кг}, \\ l_1 = 0,8 \text{ м}, l_2 = 0,5 \text{ м},$$

и выбранных законах программного движения манипулятора:

$$q_1^* = 1,1 \sin(1,2t + 1), \dot{q}_1^* = 1,32 \cos(1,2t + 1), \\ q_2^* = 1,3 \sin(1,6t + 1), \dot{q}_2^* = 2,08 \cos(1,6t + 1),$$

с начальными условиями

$$x_1(0) = 0, x_2(0) = 0,5, \dot{x}_1(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0,5.$$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования, которые показывают сходимость отклонений от программного движения к нулю с течением времени и тем самым подтверждают решение задачи стабилизации при управлении (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье получены следующие основные результаты:

- решена задача синтеза пропорционально-интегрального управления движением двухзвенного манипулятора на подвижном основании, обеспечивающего стабилизацию программного движения в нелинейной и нестационарной постановке;

- проведено численное моделирование, подтверждающее полученные теоретические результаты.

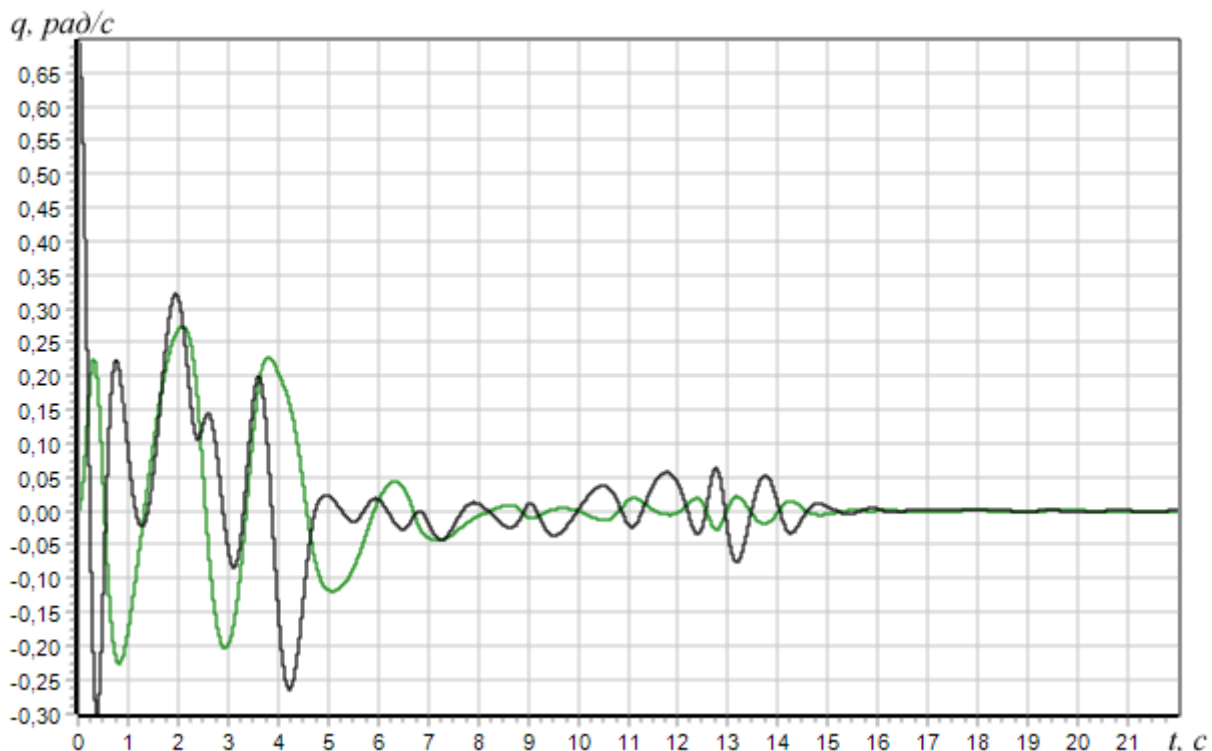


Рис. 2. Результаты моделирования при управлении (3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноуско Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М. : Физматлит, 2006. – 328 с.
2. Ананьевский И.М., Решмин С.А. Метод декомпозиции в задаче об отслеживании траекторий механических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 5. – С. 25–32.
3. Перегудова О.А. Методы сравнения в задачах устойчивости и стабилизации. – Ульяновск : УлГУ, 2004. – 60 с.
4. Андреев А.С., Макаров Д.С., Таджиев Д.А. Об управлении двухзвенным манипулятором с приводом // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 5. – С. 102–105.
5. Перегудова О.А., Макаров Д.С. Синтез управления двухзвенным манипулятором // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 4(38). – С. 36–41.
6. Андреев А.С., Благодатнов В.В., Кильметова А.Р. Уравнения Вольтера в моделировании ПИ и ПИД-регуляторов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 1. – С. 84–90.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610973 от 21 января 2015 года. Моделирование движения мобильного робота.
2. Ananievskii I.M., Reshmin S.A. Metod dekompozitsii v zadache ob otslezhivanii traektorii mekhanicheskikh sistem [Decomposition Method in the Task of Mechanical Systems Path Following]. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of Computer and Systems Sciences International (The Journal of Optimization and Control)], 2002, no. 5, pp. 25–32.
3. Peregudova O.A. *Metody sravneniia v zadachakh ustoiichivosti i stabilizatsii* [Comparison Methods in Problems on Stability and Stabilization]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2004. 60 p.
4. Andreev A.S., Makarov D.S., Tadzhiiev D.A. Ob upravlenii dvuzvennym manipuliatorom s privodom [On the Control of Driven Double-Link Manipulator]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhia* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2013, no. 5, pp. 102–105.
5. Peregudova O.A., Makarov D.S. Sintez upravleniia dvukhzvennym manipuliatorom [Control Synthesis for Double-Link Manipulator]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no. 4 (38), pp. 36–41.
6. Andreev A.S., Blagodatnov V.V., Kilmetova A.R. Uravneniia Voltera v modelirovanii PI i PID-reguliatorov [Volterra Equation for the PI and PID-Control Modeling]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhia* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2013, no. 1, pp. 84–90.
7. *Modelirovanie dvizheniia mobilnogo robota* [Simulation of Mobile Robot Motion]. State Registration Certificate of the Computer Program no. 2015610973.

REFERENCES

1. Chernousko F.L., Ananievskii I.M., Reshmin S.A. *Metody upravleniia nelineinymi mekhanicheskimi sistemami* [Methods for Nonlinear Mechanical Systems Control]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 328 p.