

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354>

УДК 62.529

## Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов

Кандидаты техн. наук, доценты Н. Н. Гурский<sup>1)</sup>, Ю. А. Скудняков<sup>2)</sup>,  
инж. В. С. Артющик<sup>1)</sup>, асп. А. Н. Безручко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Рассматривается задача управления многозвенными роботами-манипуляторами для реализации высокотехнологических процессов в промышленности. Излагаются последовательные шаги использования компьютерных технологий при построении роботов-манипуляторов, включающие математические, алгоритмические и аппаратно-программные средства для создания многоприводной мехатронной системы под управлением промышленного микроконтроллера фирмы OMRON. Приведена кинематическая схема робота-манипулятора, совершающего два типа движений – поворот вокруг оси  $z$  и прямолинейное перемещение рабочего органа вдоль радиуса поворота с точным позиционированием в заданную точку рабочего пространства. Электромеханическая конструкция манипулятора позволяет обеспечить транспортировку объектов производства в соответствии с заданным технологическим процессом. Для проектирования технологического процесса транспортирования объектов производства разработан программный модуль, позволяющий автоматизировать описание основных операций движения рабочего органа робота-манипулятора с последующим автоматическим формированием последовательности команд для управляющей программы, обеспечивающей работу электрических приводов звеньев манипулятора в реальном времени. Чтобы ускорить процесс проектирования траектории движения рабочего органа, разработана пространственная имитационная модель робота-манипулятора в среде MatLab-Simulink. Рассматривается обобщенная схема мехатронной системы управления роботом-манипулятором на базе программируемого логического контроллера OMRON, функционирующего под управлением программы, разработанной в среде программирования Sysmac Studio Automation. Для промышленного использования мехатронной системы в период наладки и эксплуатации создана программа для программируемого терминала с интерфейсными элементами и элементами анимации. Представлен внешний вид опытного образца робота-манипулятора. Разработанная мехатронная система робота-манипулятора может быть технологически ориентирована на решение других задач промышленного производства.

**Ключевые слова:** мехатронная система, робот-манипулятор, компьютерные технологии, программно-аппаратные средства, микроконтроллер, технологический процесс, электрический привод, управляющая программа, имитационная модель, программируемый логический контроллер, программируемый терминал, опытный образец

**Для цитирования:** Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов / Н. Н. Гурский [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 350–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354>

## Control of Mechatronic System Based on Multilink Robot-Manipulators

N. N. Hurski<sup>1)</sup>, Yu. A. Skudnyakov<sup>2)</sup>, V. S. Artsiushchik<sup>1)</sup>, A. N. Bezruchko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The task of controlling multi-link robots with manipulators for implementation of high-tech processes in industry has been considered in the paper. The paper presents sequential steps of using computer technology in construction of robotic-

### Адрес для переписки

Гурский Николай Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65, корп. 11  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-64  
povt@bntu.by

### Address for correspondence

Hurski Nikolai N.  
Belarusian National Technical University  
65/11 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-64  
povt@bntu.by

manipulators, including mathematical, algorithmic, and hardware and software tools for creating a multi-drive mechatronic system controlled by OMRON industrial microcontroller. A kinematic scheme of a robot manipulator has been described in the paper and it performs the following two types of movements – rotation around the  $z$  axis and rectilinear movement of a working element along a turning radius with precise positioning at a given point in the working space. Electromechanical design of the manipulator allows to ensure transportation of production objects in accordance with a given technological process. For designing the technological process of transporting production objects, a software module has been developed that makes it possible to automate description of basic operations for movement of the robot manipulator working body with subsequent automatic generation of a command sequence for a control program ensuring operation of electric drives in manipulator links in real time. To speed up the process of designing trajectory of the working body, a spatial simulation model of a robot-manipulator in the MatLab-Simulink environment has been developed. The paper considers a generalized diagram of a mechatronic control system for a robot-manipulator based on the OMRON programmable logic controller operating under control of a program developed in the programming environment Sysmac Studio Automation. A program for a programmable terminal with interface elements and animation elements has been developed for industrial use of the mechatronic system during adjustment and operation period. The paper provides an appearance of a robot-manipulator prototype. The developed mechatronic system of the robot-manipulator can be technologically oriented towards solving other problems of industrial production.

**Keywords:** mechatronic system, robot-manipulator, computer technologies, software and hardware, microcontroller, technological process, electric drive, control program, simulation model, programmable logic controller, programmable terminal, prototype

**For citation:** Hurski N. N., Skudnyakov Yu. A., Artsiushchik V. S., Bezruchko A. N. (2019) Control of Mechatronic System Based on Multilink Robot-Manipulators. 18 (4), 350–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354> (in Russian)

## Введение

Мехатронные системы стремительно расширяют область применения. Они начинают интенсивно использоваться для реализации высокотехнологических процессов в различных отраслях промышленности, качественного улучшения характеристик широкого спектра разнообразных объектов [1]. Применение мехатронного подхода при создании устройств и машин определяет их основные преимущества по сравнению с традиционными электромеханическими системами: точность реализации сложных движений, высокая степень интеграции и надежность, долговечность, помехозащищенность и быстрое перепрограммирование для выполнения требуемых операций [2].

В статье рассматриваются особенности компьютерных технологий при построении роботов-манипуляторов, включающие математические, алгоритмические и аппаратно-программные средства для создания многоприводной мехатронной системы под управлением промышленного микроконтроллера фирмы OMRON.

## Основная часть

В общем случае, для автоматизации различных производственных операций применяются многофункциональные многосвязные мани-

пуляционные роботы. Кинематическая схема многосвязного робота манипулятора показана на рис. 1.

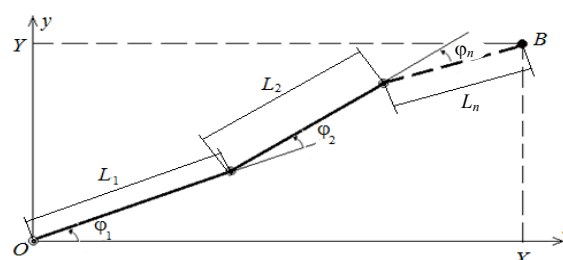


Рис. 1. Кинематика многосвязного манипулятора

Fig. 1. Kinematics of multilink manipulator

Работа манипулятора заключается в позиционировании рабочего органа (точка  $B$ ) в точку с заданными координатами. Для этого используются электроприводы на базе электрических двигателей постоянного или переменного тока. Понятие электропривода, кроме двигателя, включает схему управления, редуктор, датчики.

Как известно, состояние манипулятора описывается прямой и обратной задачами кинематики [3]. Прямая задача – вычисление координат  $(X, Y)$  положения рабочего органа манипулятора по его кинематической схеме с заданными длинами звеньев  $(L_1, L_2, \dots, L_n)$  и их ориентацией  $\varphi$  (здесь  $n$  – число степеней свободы манипулятора). Обратная задача – вычисление углов  $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$  по заданному положению рабочего органа в точке  $B(X, Y)$ .

Математическая модель прямой задачи записывается в виде вектора

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n L_i \cos \sum_{i=1}^i \varphi_i \\ \sum_{i=1}^n L_i \sin \sum_{i=1}^i \varphi_i \end{pmatrix}$$

Технически востребованной является обратная задача кинематики. Однако она, как правило, не имеет однозначного решения, поскольку для заданного положения рабочего органа не всегда существует единственное значение углов  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ . Задача может быть решена аналитически с учетом требуемых ограничений или, в общем случае, численными методами.

Численное решение заключается в оптимизации нормы  $|\vec{B} - \vec{B}_z|$ , где  $\vec{B}$ ,  $\vec{B}_z$  – вектор текущих и заданных координат рабочего органа соответственно. Для поиска оптимизируемых параметров  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  с критерием оптимизации  $|\vec{B} - \vec{B}_z|$  могут быть использованы методы оптимизации нулевого, первого или второго порядков, либо методы случайного поиска [4].

При решении многих практических задач, связанных с позиционированием рабочего органа в заданную точку пространства, применяется кинематическая схема двухзвенного манипулятора [5–7] с тремя степенями свободы: две вращательные с параметрами  $\varphi_1, \varphi_2$ , третья – линейное перемещение вдоль оси  $z$ . В этом случае для решения обратной задачи используется аналитическое решение, основанное на теореме косинусов [8].

На основе данной кинематической схемы разработана электромеханическая конструкция манипулятора для транспортировки объектов производства в соответствии с требуемым технологическим процессом. Робот-манипулятор совершает два типа движений – поворот вокруг оси  $z$  и прямолинейное перемещение рабочего органа вдоль радиуса поворота с точным позиционированием в заданную точку рабочего пространства. Внешний вид робота-манипулятора показан на рис. 2. Из рисунка видно, что такая конструктивная схема имеет четыре степени свободы. С учетом прямолинейного перемещения рабочего органа вдоль радиуса

поворота степень свободы, связанная с кистью робота, может быть исключена. Такое техническое решение возможно при синхронизации поворота кисти в зависимости от угла поворота плеча. Рабочая пространственная зона манипулятора ограничивается длинами звеньев, длиной кисти, а также высотой подъема механизма манипулятора.

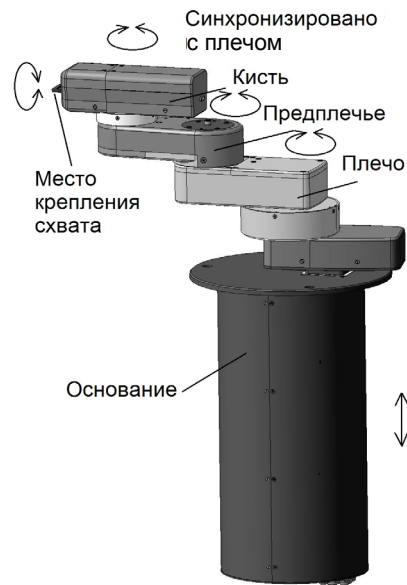


Рис. 2. Внешний вид робота-манипулятора

Fig. 2. Appearance of robot-manipulator

Для проектирования технологического процесса [9] транспортировки объектов производства разработан программный модуль, главное окно которого показано на рис. 3. На рисунке представлено множество заданных точек (для примера ограниченное 16-ю) в плоскости  $x-y$  рабочей зоны механизма, в которые может перемещаться схват манипулятора в соответствии с технологическим маршрутом. На рис. 3 показаны два положения звеньев манипулятора – одно для совершения поворота, второе – для линейного позиционирования.

При планировании маршрута движения необходимо последовательно отметить требуемые точки и задать для них тип команды и ее параметры. Для просмотра сгенерированного цифрового маршрута разработана пространственная имитационная модель манипулятора, приведенная на рис. 4. На этом рисунке цифрами обозначены производственные участки, на которые манипулятор транспортирует объекты в соответствии с рис. 3.

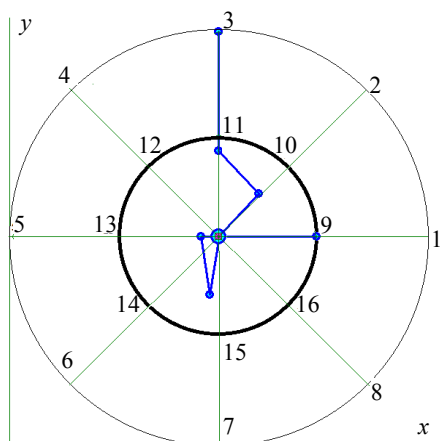


Рис. 3. Плоская модель манипулятора и траектория движения рабочего органа

Fig. 3. Plane model of manipulator and trajectory of working body movement

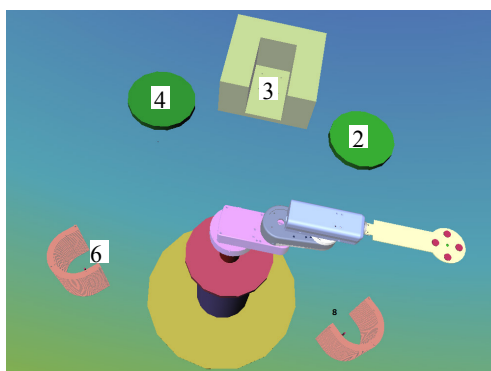


Рис. 4. 3D-модель манипулятора

Fig. 4. 3D-model of manipulator

Программная реализация планирования маршрута выполнена в среде Embarcadero RAD

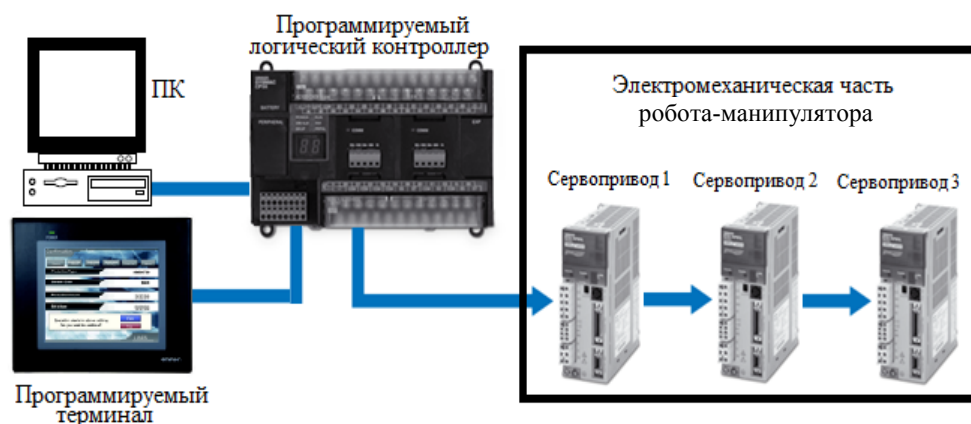


Рис. 5. Обобщенная схема мехатронной системы

Fig. 5. Generalized scheme of mechatronic system

Studio. Пространственная имитационная модель манипуляционного механизма реализована в программной системе MatLab-Simulink. Она дает возможность наблюдать качественную сторону динамического состояния манипулятора и ускоряет процесс проектирования реальной конструкции.

Работу манипулятора в режиме реального времени обеспечивает микроконтроллер с защитой в его память управляющей программой, основу функциональности которой составляет код, отлаженный на этапе моделирования. Для программирования микроконтроллера OMRON использовалась среда программирования Sysmac Studio Automation, поддерживающая язык релейно-контактной логики.

Обобщенная схема мехатронной системы управления роботом-манипулятором, ее взаимодействия с внешним окружением показана на рис. 5.

Для промышленного использования [10] разработанной мехатронной системы требуется дополнить ее средствами управления, необходимыми в период наладки и эксплуатации. Для этого используются программируемые терминалы с интерфейсными элементами и элементами анимации. Главный экран такого терминала показан на рис. 6.

Изложенные этапы программирования, моделирования и управления работой мехатронной системы робота-манипулятора на базе двухзвенного механизма программируемым логическим контроллером OMRON реализованы в опытном образце, внешний вид которого приведен на рис. 7.

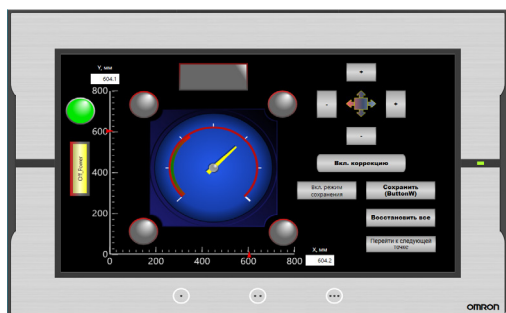


Рис. 6. Экран терминала управления манипулятором  
Fig. 6. Manipulator Control Terminal Screen

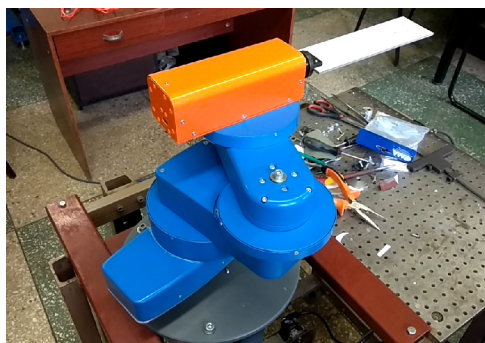


Рис. 7. Опытный образец робота-манипулятора  
Fig. 7. Prototype of robot-manipulator

### ВЫВОДЫ

1. Разработано программное обеспечение, поддерживающее работу электрических приводов робота-манипулятора на базе двухзвенного механизма под управлением промышленного программируемого логического контроллера OMRON.

2. Создана методика проектирования технологического процесса позиционирования робота-манипулятора, позволяющая обеспечить требуемую точность и скорость транспортировки объектов производства.

3. Мехатронная система робота-манипулятора может быть технологически ориентирована на решение других задач промышленного производства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
2. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич // 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 207 с.
3. Механика промышленных роботов / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1988. Т. 1. Кинематика и динамика. 304 с.
4. Кетков, Ю. Л. MatLab 7: программирование, численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.

5. Гурский, Н. Н. Математические и компьютерные модели мехатронных систем аддитивного производства / Н. Н. Гурский // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч. конф. СПб., 2017. Т. 12, ч. 1. С. 151–156.
6. Бургин, Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем / Б. Ш. Бургин // Новосибирск: Новосиб. электротех. ин-т, 1992. 199 с.
7. Имитационное моделирование механизма наплавления пластмасс в аддитивных технологиях / Н. Н. Гурский [и др.] // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. Т. 12, № 4. С. 25–30.
8. Попов, Е. П. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы / Е. П. Попов, А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич. М.: Наука, 1978. 398 с.
9. Пол, Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Р. Пол. М.: Наука, 1976. 104 с.
10. Бурдаков, С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко. М.: Высш. шк., 1986. 264 с.

Поступила 17.04.2019

Подписана в печать 25.06.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

### REFERENCES

1. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. (2004) *Fundamentals for Control of Manipulation Robots*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 480 (in Russian).
2. Yurevich E. I. (2005) *Fundamentals of Robotics*. 2<sup>nd</sup> ed. Saint-Petersburg, Publishing House “BKhV-Peterburg”. 207 (in Russian).
3. Vorob'ev E. I., Popov S. A., Sheveleva G. I., Frolov K. V. (1988) *Mechanics of Industrial Robots Vol. 1. Kinematics and Dynamics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
4. Ketkov Yu. L., Ketkov A. Yu., Schultz M. M. (2005) *MatLab 7: Programming, Numerical Methods*. Saint-Petersburg: Publishing House “BKhV-Peterburg”. 752 (in Russian).
5. Gurskii N. N. (2017) Mathematical and Computer Models of Mechatronic Systems for Additive Production. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. Mezhdunar. Nauch. Konf. T. 12, Ch. 1* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Collection of Papers of International Scientific Conference. Vol. 12. Part 1]. Saint-Petersburg, 151–156 (in Russian).
6. Burgin B. Sh. (1992) *Analysis and Synthesis of Two-Mass Electromechanical Systems*. Novosibirsk, Novosibirsk. Electro-Technical Institute. 199 (in Russian).
7. Gurskii N. N., Skachek V. A., Skachek A. V., Skudnyakov Yu. A. (2016) Simulation Modeling of Mechanism for Welding Plastics in Additive Technologies. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 12 (4), 25–30 (in Russian).
8. Popov E. P., Vereshchagin A. F., Zenkevich S. L. (1978) *Manipulation Robots. Dynamics and Algorithms*. Moscow, Nauka Publ. 398 (in Russian).
9. Paul R. (1976) *Modeling, Trajectory Planning and Motion Control of Robotic Arm*. Moscow, Nauka Publ. 104 (in Russian).
10. Burdakov S. F., Dyachenko V. A. (1986) *Designing of Manipulators for Industrial Robots and Robotic Complexes*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 264 (in Russian).

Received: 17.04.2019

Accepted: 25.06.2019

Published online: 31.07.2019