

14. Spirin I.V. Organizatsiya i upravlenie passazhirskimi avtomobil'nymi perevozkami: ucheb. dlya stud., uchrezhdeniy srednego prof. obrazovaniya [Organization and management of passenger road transport: the textbook for students of institutions of secondary professional education]. 5 ed. Moscow: Akademiya, 2010, 400 p.
15. Geographic Library. Available at: <https://geographiclib.sourceforge.io/> (accessed 12 accessed 2017).
16. GEO Python. Available at: https://github.com/JerryLeooo/geo_python (accessed 12 accessed 2017).
17. Geospatial Data Abstraction Library. Available at: <http://www.gdal.org/> (accessed 12 accessed 2017).
18. PROJ4. Available at: <https://github.com/jswhit/pyproj> (accessed 12 accessed 2017).
19. Algoritm Floyd-Uorshella [Algorithm Of Floyd-Warshell]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Floyd-Warshall_algorithm (accessed 12 accessed 2017).
20. Shcherbakov M., Golubev A. An algorithm for initial public transport network design over geospatial data, *Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International*. IEEE, 2016, pp. 1-7.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент И.М. Бородинский.

Голубев Алексей Владимирович – ВолгГТУ; e-mail: alexey.golubev@vstu.ru; Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28; аспирант.

Щербаков Максим Владимирович – e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования; зав. кафедрой; д.т.н.

Golubev Alexey Vladimirovich – Volgograd State Technical University; e-mail: alexey.golubev@vstu.ru; Volgograd, Pr. Lenin, 28, Russia; postgraduate student.

Shcherbakov Maxim Vladimirovich – e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru; the department of computer-aided design and search construction; head the department; dr. of eng. sc.

УДК 621.865.8+62-503.5

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-143-153

Н.С. Воробьева, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, А.В. Дяшкин

РАЗРАБОТКА БАЗЫ МОДЕЛЕЙ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ*

Целью данной работы является разработка метода синтеза базы моделей и управлений (БМУ) программных движений манипуляционной системы параллельно-последовательной структуры с последовательным трехступенным управляемым захватом, учитывающего особенности применения в технологических процессах промышленного производства и в перерабатывающей промышленности. Исследуется манипулятор параллельно-последовательной структуры, установленный на поворотном основании. Отличительной особенностью манипулятора является пересечение геометрических осей исполнительных звеньев механизма в точке их крепления, позволяющее исключить изгибающий момент от внешних нагрузок. Приведена кинематическая схема манипулятора, построенного на основе трипода и захватного устройства с тремя степенями свободы. В работе представлены перемещения рабочего органа манипулятора при выполнении технологических операций и рассматривается одно из перемещений рабочего органа – вертикальное прямолинейное движение (ВД). Для формирования базы моделей и управлений (БМУ) применен лингвистический аппроксиматор, предназначенный для описания траекторий, описывающих все возможные технологические движения механизма в реальном масштабе времени. Разработана математическая модель динамики движений манипулятора параллельно-последовательной структуры с семью степенями свободы. Приведен динамический

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-48-34039p_a, 16-38-00485 мол_a.

анализ пространственного механизма манипулятора. В результате записи кинетической энергии манипулятора определены составляющие коэффициенты в аналитической форме. Получены аналитические выражения кинетической и потенциальной энергии манипулятора с семью степенями свободы. Предложенный алгоритм получения уравнений динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры позволяет решать две основные задачи – определение движущих сил и моментов, необходимых для реализации заданных программных движений рабочего органа, а также усилия в кинематических парах. При известных управляющих усилиях, уравнения динамики позволяют синтезировать необходимые параметры системы управления с обратными связями, минимизирующих динамические ошибки при обработке программных движений. На основании полученных усилий в исполнительных звеньях манипулятора при прямолинейном вертикальном перемещении захватного устройства, представлены в графическом виде законы изменения усилий манипулятора параллельно-последовательной структуры с семью степенями свободы.

Манипулятор; параллельно-последовательная структура; трехстепенной захват; траектория движения; лингвистический аппроксиматор.

N.S. Vorobieva, V.V. Zhoga, V.V. Dyashkin-Titov, A.V. Dyashkin

DEVELOPMENT OF THE BASE OF MODELS OF THE PARALLEL AND SEQUENCE STRUCTURE MANIPULATOR

The purpose of this work is to develop a method for synthesizing the base of models and controls (BMC) of program movements of a parallel-sequential structure manipulation system with a sequential three-stage controlled capture, taking into account the features of application in industrial processes and in the processing industry. The manipulator of the parallel-sequential structure, mounted on the rotary base, is investigated. A distinctive feature of the manipulator is the intersection of the geometric axes of the actuating links of the mechanism at the point of their attachment, which makes it possible to exclude the bending moment from external loads. The kinematic scheme of a manipulator constructed on the basis of a tripod and a gripping device with three degrees of freedom is given. The paper presents the movements of the manipulator's body during the execution of technological operations, and one of the movements of the working organ is considered to be vertical rectilinear motion (VM). To form the base of models and controls (BMC), a linguistic approximator is used to describe trajectories describing all possible technological movements of the mechanism in real time. A mathematical model of dynamics of manipulator movements of a parallel-sequential structure with seven degrees of freedom is developed. Dynamic analysis of the spatial mechanism of the manipulator is given. As a result of recording the kinetic energy of the manipulator, the component coefficients in the analytical form are determined. Analytic expressions of kinetic and potential energy of a manipulator with seven degrees of freedom are obtained. The proposed algorithm for deriving the dynamics equations for a manipulator of a parallel-sequential structure allows solving two main tasks, namely the determination of the driving forces and the moments necessary for the realization of the given program motions of the working member, and also the efforts in kinematic pairs. With known control efforts, the equations of dynamics make it possible to synthesize the necessary parameters of a control system with feedbacks that minimize dynamic errors in the development of program motions. On the basis of the received efforts in the executive links of the manipulator with rectilinear vertical movement of the gripping device, the laws of changing the manipulator's forces of a parallel-sequential structure with seven degrees of freedom are presented graphically.

Manipulator; parallel-serial structure; gripper with three degrees of freedom; trajectory, linguistic approximator.

Введение. Обычно структура манипуляторов представляет последовательность связанных кинематическими парами звеньев [1]. Такие манипуляторы обладают рядом достоинств, однако консольность таких конструкций не позволяют реализовать перемещения больших масс, особенно на больших скоростях с требуемой точностью позиционирования.

Поэтому в последнее время находят применение манипуляционные механизмы параллельной структуры (l -координатные), представленные на рис. 1, обладающие лучшей грузоподъемностью, повышенной жесткостью системы, достижением высоких скоростей и ускорений грузозахватного устройств [2–6].



Рис. 1. Манипулятор параллельной структуры ADEPT QUATTRO S650H компании OMRON

К недостаткам манипуляторов параллельной структуры относятся ограниченность рабочей зоны, относительно небольшая манипулятивность. В связи с этим возникает необходимость разработки манипуляторов параллельно – последовательной структуры, которые объединяли бы преимущества обеих структурных схем манипуляционных систем [1].

Описание конструкции манипулятора. На рис. 2 представлена кинематическая схема манипулятора, построенного на основе трипода [7–11]. Жесткость конструкции обеспечивает пирамида, составленная из трех активных звеньев переменной длины AM , BM , CM , а дополнительную маневренность и манипулятивность – исполнительное звено AD и манипулятор последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы. Рассматриваемый многозвенный манипулятор имеет семь управляемых степеней подвижности.

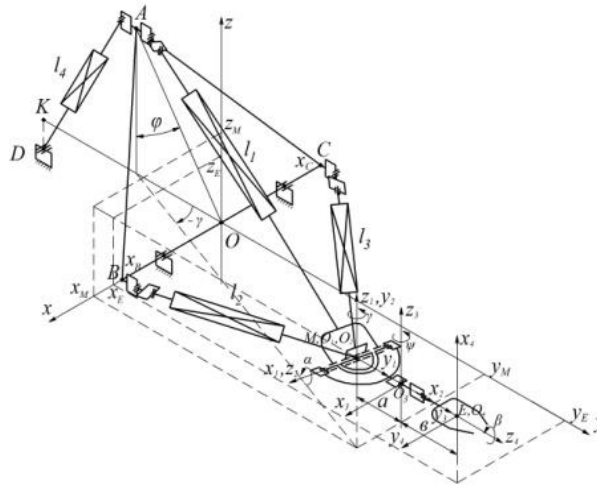


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

К сферическому шарниру [9] M монтируется трехстепенной захват, который состоит из трех звеньев последовательно связанных между собой цилиндрическими шарнирами.

Предлагаемая схема манипулятора позволяет увеличить параметры манипулятивности, обеспечить требуемую ориентацию рабочего органа захватного устройства в каждой точке зоны обслуживания [9, 10, 16, 19].

На рис. 3 приведена кинематическая схема трехстепенного захвата последовательной структуры.

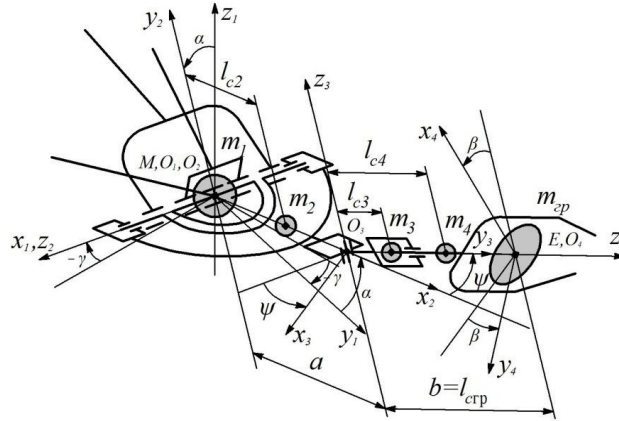


Рис. 3. Кинематическая схема захвата манипулятора-трипода с тремя степенями подвижности

Динамика манипулятора. В качестве обобщенных координат принимаются параметры $q_1 = \varphi$, $q_2 = \gamma$, $q_3 = x_M$, $q_4 = y_M$, $q_5 = z_M$, которые описывают конфигурацию манипулятора – трипода с поворотным основанием. Координаты $q_6 = \alpha$, $q_7 = \psi$, $q_8 = \beta$ – описывают состояние трехзвенного захватного устройства.

Вследствие конструктивных особенностей манипулятора - трипода, его координаты $q_1 = \varphi$, $q_2 = \gamma$, $q_3 = x_M$, $q_4 = y_M$ связаны уравнением

$$f(\gamma, \varphi) = \gamma - \arctg \frac{-x_M}{y_M + OA \sin \varphi} = 0. \quad (1)$$

Кинетическая энергия системы, подчиненной голономным связям, представляется квадратичной формой обобщенных скоростей [4]

$$T = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^8 \sum_{k=1}^8 A_{sk} \dot{q}_s \dot{q}_k, \quad (A_{sk} = A_{ks}). \quad (2)$$

Выражения для коэффициентов $A_{sk} = A_{ks}$ в формуле (2) при движении рабочего органа по произвольной траектории имеют вид

$$A_{11} = m_A OA^2, \quad A_{22} = I_\gamma, \quad A_{33} = (G + m_{тр}), \quad A_{44} = (G + m_{тр}), \quad A_{55} = (G + m_{тр}), \\ A_{66} = I_\alpha, \quad A_{77} = I_\psi, \quad A_{88} = I_\beta,$$

$$A_{23} = A_{32} = (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{сп} l_{стр}) \sin \psi \sin \gamma - \\ - [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_{тр} (a + l_{стр} \cos \psi)] (\cos \alpha \cos \gamma), \\ A_{24} = A_{42} = - (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{сп} l_{стр}) \sin \psi \cos \gamma + \\ + [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_{тр} (a + l_{стр} \cos \psi)] (\cos \alpha \sin \gamma),$$

$$\begin{aligned}
 A_{26} = A_{62} &= \sin \alpha \sin \psi \left(m_3 l_{c3} (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 l_{c4} (a + l_{c4} \cos \psi) + \right. \\
 &\quad \left. + m_{\text{гп}} l_{\text{гп}} (a + l_{\text{гп}} \cos \psi) - I_{4z} \right) + \\
 &\quad + (I_{4y} - I_{4x} + I_{\text{гpy}} - I_{\text{гpx}}) \sin \beta \cos \psi \cos \beta \cos \alpha + (I_{3x} - I_{3y}) \sin \psi \cos \psi \sin \alpha, \\
 A_{27} = A_{72} &= \left[m_3 l_{c3} (l_{c3} + a \cos \psi) + m_4 l_{c4} (l_{c4} + a \cos \psi) + \right. \\
 &\quad \left. + m_{\text{гп}} l_{\text{гп}} (l_{\text{гп}} + a \cos \psi) + I_{3z} + I_{4x} \cos^2 \beta + \right. \\
 &\quad \left. + I_{4y} \sin^2 \beta + I_{\text{гpx}} \cos^2 \beta + I_{\text{гpy}} \sin^2 \beta \right] \cos \alpha, \\
 A_{28} = A_{82} &= I_{\beta} \sin \alpha, \\
 A_{36} = A_{63} &= \left[m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + \right. \\
 &\quad \left. + m_{\text{гп}} (a + l_{\text{гп}} \cos \psi) \right] (\sin \alpha \sin \gamma), \\
 A_{37} = A_{73} &= (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{\text{гп}} l_{\text{гп}}) (\sin \psi \cos \alpha \sin \gamma - \cos \psi \cos \gamma), \\
 A_{46} = A_{64} &= - \left[m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + \right. \\
 &\quad \left. + m_{\text{гп}} (a + l_{\text{гп}} \cos \psi) \right] (\sin \alpha \cos \gamma), \\
 A_{47} = A_{74} &= (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{\text{гп}} l_{\text{гп}}) (-\sin \psi \cos \alpha \cos \gamma - \cos \psi \sin \gamma), \\
 A_{56} = A_{65} &= [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_{\text{гп}} (a + l_{\text{гп}} \cos \psi)] \cos \alpha, \\
 A_{57} = A_{75} &= - (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{\text{гп}} l_{\text{гп}}) \sin \psi \sin \alpha, \\
 A_{67} = A_{76} &= (I_{4y} - I_{4x}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi + (I_{\text{гpy}} - I_{\text{гpx}}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi, \\
 A_{68} = A_{86} &= -I_{\beta} \sin \psi, \tag{3}
 \end{aligned}$$

где m_A – приведенная масса поворотного основания ABC ; m_1 – масса пятиподвижного сферического шарнирного узла; m_2, m_3, m_4 – массы звеньев захвата ME ; $m_{\text{гп}}$ – масса переносимого груза; $G = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ – приведенная масса манипулятора; l_{c2}, l_{c3}, l_{c4} – расстояния до центров масс звеньев захвата ME ; $l_{\text{гп}}$ – расстояние до центра масс переносимого груза; $I_{\gamma}, I_{\alpha}, I_{\beta}$ – приведенные к осям относительного вращения моменты инерции манипулятора; $I_{ix}, I_{iy}, I_{iz}, i = 3, 4$ – моменты инерции звеньев 3 и 4 захвата ME и переносимого груза относительно собственных координатных осей соответственно; $I_{\text{гpx}}, I_{\text{гpy}}, I_{\text{гpz}}$ – моменты инерции переносимого груза относительно координатных осей x_4, y_4, z_4 соответственно; a – расстояние между массой m_1 и осью вращения звена 3.

Все остальные коэффициенты выражения (2) равны нулю.

Уравнения Лагранжа второго рода в явной форме записываются в виде [15]

$$\sum_{k=1}^8 A_{sk} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^8 \sum_{m=1}^8 [k, m, s] \cdot \dot{q}_k \dot{q}_m = Q_s + \lambda \frac{\partial f(q_s)}{\partial q_s} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s}, \tag{4}$$

где Q_s – обобщенная сила, соответствующая s координате; $-\frac{\partial \Pi}{\partial q_s}$ – обобщенная сила потенциальных активных сил, соответствующая s координате; λ – множитель Лагранжа; $[k, m, s]$ – символы Кристоффеля первого рода

$$[k, m, s] = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial A_{ks}}{\partial q_m} + \frac{\partial A_{ms}}{\partial q_k} - \frac{\partial A_{km}}{\partial q_s} \right). \quad (5)$$

Частные производные в выражениях (5) вычисляются с помощью программы символьной математики Mathcad.

Потенциальная энергия $\Pi(q_k)$ манипулятора имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi(q_k) = & m_A g O A \cos \varphi + (G + m_{тр}) g z_M + \\ & + [m_2 l_{c2} + (m_3 + m_4 + m_{тр}) a + (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_{тр} l_{стр}) \cos \psi] g \sin \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Синтез программных движений. Процессы перерабатывающей промышленности характеризуются периодичностью выполняемых операций манипуляционными системами в заранее неизвестных условиях, где ориентация во внешней среде осуществляется на основании показания большого числа датчиков. Применение классических математических подходов к таким системам оказывается невозможным, в связи с этим система управления должна базироваться на интеллектуальных алгоритмах.

Формирование возможных технологических траекторий захватного устройства манипулятора необходимо для планирования программных перемещений манипулятора [18, 19], которые записываются в лингвистический аппроксиматор (ЛА) [20], а затем используются для формирования базы моделей и управлений (БМУ).

Лингвистический аппроксиматор предназначен для описания траекторий, описывающих все возможные технологические движения и должны быть достаточно просты для организации управления в реальном масштабе времени [20].

Анализ технологических процессов сельскохозяйственного производства показывает, что большинство технологических операций может быть выполнено манипулятором с помощью следующих перемещений рабочего органа:

1. Вертикальное прямолинейное движение (ВД).
2. Прямолинейное движение под любым углом в вертикальной плоскости (ПДВ).
3. Горизонтальное прямолинейное движение (ГД).
4. Прямолинейное движение под любым углом в горизонтальной плоскости (ПДГ).
5. Ориентация рабочего органа в пространстве (ОР).

Например, при вертикальном прямолинейном движении рабочего органа (ВД) значения обобщенных координат $x_E = x_M = const.$, $y_E = y_M = const.$, $q_5 = z_M(t)$,

$$\alpha = -\frac{\pi}{2}, \psi = 0, \beta = 0, \text{ дифференциальные уравнения динамики манипулятора (4)}$$

при движении точки $M(x_M, y_M, z_M)$ в пространстве рабочей зоны, без изменения относительного положения рабочего органа, с учетом выражений (5), принимают вид

$$F_1 \frac{x_M}{l_1} + F_2 \frac{x_M - x_B}{l_2} + F_3 \frac{x_M + x_B}{l_3} + \lambda \frac{\partial f}{\partial x_M} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_M} = \frac{y_M + OA \sin \varphi}{x_M^2 + (y_M + OA \sin \varphi)^2},$$

$$F_1 \frac{y_M + OA \cdot \sin \varphi - y_B}{l_1} + F_2 \frac{y_M - y_B}{l_2} + F_3 \frac{y_M - y_B}{l_3} + \lambda \frac{\partial f}{\partial y_M} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y_M} = \frac{-x_M}{x_M^2 + (y_M + OA \sin \varphi)^2}$$

$$(G + m_{тр}) \ddot{z}_M = F_1 \frac{z_M - OA \cdot \cos \varphi}{l_1} + F_2 \frac{z_M}{l_2} + F_3 \frac{z_M}{l_3} - (G + m_{тр})g, \quad (9)$$

$$0 = F_1 \frac{(y_M \cdot \cos \varphi + z_M \cdot \sin \varphi)OA}{l_1} + F_4 \frac{(DK \cdot \sin \varphi - OK \cdot \cos \varphi)OA}{l_4} + \lambda \frac{\partial f}{\partial \varphi} + m_A g \cdot OA \sin \varphi, \quad (10)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = \frac{-x_M OA \cos \varphi}{x_M^2 + (y_M + OA \sin \varphi)^2},$$

$$\lambda \frac{\partial f}{\partial \gamma} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \gamma} = 1, \quad (11)$$

С учетом дифференциальных уравнений динамики кинетическая энергия манипулятора равна:

$$T = \frac{1}{2} \left[(M + m_{zp}) \dot{z}_M^2 + m_A OA^2 \dot{\varphi}^2 + I_\gamma \dot{\gamma}^2 + I_\beta \dot{\beta}^2 - 2I_\beta \cdot \dot{\gamma} \cdot \dot{\beta} \right],$$

$$I_\beta = I_{4z} + I_{zpz} = const. \quad I_\gamma = I_{1z} + I_{2x} + I_{3y} + I_{4z} + I_{zpz} = const.$$

На рис. 4 приведены зависимости усилий в исполнительных звеньях манипулятора при прямолинейном вертикальном перемещении захватного устройства.

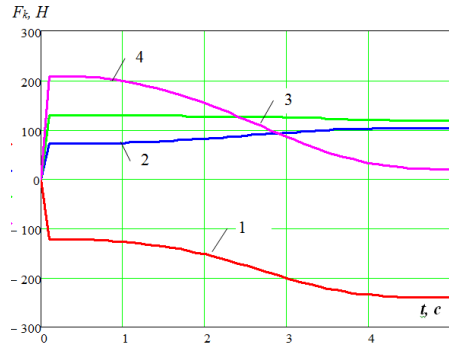


Рис. 4. Законы изменения программных усилий в исполнительных звеньях манипулятора-трипода

Заключение. Полученные уравнения динамики позволили решить две основные задачи [12–14, 17] – определение движущих сил и моментов, необходимых для реализации заданных программных движений рабочего органа, а также усилия в кинематических парах. Программные управляющие усилия и моменты использовались для синтеза параметров системы управления с обратными связями, минимизирующих динамические ошибки при обработке программных движений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кобринский А.А., Кобринский А.Е.* Манипуляционные системы роботов. – М.: Наука, 1985. – 343 с.
2. *Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 95 с.
3. *Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В.* Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры: учеб. пособие / под общ. ред. В.Л. Афолина. – М.: Изд-во МГТУ СТАНКИН, Янус-К, 2006. – 448 с.
4. *Бушуев В.В., Хольшев И.Г.* Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 3-8.
5. Робот-манипулятор FlexPickerIRB 360 компании AAB www.abb.com/robotics. – Режим доступа: http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf.
6. *Рыбак Л.А., Гриненко Г.П.* Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления коммерциализации // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – № 7 (25). – С. 32-39.
7. *Герасун В.М., Пындак В.И., Несмиянов И.А., Дяшкин-Титов В.В., Павловский В.Е.* Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2012. – № 44. – 24 с.
8. *Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V., Nesmianov I., Pavlovsky V., Skakunov V., Bogatyrev V., Golubev D., Dyashkin-Titov V., Vorobieva N.* Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Series: Mechanisms and Machine Science. – Springer International Publishing Switzerland, 2014. – Vol. 22. – P. 463-471.
9. Пат. 2616493 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры / *В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, А.В. Дяшкин, Н.С. Воробьева, И.А. Несмиянов, А.Г. Иванов*; опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11.
10. *Герасун В.М., Жога В.В., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В.* Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 3. – С. 2-8.
11. *Nesmiyanov I., Zhoga V., Skakunov V., Terekhov S., Vorob'eva N., Dyashkin-Titov V., Fares Ali Hussein Al-hadsha.* Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod // Communications in Computer and Information Science. – Springer International Publishing Switzerland, 2015: CIT&DS 2015, CCIS 535. – P. 392-404.
12. *Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V., Skakunov V.N., Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V., Vocharnikov V.S.* On the unstable operating modes of manipulator electric drives // Journal of Machinery Manufacture and Reability. – 2017. – Vol. 46, No. 3. – P. 232-239. DOI: 10.3103/S1052618817030098.
13. *Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В., Жога В.В., Несмиянов И.А.* Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 3. – С. 32-41.
14. *Дяшкин-Титов В.В., Жога В.В., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С.* Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конференции / под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 439-449.
15. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М., 1961. – 824 с.
16. *Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С.* Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 525-530.
17. *Коловский М.З., Слоущ А.В.* Основы динамики промышленных роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1998. – 240 с.
18. *Корендяев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И.* Теоретические основы робототехники: в 2 кн. / отв. ред. С.М. Каплунов. Кн. 1. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
19. *Дяшкин-Титов В.В., Воробьева Н.С., Терехов С.Е.* Алгоритм позиционирования захвата манипулятора-трипода // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конференции / под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 634-644.
20. *Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М. и др.* Интеллектуальные роботы: учеб. пособие для вузов / под общей ред. Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

REFERENCES

1. *Kobrinskiy A.A., Kobrinskiy A.E.* Manipulyatsionnye sistemy robotov [Manipulation robot system]. Moscow: Nauka, 1985, 343 p.
2. *Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F.* Prostranstvennye mekhanizmy parallel'noy struktury [Spatial parallel structure mechanisms]. Moscow: Nauka, 1991, 95 p.
3. *Afonin V.L., Podzorov P.V., Sleptsov V.V.* Obrabatyvayushchee oborudovanie na osnove mekhanizmov parallel'noy struktury: ucheb. posobie [Processing equipment on the basis of mechanisms of parallel structure: the textbook], under the general ed. V.L. Afonina. Moscow: Izd-vo MGTU STANKIN, Yanus-K, 2006, 448 p.
4. *Bushuev V.V., Khol'shev I.G.* Mekhanizmy parallel'noy struktury v mashinostroenii [The mechanisms of parallel structure in mechanical engineering], *STIN* [Machines and tools], 2001, No. 1, pp. 3-8.
5. Robot-manipulyator FlexPickerIRB 360 kompanii AAB www.abb.com/robotics [Robot manipulator FlexPickerIRB 360 company AAB www.abb.com/robotics]. Available at: http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf.
6. *Rybak L.A., Grinenko G.P.* Innovatsionnoe obrabatyvayushchee oborudovanie na baze parallel'nykh struktur: perspektivy i napravleniya kommersializatsii [Innovative processing equipment on the basis of parallel structures: prospects of commercialization], *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering], 2013, No. 7 (25), pp. 32-39.
7. *Gerasun V.M., Pyndak V.I., Nesmiyanov I.A., Dyashkin-Titov V.V., Pavlovskiy V.E.* Manipulyatory dlya mobil'nykh robotov. Kontseptsii i printsipy proektirovaniya [Manipulators for mobile robots. Concepts and principles of designing], *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha* [Preprint IPM im. M. V. Keldysh], 2012, No. 44, 24 p.
8. *Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V., Nesmianov I., Pavlovsky V., Skakunov V., Bogatyrev V., Golubev D., Dyashkin-Titov V., Vorobieva N.* Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Series: Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing Switzerland, 2014, Vol. 22, pp. 463-471.
9. *Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Dyashkin A.V., Vorob'eva N.S., Nesmiyanov I.A., Ivanov A.G.* Manipulyator-tripod parallel'no-posledovatel'noy struktury [Manipulator-tripod-parallel structures]. Patent 2616493 RF, MPK V66S 23/44, published 17.04.2017. Bull. No. 11.
10. *Gerasun V.M., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V.* Opredelenie zony obsluzhivaniya mobil'nogo manipulyatora-tripoda [Definition of the zone of the mobile manipulator-tripod], *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education], 2013, No. 3, pp. 2-8.
11. *Nesmiyanov I., Zhoga V., Skakunov V., Terekhov S., Vorob'eva N., Dyashkin-Titov V., Fares Ali Hussein Al-hadsha.* Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod, *Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing Switzerland, 2015: CIT&DS 2015, CCIS 535, pp. 392-404.
12. *Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V., Skakunov V.N., Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V., Bocharnikov V.S.* On the unstable operating modes of manipulator electric drives, *Journal of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, Vol. 46, No. 3, pp. 232-239. DOI: 10.3103/S1052618817030098.
13. *Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A.* Dinamika manipulyatora parallel'no-posledovatel'noy struktury na osnove tripoda [The dynamics of the manipulator parallel-to-serial structure-based tripod], *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education], 2017, No. 3, pp. 32-41.
14. *Dyashkin-Titov V.V., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S.* Dinamika manipulyatora parallel'no-posledovatel'noy struktury [The dynamics of the manipulator parallel-to-serial structures], *Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: Materialy 6-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* [Modern engineering: Science and education: Materials of 6th International scientific-practical conference], ed. by A.N. Evgrafova i A.A. Popovicha. Saint Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2017, pp. 439-449.

15. *Lur'e A.I.* Analiticheskaya mekhanika [Analytical mechanics]. Moscow, 1961, 824 p.
16. *Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S.* Zadacha pozitsionirovaniya manipulyatora parallel'no-posledovatel'noy struktury s upravlyаемым zakhvatnym ustroystvom [The task of positioning the manipulator parallel-serial structure with a controlled gripper], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2016, Vol. 17, No. 8, pp. 525-530.
17. *Kolovskiy M.Z., Sloushch A.V.* Osnovy dinamiki promyshlennykh robotov [Bases of dynamics of industrial robots]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1998, 240 p.
18. *Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I.* Teoreticheskie osnovy robototekhniki [Theoretical foundations of robotics]: In 2 books, responsible ed. by S.M. Kaplunov. Book 1. Moscow: Nauka, 2006, 383 p.
19. *Dyashkin-Titov V.V., Vorob'eva N.S., Terekhov S.E.* Algoritm pozitsionirovaniya zakhvata manipulyatora-tripoda [The positioning algorithm of the capture of the manipulator-tripod], *Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: Materialy 5-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* [Modern engineering: Science and education: Proceedings of the 5th International scientific-practical conference], ed. by A.N. Evgrafova i A.A. Popovicha. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016, pp. 634-644.
20. *Kalyaev I.A., Lokhin V.M., Makarov I.M. i dr.* Intellektual'nye roboty: ucheb. posobie dlya vuzov [Intelligent robots: textbook for universities], under the general ed. of E.I. Yurevicha. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 360 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Гайдук.

Жога Виктор Викторович – ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет; e-mail: dtm@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, проспект Ленина, 28; тел.: 88442248099, факс: 88442230076; кафедра теоретической механики; д. физ.-мат. наук; профессор.

Воробьева Наталья Сергеевна – ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет; e-mail: vorobva@inbox.ru; 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, 26; тел.: 88442411849, факс: 88442411085; кафедра механики; зав. кафедрой; к.т.н.

Дяшкин-Титов Виктор Владимирович – e-mail: c_43.52.00@mail.ru; кафедра механики; доцент кафедры.

Дяшкин Андрей Владимирович – e-mail: andrejdyashkin@mail.ru; кафедра механики; доцент кафедры.

Zhoga Victor Viktorovich – FGBOU VO Volgograd State Technical University; e-mail: dtm@vstu.ru; 400005, Volgograd, Lenin Avenue, 28; phone: +78442248099, fax: +78442230076; the department of theoretical mechanics; dr. of phys.-math. sc.; professor.

Vorobieva Natalia Sergeevna – FGBOU VO Volgograd State Agrarian University; e-mail: vorobva@inbox.ru; 400002, Volgograd, University Prospekt, 26; phone: +78442411849, fax: +78442411085; the department of mechanics; head of department; cand. of eng. sc.

Dyashkin-Titov Victor Vladimirovich – e-mail: c_43.52.00@mail.ru; the department of mechanics; associate professor of the department.

Dyashkin Andrey Vladimirovich – e-mail: andrejdyashkin@mail.ru; the department of mechanics; associate professor of the department.