

Разработка одноподвижных механизмов параллельной структуры с круговой направляющей*

А.С. Фомин¹, В.А. Глазунов²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» РАН

The Development of One-Degree-of-Freedom Parallel Structure Mechanisms with a Circular Guide

A.S. Fomin¹, V.A. Glazunov²

¹ Siberian State Industrial University

² Federal State Budgetary Scientific Institution — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Разработаны одноподвижные пространственные механизмы параллельной структуры с круговой направляющей по типу гексапода. При синтезе этих механизмов применен новый способ, заключающийся в объединении плоского механизма, служащего в качестве горизонтально расположенного подвижного основания, и пространственных кинематических цепей, включающих в себя соединительные и выходные звенья (платформы). Плоский механизм основания выполнен с шестью кинематическими цепями, оканчивающимися каретками, на которые вертикально установлены соединительные звенья пространственных цепей. Положение выходных звеньев разработанных механизмов контролируется единственным приводом, расположенным в центре круговой направляющей. Механизмы воспроизводят разные траектории движения выходных звеньев при изменении длины единственного звена в каждой кинематической цепи механизма основания. Представленные механизмы целесообразно применять при пространственной ориентации различных объектов и проведении циклических операций. Кинематические схемы таких механизмов могут быть использованы при создании медицинских устройств, ориентационных платформ для обработки элементов и деталей машин, а также при конструировании вибростендов.

Ключевые слова: степень свободы, кинематическая пара, механизм параллельной структуры, гексапод

The authors develop one-degree-of-freedom spatial parallel structure mechanisms with a hexapod-type circular guide. For the synthesis of these mechanisms, a new method is applied that involves integrating a planar linkage, serving as a horizontal movable base, and spatial kinematic chains including connecting links and end-effectors (platforms). The base mechanism is designed with six kinematic chains ending with carriages, on which the connecting links of spatial chains are vertically mounted. The position of the end-effectors of the developed mechanisms is controlled by a single drive set located in the center of the circular guide. The mechanisms reproduce different trajectories of the end-effectors by length change of a single link in each kinematic chain. The presented mechanisms can be applied for spatial orientation of various objects and carrying out cyclic

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный № 9.12794.2018/12.2).

operations. Kinematic schemes of such mechanisms can be used for developing medical devices, orientation platforms for processing machine parts, as well as for designing vibration tables.

Keywords: degree of freedom, kinematic pair, parallel structure mechanism, hexapod

Механизмы параллельной структуры (МПС) обеспечивают повышенную жесткость, равномерное распределение усилий по всей кинематической цепи (КЦ), высокую точность позиционирования выходного звена (ВЗ), повышенную грузоподъемность, возможность установки дополнительных исполнительных устройств на ВЗ, а также другие важные характеристики, непосредственно влияющие на эффективность выполнения разных технологических операций [1–3].

В зависимости от практического применения МПС имеют неодинаковое число приводов и воспроизводят различные траектории движения ВЗ [4, 5]. Сокращение числа приводов в таких механизмах является важной задачей, решение которой позволит упростить их контроль, повысить надежность при передаче движений через множество звеньев и кинематических пар. Уменьшить число приводов можно путем разработки оптимальной структуры МПС, обеспечивающей требуемые соотношения между подвижностью и числом общих наложенных связей, числом и типом звеньев и кинематических пар [6, 7].

Одноподвижные МПС используются при создании таких устройств, как вибростенды для имитации землетрясений [8], соединения суставов человека [9], системы для микропозиционирования [10] и шагающие роботы, имеющие единственный двигатель [11, 12].

Обратимся к МПС с круговыми направляющими, жестко установленными на стойках [13–17]. В этих механизмах устранена дополнительная поворотная ступень направляющей для снижения затрат на их производство. Тем не менее они требуют установки до шести приводов. Воспроизведение заданных траекторий движения ВЗ таких МПС можно реализовать и с минимальным количеством приводов, а именно с одним. При этом уменьшение числа приводов позволит упростить управление такими механизмами и снизить затраты на их производство.

Цель работы — разработка кинематических схем одноподвижных МПС с круговой направляющей.

Синтез новых одноподвижных МПС. Разработка механизма подвижного основания. Для синтеза одноподвижных МПС объединим плоскую и пространственную КЦ, суммарное число степеней свободы которых будет равно единице. Примем число соединительных цепей, устанавливаемых между стойкой и ВЗ, равным шести (по типу гексапода).

В качестве плоской КЦ разработан одноподвижный МПС с шестью ВЗ (рис. 1, а). Этот механизм принят за подвижное основание для приведения в движение установленных на нем пространственных КЦ. Ведущее звено механизма выполнено в виде зубчатого колеса 2,

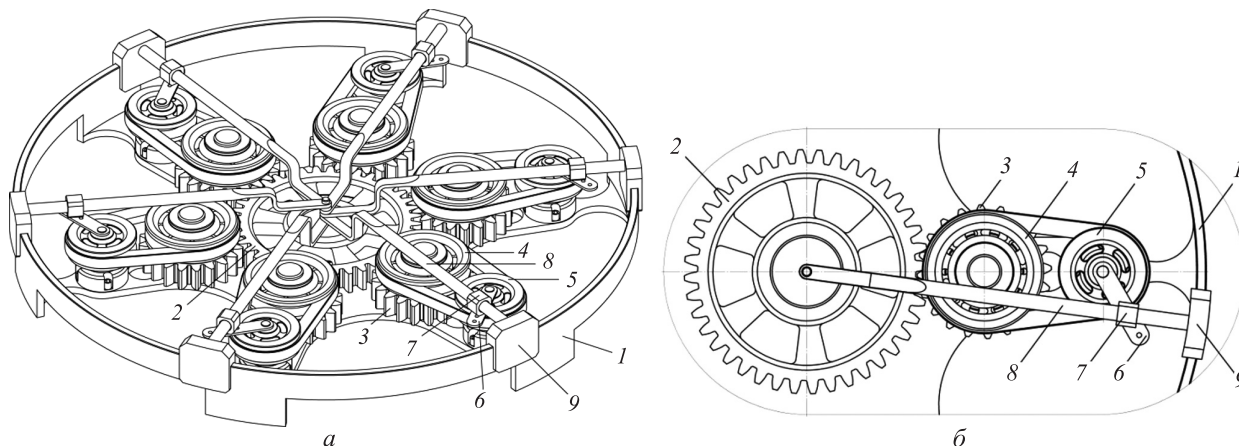


Рис. 1. Кинематические схемы:
а — одноподвижного плоского МПС с шестью ВЗ; б — одной из шести КЦ плоского МПС

установленного в центре круговой направляющей 1.

С ведущим звеном 2 сопряжены шесть КЦ, состоящих из звеньев 3–9 (рис. 1, б). Каждая КЦ включает в себя ведомое колесо 3, жестко соединенное с ведущим диском 4, сопряженным посредством гибкой связи с ведомым диском 5. На диске 5 жестко установлен кривошип 6, сопряженный с камнем 7, который соединен с кулисой 8. На конце кулисы жестко смонтирована каретка 9.

Смещения кареток относительно круговой направляющей 1 варьируются изменением длин кривошипов. Это обеспечивается с помощью отверстий на каждом из кривошипов, что позволяет осуществлять перестановку камней относительно них. Таким образом, радиус вращения кривошипов является переменным. При установке дополнительных звеньев на каретки становится возможным получать для них изменяемые траектории движения.

Число степеней свободы КЦ, показанной на рис. 1, б, определяется по формуле П.Л. Чебышева

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1)$$

где n — число подвижных звеньев; p_5 и p_4 — числа одно- и двухподвижных кинематических пар.

При пяти подвижных звеньях ($n = 5$), шести одноподвижных ($p_5 = 6$) и двух двухподвижных ($p_4 = 2$) кинематических парах подвижность $W = 1$.

Полученный результат гарантирует определенность движения всех звеньев КЦ при задании движения единственному звену. Подвижность такой КЦ без учета ведущего звена $W = 0$. Поэтому для всего механизма с шестью КЦ (см. рис. 1, а) подвижность $W = 1$.

Разработка МПС со сферическими шарнирами. На плоский механизм основания, показанный на рис. 1, а, вертикально установим пространственную КЦ так, чтобы каретки приводили в движение соединительные звенья этой КЦ. На рис. 2 показана кинематическая схема такого механизма, где 1–9 — то же, что на рис. 1. В нем соединительные звенья 10 сопряжены с каретками 9 сферическими шарнирами. ВЗ (платформа) 11 также образует с соединительными звеньями 10 сферические шарниры.

С учетом того что подвижность механизма основания определена по формуле (1), отдельно найдем число степеней свободы КЦ звеньев 10–11, установленной на каретках. Эта КЦ включает в себя семь звеньев ($n = 7$) и двенадцать сферических шарниров ($p_3 = 12$). Тогда, согласно формуле А.П. Малышева, записанной в виде

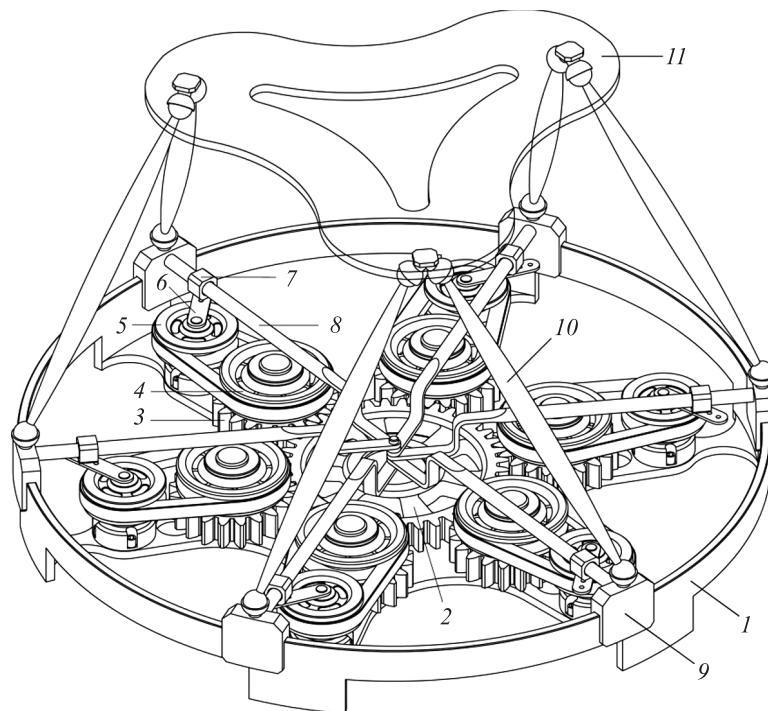


Рис. 2. Кинематическая схема одноподвижного МПС со сферическими шарнирами

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (2)$$

где p_3 , p_2 и p_1 — числа трех-, четырех- и пятиподвижных кинематических пар, ее подвижность оказывается равной шести.

Шесть подвижностей характеризуют независимые вращения соединительных звеньев вокруг их продольных осей с помощью сферических шарниров. Эти подвижности не влияют на движение ВЗ [18].

Разработка МПС с вращательными шарнирами. На место КЦ со сферическими парами может быть установлена КЦ с вращательными парами. В этом случае кинематическая схема одноподвижного МПС будет выглядеть, как показано на рис. 3, где 1–9 — то же, что на рис. 1.

Этот механизм включает в свой состав шесть соединительных КЦ из звеньев 10–14, где крайние звенья 10 связаны с каретками 9 шестью вращательными шарнирами, а звенья 14 сопряжены с ВЗ 15 тремя вращательными шарнирами.

Число степеней свободы такого механизма определяется как сумма числа степеней свободы механизма основания, приведенного на рис. 1, а ($W = 1$), и пространственной КЦ звеньев 10–15. Подвижность данной цепи, вычисляемая по формуле (2), при $n = 25$ и $p_5 = 30$ равна

нулю, т. е. эта КЦ является группой Ассур. Тогда общая подвижность МПС, приведенного на рис. 3, равна единице.

Расчет траекторий движения платформы одноподвижного МПС с круговой направляющей. В разработанных механизмах (см. рис. 2 и 3) кривошип в каждой из КЦ имеет по три отверстия для установки камня на выбранном расстоянии от центра вращения диска. В связи с этим ВЗ механизма может перемещаться по разным траекториям. Число возможных траекторий определяется выражением

$$R = k^m,$$

где R — число возможных траекторий, воспроизводимых платформой, или число возможных расположений шарниров в КЦ механизма; k — число отверстий на каждом кривошипе; m — число кривошипов.

Для разработанных механизмов (см. рис. 2 и 3) $k = 3$ и $m = 6$. Таким образом, $R = 729$.

В исследовании выполнен численный расчет траекторий движения платформы МПС со сферическими шарнирами, приведенного на рис. 2. Получены координаты центральной точки ($X_{ц}$, $Y_{ц}$, $Z_{ц}$) платформы в зависимости от длин кривошипов каждой из КЦ. Результаты расчета приведены в таблице, где координаты

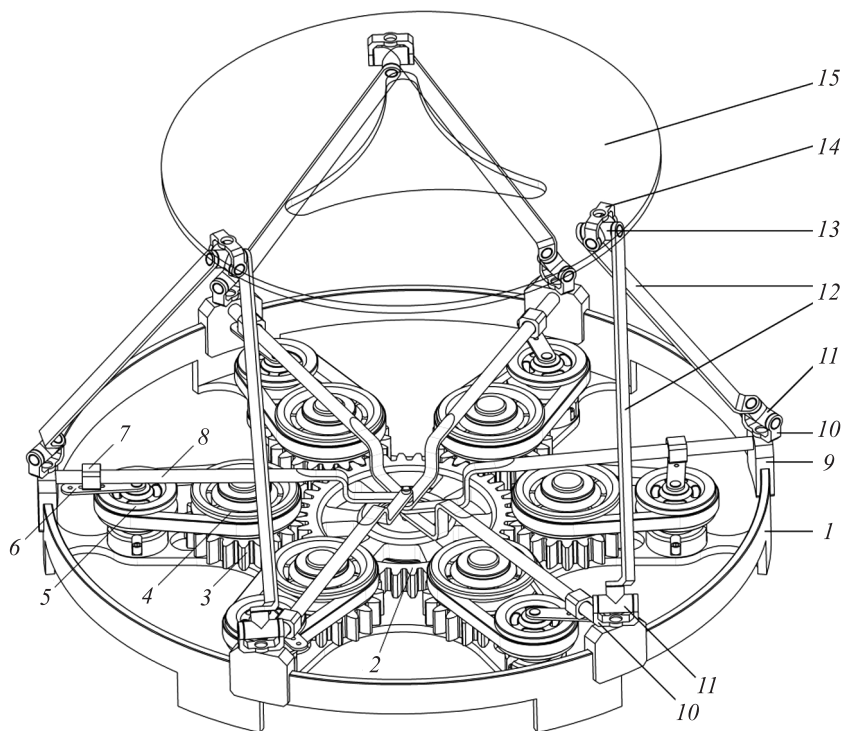


Рис. 3. Кинематическая схема одноподвижного МПС с вращательными шарнирами

Изменение координат центральной точки платформы в зависимости от длины кривошипов

Длины кривошипов, мм								
50			62			74		
Координаты, мм								
$X_{ц1}$	$Y_{ц1}$	$Z_{ц1}$	$X_{ц2}$	$Y_{ц2}$	$Z_{ц2}$	$X_{ц3}$	$Y_{ц3}$	$Z_{ц3}$
-6	-51	470	-8	-48	465	-8	-48	461
-10	-42	473	-13	-42	470	-14	-42	466
-14	-24	480	-17	-28	480	-21	-27	478
-15	-6	487	-20	-14	491	-27	-14	492
-11	3	493	-16	-6	498	-22	-7	500
-2	-1	494	-3	-4	498	-3	-6	501
6	-12	493	13	-11	493	20	-12	494
10	-27	488	19	-23	485	28	-23	484
6	-41	480	11	-35	476	17	-35	474
-1	-51	473	-1	-45	468	1	-45	464

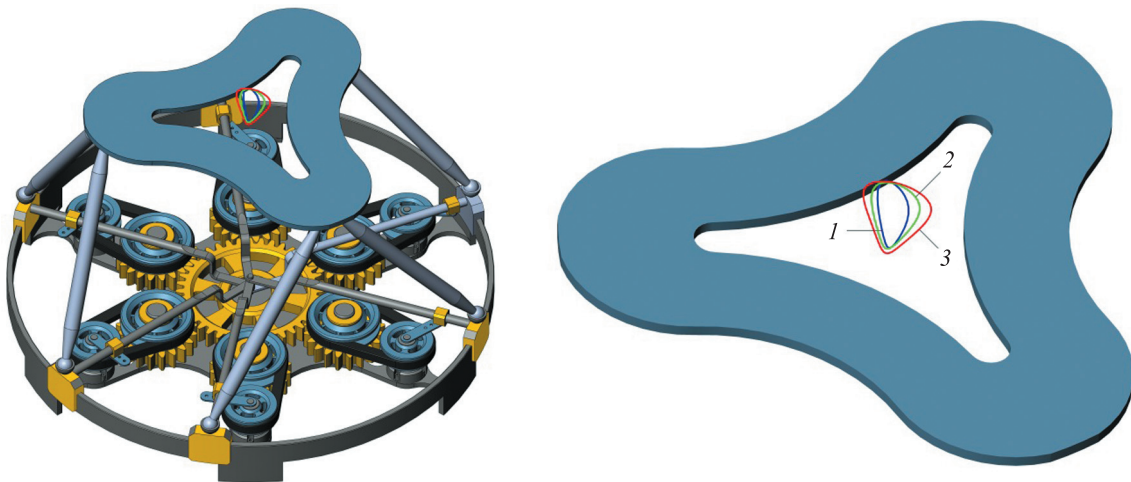


Рис. 4. Трехмерная модель одноподвижного МПС с траекториями движения центральной точки платформы при длине кривошипов $l_6 = 50$ (1), 62 (2) и 74 мм (3)

центральной точки платформы определены для длин кривошипов $l_6 = 50, 62$ и 74 мм.

Расчет выполнен относительно базовой системы координат, расположенной в центре круговой направляющей. Длины соединительных цепей механизма приняты равными 375 мм. Они также равны расстояниям между сферическими шарнирами, сопряженными с платформой (см. рис. 2). Диаметр круговой направляющей равен 810 мм.

На рис. 4 показана трехмерная модель одноподвижного МПС с траекториями движения центральной точки платформы, построенными по численным данным, приведенным в табли-

це. Траектория 1 соответствует длине кривошипов $l_6 = 50$ мм, траектория 2 — $l_6 = 62$ мм, траектория 3 — $l_6 = 74$ мм.

Выводы

1. Разработаны два одноподвижных МПС с круговой направляющей, отличительной особенностью которых является возможность воспроизведения разных траекторий движения платформы при единственном приводе системы.

2. Выполнен структурный анализ разработанных МПС. Определены координаты и тра-

ектории центральной точки платформы механизма со сферическими шарнирами при разной длине кривошипов.

3. Предложенные механизмы целесообразно применять в качестве подвижных платформ при пространственной ориентации объектов, а также для выполнения циклических операций, требующих движения по заданным траекториям.

4. Проведенное исследование может быть продолжено в направлении анализа сингуляр-

ностей первого типа (когда соединительная цепь дает проекцию на основание, проходящую через центр круговой направляющей) и второго типа (когда силовые винты, проходящие вдоль стержней соединительных цепей, имеют линейную зависимость). При анализе рабочей зоны должны быть заданы конечные положения ВЗ и вычислены требуемые длины кривошипов. Предельные значения определяют границу рабочей зоны.

Литература

- [1] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 96 с.
- [2] Kong X., Gosselin C.M. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Berlin Heidelberg, Springer, 2007. 276 p.
- [3] Глазунов В.А., Чунихин А.Ю. Развитие механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 37–43.
- [4] Siccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer Science & Business Media, 2004. 312 p.
- [5] Хейло С.В., Глазунов В.А., Ширинкин М.А., Календарев А.В. Возможные применения механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2013, № 5, с. 19–24.
- [6] Dvornikov L.T., Fomin A.S. Development of the basic conditions for division of mechanisms into subfamilies. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 882–888, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.038
- [7] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, № 2, т. 2, с. 3–17. URL: <http://tmm.spbstu.ru/4/dvornikov.pdf> (дата обращения 15 апреля 2018).
- [8] Glazunov V., Kravnev A. Design and singularity criteria of parallel manipulators. *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, 2006, vol. 487, pp. 15–22, doi: 10.1007/3-211-38927-X_4
- [9] Franci R., Parenti-Castelli V., Belvedere C., Leardini A. A new one-DOF fully parallel mechanism for modelling passive motion at the human tibiotalar joint. *Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 42(10), pp. 1403–1408, doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.04.024
- [10] Fomin A., Glazunov V., Didenko V., Paik J. The design of a new rotary hexapod with a single active degree of freedom. *Proceedings of the 5th IFToMM International Symposium on Robotics Mechatronics*, Sydney, Australia, 2017, pp. 1–8.
- [11] Брискин Е.С., Калинин Я.В. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2011, № 2, с. 170–176.
- [12] Rooney T., Pearson M., Welsby J., Horsfield I., Sewell R., Dogramadzi S. Artificial active whiskers for guiding underwater autonomous walking robots. *The 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Paris, 6–8 September, 2011, pp. 1–6. Available at: <http://eprints.uwe.ac.uk/16101> (accessed 15 May 2018).
- [13] Алешин А.К., Глазунов В.А., Оффер Ш., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Ласточкин А.Б. Анализ элементарных перемещений манипулятора параллельной структуры с круговой направляющей на основе дифференцирования уравнений связи. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2016, № 5, с. 17–21.
- [14] Yau C.L. *Systems and methods employing a rotary track for machining and manufacturing*. US Patent no. 6196081, 2001.
- [15] Bonev I.A., Gosselin C.M. Geometric algorithms for the computation of the constant-orientation workspace and singularity surfaces of a special 6-RUS parallel manipulator.

- Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2002, vol. 5A, pp. 505–514.
- [16] Рашоян Г.В., Ласточкин А.Б., Глазунов В.А. Кинематический анализ пространственного механизма параллельной структуры с круговой направляющей. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2014, № 2, с. 20–26.
- [17] Shchokin B., Janabi-Sharifi F. Design and kinematic analysis of a rotary positioner. *Robotica*, 2007, vol. 25, no. 1, pp. 75–85, doi: 10.1017/S0263574706003006
- [18] Фомин А.С. Структурный анализ манипуляторов с круговой направляющей. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2017, № 12, ч. 2, с. 238–241. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12026> (дата обращения 20 июня 2018).

References

- [1] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka publ., 1991. 96 p.
- [2] Kong X., Gosselin C.M. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Berlin Heidelberg, Springer, 2007. 276 p.
- [3] Glazunov V.A., Chunichin A.Y. Development of mechanisms of parallel structure. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: 10.3103/S1052618814030030
- [4] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer Science & Business Media, 2004. 312 p.
- [5] Kheilo S.V., Glazunov V.A., Shirinkin M.A., Kalendarev A.V. Possible applications of mechanisms of parallel structure. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42, no. 5, pp. 359–363, doi: 10.3103/S1052618813050063
- [6] Dvornikov L.T., Fomin A.S. Development of the basic conditions for division of mechanisms into subfamilies. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 882–888, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.038
- [7] Dvornikov L.T. Experience of structural synthesis of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2004, no. 2, vol. 2, pp. 3–17. Available at: <http://tmm.spbstu.ru/4/dvornikov.pdf> (accessed 15 April 2018).
- [8] Glazunov V., Kraynev A. Design and singularity criteria of parallel manipulators. *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, 2006, vol. 487, pp. 15–22, doi: 10.1007/3-211-38927-X_4
- [9] Franci R., Parenti-Castelli V., Belvedere C., Leardini A. A new one-DOF fully parallel mechanism for modelling passive motion at the human tibiotalar joint. *Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 42(10), pp. 1403–1408, doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.04.024
- [10] Fomin A., Glazunov V., Didenko V., Paik J. The design of a new rotary hexapod with a single active degree of freedom. *Proceedings of the 5th IFToMM International Symposium on Robotics Mechatronics*, Sydney, Australia, 2017.
- [11] Briskin E.S., Kalinin Y.V. On energetically efficient motion algorithms of walking machines with cyclic drives. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 2, pp. 348–354, doi: 10.1134/S1064230711020043
- [12] Rooney T., Pearson M., Welsby J., Horsfield I., Sewell R., Dogramadzi S. Artificial active whiskers for guiding underwater autonomous walking robots. *The 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Paris, 6–8 September, 2011, pp. 1–6. Available at: <http://eprints.uwe.ac.uk/16101> (accessed 15 May 2018).
- [13] Aleshin A.K., Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Skvortsov S.A., Lastochkin A.B., Shai O. Infinitesimal displacement analysis of a parallel manipulator with circular guide via the differentiation of constraint equations. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, vol. 45, no. 5, pp. 398–402, doi: 10.3103/S1052618816050034
- [14] Yau C.L. *Systems and methods employing a rotary track for machining and manufacturing*. US Patent no. 6196081, 2001.

- [15] Bonev I.A., Gosselin C.M. Geometric algorithms for the computation of the constant-orientation workspace and singularity surfaces of a special 6-RUS parallel manipulator. *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2002, vol. 5A, pp. 505–514.
- [16] Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic analysis of the spatial parallel structure mechanism with circle rail. *Engineering and Automation Problems*, 2014, no. 2, pp. 20–26 (in Russ.).
- [17] Shchokin B., Janabi-Sharifi F. Design and kinematic analysis of a rotary positioner. *Robotica*, 2007, vol. 25, no. 1, pp. 75–85, doi: 10.1017/S0263574706003006
- [18] Fomin A.S. Structural analysis of manipulators with circular guide. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, no. 12, pt. 2, pp. 238–241 (in Russ.). Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12026> (accessed 20 June 2018).

Статья поступила в редакцию 26.09.2018

Информация об авторах

ФОМИН Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и машиностроение». Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, Российская Федерация, ул. Кирова, д. 42, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич — доктор технических наук, доктор философских наук, профессор, директор ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» РАН (101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: vaglznv@mail.ru).

Information about the authors

FOMIN Alexey Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University (654007, Novokuznetsk, Russian Federation, Kirov St., Bldg. 42, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

GLAZUNOV Viktor Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Doctor of Philosophy, Professor, Director, Federal State Budgetary Scientific Institution — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101990, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: vaglznv@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фомин А.С., Глазунов В.А. Разработка одноподвижных механизмов параллельной структуры с крутовой направляющей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 30–37, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-30-37

Please cite this article in English as:

Fomin A.S., Glazunov V.A. The Development of One-Degree-of-Freedom Parallel Structure Mechanisms with a Circular Guide. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 30–37, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-30-37