

УДК 621.01, 531.8

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-20-27

Синтез, кинематическое и динамическое моделирование складных механизмов параллельной структуры с круговой направляющей*

С.В. Киселев, А.С. Фомин, А.В. Антонов

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

Synthesis, kinematic and dynamic simulation of foldable parallel mechanisms with a circular rail

S.V. Kiselev, A.S. Fomin, A.V. Antonov

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

Рассмотрены складные механизмы параллельной структуры с круговой направляющей (механизмы FoldRail), образующие новое семейство механических систем. Такие механизмы реализуют неограниченный угол поворота выходного звена вокруг оси, перпендикулярной плоскости круговой направляющей, обладают возможностью трансформации между трех- и двумерными конфигурациями и имеют увеличенный размер рабочей зоны по сравнению с аналогичными механизмами параллельной структуры, снабженными круговой направляющей. Предложен алгоритм структурного синтеза складных механизмов параллельной структуры с круговой направляющей, состоящий в разработке типовой кинематической цепи, способствующей систематическому созданию на ее основе таких механизмов. С помощью разработанной компьютерной модели выполнено моделирование обратных задач кинематики и динамики для нового складного механизма с тремя кинематическими цепями. Моделирование проведено для спиралевидной траектории движения выходного звена, при воспроизведении которой задействованы все приводы механизма. Полученные результаты позволяют подобрать приводы для ведущих звеньев механизма.

Ключевые слова: складные механизмы параллельной структуры, круговая направляющая, структурный синтез, кинематическое и динамическое моделирование

The article considers foldable parallel mechanisms with a circular rail (FoldRail mechanisms), which give rise to a new family of mechanical systems. These mechanisms rotate unlimitedly around the rail axis, transform between planar and spatial configurations, and have an increased workspace compared to other parallel mechanisms with a circular rail. First, the paper introduces a type synthesis algorithm of the FoldRail mechanisms that includes a development of a kinematic chain, whose structure allows creating the considered mechanisms. Next, the article performs an inverse kinematic and dynamic analysis for a novel three-chain mechanism based on its virtual prototype. During the simulation, the output link of the mechanism follows a spiral-like trajectory, such that all the drives become actuated. The obtained results allow selecting the actuators for the driving links.

Keywords: foldable parallel mechanisms, circular rail, type synthesis, kinematic and dynamic simulation

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10409, <https://rscf.ru/project/21-79-10409/>.

На сегодняшний день создается достаточно большое количество механизмов параллельной структуры (МПС), где несколько кинематических цепей, имеющих независимые приводы, установлены между неподвижным и выходным звеньями. По сравнению с другими аналогичными механизмами такие МПС имеют преимущества по точности, жесткости, быстродействию, способности манипулирования большими нагрузками, маневренности и другим важным функциональным свойствам [1, 2].

К достоинствам МПС, снабженных круговой направляющей (КН), относится и возможность увеличения угла поворота выходного звена. Особенность строения МПС с КН значительно расширяет возможности их применения в цифровом и аддитивном производстве, при разработке авто- и авиатренажеров, в роботохирургии и других областях [3–14]. В работе [15] механизмы такого типа систематизированы по числу степеней свободы W и числу кинематических цепей.

Однако МПС с КН имеют такие недостатки, как небольшой размер рабочей зоны и значительные габаритные размеры. Это ограничивает их практическое применение.

Функциональные свойства МПС с КН можно улучшить, усовершенствовав их строение, в частности, создав более компактный и элегантный дизайн кинематических цепей, входящих в их состав.

Цель исследования — разработка нового семейства МПС с КН, где для увеличения размера рабочей зоны и обеспечения компактности используются складные кинематические цепи, имеющие возможность трансформации между трех- и двумерными конфигурациями, а также моделирование обратных задач кинематики и динамики механизмов данного типа.

Синтез нового семейства складных МПС с КН.

Создание любого механизма начинается с разработки его структурной схемы с определением параметров, учитывающих типы входящих в его состав элементов и связей между ними. Известны различные методы структурного синтеза МПС, в том числе основанные на применении винтового исчисления, теории групп и графов, структурных формул и др. [16–18].

Для синтеза МПС с КН будем использовать структурные формулы подвижности кинематических цепей, хорошо зарекомендовавшие себя при создании различных механизмов [19–21].

Проведем синтез типовой кинематической цепи для МПС с КН, для чего определим структурные параметры создаваемой цепи. Примем условие, что эта цепь не будет налагать никаких ограничений, и в ее конструкции будут использованы только одноподвижные вращательные (p_5) и трехподвижные сферические (p_3) шарниры. Двух- (p_4), четырех- (p_2) и пятиподвижные (p_1) шарниры применяться не будут, так как использование вращательных и сферических шарниров является более предпочтительным на практике.

Таким образом, будет соблюдаться следующее условие: $p_5 \neq 0$, $p_4 = 0$, $p_3 \neq 0$, $p_2 = 0$, $p_1 = 0$. Учитывая, отсутствие в синтезируемой цепи ограничений ($W = 6$), применим формулу А.П. Малышева, которая для принятых условий имеет вид

$$6n - 5p_5 - 3p_3 = 6,$$

где n — число подвижных звеньев цепи.

Отсюда получаем формулу для определения числа подвижных звеньев

$$n = \frac{5p_5 + 3p_3}{6} + 1.$$

Согласно этой формуле, минимальное значение параметра p_5 (при наличии в цепи пар p_3) равно трем. При этом параметр p_5 может принимать значения из ряда 3, 6, 9, 12, Рассмотрим случай, когда $p_5 = 3$. Тогда параметр p_3 может принимать значения из ряда 1, 3, 5, 7, ..., соответствующие значениям параметра n из ряда 4, 5, 6, 7, Таким образом, первым решением, удовлетворяющим поставленным условиям, будет следующее: $n = 4$, $p_5 = 3$, $p_3 = 1$.

По найденным параметрам синтезирована новая складная кинематическая цепь, модель которой в сложенной и разложенной конфигурациях показана на рис. 1.

Кинематическая цепь состоит из стойки 1, выполненной в виде замкнутой КН, каретки 2, промежуточного звена 3, криволинейной штанги 4 и платформы 5. Звенья образуют между собой три вращательных шарнира (1–2, 2–3 и 3–4) и один сферический (4–5). Шарнир 1–2 является вращательным, так как радиус поворота каретки относительно центра КН является неизменным. Такой дизайн кинематической цепи обеспечивает складную конструкцию для создаваемого на ее базе механизма.

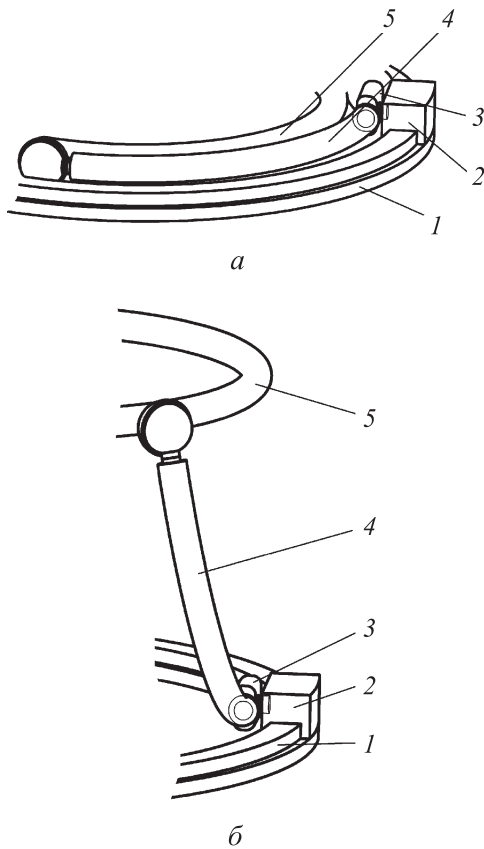


Рис. 1. Модель синтезированной кинематической цепи в сложенной (а) и разложенной (б) конфигурациях

На основе синтезированной кинематической цепи создадим семейство МПС с КН. Примем, что число цепей механизмов находится в диапазоне 3...6. Полученные кинематические схемы складных механизмов с тремя, четырьмя, пятью и шестью цепями в сложенной и разложенной конфигурациях приведены на рис. 2, а-г.

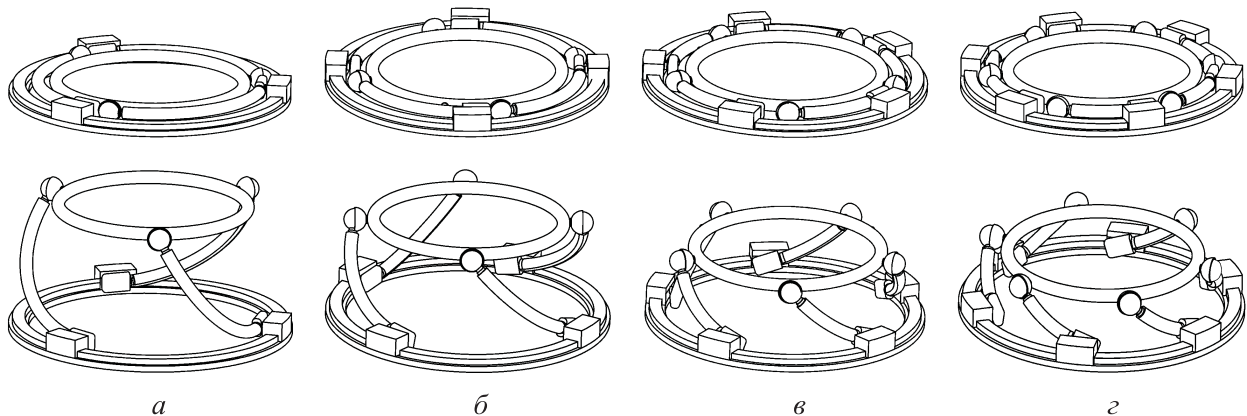


Рис. 2. Кинематические схемы складных МПС с КН с тремя (а), четырьмя (б), пятью (в) и шестью (г) цепями в сложенной и разложенной конфигурациях

Из синтезированных МПС с КН самым оптимальным по количеству кинематических цепей и расположению приводов является механизм с тремя цепями, что обосновано в работе [22]. В качестве приводных звеньев в механизме с тремя цепями приняты каретки и криволинейные штанги.

Моделирование обратных задач кинематики и динамики с применением системы автоматизированного проектирования (САПР). На сегодняшний день многие технологические процессы в машиностроении обеспечиваются за счет вычислительных мощностей компьютеров. В частности, компьютерное моделирование позволяет значительно сократить временные и финансовые затраты, связанные с проектированием и проведением различных экспериментов.

При выполнении исследований такого вида в машиностроении моделируют различные механические системы и процессы, при которых часто возникает необходимость внесения изменений. Затраты на изменение условий моделирования значительно ниже, чем на изменение физических моделей и процессов, а возможности современных вычислительных программ позволяют максимально приблизить компьютерное моделирование к реальным физическим процессам.

На основе шестиподвижного складного МПС с КН, приведенного на рис. 2, а, построена его компьютерная модель, показанная на рис. 3, а и б. Модель получена с использованием САПР SolidWorks.

Компьютерная модель шестиподвижного складного МПС с КН является сборочной кон-

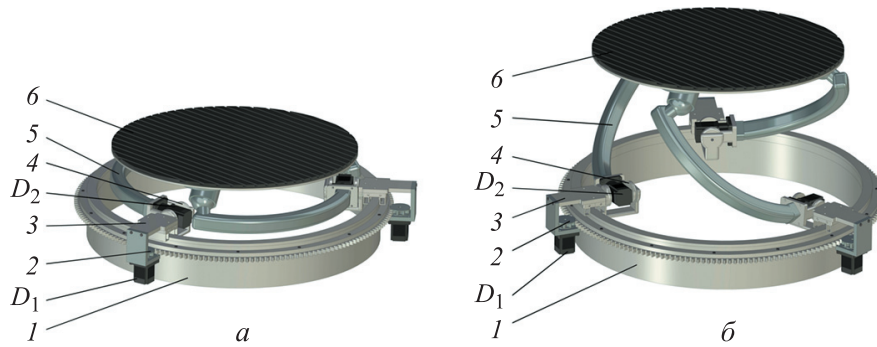


Рис. 3. Компьютерная модель шестиподвижного складного МПС с КН в сложенной (а) и разложенной (б) конфигурациях

струкцией и состоит из неподвижной КН 1 (стойки) и платформы 6 (выходного звена), соединенных тремя кинематическими цепями. Каждая из цепей включает в себя каретку 3 с приводным зубчатым колесом 2, сопряженным с приводом D_1 , промежуточное звено 4 и приводную криволинейную штангу 5, связанную с приводом D_2 .

На боковой поверхности КН нарезаны зубья, что позволяет зубчатому колесу за счет привода D_1 приводить в движение каретку. От каретки движение передается через промежуточное звено, являющееся неуправляемым (на нем не установлен привод), на криволинейную штангу 5. При этом сопряженный с ней привод D_2 позволяет осуществлять поворот криволинейной штанги вокруг ее продольной оси.

Таким образом, два привода в каждой кинематической цепи, т. е. шесть приводов всего механизма, позволяют контролировать шесть степеней свободы выходного звена.

Предложенный дизайн МПС с КН и его отдельных звеньев, в частности криволинейных штанг, обусловлен возможностью полного

сложения механизма из трехмерной конфигурации в двумерную (плоскую). Такой дизайн также позволяет реализовать неограниченный угол поворота выходного звена вокруг оси, перпендикулярной плоскости КН. Кроме того, значительное смещение выходного звена в вертикальном направлении увеличивает размер рабочей зоны механизма.

Проведем моделирование обратных задач кинематики и динамики, используя разработанную компьютерную модель, для чего зададим траекторию движения центральной точки выходного звена в виде пространственной спирали, расположенной относительно неподвижной системы координат XYZ согласно рис. 4. В этом случае задействованы все шесть приводов механизма, а выходное звено смещается параллельно плоскости основания (горизонтальная ориентация) от нижней точки траектории к верхней.

Графические зависимости угловых перемещений α , скоростей ω , ускорений ϵ и крутящих моментов T_m приводов ведущих звеньев МПС с КН от времени t приведены на рис. 5, а–г. Здесь цифрами 1, 3, 5 обозначены параметры шесте-

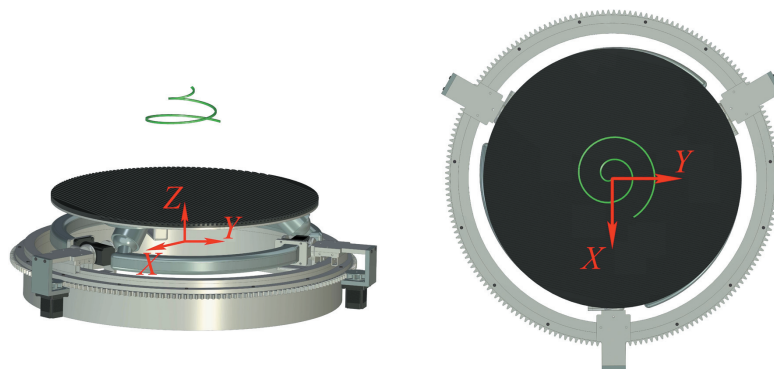


Рис. 4. Моделирование траектории движения выходного звена МПС с КН по пространственной спирали

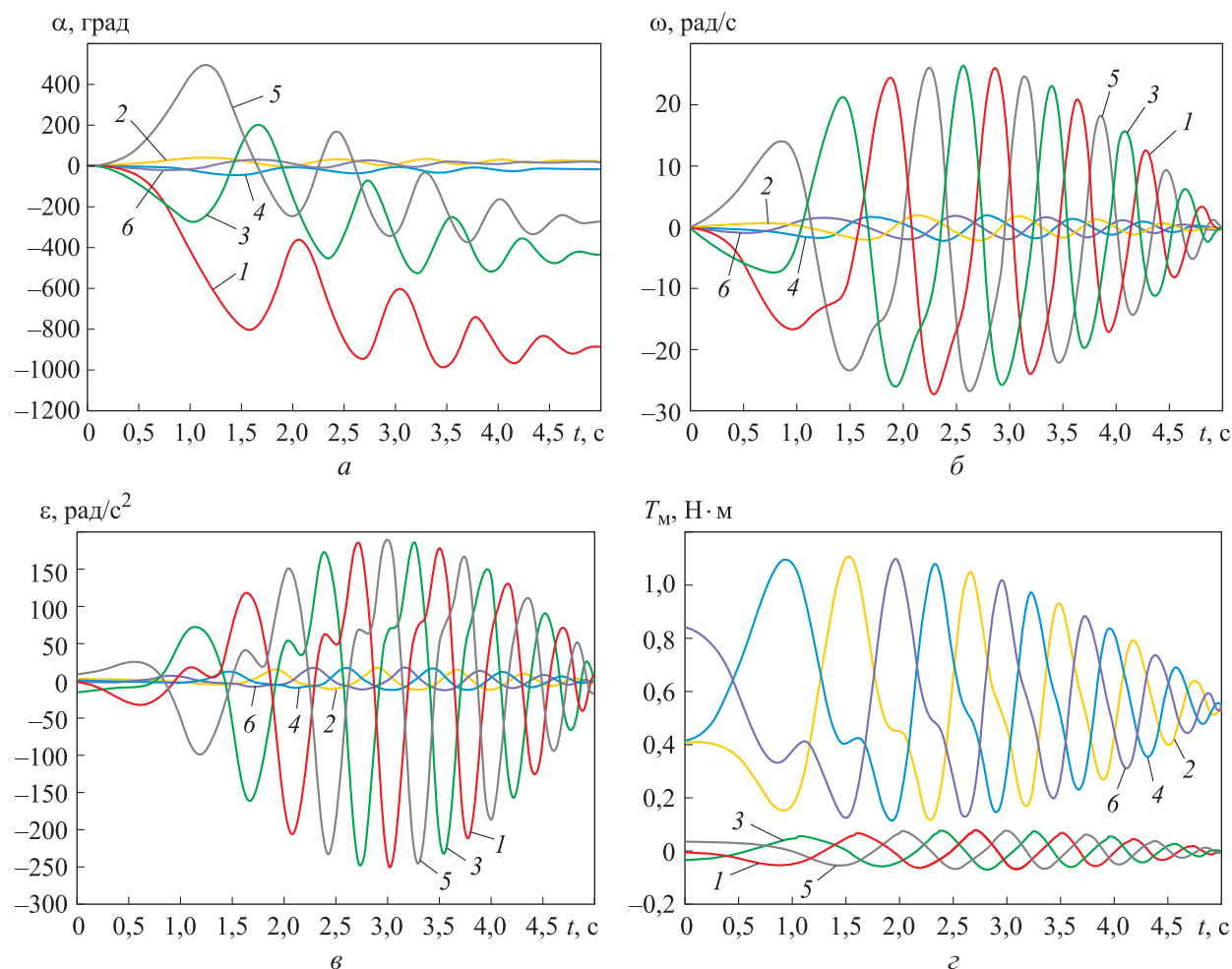


Рис. 5. Зависимости угловых перемещений α (а), скоростей ω (б), ускорений ε (в) и крутящих моментов T_m приводов (з) шестерен кареток (1, 3, 5) и криволинейных штанг (2, 4, 6) МПС с КН

рен кареток, а цифрами 2, 4, 6 — криволинейных штанг.

При динамическом моделировании задавались материалы звеньев, предполагаемые к использованию в физическом прототипе, и учитывалось трение между подвижными элементами звеньев механизма.

Результаты динамического моделирования позволяют подобрать параметры приводов. В отличие от аналитических методов расчета, использование пакетов САПР дает возможность максимально учесть геометрические характеристики звеньев механизма.

Выводы

1. На основе синтезированной складной кинематической цепи разработано новое семейство складных МПС с КН. Предложены меха-

низмы с тремя, четырьмя, пятью и шестью кинематическими цепями.

2. С использованием САПР SolidWorks разработана компьютерная модель шестиподвижного складного МПС с КН. На ее основе выполнено моделирование обратных задач кинематики и динамики механизма для траектории движения выходного звена в виде пространственной спирали, при которой задействованы все шесть приводов. Определены угловые перемещения, скорости, ускорения и крутящие моменты, возникающие в приводах. Полученные расчетные данные позволяют подобрать соответствующие приводы.

3. Результаты исследования планируется применить при разработке и изготовлении физического прототипа шестиподвижного складного МПС с КН.

Литература

- [1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботехника. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 5, с. 16–25.
- [2] Siccarelli M. Fundamentals of the mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2022. 381 p.
- [3] Ryu S.-J., Kim J.W., Hwang J.C. et al. Eclipse: an overactuated parallel mechanism for rapid machining. In: *Parallel kinematic machines*. Springer, 1999, pp. 441–455, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0885-6_32
- [4] Coulombe J., Bonev I.A. A new rotary hexapod for micropositioning. *Proc. IEEE ICRA*, 2013, pp. 877–880, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630676>
- [5] Chen T., Qian S., Li Y. et al. Mechanism design and analysis for an automatical reconfiguration cable-driven parallel robot. *Proc. IEEE CRC*, 2017, pp. 45–50, doi: <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.45>
- [6] Shiga Y., Tanaka Y., Goto H. et al. Design of a six degree-of-freedom tripod parallel mechanism for flight simulators. *Int. J. Automation Technol.*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 715–721, doi: <https://doi.org/10.20965/ijat.2011.p0715>
- [7] Jeong H., Yu J., Lee D. Calibration of in-plane center alignment errors in the installation of a circular slide with machine-vision sensor and a reflective marker. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 20, art. 5916, doi: <https://doi.org/10.3390/s20205916>
- [8] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Параллельные и последовательные структуры манипуляторов в роботехнике. *Доклады Академии наук*, 2019, т. 485, № 2, с. 166–170, doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852166-170>
- [9] Xu C.C., Xue C., Duan X.C. A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 428, art. 012053, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/428/1/012053>
- [10] Song Y., Qi Y., Dong G. et al. Type synthesis of 2-DoF rotational parallel mechanisms actuating the inter-satellite link antenna. *Chinese J. Aeronaut.*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 1795–1805, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.05.005>
- [11] Kim J., Park F.C., Ryu S.J. et al. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 2001, vol. 17, no. 4, pp. 423–434, doi: <https://doi.org/10.1109/70.954755>
- [12] Kim S.H., Shin H.P., In W.S. et al. Design of a 6 D.O.F. flight simulator based on a full spinning parallel mechanism platform. *AIAA Paper*, 2005, no. 2005–6105, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2005-6105>
- [13] Glazunov V.A., Filippov G.S., Rashoyan G.V. et al. Velocity analysis of a spherical parallel robot. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 11, art. 112012, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112012>
- [14] Скворцов С.А. Кинематический анализ пространственного механизма параллельной структуры с круговой направляющей и четырьмя кинематическими цепями. *Справочник. Инженерный журнал*, 2016, № 5, с. 16–21, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2016.05.pp.016-021>
- [15] Киселев С.В., Антонов А.В., Фомин А.С. Роботы параллельной структуры с круговой направляющей: систематический обзор кинематических схем, методов синтеза и анализа. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2022, № 1, с. 26–38, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711922010059>
- [16] Glazunov V. Design of decoupled parallel manipulators by means of the theory of screws. *Mech. Mach. Theory*, 2010, vol. 45, no. 2, pp. 239–250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2009.09.003>
- [17] Ye W., Li Q. Type synthesis of lower mobility parallel mechanisms: a review. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 32, no. 1, art. 38, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0350-x>
- [18] Meng X., Gao F., Wu S. et al. Type synthesis of parallel robotic mechanisms: framework and brief review. *Mech. Mach. Theory*, 2014, vol. 78, pp. 177–186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.008>
- [19] Tsai L.-W. Systematic enumeration of parallel manipulators. In: *Parallel kinematic machines*. Springer, 1999, pp. 33–49, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0885-6_3

- [20] Alizade R., Bayram C. Structural synthesis of parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 2004, vol. 39, no. 8, pp. 857–870, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.008>
- [21] Fomin A., Ivanov W. Development of a mixing mechanism with a complex motion of the end-effector. *Stroj. Vestn.-J. Mech. E.*, 2019, vol. 65, no. 5, pp. 319–325, doi: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5965>
- [22] Fomin A., Antonov A., Kiselev S. A new class of foldable mechanisms with a circular rail-FoldRail mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2023, vol. 189, art. 105425, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105425>

References

- [1] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them: wave and additive technologies, the machine tool industry, and robot surgery. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 5, pp. 16–25. (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>)
- [2] Ceccarelli M. Fundamentals of the mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2022. 381 p.
- [3] Ryu S.-J., Kim J.W., Hwang J.C. et al. Eclipse: an overactuated parallel mechanism for rapid machining. In: *Parallel kinematic machines*. Springer, 1999, pp. 441–455, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0885-6_32
- [4] Coulombe J., Bonev I.A. A new rotary hexapod for micropositioning. *Proc. IEEE ICRA*, 2013, pp. 877–880, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630676>
- [5] Chen T., Qian S., Li Y. et al. Mechanism design and analysis for an automatical reconfiguration cable-driven parallel robot. *Proc. IEEE CRC*, 2017, pp. 45–50, doi: <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.45>
- [6] Shiga Y., Tanaka Y., Goto H. et al. Design of a six degree-of-freedom tripod parallel mechanism for flight simulators. *Int. J. Automation Technol.*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 715–721, doi: <https://doi.org/10.20965/ijat.2011.p0715>
- [7] Jeong H., Yu J., Lee D. Calibration of in-plane center alignment errors in the installation of a circular slide with machine-vision sensor and a reflective marker. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 20, art. 5916, doi: <https://doi.org/10.3390/s20205916>
- [8] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A. et al. Parallel and sequential structures of manipulators in robotic surgery. *Doklady Akademii nauk*, 2019, vol. 485, no. 2, pp. 166–170, doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852166-170> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 106–109, doi: <https://doi.org/10.1134/S102833581903008X>)
- [9] Xu C.C., Xue C., Duan X.C. A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 428, art. 012053, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/428/1/012053>
- [10] Song Y., Qi Y., Dong G. et al. Type synthesis of 2-DoF rotational parallel mechanisms actuating the inter-satellite link antenna. *Chinese J. Aeronaut.*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 1795–1805, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.05.005>
- [11] Kim J., Park F.C., Ryu S.J. et al. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 2001, vol. 17, no. 4, pp. 423–434, doi: <https://doi.org/10.1109/70.954755>
- [12] Kim S.H., Shin H.P., In W.S. et al. Design of a 6 D.O.F. flight simulator based on a full spinning parallel mechanism platform. *AIAA Paper*, 2005, no. 2005-6105, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2005-6105>
- [13] Glazunov V.A., Filippov G.S., Rashoyan G.V. et al. Velocity analysis of a spherical parallel robot. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 11, art. 112012, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112012>
- [14] Skvortsov S.A. Kinematic analysis the spatial mechanism of parallel structure with a circular guide and four kinematic chains. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2016, no. 5, pp. 16–21, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2016.05.pp.016-021> (in Russ.).
- [15] Kiselev S.V., Antonov A.V., Fomin A.S. Parallel robots with a circular guide: systematic review of kinematic schemes and methods of synthesis and analysis. *Problemy mashi-*

- nostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 1, pp. 26–38, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711922010059> (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 1, pp. 20–29, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822010058>)
- [16] Glazunov V. Design of decoupled parallel manipulators by means of the theory of screws. *Mech. Mach. Theory*, 2010, vol. 45, no. 2, pp. 239–250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2009.09.003>
- [17] Ye W., Li Q. Type synthesis of lower mobility parallel mechanisms: a review. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 32, no. 1, art. 38, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0350-x>
- [18] Meng X., Gao F., Wu S. et al. Type synthesis of parallel robotic mechanisms: framework and brief review. *Mech. Mach. Theory*, 2014, vol. 78, pp. 177–186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.008>
- [19] Tsai L.-W. Systematic enumeration of parallel manipulators. In: *Parallel kinematic machines*. Springer, 1999, pp. 33–49, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0885-6_3
- [20] Alizade R., Bayram C. Structural synthesis of parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 2004, vol. 39, no. 8, pp. 857–870, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.008>
- [21] Fomin A., Ivanov W. Development of a mixing mechanism with a complex motion of the end-effector. *Stroj. Vestn.-J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 65, no. 5, pp. 319–325, doi: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5965>
- [22] Fomin A., Antonov A., Kiselev S. A new class of foldable mechanisms with a circular rail-FoldRail mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2023, vol. 189, art. 105425, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105425>

Статья поступила в редакцию 13.12.2023

Информация об авторах

КИСЕЛЕВ Сергей Валерьевич — аспирант. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: ksv01@mail.ru).

ФОМИН Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

АНТОНОВ Антон Владимович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: antonov.av@imash.ru).

Information about the authors

KISELEV Sergey Valer'evich — Postgraduate. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: ksv01@mail.ru).

FOMIN Alexey Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: alexey-nvkz@mail.ru).

ANTONOV Anton Vadimovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: antonov.av@imash.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Киселев С.В., Фомин А.С., Антонов А.В. Синтез, кинематическое и динамическое моделирование складных механизмов параллельной структуры с круговой направляющей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 20–27, doi: [10.18698/0536-1044-2023-12-20-27](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-12-20-27)

Please cite this article in English as:

Kiselev S.V., Fomin A.S., Antonov A.V. Synthesis, kinematic and dynamic simulation of foldable parallel mechanisms with a circular rail. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 20–27, doi: [10.18698/0536-1044-2023-12-20-27](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-12-20-27)