

УДК 621.01; 007.52

doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-43-49

Структурный синтез и анализ механизмов с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения

А.И. Едакин, Т.В. Едакина, В.В. Самойлова, В.С. Рамжаев

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

Structural Synthesis and Analysis of Mechanisms with an Output Link Performing Two Rotational and One Translational Movements

A.I. Edakin, T.V. Edakina, V.V. Samoylova, V.S. Ramzhaev

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены механизмы параллельной структуры, основой которых является шарнирный плоский параллелограмм с дополнительным звеном, обеспечивающим возможность поддержания точки ввода рабочего инструмента, установленного на выходном звене. С помощью вращательной кинематической пары, сопряженной с основанием, плоскость вращения шарнирного параллелограмма может менять угол наклона. Предлагаемая конструкция обладает большей нагрузочной способностью, чем имеющиеся аналоги, так как вращательная кинематическая пара, сопрягающая шарнирный параллелограмм с основанием, выполнена в виде двух полуосей, а выходное звено расположено между промежуточными звеньями этого параллелограмма. Равенство углов поворота выходного звена и промежуточных звеньев шарнирного параллелограмма обеспечено наличием дополнительных звеньев или ременных передач. Приведены трехмерные модели указанных механизмов, выполнен их структурный синтез в различных модификациях. В зависимости от модификации появляется возможность применения таких механизмов не только в сфере промышленности, включая аддитивные технологии, но и в области медицины при проведении хирургических операций и исследовании свойств плазмы.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, структурный анализ, рабочий инструмент, шарнирный параллелограмм, число степеней свободы

The article considers mechanisms based on a hinged flat parallelogram with an additional link, ensuring the ability to maintain the insertion point of the tool installed on the output link. A rotational kinematic pair coupled to the base allows the plane of rotation of the articulated parallelogram to change the angle of inclination. The proposed design should have a greater load capacity than the available analogues, since the rotational kinematic pair mating the articulated parallelogram with the base is made in the form of two semi-axes, and the output link is located between the intermediate links of this parallelogram. The equality of the rotation angles of the output link and the intermediate links of the articulated parallelogram is ensured by the presence of additional links or belt drives. Three-dimensional models of these mechanisms are presented, and their structural synthesis is carried out in various modifications. Depending on the modification, it becomes possible to apply such

mechanisms not only in industry, including additive technologies, but also in the field of medicine during surgical operations and in the study of plasma properties.

Keywords: parallel structure mechanism, structural analysis, end effector, hinged parallelogram, number of degrees of freedom

Механизмы параллельной структуры (далее механизмы), обеспечивающие постоянство точки ввода рабочего инструмента, являются востребованными в медицине [1–7]. В частности, их применяют для робот-ассистированного проведения хирургических операций и исследования свойств плазмы.

Один из механизмов, обладающих таким свойством, — робот *da Vinci*, разработанный в конце 1980-х годов и получивший распространение во всем мире. В данном направлении активно ведутся дальнейшие разработки и достигнуты важные результаты [8–13].

Так, в ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» разработаны устройства, развивающие эту идею с использованием ременных и конических передач. [14, 15]. Создан механизм, построенный на основе шарнирного плоского параллелограмма. Благодаря расположению опорных частей с двух сторон от выходного звена, а также размещению на нем двигателя поступательного перемещения уменьшаются массогабаритные характеристики устройства.

Цель работы — выполнить структурный анализ указанных механизмов и разработать их трехмерные модели.

Структурный синтез и анализ механизма с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения. Основой рассматриваемых механизмов служит плоский шарнирный параллелограмм, включающий в себя вращательные кинематические пары B, C, B', C' (рис. 1).

Кроме того, имеют место вращательные кинематические пары с осями, параллельными осям упомянутых пар, сопряженные с шарнирами A и A' . Оси шарниров A и A' перпендикулярны осям шарниров B, C, B', C' . Указанное расположение кинематических пар позволяет менять плоскость, в которой движется шарнирный параллелограмм.

Вращательные кинематические пары E и D присоединены к звеньям CC' и BB' таким образом, чтобы звено EF сохраняло условие параллельности звеньев AC и $A'C'$. При этом выпол-

няется условие постоянства положения точки O (которое можно наблюдать на рис. 2), что требуется, например, при проведении хирургических операций и экспериментов, связанных с исследованием плазмы.

Рассмотрим структуру исследуемого манипулятора. Для определения числа степеней свободы W четырехзвенника $ACC'A'$ используем формулу Чебышева

$$W = 3(n-1) - 2p_i,$$

где n — число звеньев, $n = 4$; p_i — число пар i -го класса, $p_5 = 4$.

Подставляя в эту формулу значения параметров n и p_5 , имеем

$$W = 3(n-1) - 2p_5 = 3(4-1) - 2 \cdot 4 = 1.$$

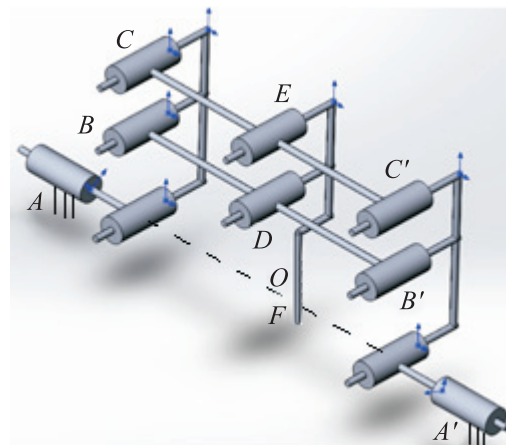


Рис. 1. Трехмерная модель механизма с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения

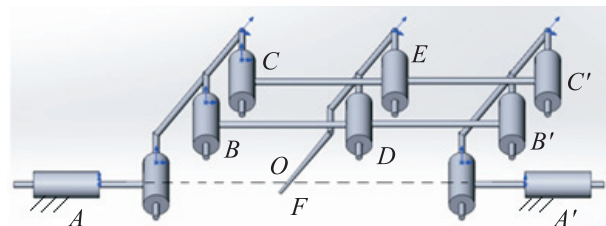


Рис. 2. Трехмерная модель механизма с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения, обеспечивающая выполнение условия постоянства положения точки O

После добавления к механизму звена BB' получаем

$$W = 3(5 - 1) - 2 \cdot 6 = 0,$$

где $n = 5$; $p_5 = 6$.

То есть формально число степеней свободы механизма равно нулю, однако в силу особых геометрических соотношений — наличия параллелограммов $ACC'A'$ и $ABB'A'$ — он имеет одну степень свободы.

После добавления еще одного звена ED число степеней свободы

$$W = 3(6 - 1) - 2 \cdot 8 = -1,$$

где $n = 6$; $p_5 = 8$.

В результате расчета с учетом всех добавленных звеньев и кинематических пар получаем статически неопределимую ферму. Однако звено ED расположено параллельно звеньям CB и $C'B'$, поэтому число степеней свободы механизма, включающего в себя вращательные кинематические пары с параллельными осями, остается равным единице.

При добавлении к исследуемому механизму еще двух вращательных кинематических пар A и A' с совпадающими осями получаем новый механизм с двумя степенями свободы (с вращением звена EF относительно двух горизонтальных осей). При этом положение точки O будет оставаться неизменным.

Такой механизм вместо двух шарнирных параллелограммов может иметь две передачи с гибкой связью (рис. 3).

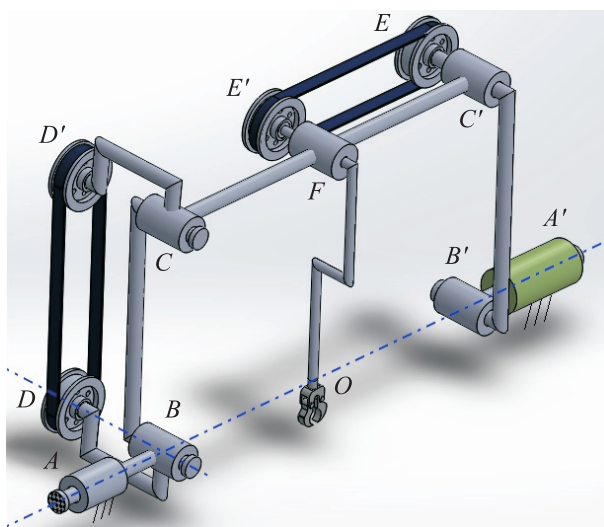


Рис. 3. Трехмерная модель механизма с двумя гибкими связями и выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения

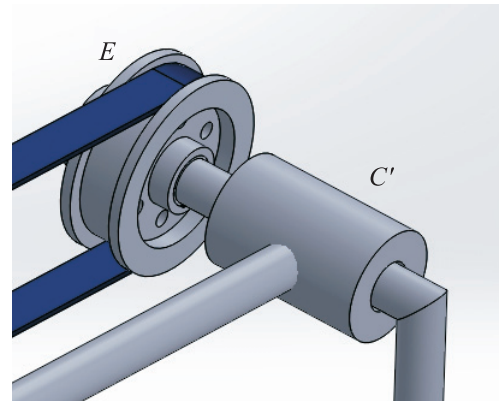


Рис. 4. Трехмерная модель фрагмента механизма с жесткой связью шкива E и оси вращательной пары C'

Трехмерная модель фрагмента механизма с жесткой связью шкива E и оси вращательной пары C' показана на рис. 4. В данном случае шарнирный параллелограмм $BCC'B'$ сопряжен с вращательной кинематической парой AA , которая имеет две неподвижные втулки и, соответственно, две части оси.

Чтобы обеспечить постоянство точки ввода, в механизме использованы две ременные передачи (передачи с гибкой связью). Одна из них содержит шкивы D и D' , имеющие одинаковые радиусы. Шкив D жестко связан с втулкой вращательной кинематической пары B (рис. 5), шкив D' — с втулкой кинематической пары C .

Наличие этих двух шкивов обеспечивает параллельность осей звеньев AB и CC' . Кроме того, на звене CC' жестко закреплена втулка кинематической пары F , к которой присоединено выходное звено.

С осью вращательной кинематической пары F жестко связан шкив E' . Сопряженный

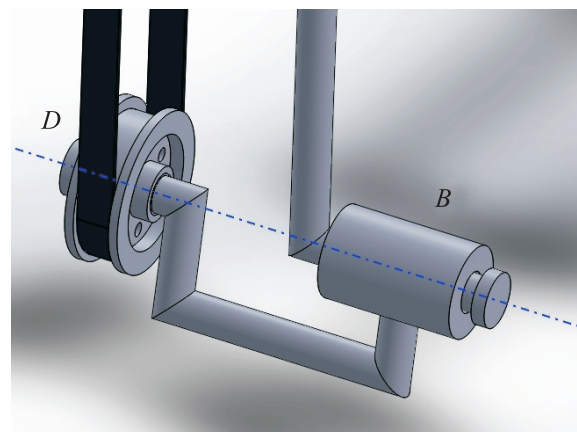


Рис. 5. Трехмерная модель фрагмента механизма с вращательной кинематической парой B

с этим шкивом гибкой связью шкив E жестко соединен с осью вращательной кинематической пары C' , что обеспечивает параллельность осей звена $B'C'$ и выходного звена.

Определим число степеней свободы. Очевидно, что число степеней свободы шарнирного параллелограмма $B'C'BC$ равно единице. С помощью формулы Чебышева получаем

$$W = 3(n-1) - 2p_5 = 3(4-1) - 2 \cdot 4 = 1,$$

где $n = 4$, $p_5 = 4$.

После добавления к этому механизму еще одной кинематической пары F и одного звена FO ($n = 5$, $p_5 = 5$) число степеней свободы

$$W = 3(n-1) - 2p_5 = 3(5-1) - 2 \cdot 5 = 2.$$

Добавление в кинематическую цепь еще двух связей приводит к появлению гибких связей, соединяющих шкивы D и D' , E и E' (см. рис. 3). В данном случае поворот в кинематической паре B должен быть равен повороту в кинематической паре C , а поворот в кинематической паре E — повороту в кинематической паре E' , что необходимо учесть в структурной формуле.

Структурная формула запишется таким образом, что имеют место те же самые звенья, однако число кинематических пар увеличилось на два, введены еще две гибкие связи. При этом каждая из двух кинематических пар отбирает по одной степени свободы. Определим число степеней свободы кинематической цепи, где $n = 5$, $p_5 = 5$, $p_4 = 2$:

$$W = 3(n-1) - 2p_5 - p_4 = 3(5-1) - 2 \cdot 5 - 2 = 0.$$

Число степеней свободы равно нулю, однако одна из гибких связей, а именно DD' , является повторяющейся. Ее наличие обуславливает параллельность звеньев BB' и CC' , т. е. эта связь может быть убрана без изменения числа степеней свободы. Тогда механизм будет иметь одну степень свободы.

Еще одну степень свободы обеспечивает движение в кинематических парах A и A' , через которые проходит одна ось (см. рис. 3). В данном случае число степеней свободы снова станет равным двум.

Тогда ременную передачу DD' можно исключить из схемы механизма. При этом наличие шарнирного параллелограмма $BCC'B'$ позволит сохранить ориентацию звеньев CC' относительно оси AA' (рис. 6).

Наличие ременной передачи DD' позволяет увеличить жесткость параллелограмма $BCC'B'$.

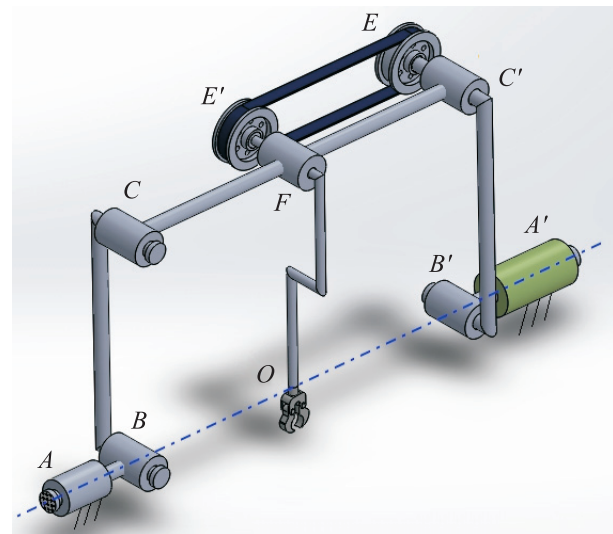


Рис. 6. Трехмерная модель механизма с одной гибкой связью EE'

При учете лишь одной ременной передачи кинематическая структура EE' имеет одну степень свободы. Тогда передача EE' обеспечивает ориентацию звена FO параллельно таковой для звеньев BC и $C'B'$.

В тех случаях, когда для выходного звена необходимо сохранять постоянную ориентацию, имея возможность заранее установить направление оси указанного звена, целесообразно использовать другую схему, в которой шкив E жестко связан со втулкой шарнира C' (рис. 7).

В данном случае, проворачивая со скольжением шкив E' относительно ремня $E'E$, надо установить направление оси FO . При движении

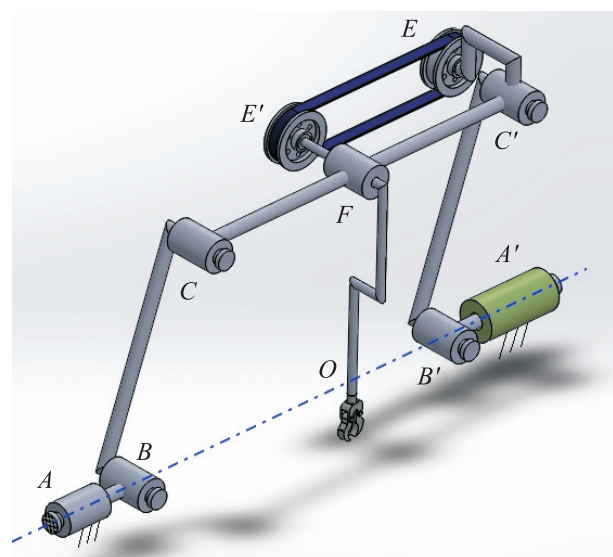


Рис. 7. Трехмерная модель механизма, обеспечивающего поступательное перемещение выходного звена FO

в кинематических парах AA' и BB' получим поступательное движение звена FO в плоскости $B'BCC'$, а также вращение этой плоскости вокруг оси AA' .

Выводы

1. Проведен структурный анализ механизма с промежуточным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения.

2. Разработано несколько модификаций трехмерной модели механизма с учетом осо-

бенностей применения, соответствующих либо постоянству точки ввода рабочего инструмента, либо его поступательному перемещению. Для всех модификаций определено число степеней свободы.

3. Результаты исследования являются основой дальнейшей работы по решению обратной задачи о положениях, по кинематическому анализу, решению задач о скоростях и ускорениях для механизма с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения.

Литература

- [1] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Параллельные и последовательные структуры манипуляторов в роботохирургии. *ДАН*, 2019, № 2, с. 166–170, doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852166-170>
- [2] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Разработка и исследование механизмов с постоянной точкой ввода инструмента в рабочую область, предназначенных для хирургических операций и исследования свойств плазмы. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2020, № 6, с. 3–14.
- [3] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботохирургия. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 5, с. 16–25, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920060103>
- [4] Глазунов В.А., Глушков П.С., Левин С.В. и др. *Манипулятор*. Патент РФ 170656. Заявл. 20.06.2016, опубл. 03.05.2017.
- [5] Глазунов В.А., Духов А.В. Информатизация разработки механизмов роботов параллельной структуры для медицинских применений. *Качество. Инновации. Образование*, 2015, т. 2, № 5, с. 52–62.
- [6] Краснопольский В.И., Попов А.А., Мананникова Т.Н. и др. Робот-ассистированная хирургия в онкогинекологии. *Онкогинекология*, 2014, № 3, с. 136–139.
- [7] Филиппов Г.С., Глазунов В.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя, высокопрецизионных хирургических манипуляциях, зондовой диагностики плазменных потоков. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2018, № 3, с. 121–128.
- [8] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Разработка и решение задачи о положениях механизма параллельно-последовательной структуры для хирургических операций как альтернативы роботу Da Vinci. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2019, № 4, с. 3–13.
- [9] Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *J. Mech. Des.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 617–624, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1667955>
- [10] Antonov A.V., Aleshin A.K., Glazunov V.A., et al. Dynamics of a new parallel structure mechanism with motors mounted on the base outside the working area. *Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s readings”*. Springer, 2019, pp. 183–195.
- [11] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulations*. Springer, 2004. 312 p.
- [12] Gosselin C., Angeles J. The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator. *J. Mech., Trans., and Automation.*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 202–207, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3258984>
- [13] Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [14] Крайнев А.Ф. *Механизмы машин. Функция, структура, действие*. Москва, Спектр, 2016. 176 с.
- [15] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике. *ДАН*, 2014, т. 459, № 4, с. 428–432.

References

- [1] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., et al. Parallel and sequential structures of manipulators in robotic surgery. *DAN*, 2019, 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>)
- [2] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., et al. Development and investigation of mechanisms with a constant point of entry of a tool into the working area, intended for surgery and study of the properties of plasma. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2020, no. 6, pp. 3–14. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 6, pp. 463–473, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618820060096>)
- [3] 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, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920060103> (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>)
- [4] Glazunov V.A., Glushkov P.S., Levin S.V., et al. *Manipulyator*. Patent RF 170656. Appl. 20.06.2016, publ. 03.05.2017. (In Russ.).
- [5] Glazunov V.A., Dukhov A.V. Informational support of parallel mechanisms development for application in medicine. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2015, vol. 2, no. 5, pp. 52–62. (In Russ.).
- [6] Krasnopol'skiy V.I., Popov A.A., Manannikova T.N., et al. Robot-assisted surgery in gynecologic oncology. *Onkoginekologiya* [Onkogynecology], 2014, no. 3, pp. 136–139. (In Russ.).
- [7] Filippov G.S., Glazunov V.A. Application prospect of parallel mechanisms in additive production technologies for central body of jet engine nozzle high-precision surgery manipulations, probe diagnostics by plasma flux. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2018, no. 3, pp. 121–128. (In Russ.).
- [8] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., et al. Formulation and solution of the problem of the positions of a mechanism with a parallel-series structure used in surgery as an alternative to the da Vinci robot. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2019, no. 4, pp. 3–13. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2019, vol. 48, no. 4, pp. 283–291, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618819040149>)
- [9] Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *J. Mech. Des.*, 2004, vol. 126, no. 4, pp. 617–624, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1667955>
- [10] Antonov A.V., Aleshin A.K., Glazunov V.A., et al. Dynamics of a new parallel structure mechanism with motors mounted on the base outside the working area. *Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's readings"*. Springer, 2019, pp. 183–195.
- [11] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulations*. Springer, 2004. 312 p.
- [12] Gosselin C., Angeles J. The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator. *J. Mech., Trans., and Automation*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 202–207, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3258984>
- [13] Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [14] Kraynev A.F. *Mekhanizmy mashin. Funktsiya, struktura, deystvie* [Machine mechanisms. Function, structure, operation]. Moscow, Spektr Publ., 2016. 176 p. (In Russ.).
- [15] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Handling mechanisms of parallel structure and their application in modern equipment. *DAN*, 2014, vol. 459, no. 4, pp. 428–432. (In Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 582–585, doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335814120015>)

Статья поступила в редакцию 11.05.2021

Информация об авторах

ЕДАКИН Антон Игоревич — аспирант отдела «Механика машин и управление машинами». ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: edakin-anton@mail.ru).

ЕДАКИНА Татьяна Витальевна — аспирант отдела «Механика машин и управление машинами». ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: tatiana.susakova.00@mail.ru).

САМОЙЛОВА Виолетта Владимировна — аспирант отдела «Механика машин и управление машинами». ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: t-violka@mail.ru).

РАМЖАЕВ Владимир Сергеевич — аспирант отдела «Механика машин и управление машинами». ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: sencor@bk.ru).

Information about the authors

EDAKIN Anton Igorevich — Postgraduate, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: edakin-anton@mail.ru).

EDAKINA Tatyana Vitalievna — Postgraduate, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: tatiana.susakova.00@mail.ru).

SAMOILOVA Violetta Vladimirovna — Postgraduate, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: t-violka@mail.ru).

RAMZHAEV Vladimir Sergeevich — Postgraduate, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: sencor@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Едакин А.И., Едакина Т.В., Самойлова В.В., Рамжаев В.С. Структурный синтез и анализ механизмов с выходным звеном, совершающим одно поступательное и два вращательных движения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 43–49, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-43-49

Please cite this article in English as:

Edakin A.I., Edakina T.V., Samoylova V.V., Ramzhaev V.S. Structural Synthesis and Analysis of Mechanisms with an Output Link Performing Two Rotational and One Translational Movements. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 11, pp. 43–49, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-43-49