

УДК 621.01 + 007.52

doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-31-38

Разработка и анализ механизма параллельной структуры, имеющего дугообразные направляющие с прорезями и постоянную точку ввода

А.В. Духов¹, А.А. Романов², М.Н. Ерофеев²,
И.Н. Кравченко², А.В. Николаев²

¹ АО «НИИМА «Прогресс»

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Development and Analysis of a Parallel Structure Mechanism with Slotted Arcuate Guides and a Constant Entry Point

A.V. Dukhov¹, A.A. Romanov², M.N. Erofeev²,
I.N. Kravchenko², A.V. Nikolaev²

¹ JSC NIIMA "Progress"

² Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Разработка и исследование новых механизмов параллельной структуры, обеспечивающих постоянство точки ввода инструмента в рабочую область, является актуальной задачей хирургии и научной медицины. Выполнен структурный синтез механизма параллельной структуры, предназначенного для роботизированной хирургической операции методом лапароскопии. Предложенный механизм снабжен дугообразными направляющими с прорезями, установленными на основании перпендикулярно друг другу. На пересечении прорезей размещена втулка, через которую происходит линейное перемещение прямолинейного вала, связанного с выходным звеном. Такая компоновка обеспечивает постоянство точки ввода, что позволяет использовать разработанный механизм в лапароскопической хирургии и исследованиях свойств плазмы. Для данного механизма решена обратная задача о положениях, определена рабочая область и разработана 3D-модель.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, число степеней свободы, структура механизма, обратная задача о положениях, рабочая зона механизма

The development and study of new mechanisms of a parallel structure ensuring the constancy of the point of instrument entry into the working area is an urgent task of surgery and scientific medicine. A structural synthesis of a parallel structure mechanism designed for robotic laparoscopic surgery has been performed. The proposed mechanism is equipped with arcuate guides with slots installed on the base perpendicular to each other. At the intersection of the slots, there is a bushing through which a straight shaft connected to the output link moves linearly. This arrangement provides a constant entry point, which allows the developed mechanism to be used in laparoscopic surgery and studies of plasma properties. For this mechanism, the inverse problem of positions has been solved, the working area has been determined, and a 3D model has been developed.

Keywords: parallel mechanism, number of degrees of freedom, mechanism structure, inverse problem of positions, working area

Механизмы параллельной структуры (МПС), предназначенные для выполнения хирургических операций и исследования свойств плазмы, имеют постоянную точку ввода [1–10], относительно которой рабочий орган может перемещаться лишь так, чтобы вращаться вокруг осей, проходящих через эту точку, и двигаться вдоль оси инструмента. В соответствии с этим разрабатываются такие схемы, которые наиболее близки к структуре сферических механизмов роботов параллельной структуры.

Рассматриваемый МПС имеет две дуги, расположенные ортогонально друг другу и имитирующие вращательные кинематические пары. На каждой из дуг есть прорезь, в которой перемещается выходное звено (ВЗ), выполненное в виде стержня, входящего в рабочую область через точку ввода O (рис. 1).

Прототипом такого МПС является сферический механизм, разработанный в Институте машиноведения имени А.А. Благовраова (рис. 2).

Чтобы ВЗ линейно перемещалось вдоль своей оси и вращалось вокруг нее, на его верхней части должны быть смонтированы два соответствующих двигателя. Для обеспечения возможности перемещения рабочего органа относительно двух ортогональных осей на конце ВЗ необходимо расположить еще два двигателя, движение от которых должно передаваться через тросовые или зубчатые передачи [11].

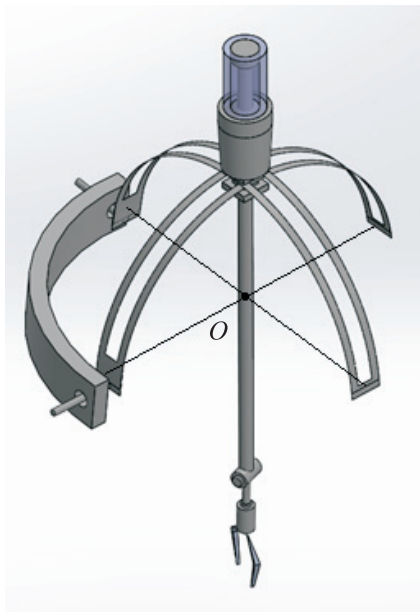


Рис. 1. 3D-модель МПС с дугообразными направляющими



Рис. 2. Внешний вид прототипа МПС с дугообразными направляющими

Такой МПС имеет шесть степеней свободы [12], что подтверждает формула Сомова — Малышева:

$$W = 6(n-1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1,$$

где W — число степеней свободы; n — число звеньев, включая основание; p_i — число кинематических пар i -го класса ($i = 1, \dots, 5$).

Исследуемый механизм имеет семь звеньев ($n = 7$) и пять кинематических пар: $p_5 = 6$, $p_4 = 0$, $p_3 = 0$, $p_2 = 0$, $p_1 = 0$. Подставляя эти значения в формулу Сомова — Малышева, получаем

$$W = 6(7-1) - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 0 = 6.$$

Отсюда следует указанное число степеней свободы ВЗ.

Решение обратной задачи о положениях для МПС с шестью степенями свободы. Обратная задача о положениях заключается в определении обобщенных координат (перемещения в приводах) при фиксированном положении ВЗ [13, 14].

За исходное примем такое положение ВЗ, когда оно расположено вертикально, т. е. перпендикулярно осям поворота дугообразных направляющих с прорезями (см. рис. 1), а линейный двигатель переместил в верхнее положение прямолинейный вал.

При решении обратной задачи о положениях МПС с шестью степенями свободы считаем известными координаты центральной точки

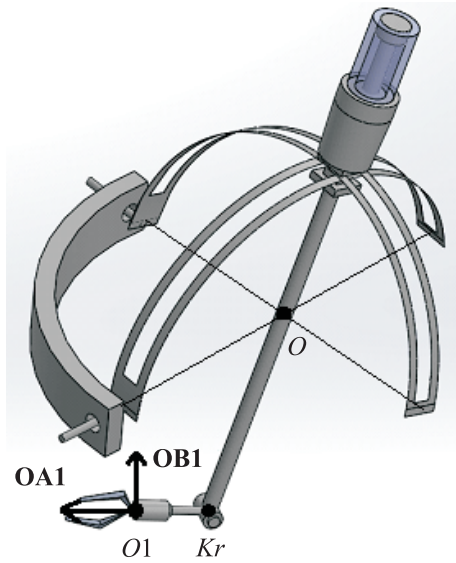


Рис. 3. 3D-модель МПС с произвольным положением ВЗ

ВЗ O_1 и два позиционирующих единичных вектора OA_1 и OB_1 . Один из них сонаправлен с прямолинейным валом, соединяющим рабочий орган и вращательный шарнир с центральной точкой Kr , а другой перпендикулярен прямолинейному валу (рис. 3).

Зная координаты центральной точки ВЗ, единичный вектор OA_1 и длину прямолинейного вала k , определяем положение центральной точки вращательного шарнира

$$Kr = -kOA_1 + O_1.$$

Находим вектор, идущий от точки O (точки фиксированного ввода и начала системы координат) к точке Kr ,

$$OKr = Kr - O.$$

Угол наклона дугообразной направляющей относительно оси OY β_n вычислим с помощью произведения матрицы, определяющей угол поворота относительно оси OY , на вектор OKr :

$$\begin{pmatrix} \cos \beta_n & 0 & \sin \beta_n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_n & 0 & \cos \beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} OKr_1 \\ OKr_2 \\ OKr_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} OKr_1 \cos \beta_n + OKr_3 \sin \beta_n \\ OKr_2 \\ OKr_3 \cos \beta_n - OKr_1 \sin \beta_n \\ 1 \end{pmatrix},$$

где OKr_1 , OKr_2 , OKr_3 — координаты вектора OKr .

Решая уравнение

$$OKr_1 \cos \beta_n + OKr_3 \sin \beta_n = 0,$$

получаем угол поворота дугообразной направляющей $\beta_n = b$, необходимый для ее возврата в начальное положение относительно оси OY .

Координаты векторов OKr , OA_1 , OB_1 до поворота дугообразной направляющей относительно оси OY определяем из следующих выражений:

$$OKr = QQ \begin{pmatrix} OKr_1 \\ OKr_2 \\ OKr_3 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad OA_1 = QQ \begin{pmatrix} OA_1_1 \\ OA_1_2 \\ OA_1_3 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$OB_1 = QQ \begin{pmatrix} OB_1_1 \\ OB_1_2 \\ OB_1_3 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad QQ = \begin{pmatrix} \cos b & 0 & \sin b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где OA_1_1 , OA_1_2 , OA_1_3 и OB_1_1 , OB_1_2 , OB_1_3 — координаты векторов OA_1 и OB_1 соответственно.

Угол наклона дугообразной направляющей относительно оси OX α_n вычислим с помощью произведения матрицы, определяющей угол поворота относительно оси OX , на вектор OKr :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} OKr_1 \\ OKr_2 \\ OKr_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} OKr_1 \\ OKr_2 \cos \alpha_n - OKr_3 \sin \alpha_n \\ OKr_3 \cos \alpha_n + OKr_2 \sin \alpha_n \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение

$$OKr_2 \cos \alpha_n - OKr_3 \sin \alpha_n = 0,$$

получаем угол поворота дугообразной направляющей $\alpha_n = a$, необходимый для ее возврата начальное положение относительно оси OX .

Аналогично определяем координаты указанных векторов до поворота дугообразной направляющей относительно оси OX :

$$OKr = QQ \begin{pmatrix} OKr_1 \\ OKr_2 \\ OKr_3 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad OA_1 = QQ \begin{pmatrix} OA_1_1 \\ OA_1_2 \\ OA_1_3 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{OB1} = \mathbf{QQ} \begin{pmatrix} \mathbf{OB1}_1 \\ \mathbf{OB1}_2 \\ \mathbf{OB1}_3 \\ 1 \end{pmatrix}; \mathbf{QQ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & -\sin a & 0 \\ 0 & \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Угол поворота ВЗ относительно оси OZ φ_3 определяем, используя произведение соответствующей матрицы поворота и вектора **OAI**:

$$\begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{OA1}_1 \\ \mathbf{OA1}_2 \\ \mathbf{OA1}_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{OA1}_1 \cos \gamma - \mathbf{OA1}_2 \sin \gamma \\ \mathbf{OA1}_2 \cos \gamma + \mathbf{OA1}_1 \sin \gamma \\ \mathbf{OA1}_3 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение

$$\mathbf{OA1}_2 \cos \gamma + \mathbf{OA1}_1 \sin \gamma = 0,$$

получаем угол поворота ВЗ $\gamma = g$, необходимый для его возврата в начальное положение относительно оси OZ. Следовательно, угол поворота ВЗ относительно оси OZ $\varphi_3 = -g$. Отсюда находим новые координаты векторов **OAI** и **OB1**.

Угол поворота ВЗ относительно оси OY φ_2 найдем с помощью произведения соответствующей матрицы поворота и вектора **OAI**:

$$\begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{OA1}_1 \\ \mathbf{OA1}_2 \\ \mathbf{OA1}_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{OA1}_1 \cos \beta + \mathbf{OA1}_3 \sin \beta \\ \mathbf{OA1}_2 \\ \mathbf{OA1}_3 \cos \beta - \mathbf{OA1}_1 \sin \beta \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение

$$\mathbf{OA1}_3 \cos \beta - \mathbf{OA1}_1 \sin \beta = 0,$$

получаем угол поворота ВЗ $\beta = b$, необходимый для его возврата в начальное положение относительно оси OY. Следовательно, угол поворота ВЗ относительно оси OY $\varphi_2 = -b$. Отсюда находим новые координаты векторов **OAI** и **OB1**.

Угол поворота относительно оси OX φ_1 найдем, используя произведение соответствующей матрицы поворота и вектора **OB1**:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{OB1}_1 \\ \mathbf{OB1}_2 \\ \mathbf{OB1}_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{OB1}_1 \\ \mathbf{OB1}_2 \cos \alpha - \mathbf{OB1}_3 \sin \alpha \\ \mathbf{OB1}_3 \cos \alpha + \mathbf{OB1}_2 \sin \alpha \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение

$$\mathbf{OB1}_2 \cos \alpha - \mathbf{OB1}_3 \sin \alpha = 0,$$

получаем угол поворота ВЗ $\alpha = a$, необходимый для его возврата в начальное положение относительно оси OX. Следовательно, угол поворота ВЗ относительно оси OX $\varphi_1 = -a$. Отсюда определяем новые координаты векторов **OAI** и **OB1**.

Линейные перемещения ВЗ и центральной точки вращательного шарнира Kr равны, поэтому, зная расстояние от Kr до точки постоянного входа O , можно рассчитать его линейное перемещение, найдя разницу этих значений.

В результате решения обратной задачи с входными параметрами, соответствующими 3D-модели, определены координаты центральной точки ВЗ и двух позиционирующих единичных векторов:

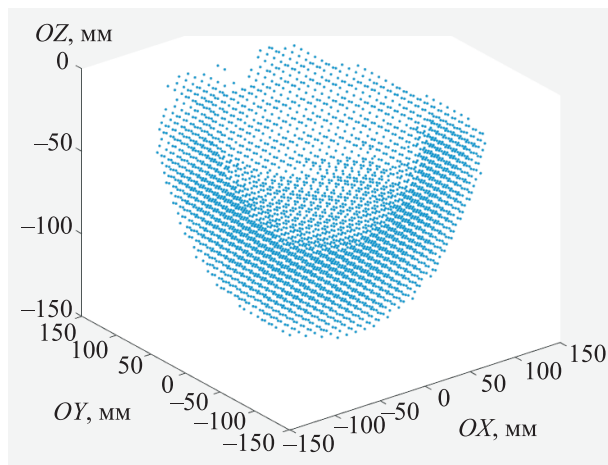
$$\mathbf{O1} = \begin{pmatrix} -66,611 \\ -81,317 \\ 46,632 \end{pmatrix}; \mathbf{OAI} = \begin{pmatrix} -0,730 \\ 0,384 \\ 0,566 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{OB1} = \begin{pmatrix} -0,167 \\ -0,903 \\ 0,396 \end{pmatrix}.$$

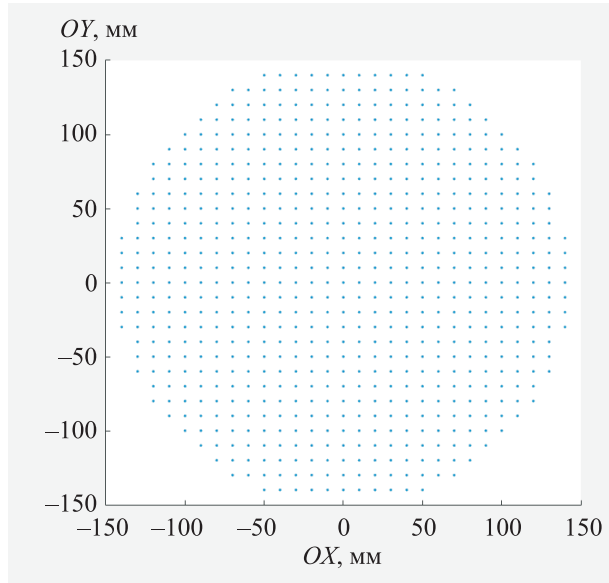
Получены следующие данные:

- углы поворота двигателей, определяющие наклон дугообразных направляющих относительно осей OX и OY: $\alpha_n = 59,968^\circ$ и $\beta_n = -56,431^\circ$;
- углы поворота двигателей, определяющие поворот ВЗ относительно осей OX, OY и OZ: $\varphi_1 = -165,73^\circ$, $\varphi_2 = -172,59^\circ$ и $\varphi_3 = -93,915^\circ$;
- линейное перемещение прямолинейного вала $\Delta x = 7,216$.

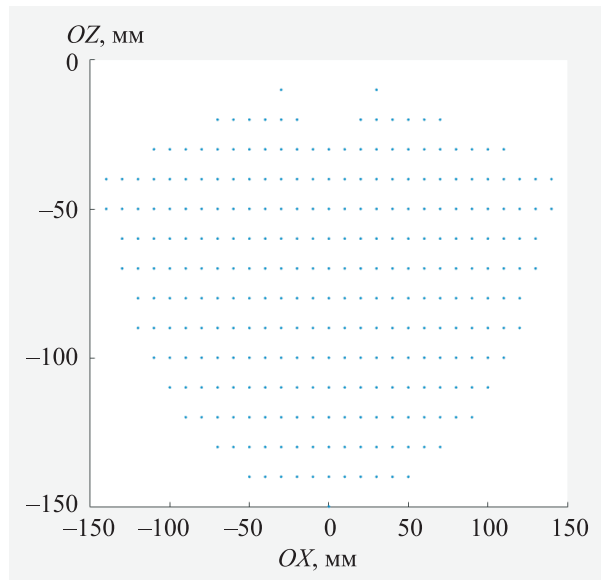
В ходе решения все промежуточные и конечные значения полностью совпадали с таковыми для 3D-модели, что подтверждает верность решения обратной задачи о положениях.



a



б



в

Рис. 4. Рабочая зона МПС (*a*) и ее проекции на плоскости *XOY* (*б*) и *XOZ* (*в*)

Определение рабочей зоны МПС с шестью степенями свободы. Оценить размер и форму рабочей зоны можно, исследуя решение обратной задачи о положениях [15]. При определении рабочей зоны МПС учитывались следующие ограничения, обусловленные конструктивными особенностями механизма: максимальный угол наклона прямолинейного вала составляет 75° , ход прямолинейного вала ограничен пятьюдесятью безразмерными единицами. С учетом этих ограничений получены рабочая зона МПС и ее проекции на плоскости *XOY* и *XOZ*, приведенные на рис. 4, *a–в*.

Вывод

Предложен МПС с дугообразными направляющими, обеспечивающими постоянную точку ввода и возможность вращения ВЗ относительно двух ортогональных осей. Такая компоновка дает больше возможностей при проведении эндоскопических операций посредством дополнительных приводов, отвечающих за вращение ВЗ относительно двух его ортогональных осей.

Литература

- [1] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Перспективные малоинвазивные роботохирургические комплексы параллельной структуры. *Доклады РАН. Физика, технические науки*, 2020, т. 495, № 1, с. 84–88, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740020060206>
- [2] Глазунов В.А., Духов А.В., Ращоян Г.В. и др. Моделирование роботов параллельной структуры для хирургических применений в полевых условиях. В: *Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации*. Москва, ГНИИЦ РТ, 2016, с. 223–225.
- [3] 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.
- [4] Глазунов В.А., Козырев А.В. Перспективы применения роботов параллельной структуры в медицине. В: *Медицинские, технические и технологические аспекты фундаментальных проблем роботохирургии*. Москва, Информ-Право, 2013, с. 75–83.
- [5] 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, doi: <https://doi.org/10.1134/S0235711919040151>
- [6] Цымбал Д.Д., Мареев Г.О., Мареев О.В. *Устройство для позиционирования хирургического инструмента в пространстве*. Патент РФ 198063. Заявл. 07.08.2019, опубл. 16.06.2020.
- [7] Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Петраков А.А. и др. Разработка новых механизмов для современных устройств. В: *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018, с. 131–143.
- [8] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Параллельные и последовательные структуры манипуляторов в роботохирургии. *Доклады академии наук*, 2019, т. 485, № 2, с. 166–170, doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524852166-170>
- [9] Глазунов В.А. *Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2018. 1036 с.
- [10] 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, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920060103>
- [11] Антонов А.В., Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры с двигателями, расположенными вне рабочей зоны. В: *Механизмы перспективных робототехнических систем*. Москва, Техносфера, 2020, с. 53–85.
- [12] Чернецов Р.Ф., Велиев Е.И., Глазунов В.А. и др. Определение числа степеней свободы механизмов с постоянной точкой ввода инструмента. *Станкоинструмент*, 2019, № 4, с. 80–83.
- [13] Хейло С.В. Решение задачи кинематики сферического манипулятора параллельной структуры. *Машиностроение и инженерное образование*, 2010, № 4, с. 29–33.
- [14] Антонов А.В., Глазунов В.А. Обратная задача о положении механизма параллельной структуры. *Передача, обработка, отображение информации*. Москва, Экспертно-аналитический центр Минобрнауки России, 2020, с. 15–19.
- [15] Хейло С.В., Ларюшкин П.А. Определение рабочей зоны манипуляторов параллельной структуры. *Справочник. Инженерный журнал*, 2013, № 2, с. 27–31.

References

- [1] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., et al. Promising minimally invasive robotic surgical complexes with parallel structure. *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 495, no. 1, pp. 84–88, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740020060206> (in Russ.).

- [2] Glazunov V.A., Dukhov A.V., Rashchayan G.V., et al. Modelirovanie robotov parallel'noy struktury dlya khirurgicheskikh primeneniya v polevykh usloviyakh [Modeling of parallel robots for surgery applications in the field]. V: *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [In: Robotization of Armed Forces of the Russian Federation]. Moscow, GNIITs RT Publ., 2016, pp. 223–225. (In Russ.).
- [3] Filippov G.S., Glazunov V.A. Prospects of application of parallel structure mechanisms in additive technologies of manufacturing of the central body of the turbojet engine nozzle, high-precision surgical manipulations, probe diagnostics of plasma flows. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2018, no. 3, pp. 121–128. (In Russ.).
- [4] Glazunov V.A., Kozyrev A.V. Perspektivy primeneniya robotov parallel'noy struktury v meditsine [Prospect of using parallel robots in medicine]. V: *Meditzinskie, tekhnicheskie i tekhnologicheskie aspekty fundamental'nykh problem robotokhirurgii* [In: Medic, technical and technological aspects of fundamental problems in robotic surgery]. Moscow, Inform-Pravo Publ., 2013, pp. 75–83. (In Russ.).
- [5] 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, doi: <https://doi.org/10.1134/S0235711919040151> (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2019, vol. 48, no. 4, pp. 283–291, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618819040149>)
- [6] Tsymbal D.D., Mareev G.O., Mareev O.V. *Ustroystvo dlya pozitsionirovaniya khirurgicheskogo instrumenta v prostranstve* [Device for positioning surgical instrument in space]. Patent RU 198063. Appl. 07.08.2019, publ. 16.06.2020. (In Russ.).
- [7] Glazunov V.A., Filippov G.S., Petrakov A.A., et al. Razrabotka novykh mekhanizmov dlya sovremennykh ustroystv [Development of new mechanisms for modern devices]. V: *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [In: New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018, pp. 131–143. (In Russ.).
- [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] Glazunov V.A. *Mekhanizmy parallel'noy struktury i ikh primeneniye: robototekhnicheskie, tekhnologicheskie, meditsinskie, obuchayushchie sistemy* [Parallel mechanisms and their application: robotic, technological, medic and learning systems]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2018. 1036 p. (In Russ.).
- [10] 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, doi: <https://doi.org/10.31857/S0235711920060103> (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 6, pp. 463–473, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618820060096>)
- [11] Antonov A.V., Glazunov V.A. Mekhanizmy parallel'noy struktury s dvigatelyami, raspolozhennymi vne rabochey zony [Parallel mechanisms with out-of-the-way engines]. V: *Mekhanizmy perspektivnykh robototekhnicheskikh sistem* [In: Mechanisms of prospective robotic systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2020, pp. 53–85. (In Russ.).
- [12] Chernetsov R.F., Veliev E.I., Glazunov V.A., et al. Determining the number of degrees of freedom of mechanisms with a constant point of input of a tool. *Stankoinstrument*, 2019, no. 4, pp. 80–83. (In Russ.).
- [13] Kheylo S.V. Kinematic problem of the spherical parallel manipulator. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2010, no. 4, pp. 29–33. (In Russ.).
- [14] Antonov A.V., Glazunov V.A. *Obratnaya zadacha o polozhenii mekhanizma parallel'noy struktury. Peredacha, obrabotka, otobrazhenie informatsii* [Reverse problem on position of parallel mechanism. Transfer, processing and display of information]. Moscow, Ekspertno-analiticheskiy tsentr Minobrnauki Rossii Publ., 2020, pp. 15–19. (In Russ.).
- [15] Kheylo S.V., Laryushkin P.A. Determination of robot range manipulators parallel structure. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2013, no. 2, pp. 27–31. (In Russ.).

Информация об авторах

ДУХОВ Андрей Валерьевич — начальник группы тестирования СВЧ микросхем и модулей. АО «НИИМА «Прогресс» (125183, Москва, Российская Федерация, проезд Черепановых, д. 54, e-mail: dukhov@me.com).

РОМАНОВ Андрей Александрович — младший научный сотрудник. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

ЕРОФЕЕВ Михаил Николаевич — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: erofeevnm@imash.ru).

КРАВЧЕНКО Игорь Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru).

НИКОЛАЕВ Алексей Владимирович — доктор технических наук, главный научный сотрудник. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: alarmoren@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Духов А.В., Романов А.А., Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Николаев А.В. Разработка и анализ механизма параллельной структуры, имеющего дугообразные направляющие с прорезями и постоянную точку ввода. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 31–38, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-31-38

Please cite this article in English as:

Dukhov A.V., Romanov A.A., Erofeev M.N., Kravchenko I.N., Nikolaev A.V. Development and Analysis of a Parallel Structure Mechanism with Slotted Arcuate Guides and a Constant Entry Point. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 1, pp. 31–38, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-31-38

Information about the authors

DUKHOV Andrey Valeryevich — Head of the Group Testing Microwave Chips and Modules. JSC Progress MRI (125183, Moscow, Russian Federation, Proyezd Cherepanovykh, Bldg. 54, e-mail: dukhov@me.com).

ROMANOV Andrey Alexandrovich — Junior Researcher. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

EROFEEV Mikhail Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Deputy Director for Research. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: erofeevnm@imash.ru).

KRAVCHENKO Igor Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Researcher. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru).

NIKOLAYEV Aleksey Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Chief Researcher. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: alarmoren@yandex.ru).