

УДК 62-523; 621.01

## Влияние различного расположения приводных кинематических пар в механизмах совместного относительного манипулирования на особые положения

**В.Н. Пащенко<sup>1</sup>, С.А. Зайков<sup>2</sup>, А.А. Романов<sup>3</sup>**<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> АО «Калугаприбор»<sup>3</sup> ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

## Influence of the drive kinematic pairs different arrangement in the combined relative manipulation mechanism on special positions

**V.N. Pashchenko<sup>1</sup>, S.A. Zaikov<sup>2</sup>, A.A. Romanov<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> JSC Kalugapribor<sup>3</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены вопросы синтеза механизмов совместного относительного манипулирования, обладающие преимуществами перед механизмами параллельной структуры. Механизм совместного относительного манипулирования включает в себя два последовательно соединенных модуля с определенным числом степеней свободы. Один модуль воспроизводит заданную траекторию, а второй — определяет ориентацию тела в подвижной системе координат и движение самой системы координат. Механизмы относительного манипулирования применяют в современных многокоординатных металлообрабатывающих станках и координатно-измерительных машинах, несущих манипуляционных системах лазер-роботов, оптических устройствах, телескопах и тренажерах, регулируемых шарнирных фермах строительных механизмов и др. Показана актуальность исследования рабочей зоны для различных вариантов расположения приводных кинематических пар на механизме, воспроизводящем заданную траекторию, так как она является одной из основных характеристик любого манипуляционного механизма. Определены особые положения предложенных вариантов, построены рабочие зоны с учетом особых положений для механизма совместного относительного манипулирования. Результаты исследования подтвердили эффективность размещения приводных кинематических пар на промежуточных звеньях, что позволило синтезировать механизм совместного относительного манипулирования с наименьшим количеством особых положений. Рассмотрены различные подходы к описанию и классификации таких положений.

EDN: YHQNRI, <https://elibrary/yhqnr>

**Ключевые слова:** механизмы совместного относительного манипулирования, особые положения, рабочая зона, математический аппарат, метод Госслена — Анджелеса, уравнения связи

The paper considers the problems in synthesizing the combined relative manipulation mechanisms providing advantages over the parallel structure mechanisms. The combined

relative manipulation mechanism includes two series-connected modules with a certain number of the degrees of freedom. The first module reproduces a given trajectory; the second determines body orientation in the moving coordinate system and motion of the coordinate system itself. Relative manipulation mechanisms are used in the modern multi-coordinate metalworking and coordinate measuring machines, laser robotics manipulation support systems, optical devices, telescopes and simulators, adjustable hinged trusses of the construction mechanisms, etc. The paper shows relevance of studying the working area for various options of positioning the drive rotary pairs on the mechanism reproducing a given trajectory, since it is one of the main characteristics of any manipulation mechanism. It specifies special provisions for the proposed options; working areas are designed taking into account special provisions for the combined relative manipulation mechanism. Study results confirm efficiency of positioning the drive rotary pairs on the intermediate links making it possible to synthesize a combined relative manipulation mechanism with the least number of the special positions. The paper considers various approaches to description and classification of such positions.

EDN: YHQNRI, <https://elibrary/yhqnr>

**Keywords:** combined relative manipulation mechanism, special position, working area, mathematical apparatus, Gosselin–Angeles method, coupling equations

Одной из основных тенденций развития современной робототехники является разработка манипуляционных механизмов на основе параллельной кинематики [1–3]. Эти механизмы обладают такими преимуществами перед механизмами последовательной структуры, как большая жесткость, легкость конструкции и повышенная скорость движения рабочего органа относительно объекта обработки [4–6].

Однако такие механизмы имеют и недостатки: относительно небольшую рабочую зону (РЗ) и наличие особых положений (ОП) [7, 8]. Одним из решений этой проблемы является организация совместного относительного манипулирования [9, 10].

Таким образом, при синтезе механизмов совместного относительного манипулирования исследование РЗ на ОП является актуальной задачей.

Различные подходы к описанию и классификации ОП приведены в работах К. Ханта, К. Госслена, Х. Анджелеса, В.А. Глазунова и других авторов [11–15].

Для определения ОП применен математический аппарат, основанный на изучении свойств матриц Якоби, используемый в методе Госслена — Анджелеса, суть которого заключается в установлении зависимостей между обобщенными скоростями в приводах и абсолютными скоростями выходного звена:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = (-\mathbf{B})\boldsymbol{\omega},$$

где  $\mathbf{A}$  — матрица частных производных от неявных функций  $F_i$  ( $i$  — номер приводной ки-

нематической пары — ПКП) по абсолютным координатам  $x$  и  $y$ ,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{pmatrix};$$

$\mathbf{v}$  — абсолютная скорость центра выходного звена,

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix};$$

$\mathbf{B}$  — матрица частных производных от неявных функций по обобщенным координатам  $\theta_i$ ,

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_2} \end{pmatrix};$$

$\boldsymbol{\omega}$  — обобщенная скорость,

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}.$$

Уравнения связи имеют неявный вид  $F_i(x, y, \theta_i) = 0$ .

О наличии или отсутствии ОП позволяют судить определители матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ : положения, в которых хотя бы один из них равен нулю, будут особыми.

Цель работы — синтезировать механизмы совместного относительного манипулирования с наименьшим числом ОП путем исследования на ОП при различном расположении ПКП.

**Постановка задачи.** В качестве объекта исследования рассмотрим механизм совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы, структурная схема которого приведена на рис. 1. Он включает в себя плоский пятизвенный механизм с двумя кинематическими цепями и дополнительной возможно-

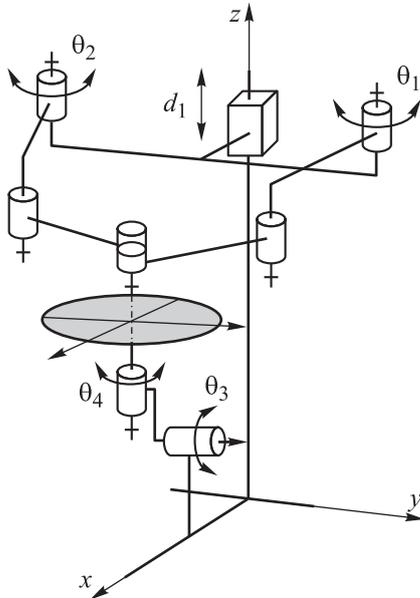


Рис. 1. Структурная схема механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы

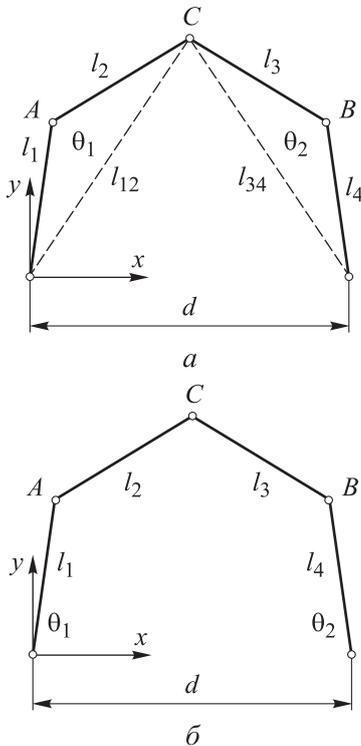


Рис. 2. Структурные схемы исследуемого механизма с верхним (а) и нижним (б) расположением ПКП

стью перемещения вдоль оси  $Oz$  (обобщенные координаты  $\theta_1, \theta_2, d_1$ ), и поворотный механизм с одной кинематической цепью (обобщенные координаты  $\theta_3, \theta_4$ ).

Так как наличие ОП механизма совместного относительного манипулирования характерно для пятизвенного механизма, будем рассматривать задачу с расположением ПКП  $\theta_1$  и  $\theta_2$  на промежуточных сочленениях (далее с верхним расположением ПКП) и основании (далее с нижним расположением ПКП), как показано на рис. 2.

**Решение поставленной задачи.** Проведем исследование на наличие ОП в пятизвенном механизме с верхним расположением ПКП (см. рис. 2, б).

Запишем уравнения связи для кинематических цепей пятизвенного механизма в виде неявных функций

$$F_1 = x^2 + (d - y)^2 - l_{12}^2 = 0;$$

$$F_2 = x^2 + y^2 - l_{34}^2 = 0,$$

где

$$l_{12} = \sqrt{x^2 + (d - y)^2} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_1};$$

$$l_{34} = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos \theta_2}.$$

После преобразований получаем

$$F_1 = x^2 + (d - y)^2 - l_1^2 - l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \theta_1 = 0;$$

$$F_2 = x^2 + y^2 - l_3^2 - l_4^2 + 2l_3l_4 \cos \theta_2 = 0.$$

Исходя из кинематики исследуемого механизма, уравнения связи представим как

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_2} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{v} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}; \quad \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}.$$

Продифференцировав уравнения связи, определяем матрицы

$$\dot{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 2x & -2(d - y) \\ 2x & 2y \end{pmatrix} \Rightarrow \det(\dot{\mathbf{A}}) = 4xd;$$

$$\dot{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} -2l_1l_2 \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & -2l_3l_4 \sin \theta_2 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \det(\dot{\mathbf{B}}) = 4l_1l_2l_3l_4 \sin \theta_1 \sin \theta_2.$$

Согласно методу Госслена — Анджелеса, ОП первого типа возникают в пятизвенном механизме с верхним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$ , что соответствует следующим случаям:

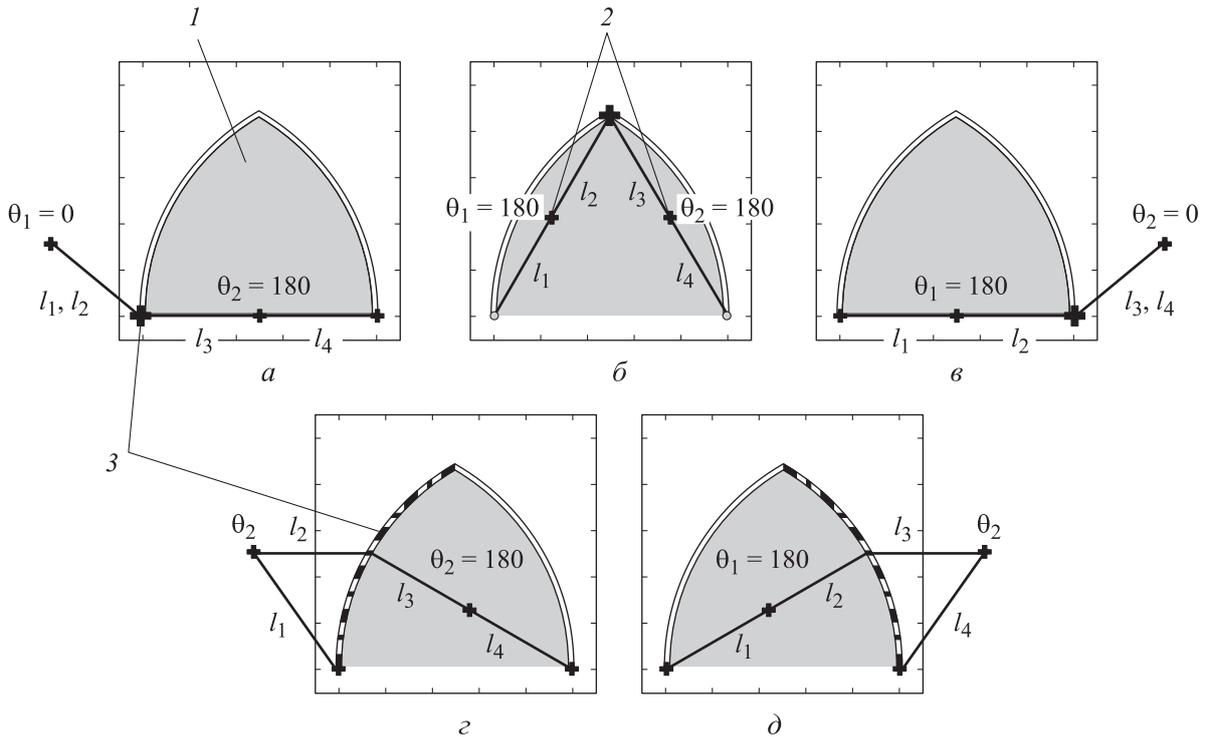


Рис. 3. Схемы пятизвенного механизма с верхним расположением ПКП с учетом ОП первого типа:  
 1 — РЗ пятизвенного механизма; 2 — ПКП; 3 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$

- 1)  $\theta_1 = 0, \theta_2 = 180$ , с наложением друг на друга звеньев  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 3, а);
- 2)  $\theta_1 = 180, \theta_2 = 180$  (рис. 3, б);
- 3)  $\theta_1 = 180, \theta_2 = 0$ , с наложением друг на друга звеньев  $l_3$  и  $l_4$  (рис. 3, в);
- 4)  $\theta_2 = 180$  (рис. 3, г);
- 5)  $\theta_1 = 180$  (рис. 3, д).

Положение выходного звена на рис. 3 отмечено крестом.

ОП второго типа возникают в пятизвенном механизме с верхним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$ , т. е. при условии, что координата выходного звена  $x$  равна нулю, как показано на рис. 4.

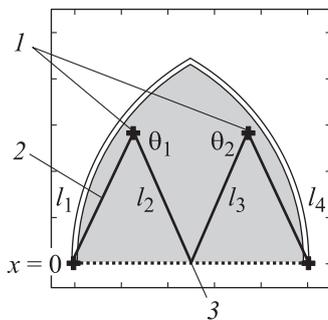


Рис. 4. Схема пятизвенного механизма с верхним расположением ПКП с учетом ОП второго типа:  
 1 — ПКП; 2 — РЗ пятизвенного механизма;  
 3 — ОП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$

ОП третьего типа возникают в пятизвенном механизме с верхним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$ , т. е. при  $x = 0$  или  $\sin \theta_1 = 180$ , или  $\sin \theta_2 = 180$ . В этом случае происходит наложение звеньев друг на друга, как показано на рис. 5.

В итоге получаем РЗ механизма совместного относительного манипулирования с учетом ОП пятизвенного механизма с верхним расположением ПКП, включая РЗ поворотного механизма, как показано на рис. 6. Видно, что ОП пятизвенного механизма не попадают в РЗ поворотного механизма, т. е. в РЗ механизма совместного относительного манипулирования отсутствуют ОП.

Проведем исследование на наличие ОП в пятизвенном механизме с нижним расположением ПКП (см. рис. 2, б).

Запишем уравнения связи

$$F_1 = (x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 - l_2^2 = 0;$$

$$F_2 = (x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 - l_3^2 = 0,$$

где  $x_C, y_C, x_A, y_A$  и  $x_B, y_B$  — координаты рабочего органа  $C$ , сочленений  $A$  и  $B$  соответственно,

$$x_A = \sin(\theta_1)l_1; y_A = d - \cos(\theta_1)l_1;$$

$$x_B = \sin(\theta_2)l_4; y_B = \cos(\theta_2)l_4.$$

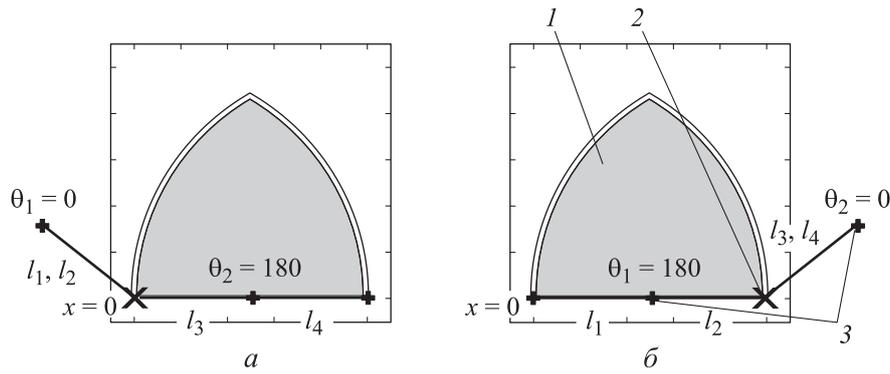


Рис. 5. Схема пятизвенного механизма с верхним расположением ПКП с учетом ОП третьего типа:  
1 — РЗ пятизвенного механизма; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$ ; 3 — ПКП

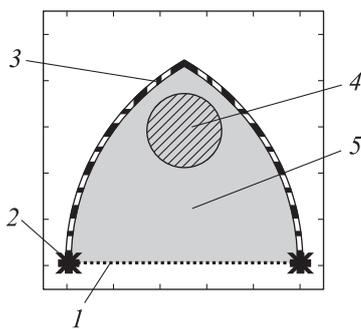


Рис. 6. Схема РЗ механизма совместного относительного манипулирования с учетом ОП:  
1 — ОП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$ ; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$  и при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$ ; 3 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$ ;  
4 — РЗ поворотного механизма;  
5 — РЗ пятизвенного механизма

Тогда имеем

$$F_1 = [x_c - l_1 \sin \theta_1]^2 + [y_c - d + l_1 \cos \theta_1]^2 - l_2^2 = 0;$$

$$F_2 = [x_c - l_4 \sin \theta_2]^2 + [y_c - d + l_4 \cos \theta_2]^2 - l_3^2 = 0.$$

Находим детерминанты матриц

$$\det(\dot{\mathbf{A}}) = 4dx + 4l_1l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) - 4l_4d \sin \theta_2 - 4l_1x \cos \theta_1 - 4l_1x \cos \theta_2 - 4l_1y \sin \theta_1 + 4l_4y \sin \theta_2;$$

$$\det(\dot{\mathbf{B}}) = 4l_1l_2 [x \cos \theta_2 - y \sin \theta_2] \times [x \cos \theta_1 - d \sin \theta_1 + y \sin \theta_1].$$

Согласно методу Госслена — Анджелеса, ОП первого типа возникают в пятизвенном механизме с нижним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$  (рис. 7). В этом случае ОП выходного

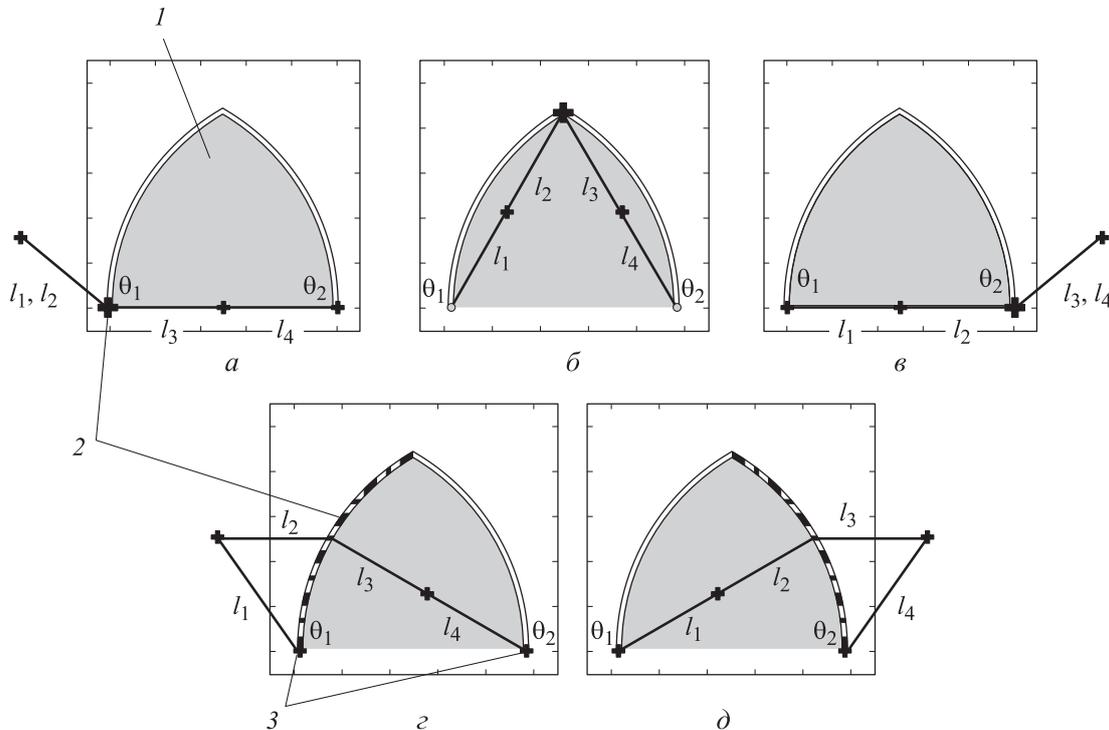


Рис. 7. Схема пятизвенного механизма с нижним расположением ПКП с учетом ОП первого типа:  
1 — РЗ пятизвенного механизма; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$ ; 3 — ПКП

звена аналогичны первому типу для механизма с верхним расположением ПКП.

ОП второго типа возникают в пятизвенном механизме с нижним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$ , как показано на рис. 8.

ОП третьего типа появляются в пятизвенном механизме с нижним расположением ПКП при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$  (рис. 9), как и в таком с верхним расположением ПКП.

В итоге получаем РЗ механизма совместного относительного манипулирования с учетом ОП пятизвенного механизма с нижним расположе-

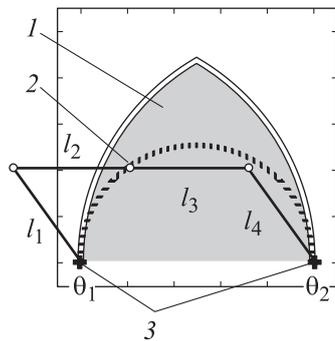


Рис. 8. Схема пятизвенного механизма с нижним расположением ПКП с учетом ОП второго типа: 1 — РЗ пятизвенного механизма; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$ ; 3 — ПКП

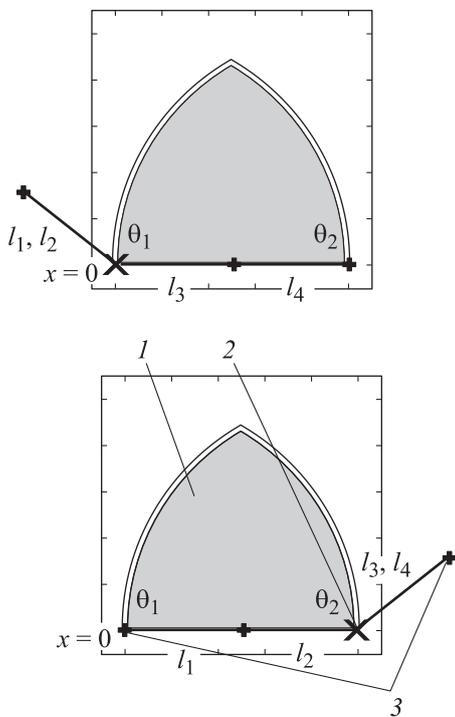


Рис. 9. Схемы пятизвенного механизма с нижним расположением ПКП с учетом ОП третьего типа: 1 — РЗ пятизвенного механизма; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$ ; 3 — ПКП

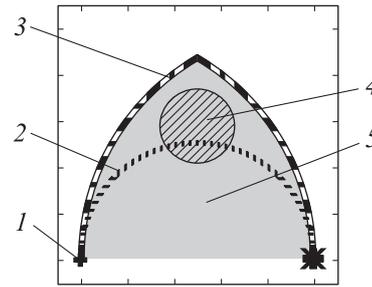


Рис. 10. Схема РЗ механизма совместного относительного манипулирования с нижним расположением ПКП с учетом ОП: 1 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$  и при  $\det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) = 0$ ; 2 — ОП при  $\det(\mathbf{A}) = 0$ ; 3 — ОП при  $\det(\mathbf{B}) = 0$ ; 4 — РЗ поворотного механизма; 5 — РЗ пятизвенного механизма

нием ПКП, включая РЗ поворотного механизма, как показано на рис. 10. Видно, что ОП пятизвенного механизма частично попадают в РЗ поворотного механизма. Это позволяет заключить, что такой вариант расположения ПКП является менее предпочтительным, чем предыдущий, так как в РЗ механизма совместного относительного манипулирования в заданной конфигурации присутствуют ОП.

### Выводы

1. На основе метода Госслена — Анджелеса рассмотрен процесс нахождения ОП для механизма совместного относительного манипулирования, который включает в себя механизм, воспроизводящий заданную траекторию в виде пятизвенного механизма с дополнительной степенью свободы, и поворотный механизм, определяющий ориентацию тела в подвижной системе координат.

2. Предложены два варианта расположения ПКП на механизме, воспроизводящем заданную траекторию. Для этих вариантов определены ОП и построены РЗ механизма совместного относительного манипулирования с учетом ОП.

3. Установлено, что вариант расположения ПКП на промежуточных звеньях является более предпочтительным, так как в РЗ механизма совместного относительного манипулирования в заданной конфигурации отсутствуют ОП.

4. Полученные результаты удовлетворяют заданному требованию (синтезировать механизм совместного относительного манипулирования с наименьшим количеством ОП) и могут быть использованы для решения задачи синтеза подобных механизмов.

## Литература

- [1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике. *Доклады академии наук*, 2014, т. 459, № 4, с. 428–431, doi: <https://doi.org/10.7868/S086956521434009X>
- [2] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 94 с.
- [3] Пащенко В.Н., Романов А.В., Власовский А.И. и др. Определение зависимости манипулятивности шестизвенного механизма от его геометрических параметров методами численного моделирования. *Электронные информационные системы*, 2020, № 1, с. 14–20.
- [4] Глазунов В.А., Чунихин А.Ю. Развитие исследований механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 37–43.
- [5] Глазунов В.А., ред. *Механизмы перспективных робототехнических систем*. Москва, Техносфера, 2020. 296 с.
- [6] Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. и др. Оценка решения задач кинематики в системе управления механизмом с параллельной кинематикой космического назначения на базе гексапода. *Оборонная техника*, 2017, № 9, с. 29–37.
- [7] Хейло С.В., Глазунов В.А., Ширинкин М.А. и др. Возможные применения механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2013, № 5, с. 19–24.
- [8] Глазунов В.А., Брио С., Аракелян В. и др. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2008, № 2, с. 90–100.
- [9] Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Терехова А.Н. и др. Об особенностях устройств относительного манипулирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2007, № 2, с. 77–85.
- [10] Пащенко В.Н., Пащенко В.В., Тимошенко А.А. *Расчет погрешности позиционирования выходного звена механизма совместного относительного манипулирования*. МИКМУС-2018. Москва, ИМАШ РАН, 2018, с. 498–501.
- [11] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Lachikhin A. et al. Positioning error calculation of the relative manipulation mechanism output link. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. *Springer*, 2020, pp. 197–208, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_17)
- [12] Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2004, № 2, с. 78–84.
- [13] Глазунов В.А., Аракелян В., Брио С. и др. Скоростные и силовые критерии близости к сингулярностям манипуляторов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 3, с. 10–17.
- [14] Аракелян В., Брио С., Глазунов В.А. Исследование особых положений манипулятора с параллельной структурой «ПАМИНСА». *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2006, № 1, с. 80–88.
- [15] Pashchenko V., Artemyev A., Antonov A. et al. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. *Springer*, 2020, pp. 253–263, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_21)

## References

- [1] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Handling mechanisms of parallel structure and their application in modern equipment. *Doklady akademii nauk*, 2014, vol. 459, no. 4, pp. 428–431, doi: <https://doi.org/10.7868/S086956521434009X> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 582–585, doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335814120015>)
- [2] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury* [Spatial mechanisms with parallel structure]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 94 p. (In Russ.).

- [3] Pashchenko V.N., Romanov A.V., Vlasovskiy A.I. et al. Determination of the relationship between manipulative capability of a six-member mechanism and its geometric parameters by numerical simulations. *Elektronnyye informatsionnye sistemy* [Electronic Information Systems], 2020, no. 1, pp. 14–20. (In Russ.).
- [4] Glazunov V.A., Chunikhin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 3, pp. 37–43. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>)
- [5] Glazunov V.A., ed. *Mekhanizmy perspektivnykh robototekhnicheskikh sistem* [mechanisms of prospective robotic systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2020. 296 p. (In Russ.).
- [6] Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Slobodzyan N.S. et al. Kinematics tasks estimation in control system of space application hexapod based on parallel kinematics mechanism. *Oboronnaya tekhnika*, 2017, no. 9, pp. 29–37. (In Russ.).
- [7] Kheylo S.V., Glazunov V.A., Shirinkin M.A. et al. Possible applications of mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 5, pp. 19–24. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2013, vol. 42, no. 5, pp. 359–363, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618813050063>)
- [8] Glazunov V.A., Brio S., Arakelyan V. et al. Development of manipulators with a parallel-cross structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2008, no. 2, pp. 90–100. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2008, vol. 37, no. 8, pp. 176–185, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618808020143>)
- [9] Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Terekhova A.N. et al. On specific features of relative manipulators. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2007, no. 2, pp. 77–85. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2007, vol. 36, no. 2, pp. 170–177, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618807020124>)
- [10] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Timoshenko A.A. [Calculation of the positioning error of the output link of the relative manipulation mechanism]. MIKMUS-2018. Moscow, IMASH RAN Publ., 2018, pp. 498–501. (In Russ.).
- [11] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Lachikhin A. et al. Positioning error calculation of the relative manipulation mechanism output link. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, 2020, pp. 197–208, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_17)
- [12] Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E. Control of mechanisms of parallel structure at transition through special positions. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2004, no. 2, pp. 78–84. (In Russ.).
- [13] Glazunov V.A., Arakelyan V., Brio S. et al. Speed and force criteria for the proximity to singularities of parallel structure manipulators. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2012, no. 3, pp. 10–17. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2012, vol. 41, no. 3, pp. 194–199, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618812030041>)
- [14] Arakelyan V., Brio S., Glazunov V.A. A study of the special positions of a manipulator with a parallel ‘PAMINSA’ structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2006, no. 1, pp. 80–88. (In Russ.).
- [15] Pashchenko V., Artemyev A., Antonov A. et al. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, 2020, pp. 253–263, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_21)

Статья поступила в редакцию 14.11.2024

## Информация об авторах

**ПАЩЕНКО Василий Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Мехатроника и робототехнические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, ул. Баженова, д. 2, e-mail: pashenkovn@inbox.ru).

**ЗАЙКОВ Сергей Александрович** — инженер-конструктор. АО «Калугаприбор» (248021, Калуга, Российская Федерация, ул. Московская, д. 249, e-mail: buka.funf@gmail.com).

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

## Information about the authors

**PASHCHENKO Vasily Nikolaevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head, Department of Mechatronics and Robotic Systems. Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenova St., Bldg. 2, e-mail: pashenkovn@inbox.ru).

**ZAIKOV Sergei Aleksandrovich** — Design Engineer. JSC Kalugapribor (248021, Kaluga, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 249 e-mail: buka.funf@gmail.com).

**ROMANOV Andrey Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пащенко В.Н., Зайков С.А., Романов А.А. Влияние различного расположения приводных кинематических пар в механизмах совместного относительного манипулирования на особые положения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 12–20.

### Please cite this article in English as:

Pashchenko V.N., Zaikov S.A., Romanov A.A. Influence of the drive kinematic pairs different arrangement in the combined relative manipulation mechanism on special positions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 12–20.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник Н.В. Быкова

### «Газовая динамика»

Рассмотрены основные термодинамические свойства газов, существенные для газовой динамики; теория одномерных стационарных течений в каналах переменного сечения, в том числе соплах реактивных двигателей; теория прямого скачка уплотнения; теория одномерных нестационарных движений с образованием ударных волн и волн разрежения; теория плоских и пространственных течений идеального газа, а также вопросы влияния вязкости, теплопроводности, турбулентности и химических реакций на газовые потоки.

Для студентов, обучающихся по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», а также для изучающих газовую динамику и механику жидкости и газа. Может представлять интерес для научных работников и инженеров, в том числе и для самообразования.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>