

УДК 621.01; 007.52

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-35-40

# Структурный и кинематический анализ изоморфного механизма параллельной структуры для поступательных перемещений выходного звена

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

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

## Structural and Kinematic Analysis of the Isomorphic Mechanism of a Parallel Structure for Translational Movements of the Output Link

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

Institution of Russian Academy of Sciences Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute

Рассмотрен механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы, обладающий свойством изоморфности. Передаточное отношение между перемещениями в приводе и выходного звена является постоянной величиной. Это обусловлено тем, что все линейные двигатели расположены параллельно соответствующим осям неподвижной системы координат, и в каждой кинематической цепи есть две вращательные кинематические пары, оси которых параллельны осям соответствующих линейных двигателей. Кроме того, каждая кинематическая цепь имеет две диады, обеспечивающие линейное перемещение ползуна, приводимого в движение винтом, вращаемым соответствующим двигателем. На основе разработанной трехмерной модели выполнен структурный анализ механизма с определением числа степеней свободы и решением задачи о его положениях. Предложенный механизм может быть применен во многих сферах деятельности промышленных предприятий, в том числе в аддитивных технологиях вследствие роста автоматизации, роботизации и развития искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** механизм параллельной структуры, структурный анализ, свойство изоморфности, выходное звено, линейный двигатель, рабочая зона

The article considers the mechanism of a parallel structure with three degrees of freedom, having the property of isomorphism. The ratio between the movements in the drive and the movements of the output link is constant. This is due to the fact that all linear drivers are located parallel to the corresponding axes of the fixed coordinate system, and in each kinematic chain there are two rotational kinematic pairs, the which axes are parallel to the axes of the corresponding linear drivers. In addition, each kinematic chain has two dyads that provide linear motion of the linear driver rod. On the basis of the developed three-dimensional model, a structural analysis of the mechanism with determination of the number of degrees of freedom and solving the problem of its positions was carried out. The proposed mechanism can be applied in many areas of activity of industrial enterprises, including additive technologies due to the growth of automation, robotization and the development of artificial intelligence.

**Keywords:** mechanism of a parallel structure, structural analysis, isomorphism property, output link, linear drive, operating area

Механизмы параллельной структуры (МПС) обладают такими достоинствами, как высокая точность позиционирования и большая грузоподъемность [1–8]. Однако они имеют недостатки, касающиеся особых положений и кинематической связанности приводов. Любое перемещение выходного звена (например, прямолинейное) требует согласованного движения всех приводов, причем передаточные отношения промежуточных положений различаются.

Существуют некоторые решения, позволяющие обеспечить постоянство передаточного отношения между приводом и выходным звеном. Наиболее известное из них — робот Izoglide, предложенный К. Конгом и К. Госленом [9–11]. В основу такого МПС положена идея, что все линейные двигатели расположены параллельно осям неподвижной системы координат, а каждая кинематическая цепь содержит две вращательные кинематические пары с осями, параллельными осям соответствующих линейных двигателей.

В Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработаны МПС, развивающие эту идею [12–14]. Вместо поступательной кинематической пары в каждой кинематической цепи введены две диады, обеспечивающие поступательное перемещение ползуна, приводимого в движение винтом, вращаемым соответствующим приводом [15].

Цель работы — провести структурный анализ таких МПС на основе разработанной трехмерной модели с определением числа степеней свободы, а также решить задачу о положениях механизма.

**Структурный анализ механизма с тремя степенями свободы, обладающего свойством изоморфности.** Изоморфный МПС осуществляет поступательные перемещения выходного звена по трем осям. Трехмерная модель изоморфного МПС, созданная на основе робота Izoglide, приведена на рис. 1.

Для проведения структурного анализа рассматриваемого МПС воспользуемся его кинематической схемой (рис. 2). Так как приводные узлы и сопряженные с ними кинематические цепи аналогичны во всех трех осях, кинематическая схема приведена для одной цепи.

Определим число степеней свободы МПС в целом. Предполагаем, что механизм имеет три степени свободы, так как перемещение выход-

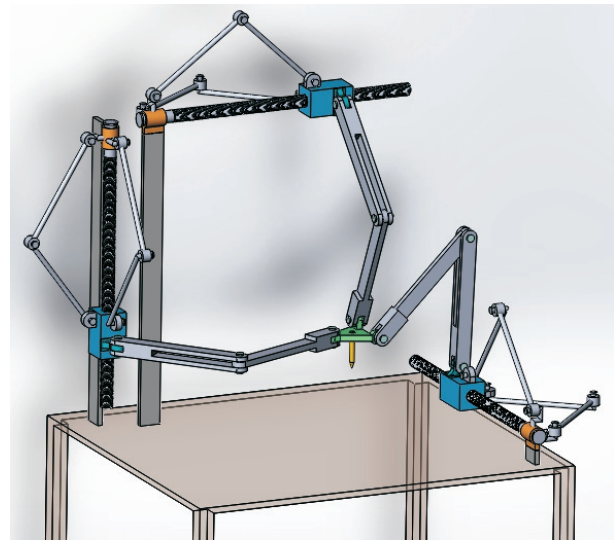


Рис. 1. Трехмерная модель изоморфного МПС, созданная на основе робота Izoglide

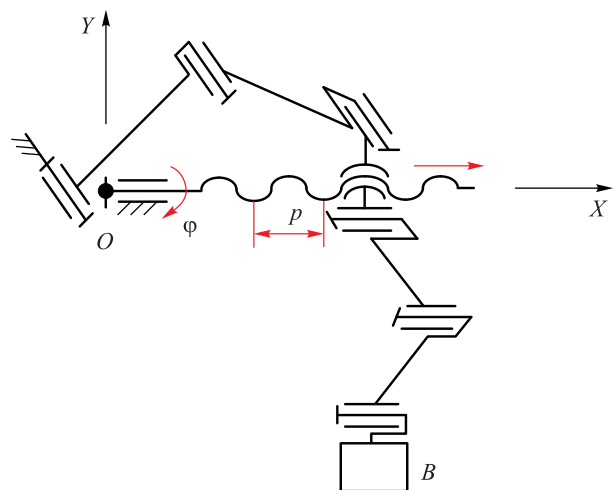


Рис. 2. Кинематическая схема одной цепи рассматриваемого МПС:

$\varphi$  — угол поворота вращательного двигателя;  
 $p$  — шаг винтовой передачи

ного звена происходит по трем осям. Число степеней свободы МПС рассчитаем по формуле Сомова — Малышева для пространственного механизма

$$W = 6(n-1) - 5p_5 - 4p_4,$$

где  $n$  — число звеньев;  $p_5$  и  $p_4$  — число пар пятого и четвертого класса.

Считаем, что ползун и вращательную пару, связанную с ним, можно рассматривать как цилиндрическую пару четвертого класса. В соответствии с этим общее число степеней свободы равно нулю:

$$W = 6(n-1) - 5p_5 - 4p_4 = 6(8-1) - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 3 = 0.$$

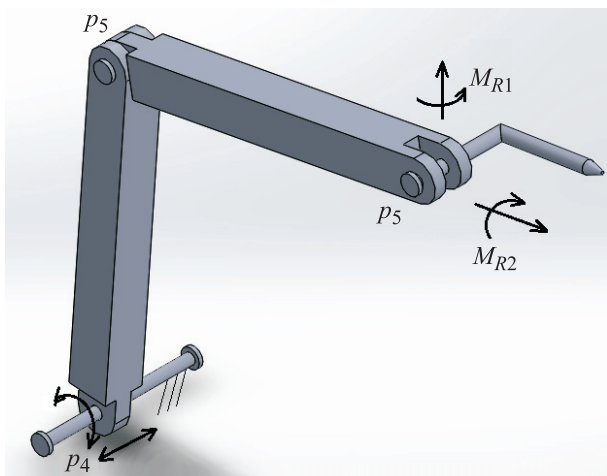


Рис. 3. Кинематическая цепь манипулятора Izoglide

Однако при рассмотрении связей, налагаемых каждой кинематической цепью, необходимо учесть два момента  $M_{R1}$  и  $M_{R2}$ , препятствующих двум вращениям (рис. 3).

Матрица плюккеровых координат связей, налагаемых кинематическими цепями, определяется как

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & r_{11x}^0 & r_{11y}^0 & r_{11z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{12x}^0 & r_{12y}^0 & r_{12z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{21x}^0 & r_{21y}^0 & r_{21z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{22x}^0 & r_{22y}^0 & r_{22z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{31x}^0 & r_{31y}^0 & r_{31z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{32x}^0 & r_{32y}^0 & r_{32z}^0 \end{pmatrix}$$

и представлена шестью плюккеровыми координатами, одни из которых (1–3 столбцы) — проекции вектора на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а другие (4–6 столбцы) — проекции момента относительно начала координат на те же координатные оси.

Таким образом, имеем матрицу размером  $6 \times 6$ , в которой независимыми являются только три строки (ранг равен трем), поэтому налагаются три связи — три момента, препятствующие любым возможным вращениям. Итак, исследуемый МПС имеет три степени свободы — три поступательных движения выходного звена.

Необходимо учесть, что при наличии вращательной, винтовой и поступательной кинематических пар, расположенных соосно таким образом, что вращательная кинематическая пара является приводной, число степеней свободы описывается выражением

$$W = 2(n - 1) - p_5.$$

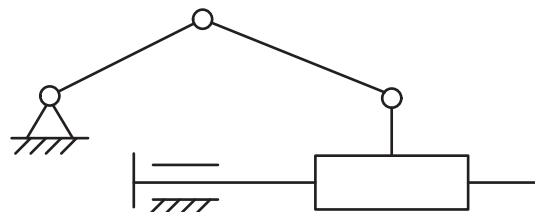


Рис. 4. Кинематическая схема плоского механизма

В каждой кинематической цепи изоморфного МПС есть три неподвижные кинематические пары. При этом получаем частичную кинематическую цепь с одной степенью свободы (см. рис. 2):

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

где  $n = 3$ ;  $p_5 = 3$ .

Таким образом, имеем аналогичную ситуацию, когда число степеней свободы механизма в целом равно трем. Введены две диады, обеспечивающие поступательное перемещение ползуна, приводимого в движение винтом, вращаемым соответствующим приводом.

Дополнительно в схему введены две диады — два аналогичных плоских механизма, расположенных в перпендикулярных плоскостях. Кинематическая схема одного из плоских механизмов приведена на рис. 4.

Число степеней свободы одного плоского механизма

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

где  $n = 4$ ;  $p_5 = 4$ .

Движения диад по одной прямой не противоречат друг другу и соответствуют наличию одной поступательной кинематической пары. Конструкция обеспечивает жесткость всего манипулятора и перемещение соответствующего звена только в одной плоскости. При этом число степеней свободы останется равным трем.

**Решение задачи о положениях механизма для трех кинематических цепей.** Рассмотрим одну из цепей механизма, кинематическая схема которой приведена на рис. 2. Как видно из схемы, выходное звено перемещается поступательно вдоль оси  $X$  в одной плоскости посредством винтовой передачи.

В рассматриваемом МПС решение обратной задачи о положениях позволяет определить угол поворота двигателя в зависимости от координаты положения выходного звена, совпа-

дающей с таковой для ползуна в системе координат  $XOY$ . При этом решение, найденное для одной кинематической цепи, аналогично для двух других.

Угол поворота двигателя определяется выражением

$$\varphi = x/p,$$

где  $x$  — координата положения ползуна на оси  $X$ ;  $p$  — шаг винтовой кинематической пары.

Для положения выходного звена в точке  $B$  (см. рис. 2) с координатами  $x = 415$  мм,  $y = 635$  мм,  $z = 270$  мм и шагом винтовой кинематической пары  $p = 4$  мм получаем следующие углы поворотов двигателей:

$$\varphi_1 = x/p = 415/4 = 103,75^\circ;$$

$$\varphi_2 = y/p = 635/4 = 158,75^\circ;$$

$$\varphi_3 = z/p = 270/4 = 67,5^\circ.$$

## Выводы

1. Выполнен структурный анализ МПС с тремя степенями свободы, обладающего свойством изоморфности.

2. Разработана трехмерная модель манипулятора, позволяющая анализировать движения составных частей механизма и положение выходного звена в пространстве.

3. Определено число степеней свободы МПС в целом, равное трем.

4. Решена задача о положениях, аналогичная для каждой кинематической цепи, и связывающая угол поворота двигателя с положением выходного звена.

5. Проведенное исследование может быть продолжено в направлении развития технических характеристик, в частности, увеличения числа степеней свободы, расширения рабочей зоны при сохранении габаритных размеров конструкции.

## Литература

- [1] Gough V.E. Contribution to discussion to papers on research in automobile stability and control and in tyre performance. *Proc. Autom. Div. Inst. Mech. Eng.*, 1956, vol. 57, pp. 392–396.
- [2] Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1965, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, doi: [https://doi.org/10.1243%2FPIIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243%2FPIIME_PROC_1965_180_029_02)
- [3] 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>
- [4] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulations*. Kluwer, 2004. 412 p.
- [5] Parenti-Castelli V., Innocenti C. Direct displacement analysis for some classes of spatial parallel mechanisms. *Proc. 8<sup>th</sup> CISM IFToMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Poland, Cracow, 1990, pp. 123–130.
- [6] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. *Справочник. Инженерный журнал. Приложение*, 2015, № 11, с. 1–16.
- [7] Глазунов В.А. *Современные проблемы науки о машинах*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2016. 64 с.
- [8] Глазунов В.А., Духов А.В., Шептунов С.А. и др. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине. *Качество. Инновации. Образование*, 2016, № S2, с. 84–87.
- [9] Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., et al. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines Int. Conf.* Germany, Chemnitz, 2004, pp. 595–610.
- [10] Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [11] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of linear translational parallel manipulators. In: *Advances in robot kinematics — theory and applications*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 411–420.
- [12] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 95 с.
- [13] Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., et al. Structural synthesis of spatial 1-coordinate mechanisms with additional links for technological robots. In: *Advances in artificial systems for medicine and education II*. Springer, 2019, pp. 683–691.

- [14] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, робототехника. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 5, с. 16–25.
- [15] Ганиев Р.Ф., Касилов В.П., Глазунов В.А. и др. *Пространственный механизм со стабилизирующими кинематическими цепями*. Патент РФ 133045. Заявл. 04.04.2013, опубл. 10.10.2013.

## References

- [1] Gough V.E. Contribution to discussion to papers on research in automobile stability and control and in tyre performance. *Proc. Autom. Div. Inst. Mech. Eng.*, 1956, vol. 57, pp. 392–396.
- [2] Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1965, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, doi: [https://doi.org/10.1243%2FPIIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243%2FPIIME_PROC_1965_180_029_02)
- [3] 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>
- [4] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulations*. Kluwer, 2004. 412 p.
- [5] Parenti-Castelli V., Innocenti C. Direct displacement analysis for some classes of spatial parallel mechanisms. *Proc. 8<sup>th</sup> CISM IFToMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Poland, Cracow, 1990, pp. 123–130.
- [6] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Actual problems of machines science and ways of their decision. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. Prilozhenie* [Handbook. an Engineering Journal with Appendix], 2015, no. 11, pp. 1–16 (in Russ.).
- [7] Glazunov V.A. *Sovremennyye problemy nauki o mashinakh* [Modern issues of machine science]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2016. 64 p.
- [8] Glazunov V.A., Dukhov A.V., Sheptunov S.A., et al. Manipulation mechanisms of parallel structure, and some of their applications in medicine. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2016, no. S2, pp. 84–87 (in Russ.).
- [9] Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., et al. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines Int. Conf.* Chemnitz, Germany, 2004, pp. 595–610.
- [10] Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [11] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of linear translational parallel manipulators. In: *Advances in robot kinematics — theory and applications*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 411–420.
- [12] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 95 p.
- [13] Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., et al. Structural synthesis of spatial 1-coordinate mechanisms with additional links for technological robots. In: *Advances in artificial systems for medicine and education II*. Springer, 2019, pp. 683–691.
- [14] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 5, pp. 16–25. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>)
- [15] Ganiev R.F., Kasilov V.P., Glazunov V.A., et al. *Prostranstvennyy mekhanizm so stabiliziruyushchimi kinematicheskimi tsepyami* [Spatial mechanism with stabilizing kinematic links]. Patent RU 133045. Appl. 04.04.2013, publ. 10.10.2013.

Статья поступила в редакцию 11.04.2021

## Информация об авторах

**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).

**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).

**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

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

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

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

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

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Едакина Т.В., Едакин А.И., Самойлова В.В., Рамжаев В.С. Структурный и кинематический анализ изоморфного механизма параллельной структуры для поступательных перемещений выходного звена. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 35–40, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-35-40

### Please cite this article in English as:

Edakina T.V., Edakin A.I., Samoilova V.V., Ramzhaev V.S. Structural and Kinematic Analysis of the Isomorphic Mechanism of a Parallel Structure for Translational Movements of the Output Link. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 35–40, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-35-40