

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.86-182.7

Структурный синтез механизмов параллельной структуры, содержащих кинематические цепи, налагающие связи на движение выходного звена

Е.В. Диденко¹, В.Г. Певнев¹, С.М. Демидов²

¹ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»

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

Structural synthesis of the parallel structure mechanisms containing kinematic chains that impose connections on the output link motion

E.V. Didenko¹, V.G. Pevnev¹, S.M. Demidov²

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "RSU of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin"

² Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov Russian Academy of Sciences

Механизмы параллельной структуры, имеющие много достоинств, отличается то, что выходное звено связано с основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых содержит привод или налагает некоторое число связей на движение выходного звена. Такие механизмы воспринимают нагрузку как пространственные фермы, что обуславливает повышенные показатели по точности и грузоподъемности. С учетом перспективности применения механизмов параллельной структуры в различных областях промышленности рассмотрен структурный синтез таких механизмов с одной и двумя степенями свободы. Синтезированные механизмы содержат несколько приводных кинематических цепей и одну кинематическую цепь, накладывающую ограничение на движение выходного звена, чем обусловлено реализуемое число степеней свободы. Основываясь на полученных результатах, можно синтезировать все возможные структурные схемы механизмов параллельной структуры в соответствии с заданными начальными условиями.

EDN: UGBSDI, <https://elibrary/ugbsdi>

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, одна степень свободы, плоское движение, кинематическая цепь, налагаемые связи

Parallel structure mechanisms are characterized by many advantages. They are distinguished by the fact that the output link is connected to the base by several kinematic chains; each of them contains a drive or imposes a certain number of connections on the output link motion. Such mechanisms perceive load as the spatial trusses, which determines the increased indicators in accuracy and load capacity. Taking into account the prospects of using parallel structure mechanisms in various industry areas, the paper considers structural

design of such mechanisms with one and two degrees of freedom. The synthesized mechanisms contain several drive kinematic chains and one kinematic chain imposing restriction on the output link motion, which determines the implemented number of degrees of freedom. Based on the obtained results, synthesizing all possible structural schemes of the parallel structure mechanisms becomes possible in accordance with the specified initial conditions.

EDN: UGBSDI, <https://elibrary/ugbsdi>

Keywords: parallel structure mechanism, one degree of freedom, planar motion, kinematic chain, imposed connections

В настоящее время широко известны механизмы параллельной структуры (МПС), которые имеют несколько кинематических цепей (КЦ), соединяющих основание с выходным звеном (ВЗ) [1–14]. Так как все двигатели установлены на основании, нет необходимости в звеньях, обладающих высокой материалоемкостью, что снижает динамические нагрузки.

Хорошо изучен МПС, совершающий плоские движения по трем степеням свободы и имеющий три КЦ [1–4, 9, 11–13, 15]. Однако вопросам синтеза МПС с меньшим числом степеней свободы уделено недостаточно внимания.

Рассмотрим МПС, где ВЗ соединено с основанием цепями, содержащими приводы (приводными КЦ), и одной КЦ, у которой число степеней свободы не более шести (рис. 1) [8, 9].

При отсутствии локальных внутренних подвижностей такая КЦ налагает связи на движение ВЗ, число которых определяется выражением

$$D = -6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5, \quad (1)$$

где n — число подвижных звеньев в КЦ; p_1, \dots, p_5 — число одно-, ..., пятиподвижных кинематических пар (КП).

Если $D = 0$, то присоединяемая КЦ не налагает связей на движение ВЗ. Если $D > 0$, то добавление КЦ приводит к уменьшению числа

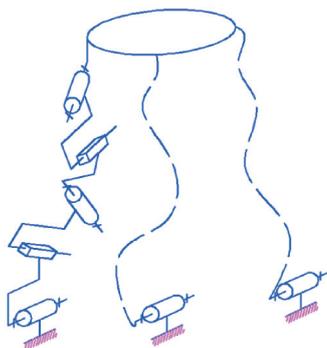


Рис. 1. Внешний вид МПС

степеней свободы на число n . Если $D < 0$, то в присоединяемой КЦ имеется локальная внутренняя подвижность, не связанная с перемещением ВЗ [8, 9, 14].

Рассмотрим различные варианты КЦ с числом налагаемых связей $D = 0$ (рис. 2). Пусть КЦ состоит из двух звеньев ($n = 2$) и трех КП: одно- ($p_1 = 1$), двух- ($p_2 = 1$) и трехподвижной ($p_3 = 1$). По формуле (1) определяем число налагаемых связей такой КЦ на движение ВЗ

$$D = -6 \cdot 2 + 5 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 0.$$

Рассмотрим МПС, у которых $D > 0$, а структурная формула имеет вид

$$W = 6 - \sum_{i=1}^k D_i = 6 + \sum_{i=1}^k (6n_i - 5p_{1i} - 4p_{2i} - 3p_{3i} - 2p_{4i} - p_{5i}),$$

где W — число степеней свободы МПС; k — число приводных КЦ; n_i — число промежуточных звеньев в i -й КЦ; p_{1i}, \dots, p_{5i} — число одно-, ..., пятиподвижных КП в i -й КЦ.

С помощью структурной формулы (1) выполнен синтез МПС, состоящих из $(k - 1)$ приводных КЦ и одной КЦ, налагающей число D связей на движение ВЗ. Число степеней свободы в синтезированных механизмах $W = 1 \dots 6$, число приводных КЦ $k = 1 \dots 6$.

Рассмотрим механизмы с одной степенью свободы ($W = 1$), состоящие из трех подвижных звеньев ($n = 3$): двух одноподвижных КП ($p_1 = 2$), одной двухподвижной КП ($p_2 = 1$) и одной трехподвижной КП ($p_3 = 1$).

Для расчета числа степеней свободы синтезируемых МПС воспользуемся формулой Сомова — Малышева, записав ее с использованием подвижности КП:

$$W = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5. \quad (2)$$

После подстановки исходных данных для синтеза в формулу (2) получаем

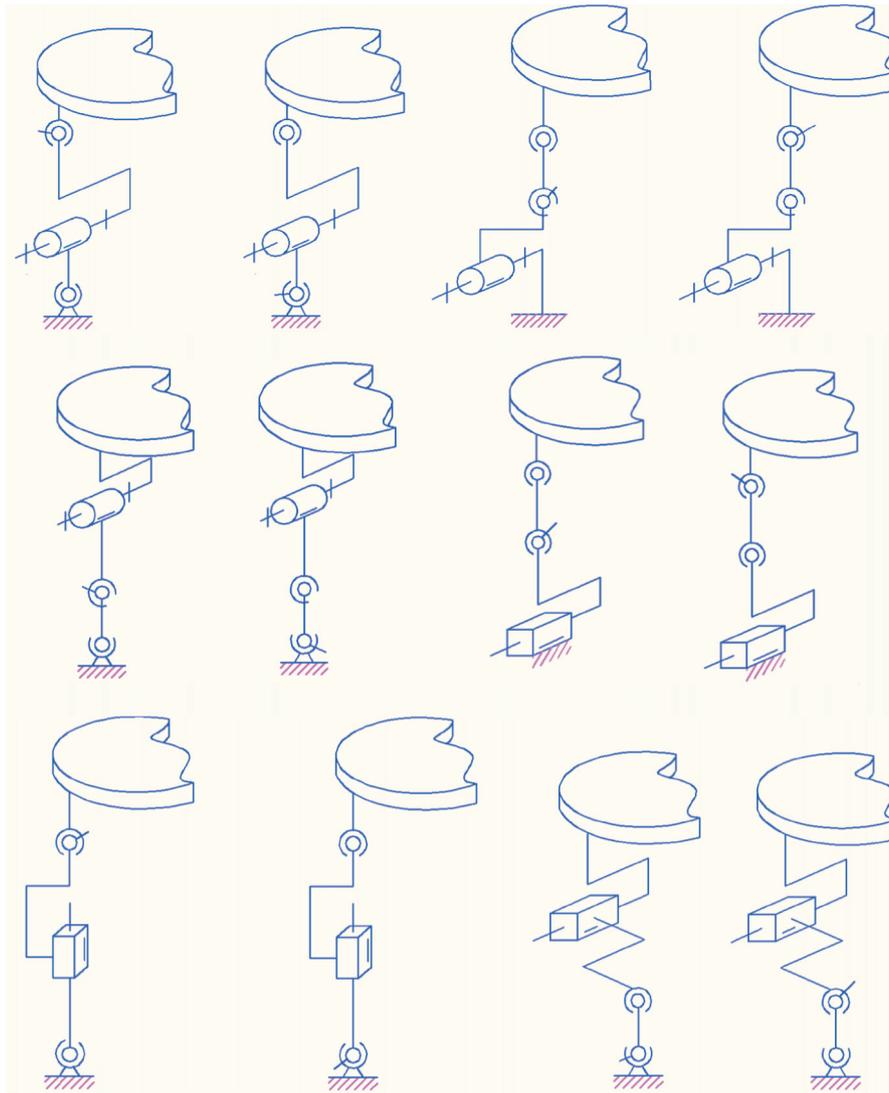


Рис. 2. Кинематические цепи с числом налагаемых связей $D = 0$

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

По формуле (1) определяем число налагаемых связей на движение ВЗ

$$D = 6 - W = 6 - 1 = 5.$$

Таким образом, синтезированные КЦ обладают одной степенью свободы. Исходя из возможности реализации поступательного или вращательного движения в приводной КЦ, используем только одноподвижные поступательные, вращательные или винтовую КП. Следовательно, можно создать шесть механизмов — три с поступательным движением ВЗ (x, y, z) и три с вращательным ($\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$).

Примеры возможных синтезированных МПС с одной степенью свободы и приводными КЦ разного вида приведены на рис. 3.

Синтезируем МПС с двумя степенями свободы ($W = 2$), состоящие из шести подвижных звеньев ($n = 6$), четырех одноподвижных КП ($p_1 = 4$), двух двухподвижных КП ($p_2 = 2$) и двух трехподвижных КП ($p_3 = 2$).

После подстановки исходных данных для синтеза в формулу (2) получаем

$$W = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 4 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 2 - 2 \cdot 0 - 0 = 2.$$

Число налагаемых связей на движение ВЗ определяем по формуле

$$D = 6 - W = 6 - 2 = 4.$$

Следовательно, синтезированные МПС должны иметь две степени свободы, а КЦ специального вида накладывать четыре связи на движение ВЗ. В приводных КЦ используем одну из их синтезированных модификаций

(см. рис. 2), а в составе КЦ, налагающей связи на движение ВЗ, — поступательные и/или вращательные КП.

Можно создать тридцать шесть возможных механизмов: девять МПС, реализующих два вращательных движения на ВЗ

$$(\varphi_x\varphi_x, \varphi_x\varphi_y, \varphi_x\varphi_z, \varphi_y\varphi_x, \varphi_y\varphi_y, \varphi_y\varphi_z, \varphi_z\varphi_x, \varphi_z\varphi_y, \varphi_z\varphi_z),$$

девять МПС, совершающих два поступательных движения

$$(x_x, x_y, x_z, y_x, y_y, y_z, z_x, z_y, z_z),$$

и восемнадцать МПС, выполняющих одно поступательное и одно вращательное движение ВЗ

$$(x\varphi_x, x\varphi_y, x\varphi_z, \varphi_x x, \varphi_y x, \varphi_z x, y\varphi_x, y\varphi_y, y\varphi_z, \varphi_y y, \varphi_z y, z\varphi_x, z\varphi_y, z\varphi_z, \varphi_x z, \varphi_y z, \varphi_z z).$$

Следует учесть, что при реализации нескольких поступательных движений, если они происходят на параллельных осях, уменьшается число степеней свободы ВЗ, так как несколько звеньев будут двигаться как единое целое. Следовательно, три механизма не будут соот-

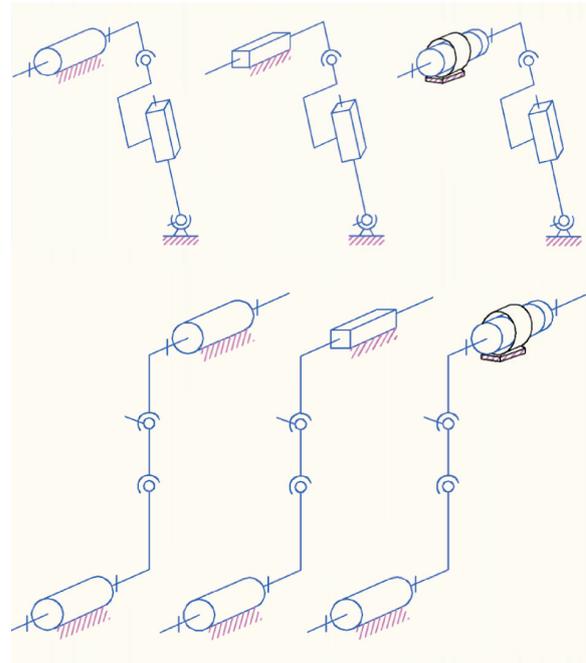


Рис. 3. Схемы МПС с одной степенью свободы и приводными КЦ разного вида

Возможные движения ВЗ для механизмов с двумя степенями свободы

Вид движения	Координаты ВЗ
ВВ	$\varphi_x\varphi_x, \varphi_x\varphi_y, \varphi_x\varphi_z, \varphi_y\varphi_x, \varphi_y\varphi_y, \varphi_y\varphi_z, \varphi_z\varphi_x, \varphi_z\varphi_y, \varphi_z\varphi_z$
ПП	$x_y, x_z, y_x, y_z, z_x, z_y$
ПВ	$x\varphi_x, x\varphi_y, x\varphi_z, y\varphi_x, y\varphi_y, y\varphi_z, z\varphi_x, z\varphi_y, z\varphi_z$
ВП	$\varphi_x x, \varphi_y x, \varphi_z x, \varphi_x y, \varphi_y y, \varphi_z y, \varphi_x z, \varphi_y z, \varphi_z z$

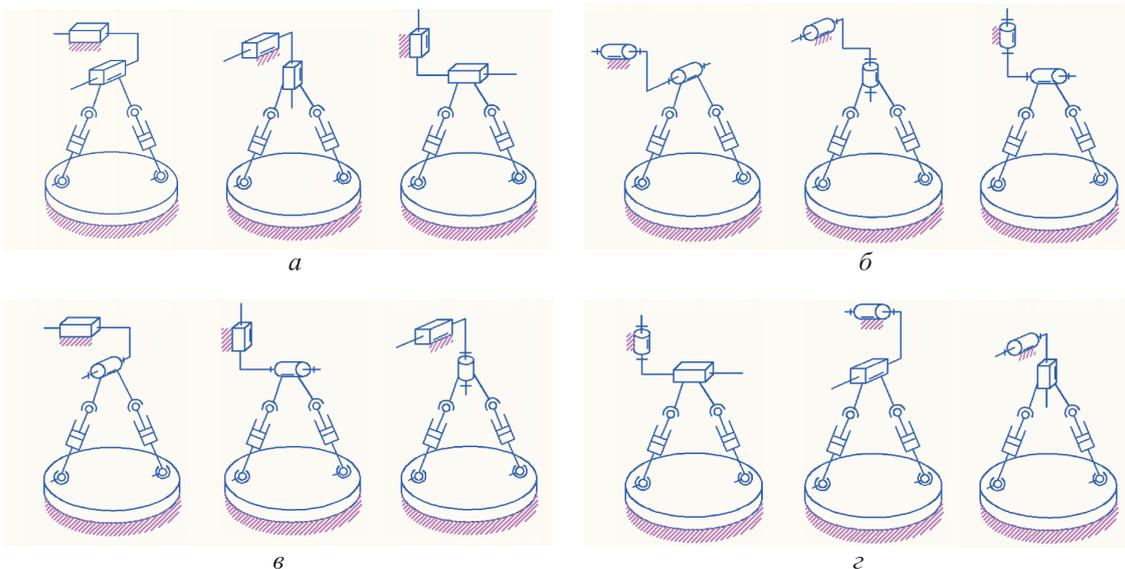


Рис. 4. Схемы синтезированных МПС с двумя степенями свободы, совершающих различные движения: а — ПП; б — ВВ; в — ПВ; г — ВП

ветствовать условиям синтеза, поскольку будут иметь одну степень свободы (xx , yy , zz). Таким образом, можно синтезировать тридцать три механизма, соответствующих сформулированным условиям синтеза.

Возможные движения ВЗ для МПС с двумя степенями свободы приведены в таблице, где В — звенья, совершающие вращательное движение, а П — поступательное.

Рассмотрим примеры некоторых синтезированных МПС, реализующие следующие движения (рис. 4):

- два поступательных (ПП) с изменением координат ВЗ $xу$, $уz$, zx (рис. 4, а);
- два вращательных (ВВ) с изменением координат ВЗ $\varphi_x\varphi_y$, $\varphi_y\varphi_z$, $\varphi_z\varphi_x$ (рис. 4, б);
- одно поступательное и одно вращательное движения (ПВ) с изменением координат ВЗ $x\varphi_x$, $z\varphi_x$, $у\varphi_z$ (рис. 4, в);

- одно вращательное и одно поступательное (ВП) с изменением координат ВЗ φ_zx , φ_xy , φ_yz (рис. 4, г).

Синтезированные механизмы представляют собой отдельную группу МПС благодаря наличию в их составе КЦ, накладывающей ограничение на движение ВЗ. Для дальнейшей реализации синтезированных МПС в составе различных вибростендов, симуляторов или иных механизмов важно учитывать их кинематические, динамические и технологические свойства, что позволит сделать окончательный выбор перспективной структурной схемы будущего устройства.

Поступая аналогичным образом, можно синтезировать все возможные структурные схемы разрабатываемых МПС в соответствии с заданными начальными условиями, а следовательно, создать атласы возможных структурных схем.

Литература

- [1] 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>
- [2] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer, 2004. 312 p.
- [3] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. XI World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2004, pp. 1624–1628.
- [4] Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [5] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *Eur. J. Mech. A Solids*, 2004, vol. 23, no. 6, pp. 1021–1039, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2004.08.006>
- [6] Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 275 p.
- [7] Merlet J.-P. *Parallel robots*. Springer, 2000. 356 p.
- [8] Глазунов В.А., Ганиев Р.Ф., ред. *Механизмы параллельной структуры и их применение*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2018. 1036 с.
- [9] Глазунов В.А., Хейло С.В., ред. *Новые механизмы робототехнических и измерительных систем*. Москва, Техносфера, 2022. 244 с.
- [10] Nosova N.Y., Glazunov V.A., Palochkin S.V. et al. Synthesis of mechanisms of parallel structure with kinematic interchange. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 5, pp. 378–383, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814050136>
- [11] Filippov G.S., Glazunov V.A., Terekhova A.A. et al. 3-DOF spherical parallel mechanism. In: AIMEE 2019. *Springer*, 2020, pp. 334–344, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39162-1_31
- [12] Balchanowski J., Szrek J., Wudarczyk S. Analysis of constraint equations of the parallel mechanisms with 3 DoF in singular configurations. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 607–616, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_61
- [13] Laryushkin P., Glazunov V., Demidov S. Singularity analysis of 3-DOF translational parallel manipulator. In: *Advances on theory and practice of robots and manipulators*. Springer, 2014, pp. 47–54, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_6
- [14] Глазунов В.А. Структура пространственных механизмов. Группы винтов и структурные группы. *Справочник. Инженерный журнал*, 2010, приложение № 3, 24 с.
- [15] Глазунов В.А., Диденко Е.В., Левин С.В. и др. *Механизм параллельной структуры*. Патент РФ 179051. Заявл. 21.12.2012, опубл. 25.04.2018.

References

- [1] 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>
- [2] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer, 2004. 312 p.
- [3] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. XI World Congress in Mechanism and Machine Science*, 2004, pp. 1624–1628.
- [4] Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [5] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *Eur. J. Mech. A Solids*, 2004, vol. 23, no. 6, pp. 1021–1039, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2004.08.006>
- [6] Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 275 p.
- [7] Merlet J.-P. Parallel robots. *Springer*, 2000. 356 p.
- [8] Glazunov V.A., Ganiev R.F., eds. *Mekhanizmy paralelnoy struktury i ikh primeneniye* [Parallel structure mechanisms and their applications]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2018. 1036 p. (In Russ.).
- [9] Glazunov V.A., Kheylo S.V., eds. *Novye mekhanizmy robototekhnicheskikh i izmeritelnykh system* [New mechanisms for robotics and measuring systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2022. 244 p. (In Russ.).
- [10] Nosova N.Y., Glazunov V.A., Palochkin S.V. et al. Synthesis of mechanisms of parallel structure with kinematic interchange. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 5, pp. 378–383, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814050136>
- [11] Filippov G.S., Glazunov V.A., Terekhova A.A. et al. 3-DOF spherical parallel mechanism. In: AIMEE 2019. *Springer*, 2020, pp. 334–344, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39162-1_31
- [12] Balchanowski J., Szrek J., Wudarczyk S. Analysis of constraint equations of the parallel mechanisms with 3 DoF in singular configurations. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 607–616, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_61
- [13] Laryushkin P., Glazunov V., Demidov S. Singularity analysis of 3-DOF translational parallel manipulator. In: Advances on theory and practice of robots and manipulators. *Springer*, 2014, pp. 47–54, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07058-2_6
- [14] Glazunov V.A. Structure of spatial mechanisms. Screw groups and structural groups. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2010, prilozheniye no. 3, 24 p. (In Russ.).
- [15] Glazunov V.A., Didenko E.V., Levin S.V. et al. *Mekhanizm paralelnoy struktury* [Mechanism of parallel structure]. Patent RU 179051. Appl. 21.12.2012, publ. 25.04.2018. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 08.04.2024

Информация об авторах

ДИДЕНКО Елена Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и технической механики. ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский просп., д. 65, к. 1, e-mail: didenkohv@gmail.com).

Information about the authors

DIDENKO Elena Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Technical Mechanics. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Gubkin University — National University of Oil and Gas (119991, Moscow, Russian Federation, Leninsky Prospekt, Bldg. 65, Block 1, e-mail: didenkohv@gmail.com).

ПЕВНЕВ Виктор Григорьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и технической механики. ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский просп., д. 65, к. 1, e-mail: pevnev.v@gubkin.ru).

PEVNEV Viktor Grigorievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Technical Mechanics. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Gubkin University — National University of Oil and Gas (119991, Moscow, Russian Federation, Leninsky Prospekt, Bldg. 65, Block 1, e-mail: pevnev.v@gubkin.ru)

ДЕМИДОВ Сергей Михайлович — кандидат технических наук, научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: chipd@rambler.ru).

DEMIDOV Sergey Mikhailovich — Candidate of Science (Eng.), Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: chipd@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Диденко Е.В., Певнев В.Г., Демидов С.М. Структурный синтез механизмов параллельной структуры, содержащих кинематические цепи, налагающие связи на движение выходного звена. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 24–30.

Please cite this article in English as:

Didenko E.V., Pevnev V.G., Demidov S.M. Structural synthesis of the parallel structure mechanisms containing kinematic chains that impose connections on the output link motion. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 24–30.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Проектирование непрерывных
технологических процессов»**

Авторы: В.В. Стулов, А.Г. Колесников

Приведен состав оборудования машины непрерывного литья заготовок и литейно-прокатного агрегата, рассмотрено моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и моделирование охлаждения кристаллизатора, описаны печи для выплавки стали и для ее обработки, а также основное и вспомогательное оборудование.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень магистратуры). Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении домашних заданий.

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>