

УДК 621.86-182.7

Структурный синтез и классификация пространственных механизмов параллельно-перекрестной структуры

В.Г. Певнев¹, Е.В. Диденко¹, А.А. Романов²¹ ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина»² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Structural synthesis and classification of the parallel-cross structure spatial mechanisms

V.G. Pevnev¹, E.V. Didenko¹, A.A. Romanov²¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

При применении в нефтегазовой промышленности колтюбинговых установок разного типа возникает проблема недостаточно точного позиционирования механизма подачи гибкой трубы над устьем скважины и нарушения позиционирования, что приводит к несовпадению продольной оси трубы с осью скважины, к изгибу и снижению ее ресурса, а в некоторых случаях к обрыву. Рассмотрена классификация пространственных механизмов параллельно-перекрестной структуры с различным количеством приводных кинематических цепей. Проанализировано влияние количества наложенных связей на степень подвижности механизмов в зависимости от наличия одной или нескольких перекрестных кинематических цепей, их расположения между соседними или противоположными приводными кинематическими цепями, а также от способа присоединения перекрестных кинематических цепей к приводным. Полученные в ходе синтеза и приведенные в классификации механизмы позволяют расширить область промышленного применения таких устройств.

EDN: KLJLLX, <https://elibrary/kljllx>

Ключевые слова: механизм параллельно-перекрестной структуры, число степеней свободы, перекрестные кинематические цепи, приводные кинематические цепи, наложенные связи, колтюбинговые установки

Various types of the coiled tubing units are used in the oil and gas industries. Therefore, a problem arises in the insufficiently precise positioning of the flexible pipe feed mechanism above the wellhead and violating its position, which leads to a misalignment of the pipe longitudinal axis and the well axis causing a decrease in the pipe life, its bending, and in certain cases, its breakage. The paper considers a classification of the spatial mechanisms of a parallel-cross structure with a different number of the drive kinematic chains. It analyzes the influence of the number of superimposed connections on the mechanism mobility degree depending on the one or more cross kinematic chains present, their position between the adjacent or opposite drive kinematic chains, as well as on the method of connecting the cross kinematic chains to the drive ones. The mechanisms obtained during the synthesis and provided in the classification would make it possible to expand the scope of industrial application of such devices.

EDN: KLJLLX, <https://elibrary/kljllx>

Keywords: parallel-cross structure mechanism, number of degrees of freedom, cross-kinematic chains, drive kinematic chains, superimposed connections, coiled tubing units

В нефтегазовой промышленности все более активно применяют колтюбинговую технику для бурения, ремонта и технического обслуживания скважин. При использовании колтюбинговых установок разного типа возникает общая проблема недостаточно точного позиционирования механизма подачи гибкой трубы (ГТ) над устьем скважины и нарушение позиционирования во время работы.

Проанализируем возможность применения механизма параллельно-перекрестной структуры (МППС) в качестве промежуточного звена между механизмом подачи ГТ и сборной мачтой, что позволит точно позиционировать механизм подачи при установке над устьем скважины и корректировать его положение во время работы в реальном времени, не прерывая технологический процесс.

Чаще всего механизм подачи ГТ устанавливают над устьем скважины с помощью манипулятора колтюбинговой установки, внешнего подъемного крана и на сборную мачту (рис. 1, а–в).

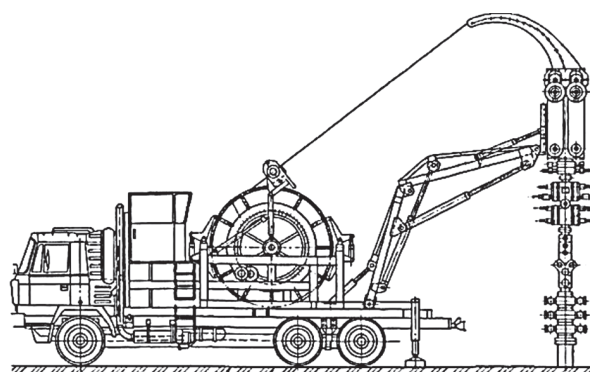
Все три варианта установки механизма подачи ГТ имеют такой недостаток, как смещение механизма подачи ГТ относительно устья скважины в горизонтальной и вертикальной плоскостях и изменение угла его наклона относительно скважины при выполнении спускоподъемных операций вследствие вибрации и больших усилий, передаваемых на ГТ. Это приводит к несовпадению продольной оси ГТ с осью скважины, к изгибу ГТ, появлению знакопеременных циклических напряжений и снижению ресурса ГТ со 120...130 до 60...70 циклов спускоподъемных операций, а в некоторых случаях и к обрыву ГТ.

Чтобы скорректировать положение механизма подачи ГТ, приходится останавливать технологический процесс, что увеличивает общее время спускоподъемных операций, а также может привести к прихвату ГТ внутри скважины и необходимости проведения дополнительных работ для его устранения.

Для решения этой проблемы предложено использовать МППС в качестве промежуточного звена между механизмом подачи ГТ и сборной мачтой, что позволит точно позиционировать механизм подачи ГТ при установке над устьем скважины и корректировать его поло-

жение во время работы в реальном времени, не прерывая технологический процесс.

Цель работы — анализ классификации МППС и исследование влияния количества наложенных связей на степень свободы МППС и возможности расширения области применения таких устройств в промышленности.



а



б



в

Рис. 1. Варианты установки механизма подачи ГТ над устьем скважины:
а и б — с помощью манипулятора колтюбинговой установки и внешнего подъемного крана;
в — на сборную мачту

Известно большое количество МППС [1–17]. Основное достоинство МППС заключается в наличии перекрестных кинематических цепей (КЦ), связывающих параллельно расположенные приводные КЦ. Причем такую связь можно реализовать между ведущими звеньями соседних или противоположных параллельных КЦ, между ведомыми звеньями соседних или противоположных параллельных КЦ, а также между ведущими и ведомыми звеньями соседних или противоположных параллельных КЦ [12].

Для выбора оптимальной схемы проведем анализ МППС, используя те же методы, что и в работах [7, 12].

В каждом варианте классификации (табл. 1) слева указано число параллельных КЦ, справа — число перекрестных КЦ. Каждая цифра в классификации соответствует эквивалентному количеству кинематических пар (КП) пятого класса рассматриваемой КЦ. В процессе работы известная классификация пространственных МППС [12] была расширена путем добавления 22 новых схем, которые выделены жирным шрифтом. Классификация включает в себя 137 базовых схем МППС.

Классификация пространственных МППС, суммарно содержащих шесть параллельных и перекрестных КЦ, в графическом виде приведена в табл. 2.

Таблица 1

Классификация пространственных МППС

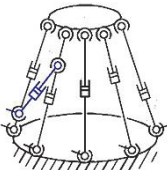
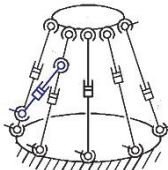
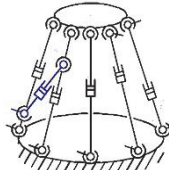
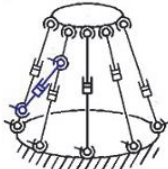
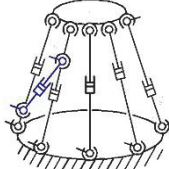
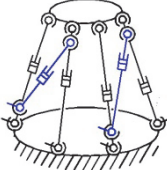
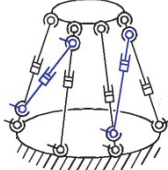
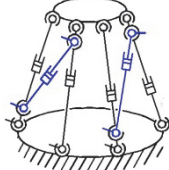
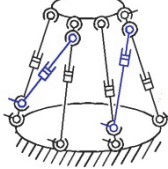
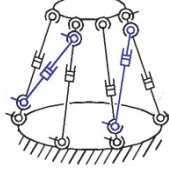
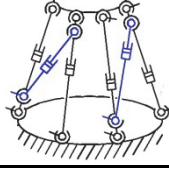
Общее число КЦ	Число параллельных КЦ– перекрестных КЦ	Количество КП пятого класса при числе степеней свободы W					
		6	5	4	3	2	1
6	5–1	66666–6	66665–6	66655–6	66555–6	65555–6	55555–6
			66666–5	66665–5	66655–5	66555–5	65555–5
	4–2	6666–66	6666–65	6666–55	6665–55	6655–55	6555–55
			6665–66	6665–65	6655–65	6555–65	5555–65
				6655–66	6555–66	5555–66	
	3–3	666–666	666–665	666–655	666–555	665–555	655–555
			665–666	665–665	665–655	655–655	555–655
				655–666	655–665	555–665	
					555–666		
	5	4–1	6666–6	6666–5	6665–5	6655–5	6555–5
			6665–6	6655–6	6555–6	5555–6	6644–5
				6664–6	6665–4	6644–6	
				6666–4	6664–5	6664–4	
3–2		666–66	666–65	666–55	665–55	655–55	555–55
			665–66	665–65	655–65	555–65	665–44
				655–66	555–66	644–66	
				664–66	665–64	664–64	
				666–64	666–54		
					664–65		
4	3–1	666–6	666–5	665–5	655–5	555–5	553–6
			665–6	655–6	555–6	653–6	563–5
				666–4	663–6	663–5	565–3
				664–6	666–3	665–3	544–6
					654–6	654–5	644–5

Окончание таблицы 1

Общее число КЦ	Число параллельных КЦ–перекрестных КЦ	Количество КП пятого класса при числе степеней свободы W					
		6	5	4	3	2	1
4	3–1				664–5	655–4	654–4
					665–4	554–6	554–5
							555–4
3	2–1	66–6	66–5	65–5	66–3	53–6	52–6
			65–6	55–6	64–5	66–2	62–5
					63–6	62–6	65–2
					56–4	65–3	54–4
					55–5	63–5	44–5
					54–6	44–6	43–6
						64–4	64–3
						55–4	63–4
						54–5	

Таблица 2

Классификация пространственных МППС в графическом виде

Общее число КЦ	Число параллельных КЦ–перекрестных КЦ	Число степеней свободы		
		6	5	4
6	5–1			
		–		
	4–2			
		–		
		–	–	
		–	–	

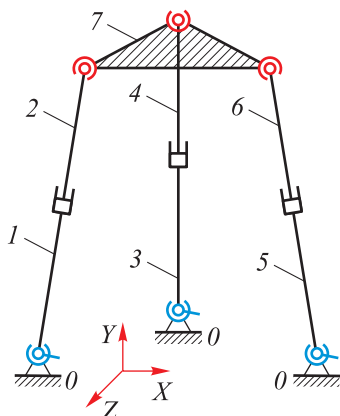


Рис. 2. Схема МПС с тремя приводными КЦ

Рассмотрим известный пространственный механизм параллельной структуры (МПС) с шестью степенями свободы, обладающий тремя приводными КЦ 1-2, 3-4 и 5-6, которые присоединены к основанию 0 и выходному звену 7 (рис. 2).

Модифицируем этот МПС путем добавления структурной группы второго класса второго порядка третьего вида между ведущим и ведомым звеньями соседних приводных КЦ (рис. 3). В результате модификации МПС получены три варианта МППС, имеющие по три приводных КЦ и одной перекрестной КЦ, которая присоединена к механизму различными по классу КП:

- двумя КП третьего класса (рис. 3, а);
- одной КП третьего и одной КП четвертого класса (рис. 3, б);
- двумя КП четвертого класса (рис. 3, в).

Приводные КЦ состоят из звеньев 1-2, 3-4 и 5-6, соединенных между собой поступатель-

ными КЦ пятого класса. Приводные КЦ присоединены к основанию 0 и выходному звену 7 с помощью трех КЦ четвертого класса и трех КЦ третьего класса.

Перекрестная КЦ представляет собой структурную группу второго класса второго порядка третьего вида, состоит из звеньев 8 и 9, связанных между собой поступательной КЦ пятого класса, и создает перекрестную связь между выходным звеном 6 приводной КЦ 5-6 и входным звеном 1 приводной КЦ 1-2.

Полученный в результате модификации МППС является пространственным, число степеней свободы которого определяется выражением Сомова — Малышева

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

где n — число подвижных звеньев; $p_5 - p_1$ — количество КП пятого-первого класса; q — число избыточных связей.

Подставляя в выражение (1) значения параметров, получаем число степеней свободы модифицированных МППС ($n = 9$, $p_2 = 0$, $p_1 = 0$ и $q = 0$):

- для МППС с параметрами $p_5 = 4$, $p_4 = 3$, $p_3 = 5$ (см. рис. 3, а) $W = 7$;
- для МППС с параметрами $p_5 = 4$, $p_4 = 4$, $p_3 = 4$ (см. рис. 3, б) $W = 6$;
- для МППС с параметрами $p_5 = 4$, $p_4 = 5$, $p_3 = 3$ (см. рис. 3, в) $W = 5$.

Анализ результатов расчета показал, что использование в присоединении перекрестной КЦ различных по классу КП влияет на число степеней свободы МППС: две КП третьего класса (см. рис. 3, а) добавляют одну местную подвижность;

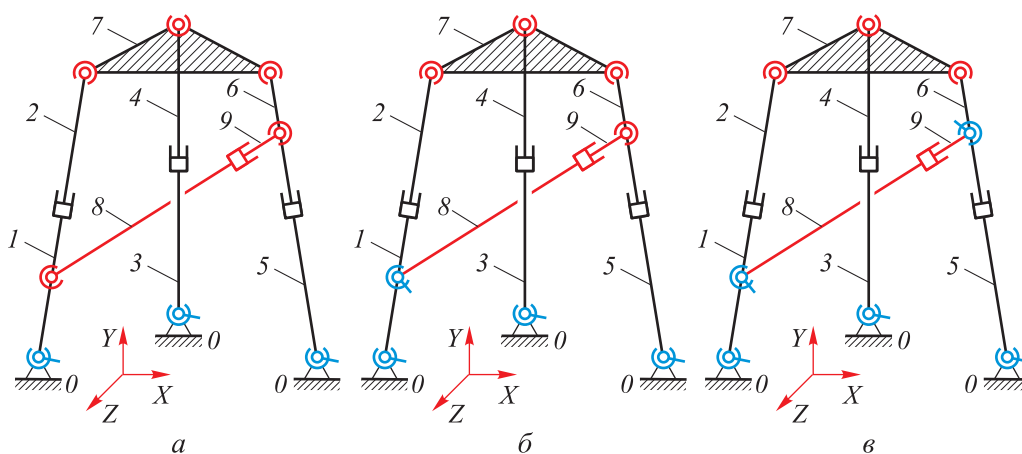


Рис. 3. Схемы МППС с тремя приводными КЦ и одной перекрестной КЦ, присоединенной различными по классу КП:
а — двумя КП третьего класса; б — одной КП третьего и одной КП четвертого класса;
в — двумя КП четвертого класса

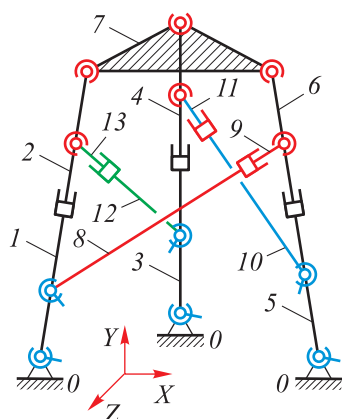


Рис. 4. Схема МППС с тремя приводными КЦ и тремя перекрестными КЦ

одна КП третьего класса и одна КП четвертого класса (см. рис. 3, б) не оказывают влияния на подвижность; две КП четвертого класса (см. рис. 3, в) накладывают одно ограничение.

Проведем последовательное усложнение МППС, показанного на рис. 3, б, путем последовательного добавления второй и третьей структурных групп второго класса второго порядка третьего вида между ведущим и ведомым звеньями соседних приводных КЦ (рис. 4).

Полученный в результате модификации МППС с тремя приводными КЦ и тремя перекрестными КЦ состоит из тринадцати подвижных звеньев ($n = 13$), соединенных шестью КП пятого класса ($p_5 = 6$), шестью КП четвертого класса ($p_4 = 6$) и шестью КП третьего класса ($p_3 = 6$). Синтезированный МППС включает в себя три приводные КЦ, образованные звеньями 1–2, 3–4, 5–6, связанными между собой вращательными КП пятого класса, и три перекрестные КЦ, созданные звеньями 8–9, 10–11 и 12–13, которые представляют собой структурные группы второго класса второго порядка третьего вида.

Приводные КЦ присоединены к основанию 0 и выходному звену 7 с помощью трех КП четвертого класса и трех КП третьего класса. Перекрестные КЦ связаны со звеньями приводных КЦ посредством трех КП четвертого класса и трех КП третьего класса.

Число степеней свободы такого МППС $W = 6$.

Анализ результатов расчета показал, что модифицированный МППС имеет шесть степеней свободы, как и прототип (см. рис. 2), что подтверждает отсутствие избыточных связей ($q = 0$).

Выводы

1. Результаты исследования пространственных МППС, созданных с использованием низших КП пятого–третьего классов, при наличии более одной перекрестной КЦ, подтверждают разное число степеней свободы механизма в зависимости от состава КП в перекрестной КЦ:

- при присоединении перекрестных КЦ к приводным КЦ посредством КП четвертого класса, каждая перекрестная КЦ накладывает одно ограничение (избыточную связь);
- при использовании КП третьего класса для присоединения перекрестных КЦ к приводным КЦ каждая перекрестная КЦ добавляет местную подвижность МППС;
- при присоединении перекрестных КЦ к приводным КЦ с помощью КП четвертого и третьего классов перекрестные КЦ не влияют на число степеней свободы МППС независимо от их количества.

2. Анализ результатов исследования позволит системно подойти к синтезу и проектированию МППС для использования в различных отраслях промышленности.

Литература

- [1] Merlet J.-P. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 355 p.
- [2] 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>
- [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 manipulation*. Kluwer Academic Publishers, 2004. 310 p.
- [5] 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.
- [6] Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Springer, 2007. 276 p.

- [7] Глазунов В.А. Структура пространственных механизмов. Группы винтов и структурные группы. *Справочник. Инженерный журнал*, 2010, приложение № 3, с. 1–24.
- [8] Meng X.D., Gao F.A. A framework for computer-aided type synthesis of parallel robotic mechanisms. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2014, vol. 228, no. 18, pp. 3496–3504, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406214531252>
- [9] Laryushkin P., Fomin A., Antonov A. Kinematic and singularity analysis of a 4-DOF Delta-type parallel robot. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2023, vol. 45, no. 4, art. 218, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04128-7>
- [10] Huo X., Jiang C., Wang B. et al. Configuration evolution of 6-DoF parallel robots based on Markov decision process. In: IFToMM WC 2023. *Springer*, 2023, pp. 673–682, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_67
- [11] Ling F. Type design and behavior control for six legged robots. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2018, vol. 31, art. 59, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0259-9>
- [12] Глазунов В.А. *Механизмы параллельной структуры и их применение*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2018. 1036 с.
- [13] Meng J., Liu G., Li Z. A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6 DoF parallel manipulators. *IEEE Trans. Rob.*, 2007, vol. 23, no. 4, pp. 625–649, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.898995>
- [14] Laryushkin P., Fomin A., Glazunov V. et al. Redundantly actuated 5-DOF delta-type parallel robot with linear drives. IFToMM WC 2023. *Springer*, 2023, pp. 820–827, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_81
- [15] Lu Y., Ye N. Type synthesis of parallel mechanisms by utilizing sub-mechanisms and digital topological graphs. *Mech. Mach. Theory*, 2017, vol. 109, pp. 39–50, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.11.008>
- [16] Сусакова Т.В., Самойлова В.В., Едакин А.И. и др. Структурный синтез и анализ механизмов параллельной структуры с поступательным движением выходного звена. *Вестник научно-технического развития*, 2020, № 6, с. 13–17, doi: <https://doi.org/10.18411/vntr2020-154-2>
- [17] Brinker J., Corves B. A survey on parallel robots with Delta-like architecture. In: *Proceedings of the 14th IFToMMWorld Congress*, 2015, pp. 407–414, doi: <https://doi.org/10.6567/IFTToMM.14TH.WC.PS13.003>

References

- [1] Merlet J.-P. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 355 p.
- [2] 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>
- [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 manipulation*. Kluwer Academic Publishers, 2004. 310 p.
- [5] 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.
- [6] Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 276 p.
- [7] Glazunov V.A. The structure of spatial mechanisms. Group of screws and structural groups. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal with Appendix], 2010, appendix 3, pp. 1–24. (In Russ.).
- [8] Meng X.D., Gao F.A. A framework for computer-aided type synthesis of parallel robotic mechanisms. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2014, vol. 228, no. 18, pp. 3496–3504, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406214531252>
- [9] Laryushkin P., Fomin A., Antonov A. Kinematic and singularity analysis of a 4-DOF Delta-type parallel robot. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2023, vol. 45, no. 4, art. 218, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04128-7>
- [10] Huo X., Jiang C., Wang B. et al. Configuration evolution of 6-DoF parallel robots based on Markov decision process. In: IFToMM WC 2023. *Springer*, 2023, pp. 673–682, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_67

- [11] Ling F. Type design and behavior control for six legged robots. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2018, vol. 31, art. 59, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0259-9>
- [12] Glazunov V.A. *Mekhanizmy parallelnoy struktury i ikh primeneniye* [Parallel structure mechanisms and their applications]. Moskva-Izhevsk, IKI Publ., 2018. 1036 p. (In Russ.).
- [13] Meng J., Liu G., Li Z. A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6 DoF parallel manipulators. *IEEE Trans. Rob.*, 2007, vol. 23, no. 4, pp. 625–649, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.898995>
- [14] Laryushkin P., Fomin A., Glazunov V. et al. Redundantly actuated 5-DOF delta-type parallel robot with linear drives. IFToMM WC 2023. *Springer*, 2023, pp. 820–827, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_81
- [15] Lu Y., Ye N. Type synthesis of parallel mechanisms by utilizing sub-mechanisms and digital topological graphs. *Mech. Mach. Theory*, 2017, vol. 109, pp. 39–50, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.11.008>
- [16] Susakova T.V., Samoylova V.V., Edakin A.I. et al. Structural synthesis and analysis of mechanisms of parallel structure with prismatic motion of the output link. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, 2020, no. 6, pp. 13–17, doi: <https://doi.org/10.18411/vntr2020-154-2> (in Russ.).
- [17] Brinker J., Corves B. A survey on parallel robots with Delta-like architecture. In: *Proceedings of the 14th IFToMMWorld Congress*, 2015, pp. 407–414, doi: <https://doi.org/10.6567/IFToMM.14TH.WC.PS13.003>

Статья поступила в редакцию 24.09.2024

Информация об авторах

ПЕВНЕВ Виктор Григорьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехника и техническая механика». ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский проспект, д. 65, к. 1, e-mail: pevnev.v@gubkin.ru).

ДИДЕНКО Елена Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехника и техническая механика». ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский проспект, д. 65, к. 1, e-mail: didenko.e@gubkin.ru).

РОМАНОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Теория механизмов и структуры машин». Федеральное государственное бюджетное учреждение науки 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

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

DIDENKO Elena Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotics and Technical Mechanics. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (119991, Moscow, Russian Federation, Leninsky Prospekt, Bldg. 65, Block 1, e-mail: didenko.e@gubkin.ru).

ROMANOV Andrey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher, Laboratory Theory of Mechanisms and Structure of Machines. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Певнев В.Г., Диденко Е.В., Романов А.А. Структурный синтез и классификация пространственных механизмов параллельно-перекрестной структуры. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 31–38.

Please cite this article in English as:

Pevnev V.G., Didenko E.V., Romanov A.A. Structural synthesis and classification of the parallel-cross structure spatial mechanisms. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 31–38.