

**ПО ИТОГАМ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ»  
(Кострома, 14–18 декабря 2020 года)**

Научная статья

УДК 004.5:616-089

doi 10.34216/2587-6147-2021-1-51-46-51

**Глеб Сергеевич Филиппов**<sup>1,2</sup>

filippov.gleb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4081-8857>

**Константин Андреевич Шалюхин**<sup>1</sup>

constmeister@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7515-2242>

**Гагик Володяевич Рашоян**<sup>1</sup>

gagik\_r@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8255-8109>

**Виктор Аркадьевич Глазунов**<sup>1</sup>

vaglznv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4802-0217>

**Сергей Александрович Скворцов**<sup>1</sup>

1691skvorcov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0470-0923>

**Александр Константинович Алёшин**<sup>1</sup>

aleshin\_ak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7960-2586>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия

**МЕХАНИЗМ МАНИПУЛЯТОРА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОБОТИЗИРОВАННОМ ХИРУРГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются механизмы параллельной и параллельно-последовательной структуры, в том числе конкретные поступательно-направляющие, плоские, сферические механизмы параллельной структуры с тремя степенями свободы, модификации роботов Delta различных производителей. Приводятся наиболее известные исследования роботов параллельно-последовательной структуры. Рассматриваются системы Mazor Renaissance и Mazor X Robotic для роботизированного ассистирования при проведении хирургических операций на позвоночнике. Кратко приводится методика синтеза механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы. Приводятся примеры синтезированных схем механизмов и трехмерных схем, синтезированных с применением моделирования в системе автоматизированного проектирования Компас 3D. Рассматривается схема механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы для роботизированного ассистирования при проведении малоинвазивных операций, который может быть использован как альтернатива платформе daVinci Surgical System. Приводится пример моделирования решения обратной задачи о положениях, прямой и обратной задачи о скоростях и прямой и обратной динамической задачи в системе MathCad, результат моделирования движения выходного звена в различных исходных условиях. Показываются результаты экспериментальных исследований с использованием опытного образца механизма.

**Ключевые слова:** механизм параллельной структуры, синтез и анализ, динамическая задача, механизм параллельно-последовательной структуры, роботизированный хирургический комплекс, математическое моделирование, роботы параллельно-последовательной структуры

**Для цитирования:** Механизм манипулятора с параллельной структурой для использования в роботизированном хирургическом комплексе / Г. С. Филиппов, К. А. Шалюхин, Г. В. Рашоян, В. А. Глазунов, С. А. Скворцов, А. К. Алёшин // Технологии и качество. 2021. № 1(51). С. 46–51. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-1-51-46-51>.

Original article

Gleb S. Filippov<sup>1,2</sup>, Konstantin A. Shalyukhin<sup>1</sup>, Gagik V. Rashoyan<sup>1</sup>, Viktor A. Glazunov<sup>1</sup>, Sergey A. Skvortsov<sup>1</sup>, Alexandr K. Aleshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN);

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)

## PARALLEL MANIPULATOR MECHANISM FOR USE IN ROBOTIC SURGERY

**Abstract.** *The article examines the mechanisms of parallel and parallel-sequential structure, including specific translational-guides, flat, spherical mechanisms of a parallel structure with three degrees of freedom, modifications of Delta robots from various manufacturers. The most famous studies of robots of parallel-serial structure are presented. Mazor Renaissance and Mazor X robotic systems for robotic assistance during spinal surgery are examined. The method of synthesis of mechanisms of parallel-serial structure with five degrees of freedom is briefly presented. Examples of synthesised schemes of mechanisms and three-dimensional schemes, synthesised using in the computer-aided design system Compass 3D, are given. A diagram of a mechanism of a parallel-sequential structure with five degrees of freedom for robotic assistance during minimally invasive operations, which can be used as an alternative to the da Vinci Surgical System Platform, is examined. An example of modelling the solution of the inverse problem of positions, direct and inverse problems of velocities and direct and inverse dynamic problems in the Mathcad system, the result of modelling the motion of the output link in various initial conditions is given. The results of experimental studies using a prototype mechanism are shown.*

**Keywords:** *mechanism of parallel structure, synthesis and analysis, dynamic problem, mechanism of parallel-sequential structure, robotic surgery, mathematical modeling, robots of parallel-serial structure*

**For citation:** Filippov G. S., Shalyukhin K. A., Rashoyan G. V., Glazunov V. A., Skvortsov S. A., Aleshin A. K. Parallel manipulator mechanism for use in robotic surgery // *Tekhnologii i kachestvo* = Technologies & Quality. 2021;1(51): 46–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-1-51-46-51>.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию новых высокоэффективных робототехнических, технологических, медицинских, исследовательских систем, основанных на эффективно спроектированных машинах и механизмах [1]. В частности, речь идет о хирургической технике: системы манипулирования (для высокоточных хирургических манипуляций), хирургические лазеры и др. [2].

Среди широкого спектра задач можно рассмотреть необходимость развития роботизированной хирургической техники для проведения вертебральных операций (на позвоночнике). При этом важными характеристиками робота являются высокая точность и нагрузочная способность. В позвонки должны быть ввернуты винты относительно большого диаметра (рис. 1) [3].

Использование роботизированной системой ориентирования инструмента при проведении операций в области позвоночника позволяет снизить нагрузку на хирурга, увеличить точность установки винтов, снизить количество осложнений, уменьшить время облучения персонала [4]. Применение передовой технологии с использованием различных роботизированных комплексов, прежде всего Mazor Robotics (Израиль), позволяет оперировать пациентов со сложными анатомическими деформациями,

которые часто исключаются из вариантов хирургического вмешательства [5–8]. При этом наблюдается снижение отклонений от расположения шурупов, нарушений стенок ножки, уменьшение облучения хирурга, времени операции [5, 9–12]. Использование роботизированной ориентации инструмента увеличило точность установки педикулярного винта на 58 %, тем самым снизив риск неврологических травм [9].

Отечественные разработки в данном направлении ведутся в МГТУ «СТАНКИН» [13], а также в ИМАШ РАН [14–18].

В Институте машиноведения им. А. А. Благонравова разрабатываются собственные схемы механизмов, имеющие перспективы использования в хирургических вертебральных роботах. Схема одного из них представлена на рис. 2.

Рассматриваемый пространственный механизм содержит основание 2, соединенные между собой кинематическими цепями направляющую раму 3 и выходное звено с установленным на нем рабочим органом 1 (см. рис. 2) [19]. Направляющая выполнена в виде жестко закрепленной на основании по углам прямоугольной рамы 3, на двух параллельных сторонах которой имеются подвижные кинематические пары 7. Выходное звено представляет собой прямо-

угольную раму 8 с расположенными на двух сторонах, параллельных соответствующим сторонам направляющей рамы, двумя вращательными кинематическими парами 6, соединенными с ними двумя кинематическими цепями. Каждая из цепей включает в себя две пары параллельных жестких звеньев 5, сопряженных с одной стороны между собой и рамой выходного звена с помощью поворотных шарниров 6,

а с другой стороны – посредством двойного поворотного шарнира 4 с вертикально установленным звеном на подвижном шарнире 7 направляющей рамы 3. Причем рабочий орган 1 закреплен на средней оси рамы выходного звена, соединенной с вращательными приводами 9, расположенными на двух сторонах рамы 8 между вращательными шарнирами 6.



Рис. 1. Конструкция на муляже

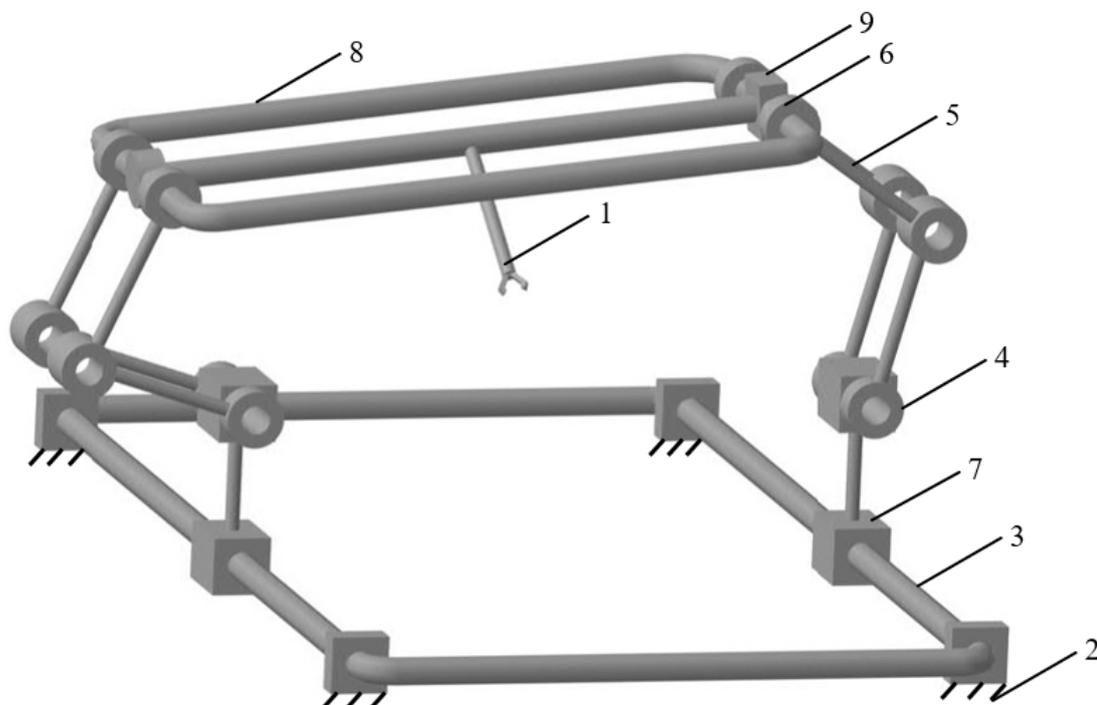


Рис. 2. Схема механизма параллельно-последовательной структуры

Манипулятор на основе механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы работает следующим образом [20]. Рабочая зона рабочего органа ма-

нипулятора располагается внутри направляющей рамы 3, между кинематически связанным рабочим органом 1 и основанием 2. Приводами оснащены обе кинематические пары 7, кинема-

тические пары 4, 5 кинематических цепей (с обеих сторон механизма), вращательная кинематическая пара 9. Совместное действие приводов, установленных на кинематические пары 4, 5, 7, позволяет перемещать в пространстве подвижную рамку 8. Движение в паре 4, 5 приводит к наклону или повороту рамки 8 относительно продольной оси. Кроме того, совместное действие приводов 4, 5 приводит, наряду с поворотом рамки 8, к ее перемещению в поперечном направлении. Перемещение в продольном направлении рамки 8 осуществляется размещенными на направляющей раме 3 приводами поступательного перемещения 7. Вращательные кинематические пары 9, расположенные на рамке 8, связанные с рабочим органом 1, на котором может быть закреплен инструмент или обрабатываемая деталь, обеспечивают поворот рабочего органа 1 вокруг поперечной оси.

Таким образом, приводы 4, 5 совместно обеспечивают вертикальное перемещение рабочего органа 1, его поворот вокруг продольной оси вместе с рамкой 8, а также его перемещение в поперечном направлении. Приводы

7 позволяют осуществить поступательное перемещение рабочего органа 1 в плоскости основания 2 вдоль продольной оси. Пространственный механизм параллельной структуры обеспечивает рабочему органу пять степеней подвижности.

Важным преимуществом рассматриваемого робота над роботами Mazor Robotics является предусмотренная еще на этапе структурного синтеза функциональная возможность проведения силовых операций – закручивание винтов в позвоночник непосредственно роботом-ассистентом (рис. 3).

Таким образом, развитие сферы разработки роботов-ассистентов, все активнее применяющихся в хирургических операциях в передовых научно развитых странах идет высоким темпом. В нашей стране есть различные организации, занимающиеся исследованиями в области медицинских роботов. Стоит отметить, что отечественные разработки обладают рядом преимуществ, расширяя функциональные возможности медицинских роботов и улучшая их характеристики, и представляют интерес для развития сферы ассистирующих роботов.



Рис. 3. Схема применения вертебрального робота параллельно-последовательной структуры

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 // СПС «КонсультантПлюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207967](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967) (дата обращения: 20.10.2020).
2. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года : утв. Правительством РФ 3 января 2014 г. // СПС «КонсультантПлюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_157978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157978) (дата обращения: 20.10.2020).

3. Транспедикулярная фиксация позвоночника (2020) // Хирургия позвоночника. Гомель. URL: <https://prozvonok.by/lechenie/chto-takoe-transpedikulyarnyj-fiksator-tpf> (дата обращения: 30.03.2021).
4. Робот-ассистированная хирургия в лечении больных с опухолями позвоночника / Э. Р. Мусаев, А. К. Валиев, К. А. Борзов, Д. И. Сафронов // Клиническая и экспериментальная хирургия : журнал им. академика Б. В. Петровского. 2015. № 4(10). С. 53–55.
5. Robotic assisted surgeries for the treatment of spine tumors / X. Hu, T. J. Scharschmidt, D. D. Ohnmeiss, I. H. Lieberman // International Journal of Spine Surgery. 2015. Vol. 9, nr 1. URL: <http://www.ijssurgery.com/content/ijss/9/1.full.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
6. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: Part 1. Technical development and a test case result / I. H. Lieberman, D. Togawa, M. M. Kayanja et al. // Neurosurgery. 2006. Vol. 59, iss. 3. P. 641–650.
7. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study / D. P. Devito, L. Kaplan, R. Dietl et al. // Spine. 2010. Vol. 35, nr 24. P. 2109–2115.
8. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement / S. R. Kantelhardt, R. Martinez, S. Baerwinkel et al. // European Spine Journal. 2011. Nr 20. P. 860–868.
9. Assessment of pedicle screw placement accuracy, procedure time, and radiation exposure using a miniature robotic guidance system / I. H. Lieberman, M. A. Hardenbrook, J. C. Wang, R. D. Guyer // Journal of Spinal Disorders and Techniques. 2012. Vol. 25, nr 5. P. 241–248.
10. Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system: first experiences and accuracy of screw placement / I. Pechlivanis, G. Kiriyathan, M. Engelhardt et al. // Spine. 2009. Vol. 34, nr 4. P. 392–398.
11. Sukovich W., Brink-Danan S., Hardenbrook M. Miniature robotic guidance for pedicle screw placement in posterior spinal fusion: early clinical experience with the SpineAssist // International Journal of Medical Robotics. 2006. Nr 2. P. 114–122.
12. Hu X., Ohnmeiss D. D., Lieberman I. H. Robotic-assisted pedicle screw placement: lessons learned from the first 102 patients // European Spine Journal. 2013. Nr 22(3). P. 661–666.
13. Наш ответ Да Винчи. Российские ученые разрабатывают настоящего робота-хирурга / Ю. Медведев // Российская газета. 2019. № 66(7824).
14. Parallel and Sequential Structures of Manipulators in Robotic Surgery / E. I. Veliev, R. F. Ganiev, V. A. Glazunov, G. S. Filippov // Doklady Physics. 2019. Vol. 64, nr 3. P. 106–109.
15. Глазунов В. А. Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы : монография. – Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – 1036 с.
16. Филиппов Г. С., Глазунов В. А., Ласточкин А. Б. Механизм параллельной структуры с 5 степенями свободы для вертебральных операций и аддитивных технологий // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2018. № 10(259). С. 55–60.
17. Разработка и решение задачи о положениях механизма параллельно-последовательной структуры для хирургических операций как альтернативы роботу da Vinci / Е. И. Велиев, Р. Ф. Ганиев, В. А. Глазунов, Г. С. Филиппов, А. Н. Терехова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 4. С. 3–13.
18. Разработка роботов-ассистентов для хирургических операций / В. А. Глазунов, Л. В. Гаврилина, Г. С. Филиппов, П. А. Швец, В. Ф. Юдкин // Русский инженер. 2020. № 4(69). С. 43–45.
19. Патент РФ на полезную модель № 191807 РФ Пространственный механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы / Филиппов Г. С., Глазунов В. А., Алешин А. К., Левин С. В., Рашоян Г. В., Шалюхин К. А., Скворцов С. А., Филиппов О. С., Гаврюшин С. С., Григорьянц А. Г. Оpubл. 22.08.2019, Бюл. № 24.
20. Филиппов Г. С. Научное обоснование и разработка механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 324 с.

## REFERENCES

1. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii : utv. Ukazom Prezi-denta Rossijskoj Federacii ot 1 dekabrya 2016 g. № 642 // SPS “Konsul'tantPlyus”. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207967](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967) (data obrashcheniya: 20.10.2020).

2. Prognoz nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda : utv. Pravitel'stvom RF 3 yanvarya 2014 g. // SPS "Konsul'tantPlyus". URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_157978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157978) (data obrashcheniya: 20.10.2020).
3. Transpedikulyarnaya fiksaciya pozvonochnika (2020) // Hirurgiya pozvonochnika. Gornel'. URL: <https://pozvonok.by/lechenie/chto-takoe-transpedikulyarnyj-fiksator-tpf> (data obrashcheniya: 30.03.2021).
4. Robot-assistirovannaya hirurgiya v lechenii bol'nyh s opuholyami pozvonochnika / E. R. Musaev, A. K. Valiev, K. A. Borzov, D. I. Safronov // Klinicheskaya i eksperimental'naya hirurgiya : zhurnal im. akademika B. V. Petrovskogo. 2015. № 4(10). S. 53–55.
5. Robotic assisted surgeries for the treatment of spine tumors / X. Hu, T. J. Scharschmidt, D. D. Ohnmeiss, I. H. Lieberman // International Journal of Spine Surgery. 2015. Vol. 9, nr 1. URL: <http://www.ijssurgery.com/content/ijss/9/1.full.pdf> (data obrashcheniya: 15.01.2021).
6. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: Part 1. Technical development and a test case result / I. H. Lieberman, D. Togawa, M. M. Kavanja et al. // Neurosurgery. 2006. Vol. 59, iss. 3. P. 641–650.
7. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study / D. P. Devito, L. Kaplan, R. Dietl et al. // Spine. 2010. Vol. 35, nr 24. P. 2109–2115.
8. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement / S. R. Kantelhardt, R. Martinez, S. Baerwinkel et al. // European Spine Journal. 2011. Nr 20. P. 860–868.
9. Assessment of pedicle screw placement accuracy, procedure time, and radiation exposure using a miniature robotic guidance system / I. H. Lieberman, M. A. Hardenbrook, J. C. Wang, R. D. Guyer // Journal of Spinal Disorders and Techniques. 2012. Vol. 25, nr 5. P. 241–248.
10. Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system: first experiences and accuracy of screw placement / I. Pechlivanis, G. Kiriyathan, M. Engelhardt et al. // Spine. 2009. Vol. 34, nr 4. P. 392–398.
11. Sukovich W., Brink-Danan S., Hardenbrook M. Miniature robotic guidance for pedicle screw placement in posterior spinal fusion: early clinical experience with the SpineAssist // International Journal of Medical Robotics. 2006. Nr 2. P. 114–122.
12. Hu X., Ohnmeiss D. D., Lieberman I. H. Robotic-assisted pedicle screw placement: lessons learned from the first 102 patients // European Spine Journal. 2013. Nr 22(3). P. 661–666.
13. Nash otvet Da Vinchi. Rossijskie uchenye razrabatyvayut nastoyashchego robota-hirurga / YU. Medvedev // Rossijskaya gazeta. 2019. № 66(7824).
14. Parallel and Sequential Structures of Manipulators in Robotic Surgery / E. I. Veliev, R. F. Ganiev, V. A. Glazunov, G. S. Filippov // Doklady Physics. 2019. Vol. 64, nr 3. P. 106–109.
15. Glazunov V. A. Mekhanizmy parallel'noj struktury i ih primenenie: robototekhnicheskie, tekhnologicheskie, medicinskie, obuchayushchie sistemy : monografiya. – Izhevsk : Izhevskij institut komp'yuternyh issledovanij, 2018. – 1036 s.
16. Filippov G. S., Glazunov V. A., Lastochkin A. B. Mekhanizm parallel'noj struktury s 5 stepenyami svobody dlya vertebral'nyh operacij i additivnyh tekhnologij // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem. 2018. № 10(259). C. 55–60.
17. Razrabotka i reshenie zadachi o polozheniyah mekhanizma parallel'no-posledovatel'noj struktury dlya hirurgicheskikh operacij kak al'ternativy robotu da Vinci / E. I. Veliev, R. F. Ganiev, V. A. Glazunov, G. S. Filippov, A. N. Terekhova // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2019. № 4. S. 3–13.
18. Razrabotka robotov-assistentov dlya hirurgicheskikh operacij / V. A. Glazunov, L. V. Gavrilina, G. S. Filippov, P. A. Shvec, V. F. Yudkin // Russkij inzhener. 2020. № 4(69). S. 43–45.
19. Patent RF na poleznuyu model' № 191807 RF Prostranstvennyj mekhanizm parallel'noj struktury s pyat'yu stepenyami svobody / Filippov G. S., Glazunov V. A., Aleshin A. K., Levin S. V., Rashoyan G. V., SHalyuhin K. A., Skvorcov S. A., Filippov O. S., Gavryushin S. S., Grigor'yanc A. G. Opubl. 22.08.2019, Byul. № 24.
20. Filippov G. S. Nauchnoe obosnovanie i razrabotka mekhanizmov parallel'no-posledovatel'noj struktury dlya mnogokoordinatnyh manipulyacionnyh sistem : dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2019. 324 s.

Статья поступила в редакцию 30.10.2020  
Принята к публикации 11.03.2021.