

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, А.К. Алешин,
Г.В. Рашоян, С.А. Скворцов, К.А. Шалюхин

ФГБУН ИМАШ РАН, г. Москва, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4

info@imash.ru

Изучены перспективы применения роботов параллельной структуры для проведения зондовой диагностики плазменных потоков ракетных двигателей. Исследована возможность повышения точности и эффективности зондовых измерений. Показано, что использование роботов параллельной структуры позволяет качественно улучшить показания зондовой диагностики, поскольку зондовые измерения проводятся преимущественно в сжатые сроки, что приводит к ограниченному числу замеров, а также несовершенными механизмами, часто управляющимися вручную, что обуславливает потерю точности. Приведено описание зондовой диагностики плазменных потоков, истекающих, в том числе из ракетных двигателей различного типа, весьма чувствительной к положению зонда, его форме и зависимой от влияния на плазменный поток самого зонда и вспомогательных механизмов. Разработаны механизмы параллельной структуры, применение которых может существенно улучшить качество проводимых экспериментов.

Ключевые слова: роботы параллельной структуры, плазменные потоки, зондовая диагностика

Ссылка для цитирования: Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Шалюхин К.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в зондовой диагностике плазменных потоков // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 6. С. 92–97.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-92-97

Экономическая безопасность и индустриализация подразумевают уменьшение технологической зависимости от импорта научного и испытательного оборудования, современных приборов и электронных комплектующих [1]. Робототехнические системы военного, специального, или двойного назначения входят в число приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации [2, 3].

Стратегия научно-технологического развития предполагает обеспечение перехода к роботизированным системам в различных областях экономики, как одного из приоритетов развития [4]. Особое значение в этом смысле придается авиационной технике и высокотехнологичным системам ее обслуживания и диагностики.

Учитывая это, ученые ИМАШ РАН (далее — Институт) активно развивают соответствующие направления науки о машинах, с высоким потенциалом внедрения и перспективой широкого применения. [5–11].

Институт на протяжении 80 лет проводит уникальные разработки для широкого спектра научной, технической, народно-хозяйственной сфер [15–18]. Разработанная учеными Института методология синтеза и анализа систем параллельной структуры, основанная на винтовом исчислении [15], является эффективным инструментом создания новых перспективных механизмов.

Повышение точности позиционирования рабочего инструмента, пониженное влияние ви-

браций двигателей на выходное звено, возрастание потенциала полезной нагрузки обусловлены ферменной структурой механизмов, в которых приводы размещаются на основании.

Цель работы

Целью работы является разработка специального механизма для перемещения зонда по заданной пространственной траектории в плазменном потоке с минимальным влиянием на турбулентные потоки.

Материалы и методы

Использование роботов параллельной структуры поможет существенно повысить качество измерений при зондовой диагностике [12–14]. В настоящее время зондовые измерения проводятся, как правило, в сжатые сроки, что приводит к ограничению числа замеров, с применением несовершенных механизмов, управляющихся вручную, и вследствие этого, к потере точности. Зондовая диагностика плазменных потоков, истекающих, в том числе, из разных типов ракетных двигателей, особенно чувствительна к положению зонда, его форме, а также влиянию на плазменный поток самого зонда и вспомогательных механизмов [19, 20]. Применение разработанного в ИМАШ РАН механизма параллельной структуры с пятью степенями свободы (рис. 1), дает возможность существенно улучшить качество проводимых экспериментов.

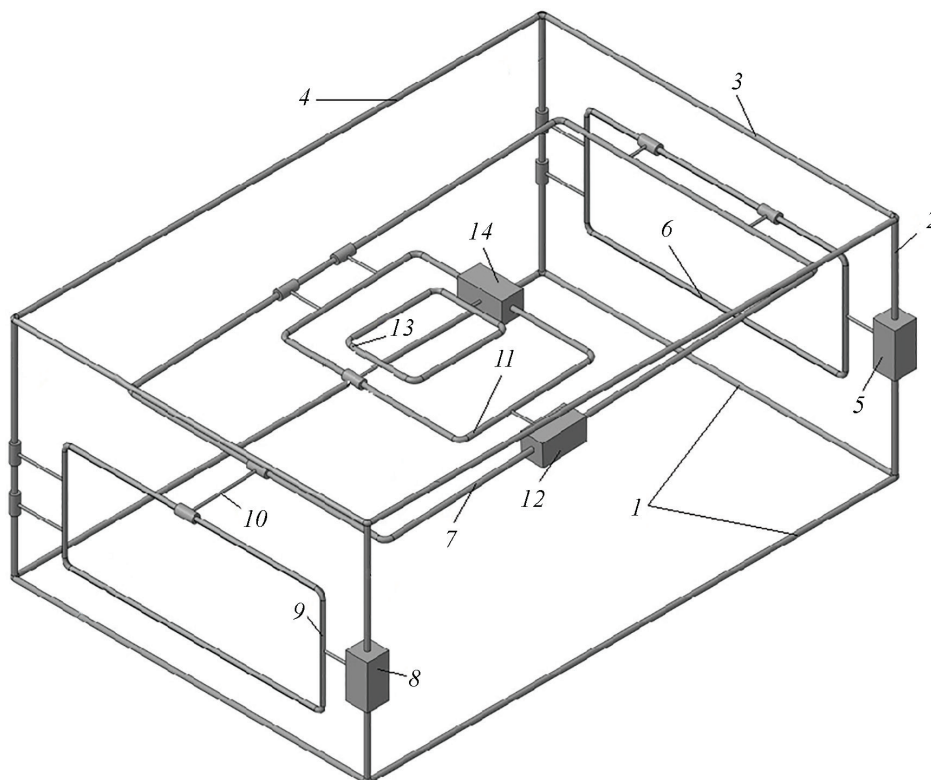


Рис. 1. Механизм для зондовой диагностики плазменных потоков с двумя вертикальными линейными двигателями: 1 — основание; 2 — вертикальная стойка; 3 — продольная балка; 4 — поперечная балка; 5 — первый подвижный линейный привод; 6, 9 — рама; 7 — подвижная платформа; 8 — второй подвижный линейный привод; 10 — промежуточное звено; 11 — поперечная каретка; 12, 14 — привод поступательного перемещения; 13 — продольная каретка

Fig. 1. The mechanism for probe diagnostics of plasma flows with two vertical linear engines: 1 — base; 2 — a vertical rack; 3 — a longitudinal beam; 4 — transverse beam; 5 — the first movable linear actuator; 6, 9 — frame; 7 — movable platform; 8 — second movable linear actuator; 10 — an intermediate link; 11 — transverse carriage; 12, 14 — translational displacement drive; 13 — longitudinal carriage

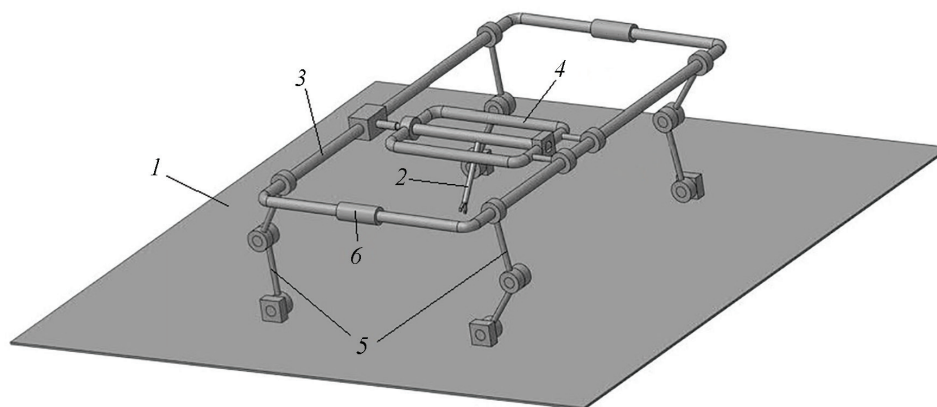


Рис. 2. Альтернативный вариант пятистепенного механизма параллельной структуры для зондовой диагностики плазменных потоков: 1 — основание; 2 — выходное звено; 3 — подвижная платформа; 4 — каретка продольного перемещения; 5 — кинематические цепи; 6 — телескопическая муфта

Fig. 2. An alternative version of the five-degree mechanism of parallel structure for probe diagnostics of plasma flows: 1 — base; 2 — output link; 3 — movable platform; 4 — carriage of longitudinal movement; 5 — kinematic chains; 6 — telescopic coupling

Разработанный механизм состоит из основания 1, на котором размещен портал, состоящий из закрепленных на основании вертикальных стоек 2, связанных между собой продольными 3 и поперечными 4 горизонтальными балками. Первый подвижный линейный привод 5 установлен на стойке посредством рамы 6, сопряженной с помощью вращательной кинематической пары с подвижной платформой 7. Второй подвижный линейный привод 8 также сопряжен с подвижной платформой посредством рамы 9, связанной со стойкой посредством поступательных кинематических пар.

Между рамой и платформой расположено промежуточное звено 10, связанное с рамой и подвижной платформой вращательными кинематическими парами. На подвижной платформе размещена поперечная каретка 11, связанная с платформой с одной стороны приводом поступательного перемещения 12, с другой стороны — поступательными кинематическими парами. С поперечной кареткой в свою очередь связана продольная каретка 13, с одной стороны — приводом поступательного перемещения 14, с другой стороны — поступательными кинематическими парами. На продольной каретке жестко установлен корпус вращательного двигателя, с валом которого связано выходное звено. На выходном звене располагается рабочий орган, которым может быть зонд. Использование механизма позволяет проводить зондовые измерения плазменных потоков с необходимой скоростью по заданной траектории с минимальным влиянием на турбулентные потоки, в частности исследовать краевые и концевые эффекты, влияние ориентации зонда в потоке плазмы, возможность получения вольт-амперных характеристик плоских зондов в зависимости от параметров задачи [25].

В качестве альтернативного варианта механизма для использования в зондовой диагностике плазменных потоков можно использовать некую конструкцию (рис. 2).

Данный манипулятор параллельной структуры, имеющий пять степеней свободы, содержит основание 1, выходное звено 2, подвижную платформу 3, установленную на платформе каретку продольного перемещения 4 с закрепленным на ней выходным звеном а также кинематические цепи 5, связывающие основание с кареткой. Платформа и каретка имеют прямоугольную форму, состоят из полых труб и сочленены между собой с взаимно перпендикулярным расположением длинных сторон. При этом элементы труб коротких сторон платформы и длинных сторон каретки разрезные и соединены с помощью телескопических муфт 6 с возможностью изменения ширины платформы и длины каретки. Кроме того, плат-

форма соединена с основанием посредством установленных попарно на длинных сторонах платформы четырех кинематических цепей, каждая из которых содержит жестко установленный на основании вращательный привод и два шарнирно соединенных между собой передаточных звена. Первое из них закреплено на оси привода, второе — шарнирно сопряжено с длинной стороной платформы, причем оси вращения приводов и поворота шарнирных соединений кинематических цепей параллельны направлению длинных сторон платформы. Каретка установлена на платформе с возможностью движения вдоль платформы и вращения вокруг собственной оси с помощью комбинированного двигателя и двух скользящих шарниров, расположенных на противоположных длинных сторонах платформы соответственно, при этом соединение каретки с комбинированным двигателем осуществлено посредством центральной оси, а с поворотными шарнирами — двумя перемычками.

Выводы

Для выполнения программы научно-технологического развития необходимы новые разработки машин, обладающих инновационными технологическими решениями и расширенным функциональным потенциалом. Механизмы параллельной структуры имеют такие преимущества, как скорость, полезная нагрузка, точность проводимых манипуляций. В Институте созданы механизмы, имеющие широчайший спектр применения, в том числе для зондовой диагностики плазменных потоков. Проведенные расчеты и испытания экспериментальных образцов подтверждают правильность выбранного подхода.

Список литературы

- [1] Указ Президента РФ от 31.12.2015 N 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (дата обращения 18.12.2018).
- [2] Указ Президента РФ от 16.12.2015 N 623 «О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники». URL: <https://base.garant.ru/71280896/> (дата обращения 18.12.2018).
- [3] Указ Президента РФ от 07.07.2011 N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации». URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (дата обращения 18.12.2018).
- [4] Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 «Об утверждении стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (дата обращения 18.12.2018).
- [5] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике // ДАН, 2014. Т. 459. № 4. С. 1–4.

- [6] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения // Справочник. Инженерный журнал (с приложением), 2015. № 11. С. 1–16.
- [7] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Перспективы теории машин в связи с развитием современного машиностроения // Справочник. Инженерный журнал (с приложением), 2015. № 5. С. 3–7.
- [8] Ганиев Р.Ф. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010. № 1. С. 3–20.
- [9] Ганиев Р.Ф. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Часть II // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010. № 3. С. 3–17.
- [10] Ганиев Р.Ф. О современном состоянии и перспективах развития ИМАШ РАН // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014. № 3. С. 11–36.
- [11] Филиппов Г.С. Математическое моделирование пространственного распределения лучистой энергии от сложного излучателя: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Москва, Моск. гос. авиац. ин-т, 2014. 23 с.
- [12] Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Ященко Б.Ю., Евдокимов И.Е. Расчет индикатрисы сложного излучателя // Научно-технический вестник Поволжья, 2012. Т. 5. С. 50–54.
- [13] Shripad P. Mahulikar, Hemant R. Sonawane, G. Arvind Rao Infrared signature studies of aerospace vehicles, Progress in Aerospace Sciences, 2007, v. 43, pp. 218–245.
- [14] Николаенко В.С., Филиппов Г.С., Раца И.И., Ященко Б.Ю. Расчет и снижение тепловой заметности двигателя летательного аппарата // 15-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика». Москва, МАИ (НИУ), 14–18 ноября 2016 г. М.: Люксор, 2016. С. 318–319
- [15] Глазунов В.А. Структура пространственных механизмов. Группы винтов и структурные группы // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2010. № 3. 24 с.
- [16] Чунихин А.Ю., Глазунов В.А. Разработка механизмов параллельной структуры с пятью степенями свободы, предназначенных для технологических роботов // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2017. № 4. С. 3–11.
- [17] Чунихин А.Ю., Глазунов В.А., Скворцов С.А., Духов А.В. Пространственный механизм с пятью степенями свободы. Патент РФ на полезную модель № 160127, 2016. Заявка 2015106848/02, 27.02.2015. Оп. 10.03.2016. Бюл. № 7. С. 4.
- [18] Козырев А.В., Глазунов В.А., Артеменко Ю.Н., Каганов Ю.Т. Пространственный поступательный механизм с тремя степенями свободы. Патент РФ на полезную модель № 133043, дата подачи заявки: 2013.03.14 2013. Бюл. № 28. 2 с.
- [19] Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Диагностика плазменных потоков с помощью ориентированных зондов. Теория и практика зондовых измерений. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 340 с.
- [20] Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Физическое, математическое и численное моделирование пристеночной плазмы применительно к системам авиационно-космической техники и волновым технологиям. Регулярная и хаотическая динамика. Ижевск, 2018. 280 с.

Сведения об авторах

Филиппов Глеб Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе ИМАШ РАН, filipov.bleb@gmail.com

Глазунов Виктор Аркадьевич — д-р техн. наук, профессор, директор ИМАШ РАН, info@imash.ru

Алешин Александр Константинович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ИМАШ РАН, aleshin_ak@mail.ru

Рашоян Гагик Володяевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИМАШ РАН, gagik_r@bk.ru

Скворцов Сергей Александрович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИМАШ РАН, 1691skvorcov@mail.ru

Шалюхин Константин Андреевич — канд. техн. наук, науч. сотр. ИМАШ РАН, constmeister@gmail.com

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

APPLICATION PROSPECTS OF PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS IN PROBE DIAGNOSTICS OF PLASMA FLOWS

G.S. Filippov, V.A. Glasunov, A.K. Aleshin,
G.V. Rashoyan, S.A. Skvortsov, K.A. Shalyukhin

IMASH RAN, 4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, 101990, Moscow, Russia

info@imash.ru

In this paper, we studied the prospects for the use of robots of a parallel structure for conducting probe diagnostics of plasma flows of rocket engines. The possibility of improving the accuracy and efficiency of measurements is investigated. The use of robots with a parallel structure allows for a qualitative improvement in probe diagnostic readings. Today, probe measurements are often carried out in a short time, which leads to a limited number of measurements, as well as imperfect mechanisms, often operated manually, which leads to loss of accuracy. Probe diagnostics of plasma flows, including those from rocket engines of various types, are very sensitive to the position of the probe, its shape, as well as the effect on the plasma flow of the probe itself and auxiliary mechanisms. The use of the parallel structure mechanisms developed at Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, can significantly improve the quality of the experiments performed.

Keywords: the robots of parallel structure, plazma flows, probe diagnostics

Suggested citation: Filippov G.S., Glasunov V.A., Aleshin A.K., Rashoyan G.V., Skvortsov S.A., Shalyukhin K.A. *Perspektivy primeneniya mekhanizmov parallel'noy struktury v zondovoy diagnostike plazmennyykh potokov* [Application prospects of parallel structure mechanisms in probe diagnostics of plasma flows]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 92–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-92-97

References

- [1] *Ukaz Prezidenta RF ot 31.12.2015 N 683 «O Strategii natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii»* [Presidential Decree no. 683 of December 31, 2015 “On the National Security Strategy of the Russian Federation”]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (accessed 18.12.2018).
- [2] *Ukaz Prezidenta RF ot 16.12.2015 N 623 «O Natsional'nom tsentre razvitiya tekhnologii i bazovykh elementov robototekhniki»* [Decree of the President of the Russian Federation dated December 16, 2015 no. 623 “On the National Center for the Development of Technologies and Basic Elements of Robotics”]. URL: <https://base.garant.ru/71280896/> (accessed 18.12.2018).
- [3] *Ukaz Prezidenta RF ot 07.07.2011 N 899 «Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii»* [Decree of the President of the Russian Federation of 07.07.2011 no. 899 “On the approval of priority areas for the development of science, technology and technology in the Russian Federation”]. URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (accessed 18.12.2018).
- [4] *Ukaz Prezidenta RF ot 01.12.2016 N 642 «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii»* [Presidential Decree no. 642 of December 1, 2016, “On the Approval of the Strategy for the Scientific and Technological Development of the Russian Federation”]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (accessed 18.12.2018).
- [5] Ganiev R.F., Glazunov V.A. *Manipulyatsionnye mekhanizmy parallel'noy struktury i ikh prilozheniya v sovremennoy tekhnike* [Manipulation mechanisms of parallel structure and their applications in modern technology]. *DAN*, 2014, v. 459, no. 4, pp. 1–4.
- [6] Ganiev R.F., Glazunov V.A. *Aktual'nye problemy mashinovedeniya i puti ikh resheniya* [Actual problems of engineering and their solutions]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal (s prilozheniem)* [Engineering Journal (with attachment)], 2015, no. 11, pp. 1–16.
- [7] Ganiev R.F., Glazunov V.A. *Perspektivy teorii mashin v svyazi s razvitiem sovremennoy mashinostroeniya* [Prospects of the theory of machines in connection with the development of modern engineering] *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal (s prilozheniem)* [Reference. Engineering Journal (with attachment)], 2015, no. 5, pp. 3–7.
- [8] Ganiev R.F. *Problemy mekhaniki mashin i tekhnologii. Perspektivy razvitiya Instituta mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN* [Problems of mechanics of machines and technologies. Prospects for the development of the Institute of Engineering them. A.A. Blagonravova RAS] *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2010, no. 1, pp. 3–20.
- [9] Ganiev R.F. *Problemy mekhaniki mashin i tekhnologii. Perspektivy razvitiya Instituta mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN. Chast' II* [Problems of mechanics of machines and technologies. Prospects for the development of the Institute of Engineering them. A.A. Blagonravov RAN. Part II] *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2010, no. 3, pp. 3–17.
- [10] Ganiev R.F. *O sovremennoy sostoyanii i perspektivakh razvitiya IMASH RAN* [On the current state and prospects of development of the Institute of Biological Sciences of the Russian Academy of Sciences] *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2014, no. 3, pp. 11–36.
- [11] Filippov G.S. *Matematicheskoe modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya luchistoy energii ot slozhnogo izluchatelya* [Mathematical modeling of the spatial distribution of radiant energy from a complex emitter]: Diss. ... Cand. Sci. (Phys.-Mat.). Moscow, Moscow. state Aviation Institute, 2014, 23 p.
- [12] Filippov G.S., Nikolaenko V.S., Yashchenko B.Yu., Evdokimov I.E. *Raschet indikatsiy slozhnogo izluchatelya* [Calculation of the indicatrix of a complex radiator] *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2012, v. 5, pp. 50–54.

- [13] Shripad P. Mahulikar, Hemant R. Sonawane, G. Arvind Rao Infrared signature studies of aerospace vehicles, *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, v. 43, pp. 218–245.
- [14] Nikolaenko V.S., Filippov G.S., Ratsa I.I., Yashchenko B.Yu. *Raschet i snizhenie teplovoy zametnosti dvigatelya letatel'no-go apparata* [Calculation and reduction of thermal visibility of the aircraft engine] 15-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika» [15th International Conference “Aviation and Cosmonautics”]. Moscow, MAI (NRU), November 14–18, 2016. Moscow: Luxor, 2016, pp. 318–319.
- [15] Glazunov V.A. *Struktura prostranstvennykh mekhanizmov. Gruppy vintov i strukturnye gruppy* [The structure of spatial mechanisms. Groups of screws and structural groups] *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal (s prilozheniem)* [Reference. Engineering Journal (with attachment)], 2010, no. 3, 24 p.
- [16] Chunikhin A.Yu., Glazunov V.A. *Razrabotka mekhanizmov parallel'noy struktury s pyat'yu stepenyami svobody, prednaznachennykh dlya tekhnologicheskikh robotov* [Development of mechanisms of parallel structure with five degrees of freedom, intended for technological robots] *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2017, no. 4, pp. 3–11.
- [17] Chunikhin A. Yu., Glazunov V.A., Skvortsov S.A., Dukhov A.V. *Prostranstvennyy mekhanizm s pyat'yu stepenyami svobody* [Spatial mechanism with five degrees of freedom]. Patent of the Russian Federation for useful model no. 160127, 2016. Application 2015106848/02, 02.27.2015. Op. 03/10/2016, bul no. 7, p. 4.
- [18] Kozyrev A.V., Glazunov V.A., Artemenko Yu.N., Kaganov Yu.T. *Prostranstvennyy postupatel'nyy mekhanizm s tremya stepenyami svobody* [Spatial translational mechanism with three degrees of freedom]. Patent of the Russian Federation for utility model no. 133043, application filing date: 2013.03.14 2013, bull. no. 28, p. 2.
- [19] Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V., Filippov G.S. *Diagnostika plazmennykh potokov s pomoshch'yu orientirovannykh zondov. Teoriya i praktika zondovykh izmereni.* [Diagnostics of plasma flows using oriented probes. Theory and practice of probe measurements]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016, 340 c.
- [20] Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V., Filippov G.S. *Fizicheskoe, matematicheskoe i chislennoe modelirovanie pristenochnoy plazmy primenitel'no k sistemam aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki i volnovym tekhnologiyam. Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika* [Physical, mathematical, and numerical modeling of near-wall plasma applied to aerospace systems and wave technologies. Regular and chaotic dynamics]. Izhevsk, 2018, 280 p.

Authors' information

Filippov Gleb Sergeevich — Cand. Sci. (Phis.-Math.), Deputy Director of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, filippov.gleb@gmail.com

Glazunov Victor Arcad'evich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, info@imash.ru

Aleshin Aleksandr Konstantinovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, aleshin_ak@mail.ru

Rashoyan Gagik Volodyaevich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, gagik_r@bk.ru

Skvortcov Sergey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, 1691skvortcov@mail.ru

Shalyukhin Konstantin Andreevich — Cand. Sci. (Tech.), Researcher of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, constmeister@gmail.com

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.