

УДК 621.01

Механизмы параллельной структуры с шестью степенями свободы, разработанные в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Н.Р. Габутдинов¹, В.А. Глазунов², Д.Н. Филиппов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

² ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4.

Developing six-degree-of-freedom parallel mechanisms at the Research Institute for Machine Science n.a. A.A. Blagonravov

N.R. Gabutdinov¹, V.A. Glazunov², D.N. Filippov¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

² Research Institute for Machine Science n. a. A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences, Malyy Kharitonëvskiy Pereulok, 4, 101990, Moscow, Russian Federation.



e-mail: gabutdinov@gmail.com



Современному машиностроению необходимы надежные, высокоэффективные и высокоточные машины. Исследованы механизмы параллельной структуры с шестью степенями свободы, позволяющие повысить эффективность multifunctionальных машин и обеспечить высокую производительность, надежность и точность. Улучшения достигаются за счет использования нескольких кинематических цепей для связи выходного звена с основанием. Рассмотрены различные виды механизмов параллельной структуры, предназначенные для решения разных инженерных задач. Описан метод классификации таких механизмов.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, производительность, надежность, точность, число степеней свободы, кинематические цепи.



Modern engineering industry requires reliable, high-performance, and high-precision machines. This paper deals with six-degree-of-freedom parallel mechanisms that make it possible to increase the efficiency of multifunctional machines and provide high performance, reliability and accuracy. The improvements can be achieved by using multiple kinematic chains to connect the output member with the foundation. Various types of parallel mechanisms for solving various engineering problems are considered. A method for classifying such mechanisms is described.

Keywords: parallel mechanism, performance, reliability, accuracy, kinematic chains.

Механизмы параллельной структуры обладают уникальными свойствами в силу того, что представляют собой подвижные пространственные фермы [1–3]. Наиболее полно данные механизмы и их классификация рассмотрены в работе [1]. В зависимости от числа степеней свободы и коли-

чества кинематических цепей механизму присваивается идентификатор. При этом логично, что одному идентификатору могут соответствовать разные механизмы.

Цель работы — проанализировать работы, проведенные в Институте машиноведения

им. А.А. Благонравова РАН, в которых рассмотрены вопросы синтеза и управление механизмами с параллельной топологией.

В процессе реализации проекта создания космического челнока, стартующего с борта самолета-носителя, стала актуальной задача синтеза механизмов, которые позволили бы манипулировать моделями летательных аппаратов в аэродинамической трубе.

В соответствии с указанной задачей механизм параллельной структуры должен был воспринимать высокую нагрузку, обладать минимальным сопротивлением и иметь шесть степеней свободы. А.Ф. Крайнев предложил схемы с тремя, четырьмя и пятью соединительными кинематическими цепями [4]. Решение задачи имеет следующие особенности.

Схемы пространственных механизмов в общем случае содержат основание 1, выходное звено 2, шесть приводов 3 поступательного движения со штоками 4, по крайней мере один из которых шарнирно связан с основанием 1, стержни 5, каждый из которых с одной стороны шарнирно связан с выходным звеном 2, а с другой — с соответствующим приводом 3 или соответствующим штоком 4, сферические шарниры 6, установленные в основании 1, каждый из которых имеет сквозное отверстие, в которых размещены стержни 5 с возможностью поступательного движения (рис. 1).

Пространственный механизм с шестью степенями свободы работает следующим образом. Перемещение выходного звена 2 обусловлено

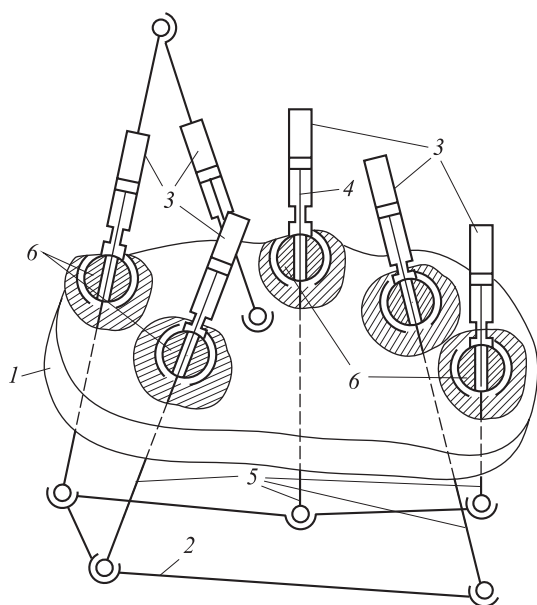


Рис. 1. Схема пространственного механизма с шестью степенями свободы

перемещением связанных с ним стержней 5 посредством приводов 3. Следует отметить, что данные механизмы для испытаний моделей летательных аппаратов могут быть использованы и в других инженерных задачах.

Дальнейшее развитие таких механизмов позволило уменьшить число стержней до двух [5]. Однако при этом нельзя использовать две сферические кинематические пары для сопряжения стержней с выходным звеном (рис. 2).

Пространственный механизм с шестью степенями свободы, представленный на рис. 2, а, содержит: основание 1 с двумя сферическими шарнирами 2 и 3, каждый из которых имеет сквозное отверстие; выходное звено 4; два стержня 5 и 6, каждый из которых размещен в отверстии соответствующего шарнира 2 и 3 с возможностью поступательного перемещения; шесть приводов 7–12 поступательного движения со штоками, пять из которых шарнирно установлены на основании, а шестой привод 12 закреплен на сферическом шарнире 2 и связан сферическим шарниром 13 со штоками двух приводов 8 и 9. Стержень 5 одним концом закреплен

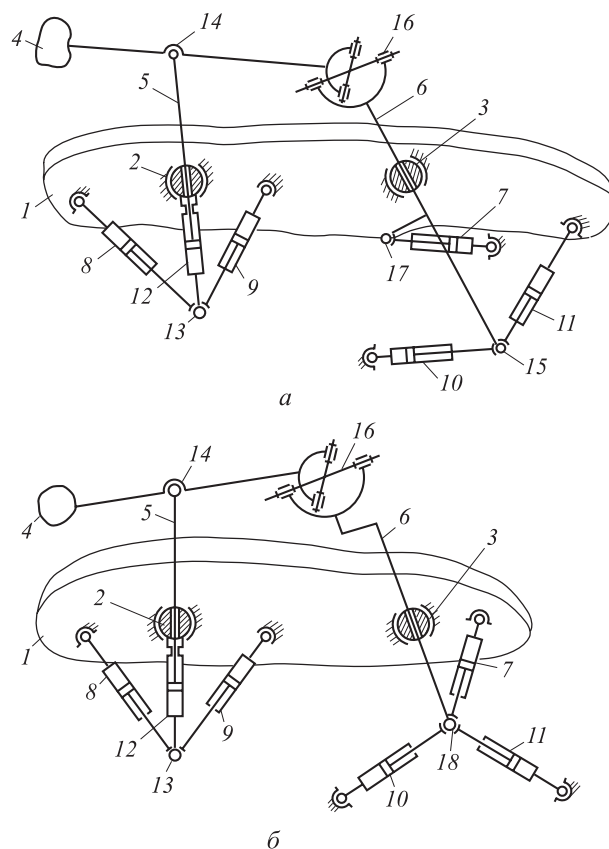


Рис. 2. Пространственный механизм с шестью степенями свободы и двумя стержнями:
а — общий случай; б — шарнир Гука расположен на оси стержня

на штоке привода 12, а другим связан посредством сферического шарнира 14 с выходным звеном 4. Стержень 6 одним концом посредством сферического шарнира 15 соединен со штоками приводов 10 и 11, а другим посредством шарнира Гука 16 — с выходным звеном 4. Привод 7 своим

штоком посредством сферического шарнира 17 связан со стержнем 6. Центр шарнира 17 смещен относительно оси стержня 6.

На рис. 2, б изображен механизм, в котором шток привода 7 соединен со стержнем 6 сферическим шарниром 18. С шарниром также сое-

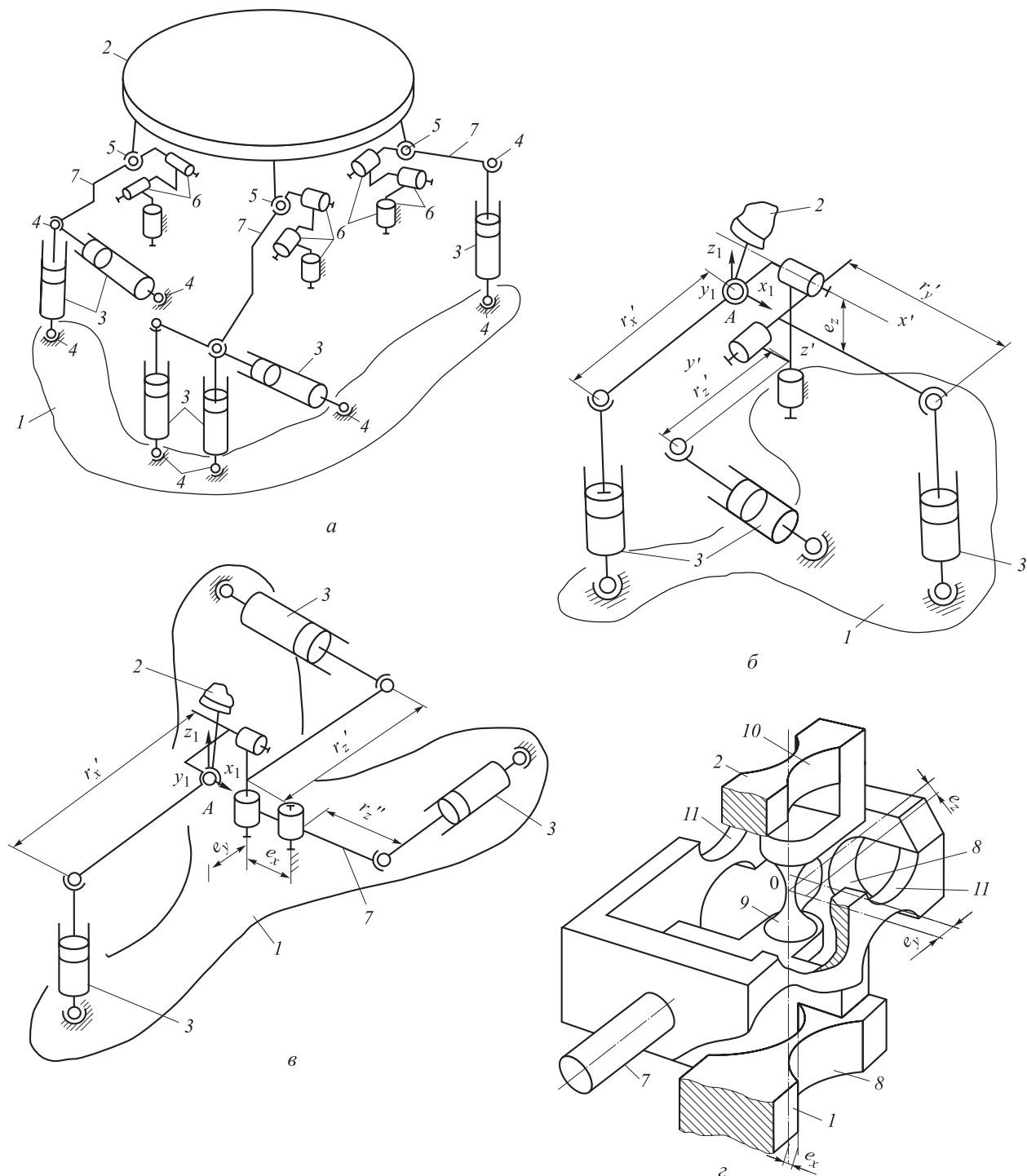


Рис. 3. Пространственный механизм микроманипулятора:

а — вращательные пары с ортогонально скрещивающимся размещением осей; б, в — кинематические цепи с тремя приводами механизма; г — кинематические цепи с гибкими элементами

динены штоки приводов 10 и 11. В этом варианте исполнения механизма для обеспечения его работоспособности шарнир Гука 16 расположен не на оси стержня 6.

Пространственный механизм с шестью степенями свободы работает следующим образом. При соответствующем перемещении штоков приводов 7–12 происходит перемещение стержней 5 и 6, которые, в свою очередь, меняют положение выходного звена 4 в пространстве.

Перед ИМАШ РАН была поставлена задача создания пространственных механизмов параллельной структуры, синтез манипулятора, предназначенного для производства электронной техники, где требуется высокая точность при перемещении объекта.

Для решения этой задачи А.Ф. Крайневым были предложены схемы манипуляционных механизмов с передаточным отношением между перемещениями в приводах и перемещениями выходного звена [6, 7]. Передаточное отношение было обеспечено за счет наличия рычага в каждой из кинематических цепей, а также за счет смещения центра сферической пары относительно центра вращательных пар, каждая кинематическая пара должна быть выполнена в виде изгибного упругого элемента.

Пространственный механизм микроманипулятора состоит из следующих элементов (рис. 3, а). Основание 1 связано с выходным звеном 2 через кинематические цепи, включающие приводы 3, соединенные с основанием и другими элементами кинематических цепей сферическими парами 4. Одна из сферических пар 5 принадлежит выходному звену. Каждая кинематическая цепь содержит три вращательные пары 6, расположенные последовательно, одна из которых сопряжена с основанием 1, а другая — со сферической парой 5 выходного звена 2. Приводы соединены с остальными элементами кинематических цепей через рычаги 7. Вращательные пары 6 можно расположить либо ортогонально друг другу со скрещивающимся расположением осей (рис. 3, а), либо компланарно, когда ось одной пары ортогональна двум остальным.

Механизм, представленный на рис. 3, б, имеет кинематические цепи, выполненные в виде единого элемента. Вращательные пары 6 сделаны в виде перемычек 8 пониженной жесткости, имеющих прямоугольное поперечное сечение, а сферическая пара 5 выполнена в виде совокупности перемычек 9 пониженной жесткости круглого сечения и перемычки 10 пониженной жесткости прямоугольного сечения. Центр перемычки 9

расположен на продолжении оси перемычки 10. Одна из вращательных пар 6 выходного звена, сопряженная со сферической парой 5, выполнена в виде совокупности двух перемычек 11 пониженной жесткости прямоугольного поперечного сечения.

Если совместить начало координат с точкой центра сферической пары 5 выходного звена 2, то вращательные пары 6 расположены от центра на расстоянии l_x, l_y, l_z . Отношение этих расстояний к длине соответствующего рычага 7 обуславливает передаточное отношение, т. е. отношение перемещения точки, с которой непосредственно связан привод 3, и точки центра сферического шарнира 5 выходного звена 2.

В случае, если механизм, изображенный на рис. 3, а, в одной кинематической цепи содержит три привода, в другой — два, в третьей — один, то три привода, принадлежащие одной кинематической цепи, определяют положение точки центра сферической пары 5 этой цепи. Остальные приводы определяют ориентацию выходного звена 2.

Было предложено еще много технических решений, позволяющих обеспечить эффективность работы устройств параллельной структуры. Одно из них связано с обеспечением перехода через особые положения (сингулярности), в которых манипулятор теряет управляемость. Для сохранения работоспособности при прохождении через сингулярности было предложено использовать дополнительный двигатель, который включается при подходе к вырожденной конфигурации [8] (рис. 4). После перехода вновь включается основной привод.

Очередным важным этапом в развитии идеи механизмов параллельной структуры стала разработка устройств для лазерной резки, активное участие в которой принял Л.К. Ковалев. Им был

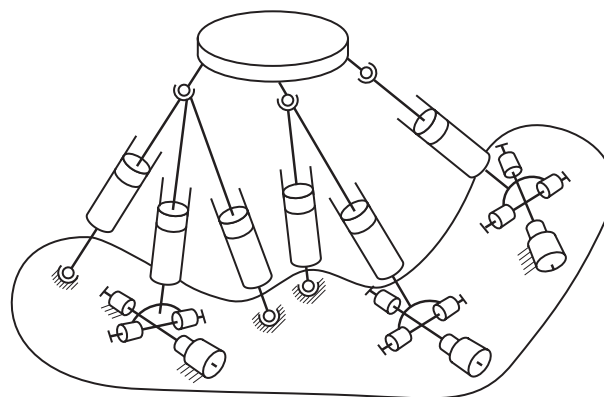


Рис. 4. Пространственный механизм

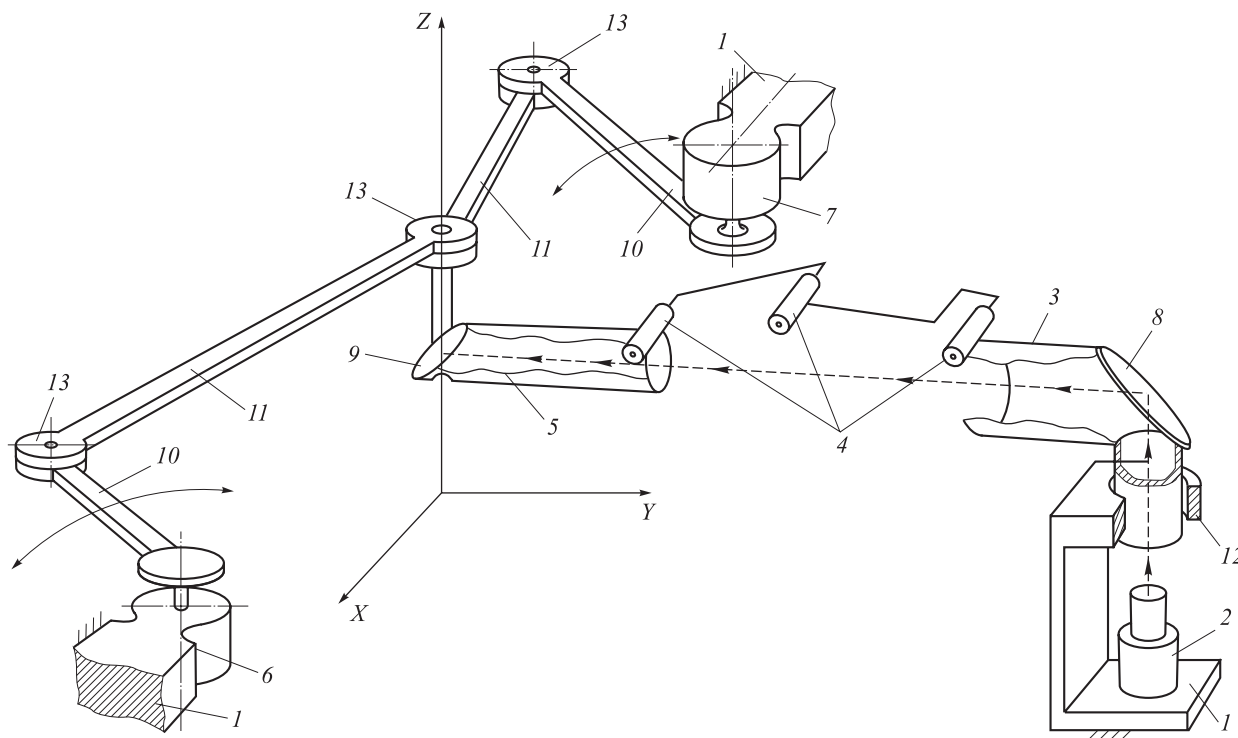


Рис. 5. Устройство для лазерной резки

предложен ряд технических решений, основанных на том, что лазер должен быть установлен на основании, а механизм параллельной структуры должен перемещать систему, состоящую из двух зеркал [9]. Особенности этого механизма заключаются в следующем (рис. 5). Данное устройство содержит основание 1, установленный на нем лазер 2, лучепровод 4 с входным 3 и выходным 5 концами, двумя приводами 6 и 7, зеркала 8 и 9, размещенные на входном и выходном концах лучепровода соответственно.

Связь между входным и выходным концами лучепровода выполнена в виде трех шарниров, включающих стержни 10 и выходные звенья 11, причем каждое входное звено соединено с двигателем вращательного движения и с выходным

звеном, а выходные звенья 11 шарнирно связаны между собой и с выходным концом лучепровода. Выходной конец лучепровода 3 соединен с основанием посредством шарнира 12.

Со временем встал вопрос о расширении эксплуатационных возможностей механизмов параллельной структуры, что было достигнуто за счет использования одинаковых приводов [10] и упрощения управления [11].

Таким образом, механизмы параллельной структуры обладают рядом уникальных свойств, позволяющих получить эффективные технические решения, имеющие широкое применение в различных областях машиностроения. Однако при этом возникают серьезные научные задачи, связанные с синтезом и управлением.

Литература

[1] Глазунов В.А. *Междисциплинарность робототехники. Самоорганизация, бифуркации, многокритериальность*. Москва, Прогресс-Традиция, 2002. 110 с.
 [2] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Springer, 2006. pp. 15–79.
 [3] Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
 [4] Борозна А.Г., Глазунов В.А., Жук В.П., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф., Миодушевский П.В., Модель Б.И., Чернов В.Ф. *Пространственный механизм с шестью степенями свободы*. А.с. № 1661528 СССР, МКИ В 25J 11/00, 1991. 7 с.
 [5] Glazunov V.A., Bolnokin V.E., Phan Bui Khoi, Glazunova O.V., Makarow M.G. Singular Zones of Parallel Manipulators and Joint Manipulating Mechanisms. *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, China, 2004, pp. 173–176.

- [6] Вишнякова Т.Л., Глазунов В.А., Коллеров Э.П., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственный механизм*. А.с. № 1703443, СССР МКИ В 25J 1/00, 1992. 6 с.
- [7] Глазунов В.А., Дугин Е.Б., Кистанов В.А., Ву Нгок Бик. Оптимизация параметров механизмов параллельной структуры на основе моделирования рабочего пространства. *Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение*, 2005, № 6, с. 12–16.
- [8] Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения. *Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение*, 2004, № 2, с. 78–84.
- [9] Крайнев А.Ф., Васецкий Б.Г., Ковалев Л.К., Глазунов В.А., Алешин А.К. *Установка для лазерной резки*. Пат. № 2060135 РФ. МКИ В 23К 26/06, 1996. 5 с.
- [10] Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Терехова А.Н., Ву Нгок Бик. Об особенностях устройств относительного манипулирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение*, 2007, № 2, с. 77–85.
- [11] Глазунов В.А., Тывес Л.И., Данилин П.О. *Пространственный механизм*. Пат. № 3403140 РФ, МКИ. В 25 J 9/00, 2010. 7 с.

References

- [1] Glazunov V.A. *Mezhdistsiplinarnost' robototekhniki. Samoorganizatsiia, bifurkatsii, mnogokriterial'nost'* [Interdisciplinary robotics. Self-organization, bifurcation, multicriteriality]. Moscow, Progress-Traditsiia publ., 2002. 110 p.
- [2] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Springer, 2006, pp. 15–79.
- [3] Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [4] Borozna A.G., Glazunov V.A., Zhuk V.P., Koliskor A.Sh., Krainev A.F., Miodushevskii P.V., Model' B.I., Chernov V.F. *Prostranstvennyi mekhanizm s shest'iu stepeniami svobody* [Spatial mechanism with six degrees of freedom]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR no. 1661528, MКИ V 25J 11/00, 1991.
- [5] Glazunov V.A., Bolnokin V.E., Phan Bui Khoi, Glazunova O.V., Makarow M.G. Singular Zones of Parallel Manipulators and Joint Manipulating Mechanisms. *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Tianjin, China, 2004, pp. 173–176.
- [6] Vishniakova T.L., Glazunov V.A., Kollerov E.P., Koliskor A.Sh., Krainev A.F. *Prostranstvennyi mekhanizm* [Spatial Mechanism]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR no. 1703443, MКИ V 25J 1/00. 1992.
- [7] Glazunov V.A., Dugin E.B., Kistanov V.A., Vu Ngok Bik. Optimizatsiia parametrov mekhanizmov paralel'noi struktury na osnove modelirovaniia rabocheho prostranstva [Optimization of parameters of mechanisms of parallel structures based on modeling workspace]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin. Mashinovedenie* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2005, no. 6, pp. 12–16.
- [8] Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E. Upravlenie mekhanizmami paralel'noi struktury pri perekhode cherez osobyie polozeniia [Control mechanisms of parallel structure when passing through special provisions]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin. Mashinovedenie* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2004, no. 2, pp. 78–84.
- [9] Krainev A.F., Vasetskii B.G., Kovalev L.K., Glazunov V.A., Aleshin A.K. *Ustanovka dlia lazernoi rezki* [Laser cutting machine]. Patent RF no. 2060135, MКИ V 23K 26/06. 1996.
- [10] Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Terekhova A.N., Vu Ngok Bik. Ob osobennostiakh ustroistv otноситel'nogo manipulirovaniia [About the features of the device relative to the manipulation]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin. Mashinovedenie* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2007, no. 2, pp. 77–85.
- [11] Glazunov V.A., Tyves L.I., Danilin P.O. *Prostranstvennyi mekhanizm* [Spatial Mechanism]. Patent RF no. 3403140, 2010.

Статья поступила в редакцию 05.05.2014

Информация об авторах

ГАБУТДИНОВ Наиль Рамилевич (Москва) — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gabutdinov@gmail.com).

ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич (Москва) — доктор технических наук, доктор философских наук, профессор, зав. лабораторией. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4).

ФИЛИППОВ Дмитрий Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент, инженер 1 категории кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

GABUTDINOV Nail' Ramilevich (Moscow) — Student of «Computer Systems of Automated Production» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: gabutdinov@gmail.com).

GLAZUNOV Viktor Arkad'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Phyl.), Professor of Research Institute for Machine Science n. a. A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN, Malyy Kharitonovskiy Pereulok, 4, 101990, Moscow, Russian Federation).

FILIPPOV Dmitriy Nikolaevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Computer Systems of Automated Production» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание монографии
**С.С. Гаврюшина, О.О. Барышниковой,
О.Ф. Борискина**

«Численный анализ элементов конструкций машин и приборов»

Изложены основные этапы расчетов на ЭВМ напряженного и деформированного состояний сложных стержневых, оболочечных и трехмерных конструктивных элементов в геометрически и физически нелинейной постановке. Особое внимание уделено разработке новой методики расчета и проектирования, позволяющей за счет использования оптимальных смешанных аппроксимаций перемещений проводить численное исследование процессов нелинейного деформирования гибких трубчатых манометрических элементов, анализировать влияние различных параметров на процесс деформирования, учитывать особенности нелинейного процесса деформирования. Приведены и проанализированы результаты расчетов тестовых примеров и реальных механических систем. Значительное внимание уделено практическому применению разработанных алгоритмов, программ и методик.

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; www.baumanpress.ru