



ЛЫСОГОРСКИЙ
Александр Евгеньевич
(МГТУ им. А.Н. Косыгина)

LYSOGORSKIY
Aleksandr Evgen'evich
(Moscow, Russian Federation,
Moscow State Textile University
'A.N. Kosygin')



ГЛАЗУНОВ
Виктор Аркадьевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

GLAZUNOV
Viktor Arkad'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Механизмы параллельной структуры с вращательными приводами для поступательных и вращательных движений

А.Е. Лысогорский, В.А. Глазунов

Механизмы параллельной структуры, как правило, должны выполнять поступательные или вращательные движения с тремя степенями свободы. В данной работе исследовано устройство, которое может выполнять оба этих вида движений с помощью трех приводов. Эти движения осуществляются с использованием трех вращательных кинематических пар с параллельными осями, расположенными в каждой из трех кинематических цепей. Изменения структуры выполняются посредством дополнительных приводов, расположенных в каждой из трех кинематических цепей. Такой подход позволяет увеличить функциональные возможности механизмов, так как они могут обрабатывать детали различной формы. Механизмы параллельной структуры с вращательными приводами для поступательных и вращательных движений будут полезны при сборке, сварке, покраске и измерениях. Подобные механизмы, способные изменять свою структуру и выполнять разные виды движения, в литературе не описаны и в данной статье представлены впервые.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, поступательные кинематические пары, поступательные и вращательные движения.

Parallel-structure mechanisms with rotational drives for translational and rotational motions

A.E. Lysogorskiy, V.A. Glazunov

Parallel-structure mechanisms, as a rule, have to perform translational or rotational motions with three degrees of freedom. In this study, a device that can perform both types of motion using three actuators is investigated. These motions are carried out using three rotational kinematic pairs with parallel axes associated with each of the three kinematic chains. Structural changes are accomplished by additional actuators located in each chain. This approach allows improving the functionality of the mechanisms as they can handle details of various shapes. The parallel-structure mechanisms with rotational drives for translational and rotational motions will be useful in assembling, welding, painting and making measurements. The mechanisms that are able to change their structure and perform various motions are not described in the literature and presented in this paper for the first time.

Keywords: parallel-structure mechanism, kinematic pairs, spherical mechanism, translational and rotational motions.

Механизмы параллельной структуры как правило предназначены для выполнения поступательных или вращательных движений с тремя степенями свободы [1—3]. Такие движения необходимы при сборке, сварке, покраске, измерениях. Структурный синтез подобных механизмов рассмотрен в многочисленных работах [4—11]. Особенно эффективным аппаратом структурного анализа и синтеза устройств подобных механизмов оказалось винтовое исчисление [12—14].

Приведем некоторые из наиболее известных механизмов параллельной структуры, выполняющих поступательные или сферические движения. Одно из первых исследований в области синтеза поступательных механизмов описано в статье [15], в которой рассмотрены связи, налагаемые на движения выходного звена. Затем был синтезирован один из наиболее известных механизмов данного класса — робот Дельта [16].

Под руководством В. Паренти-Кастелли был проведен ряд работ по созданию поступательно-направляющих механизмов. Одно из таких устройств с тремя степенями свободы [17] имеет свойство частичной развязки, когда каждый привод управляет движением выходного звена по одной декартовой координате (рис. 1). Данным свойством обладает также механизм, созданный под руководством К. Гослена и К. Конга [18].

Сферические механизмы параллельной структуры рассмотрены во многих публикаци-

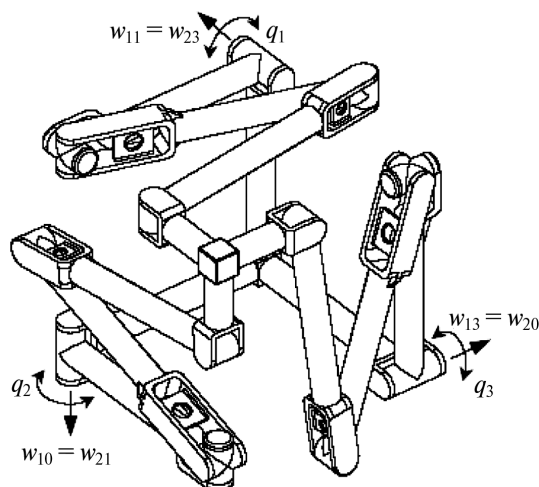


Рис. 1. Поступательно-направляющий механизм

ях. В частности весьма интересна схема механизма с тремя кинематическими цепями, где оси пар пересекаются в двух точках [19] (рис. 2). В данном случае каждая кинематическая цепь налагает по одной связи. Подобное решение используется и в других устройствах [20]. Многие применения сферических механизмов приведены в работе [21].

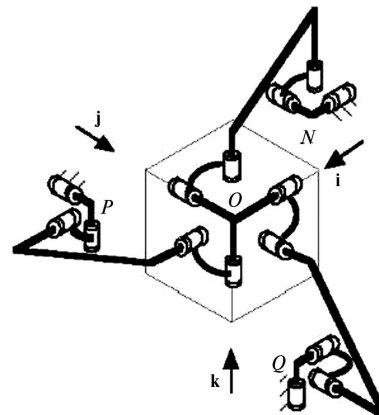


Рис. 2. Сферический механизм

Исходя из сказанного выше, целесообразно разработать механизм, который может выполнять оба вида движений (поступательное и вращательное) с помощью трех приводов. Эту проблему можно решить при наличии трех вращательных кинематических пар с параллельными осями, расположенными в каждой из трех кинематических цепей.

Рассмотрим механизм параллельной структуры с тремя соединительными кинематическими цепями, в которых начальные и конечные кинематические пары могут иметь параллельные или пересекающиеся в одной точке оси. Соответственно будет иметь место поступательно-направляющий механизм или сферический механизм. Для анализа числа степеней свободы применим известную формулу А.П. Малышева.

В каждой кинематической цепи используем частичную кинематическую цепь, состоящую из трех шарниров с параллельными осями. Эта частичная кинематическая цепь может обеспечить вращение вокруг любой оси, параллельной осям соответствующих вращательных пар. Представим графически взаимное расположение звеньев и кинематических пар. Механизм

(рис. 3) включает основание 1 , выходное звено 2 , три кинематические цепи, каждая из которых содержит входную вращательную кинематическую пару $3, 3', 3''$, начальную вращательную кинематическую пару $4, 4', 4''$, промежуточную вращательную кинематическую пару $5, 5', 5''$, конечную вращательную кинематическую пару $6, 6', 6''$, выходную вращательную кинематическую пару $7, 7', 7''$. При этом оси начальной $4, 4', 4''$, промежуточной $5, 5', 5''$ и конечной $6, 6', 6''$ вращательных кинематических пар расположены параллельно друг к другу, ось начальной вращательной кинематической пары $4, 4', 4''$ — с пересечением оси входной вращательной кинематической пары $3, 3', 3''$ перпендикулярно ей, а ось конечной вращательной кинематической пары $6, 6', 6''$ — с пересечением оси выходной вращательной кинематической пары $7, 7', 7''$ перпендикулярно ей.

Частичная кинематическая цепь, состоящая из начальной $4, 4', 4''$, промежуточной $5, 5', 5''$ и конечной $6, 6', 6''$ вращательных кинематических пар, позволяет получить вращение вокруг любой оси, параллельной осям этих пар. Благодаря тому, что каждая кинематическая цепь снабжена дополнительным приводом вращательного перемещения δ , ось которого расположена с пересечением оси входной вращательной кинематической пары 3 , возможно изменение взаимного положения входной и выходной кинематических пар. Тем самым

может быть изменен вид движения выходного звена.

Найдем число степеней свободы механизма по формуле А.П. Малышева

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

где n — число звеньев; p_5 — число пар 5-го класса (одноподвижных пар); p_4 — число пар 4-го класса, ..., p_1 — число пар 1-го класса.

Число степеней свободы, рассчитанное по этой формуле, равно 6. Три степени свободы обусловлены наличием дополнительного привода δ , который изменяет взаимное расположение вращательных кинематических пар 3 и 7 и обеспечивает поступательные либо вращательные движения выходного звена. Число степеней свободы в том случае, если дополнительные приводы заторможены, равно 3.

Для обоснования того, что механизм может двигаться поступательно рассмотрим плюккеровы координаты единичных винтов осей кинематических пар, при этом три кинематические цепи налагают по одной связи (рис. 4). Единичные винты, характеризующие положения осей кинематических пар, имеют следующие координаты:

$$E_{11} (e_{11x}, e_{11y}, e_{11z}, e_{11x}^{\circ}, e_{11y}^{\circ}, e_{11z}^{\circ});$$

$$E_{12} (e_{12x}, e_{12y}, e_{12z}, e_{12x}^{\circ}, e_{12y}^{\circ}, e_{12z}^{\circ});$$

$$E_{14} (e_{14x}, e_{14y}, e_{14z}, e_{14x}^{\circ}, e_{14y}^{\circ}, e_{14z}^{\circ});$$

$$E_{15} (e_{15x}, e_{15y}, e_{15z}, 0, 0, 0).$$

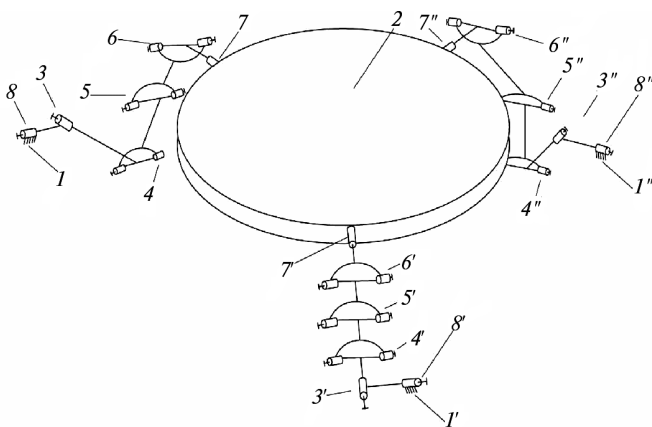


Рис. 3. Механизм, выполняющий поступательные движения

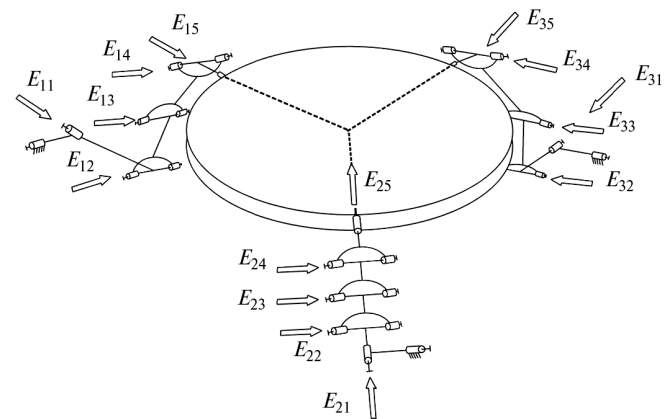


Рис. 4. Схема расположения единичных винтов поступательного механизма

Для остальных кинематических цепей выражения для единичных винтов кинематических пар аналогичны.

Рассмотрим случай, когда кинематические пары $E_{12}, E_{22}, E_{32}, E_{14}, E_{24}, E_{34}$ расположены горизонтально. В этом случае плюнкеровы координаты имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} E_{11} & (e_{11x}, e_{11y}, e_{11z}, 0, 0, 0); \\ E_{12} & (e_{12x}, e_{12y}, 0, e^{\circ}_{12x}, e^{\circ}_{12y}, e^{\circ}_{12z}); \\ E_{13} & (0, 0, 0, e^{\circ}_{13x}, e^{\circ}_{13y}, e^{\circ}_{13z}); \\ E_{14} & (e_{14x}, e_{14y}, 0, e^{\circ}_{14x}, e^{\circ}_{14y}, e^{\circ}_{14z}); \\ E_{15} & (e_{15x}, e_{15y}, e_{15z}, 0, 0, 0). \end{aligned}$$

Для других кинематических цепей выражения для плюнкеровых координат аналогичны.

Если единичные винты кинематических цепей $E_{12}, E_{13}, E_{14}, E_{22}, E_{23}, E_{24}$ и E_{32}, E_{33}, E_{34} будут горизонтальны, то они смогут обеспечить перемещение по оси z (это можно показать с помощью плоского механизма), что недопустимо. Таким образом, кинематические пары $E_{12}, E_{13}, E_{14}, E_{22}, E_{23}, E_{24}$ и E_{32}, E_{33}, E_{34} должны иметь наклон.

Убедимся, что данный механизм действительно совершает лишь поступательные движения. Для этого рассмотрим силовые винты, взаимные ортам осей кинематических пар соединительных кинематических цепей. Для первой кинематической цепи это будет силовой винт R_1 , взаимный ортам осей кинематических пар $E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{14}$ и E_{15} . Нетрудно показать, что R_1 расположен перпендикулярно осям E_{11} и E_{12}, E_{14} и E_{15} и имеет параметр, равный бесконечности. Действительно, этот винт взаимен ортам осей E_{11} и E_{12}, E_{13}, E_{14} и E_{15} , поскольку он перпендикулярен им.

Таким образом, имеет место силовой винт бесконечно большого параметра. Тоже можно сказать о двух других соединительных кинематических цепях, т. е. имеются три силовых винта, препятствующих вращательным движениям. Следовательно, возможны лишь поступательные движения.

Другая модификация рассматриваемого механизма (рис. 5) отличается тем, что под действием дополнительного привода 8 изменено взаимное положение входной 3 и выходной 7 кинематических пар. Их оси расположены с пересечением друг друга, это должно обусло-

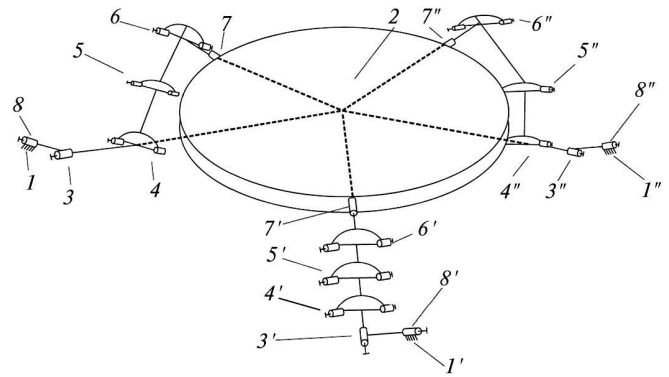


Рис. 5. Механизм, выполняющий вращательные движения

вить вращательные движения выходного звена 2 относительно основания 1 . Отметим, что частичная кинематическая цепь, включающая кинематические пары $4, 5$ и 6 , здесь также обеспечивает вращение вокруг любой оси, параллельной осям этих пар. Число степеней свободы для данной модификации механизма рассчитывается аналогично предыдущему.

Для обоснования того, что механизм может совершать сферическое движение рассмотрим плюнкеровы координаты единичных винтов осей кинематических пар механизма (рис. 6). Данные единичные винты имеют следующие координаты:

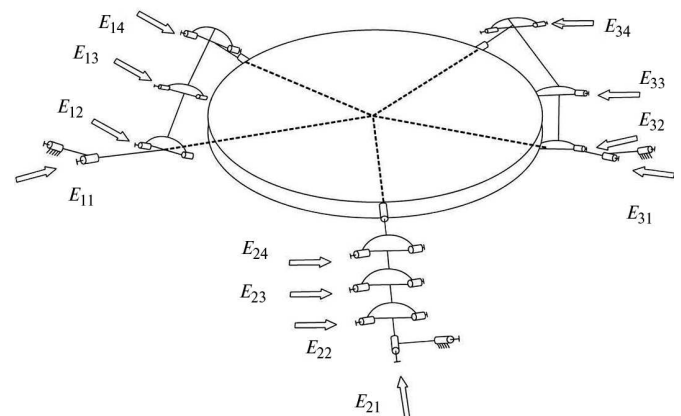


Рис. 6. Схема расположения единичных винтов сферического механизма

$$\begin{aligned}
 & E_{11} (e_{11x}, e_{11y}, e_{11z}, 0, 0, 0); \\
 & E_{12} (e_{12x}, e_{12y}, e_{12z}, e_{12x}^\circ, e_{12y}^\circ, e_{12z}^\circ); \\
 & E_{13} (e_{13x}, e_{13y}, e_{13z}, e_{13x}^\circ, e_{13y}^\circ, e_{13z}^\circ); \\
 & E_{14} (e_{14x}, e_{14y}, e_{14z}, e_{14x}^\circ, e_{14y}^\circ, e_{14z}^\circ); \\
 & E_{15} (e_{15x}, e_{15y}, e_{15z}, 0, 0, 0).
 \end{aligned}$$

Как и в предыдущем случае, выражения для плюккеровых координат единичных винтов кинематических пар аналогичны. В данном случае, как и ранее, при горизонтальном расположении кинематических пар E_{12} , E_{22} , E_{32} , E_{14} , E_{24} , E_{34} вновь возможно перемещение по оси z , что недопустимо. Таким образом, указанные кинематические пары должны иметь наклон.

Убедимся, что данный механизм действительно совершает лишь вращательные движения. Для этого рассмотрим силовые винты, взаимные ортам осей кинематических пар соединительных кинематических цепей. Для первой кинематической цепи это будет силовой винт R_1 , взаимный ортам осей кинематических пар E_{11} , E_{12} , E_{13} , E_{14} и E_{15} . Нетрудно показать, что R_1 расположен параллельно осям E_{12} и E_{14} , имеет параметр, равный нулю, и проходит через точку O . Действительно, этот винт взаимен ортам осей E_{11} и E_{15} , так как эти оси пересекают точку O , он взаимен ортам осей E_{12} , E_{13} и E_{14} , поскольку параллелен им.

Таким образом, имеет место силовой винт нулевого параметра, проходящий через точку O . Тоже можно сказать о двух других соединительных кинематических цепях, т. е. имеются три силовых винта, препятствующих поступательным движениям. Следовательно, возможны лишь вращательные движения.

Выводы

1. Задачу синтеза механизма параллельной структуры, обеспечивающего либо вращательное, либо поступательное движение, можно решить при наличии трех соединительных кинематических цепей, в каждой из которых должна быть частичная кинематическая цепь, включающая три вращательные кинематические пары с параллельными осями.

2. В каждой из кинематических цепей должен располагаться дополнительный двигатель,

изменяющий структуру самой кинематической цепи. При этом для обеспечения вращательных движений оси входных и конечных кинематических пар должны пересекаться в одной точке, для обеспечения поступательных движений указанные оси должны быть попарно параллельны.

Литература

- [1] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000, 372 p.
- [2] Колискор А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе 1-координат. *Станки и инструмент*, 1982, № 12, с. 21—24.
- [3] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991, 96 с.
- [4] Hunt K.H. *Kinematic Geometry of Mechanisms*. Oxford, Clarendon Press, 1978, 469 p.
- [5] Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007, 275 p.
- [6] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *European Journal of Mechanics*, 2004, vol. 23, pp. 1021—1039.
- [7] Herve J. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, vol. 34, no 8, pp. 719—730.
- [8] Angeles J. The Qualitative Synthesis of Parallel Manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 2004, vol. 126, pp. 617—624.
- [9] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation*. Kluwer Academic Publishers, 2004, 412 p.
- [10] Глазунов В.А. Структура пространственных механизмов. Группы винтов и структурные группы. Справочник. *Инженерный журнал*, 2010, приложение № 3, 24 с.
- [11] Sugimoto K. Existence Criteria for Overconstrained Mechanisms Design. *Trans ASME: Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1990, vol. 17, no. 3, pp. 295—298.
- [12] Диментберг Ф.М. *Теория винтов и ее приложения*. Москва, Наука, 1978, 327 с.
- [13] Диментберг Ф.М. *Теория пространственных шарнирных механизмов*. Москва, Наука, 1982, 336 с.
- [14] Воробьев Е.И., Диментберг Ф.М. *Теория пространственных шарнирных механизмов*. Москва, Наука, 1991, 262 с.
- [15] Саркисян Ю.Л., Парилян Т.Ф. Принципы построения пространственных поступательно-направляющих механизмов. *Машиноведение*, 1988, № 4, с. 12—20.
- [16] Clavel R. *Device for displacing and positioning an element in space*. Brevet № WO 87/03528. Classification Internationale de brevets: B25J 17/02. Date de publication internationale: 18.06.87.
- [17] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. of the XI World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, China, 2004, pp. 1624—1628.
- [18] Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., Bonev I. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines International Conference*. Chemnitz, Germany, 2004, pp. 595—610.
- [19] Herve J.M., Karouia M. The novel 3-RUU wrist with no idle pair. *Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*. Quebec, 2002, pp. 3—4.
- [20] Huda S., Takeda Y. Dimension Synthesis of 3-URU Pure Rotation Parallel Mechanism with Respect to Singularity and Workspace. *12-th IFTOMM World Congress*. Becasson, 2007, pp. 235—242.
- [21] Давиташвили Н.С. *Динамика сферических механизмов*. Москва, Наука, 1992, 256 с.

References

- [1] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.
- [2] Koliskor A.Sh. Razrabotka i issledovanie promyshlennykh robotov na osnove 1-koordinat [Development and research of industrial robots based on 1-coordinate]. *Stanki i instrument* [Machines and Tooling]. 1982, no. 12, pp. 21–24.
- [3] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Krainev A.F. *Prostranstvennye mekhanizmy parallel'noi struktury* [Spatial mechanisms of the parallel structure]. Moscow, Nauka publ., 1991. 96 p.
- [4] Hunt K.H. *Kinematic Geometry of Mechanisms*. Oxford, Clarendon Press, 1978. 469 p.
- [5] Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. 275 p.
- [6] Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *European Journal of Mechanics*, 2004, vol. 23, pp. 1021–1039.
- [7] Herve J. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, vol. 34, no. 8, pp. 719–730.
- [8] Angeles J. The Qualitative Synthesis of Parallel Manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 2004, vol. 126, pp. 617–624.
- [9] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation*. Kluwer Academic Publishers, 2004. 412 p.
- [10] Glazunov V.A. Struktura prostranstvennykh mekhanizmov. Gruppy vintov i strukturnye gruppy [The structure of spatial mechanisms. Group of screws and structural group]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal]. 2010, app no. 3, 24 p.
- [11] Sugimoto K. Existence Criteria for Overconstrained Mechanisms Design. *Trans ASME: Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1990, vol. 17, no 3, pp. 295–298.
- [12] Dimentberg F.M. *Teoriia vintov i ee prilozheniia* [Screw theory and its applications]. Moscow, Nauka publ., 1978. 327 p.
- [13] Dimentberg F.M. *Teoriia prostranstvennykh sharnirnykh mekhanizmov* [The theory of spatial linkage mechanisms]. Moscow, Nauka publ., 1982. 336 p.
- [14] Vorob'ev E.I., Dimentberg F.M. *Teoriia prostranstvennykh sharnirnykh mekhanizmov* [The theory of spatial linkages]. Moscow, Nauka publ., 1991. 262 p.
- [15] Sarkisian Iu.L., Parikian T.F. Printsipy postroeniia prostranstvennykh postupatel'no-napravliaiushchikh mekhanizmov [Principles of spatial translational guiding mechanisms]. *Mashinovedenie* [Knowing]. 1988, no. 4, pp. 12–20.
- [16] Clavel R. *Device for displacing and positioning an element in space*. Brevet no. WO 87/03528. Classification Internationale de brevets: B25J 17/02. Date de publication internationale: 18.06.87.
- [17] Carricato M., Parenti-Castelli V. On the topological and geometrical synthesis and classification of translational parallel mechanisms. *Proc. of the 11 World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, China, 2004, pp. 1624–1628.
- [18] Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., Bonev I. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines International Conference*. Chemnitz, Germany, 2004, pp. 595–610.
- [19] Herve J.M., Karouia M. The novel 3-RUU wrist with no idle pair. *Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*. Quebec, 2002, pp. 3–4.
- [20] Huda S., Takeda Y. Dimension Syntesis of 3-URU Pure Rotation Parallel Mechanism with Respect to Singularity and Workspace. *12-th IFToMM World Congress*. Becasson, 2007, pp. 235–242.
- [21] Davitashvili N.S. *Dinamika sfericheskikh mekhanizmov* [Dynamics of spherical mechanisms]. Moscow, Nauka publ., 1992. 256 p.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Информация об авторах

ЛЫСОГОРСКИЙ Александр Евгеньевич (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. А.Н. Косыгина (119071, Москва, Российская Федерация, Малая Калужская ул., д. 1, e-mail: Lazo-kazo@mail.ru).

ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич (Москва) — доктор технических наук, доктор философских наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vaglznv@mail.ru).

Information about the authors

LYSOGORSKIY Aleksandr Evgen'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Moscow State Textile University 'A.N. Kosygin' (Malaja Kaluzskaja str., 1, 119071, Moscow, Russian Federation, e-mail: Lazo-kazo@mail.ru).

GLAZUNOV Viktor Arkad'evich (Moscow) — Dr. Sci. (Eng., Phyl.), Professor of «Automated Production Computer Systems» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vaglznv@mail.ru).