

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90

<sup>1</sup>Бухаров К.Д., <sup>1</sup>Гришин Н.А., <sup>1</sup>Кудров М.А., <sup>2,\*</sup>Рыбак Л.А., <sup>2</sup>Черкасов В.В.<sup>1</sup>Московский физико-технический институт<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: rl\_bqtu@intbel.ru

## АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ШЕСТИСТЕПЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ И ТРЕНАЖЕРОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные аспекты применения методов математического моделирования для анализа свойств шестистепенных роботизированных платформ подвижности (РПП), которые могут быть использованы в качестве испытательных стендов и симуляторов для тестирования различной техники: дорожно-строительной, автотранспортной, авиационной, ракетно-космической и т.д. Применение тренажеров позволило создать виртуальную среду взаимодействия пользователя с конкретным специальным видом техники, которая реагирует на команды подобно настоящей. В статье рассмотрен также численный метод решения обратной задачи кинематики РПП, который состоит в определении зависимости изменения длин шести приводных штанг (прямолинейных привода) от шести координат (трех поступательных и трех вращательных), характеризующих положение подвижной платформы в пространстве. Выполнено математическое моделирование кинематики РПП. В качестве исходных данных для расчета системы управления РПП выбраны данные о требуемом линейном и угловом положении подвижной платформы РПП, а также положения штоков и скорости штоков приводных механизмов на базе электроцилиндров.

В результате моделирования получена выборка, соответствующая требованиям по величине хода штока электроцилиндров. Представлены результаты математического моделирования для множества позиционных параметров РПП. Численное моделирование поставленной оптимизационной задачи было выполнено для выбранной конфигурации геометрических параметров подвижной платформы РПП.

**Ключевые слова:** платформа, роботизация, траектория, конфигурация, гексапод, тренажер, моделирование, цифровизация, проектирование.

**Введение.** Внедрение различной роботизированной техники в производство способствует интенсивному развитию промышленности по всему миру. В связи с этим возрос интерес исследователей к оптимизации, анализу и модернизации существующих конструкций, и проектированию совершенно новых. Роботизированные платформы подвижности на базе гексаподов отличаются от роботов последовательной структуры наличием нескольких связей между неподвижным основанием и подвижной платформой, это позволяет расположить рабочий орган ближе к несущим основаниям, что существенно увеличивает эффективную грузоподъемность и обеспечивает высокую точность позиционирования, однако из-за большого количества кинематических связей рабочая область существенно ограничена [1–6]. Данные механизмы могут использоваться в тех отраслях промышленности в которых важна точность и грузоподъемность, а размеры рабочей области является второстепенным параметром.

Роботизированные платформы подвижности широко применяются в различных испытательных стендах, тренажах в качестве учебно-тренировочных комплексов для обучения водителей

дорожно-строительной техники, транспортных машин, специальной техники, техники военного назначения, авиационной и ракетно-космической. Спектр применения РПП постоянно расширяется. Для повышения качества обучения и снижения затрат наиболее эффективным способом обучения является не обучение управлению реальной машиной, а использование компьютерного тренажера (симулятора). В связи с этим водитель получает необходимые навыки, чтобы, впоследствии управлять реальной машиной с минимально возможными затратами и исключением последствий, связанных с неосторожными действиями оператора (водителя), которые могут привести к возникновению неисправностей машины или нанести вред окружающей среде. При создании тренажера широко внедряется принцип виртуальной реальности с использованием трехмерной модели местности [7]. Применительно к симуляторам дорожно-строительной техники подобные модели позволяют воссоздать условия эксплуатации и рельефа местности максимально приближенные к реальным. Понятно, что чем ближе виртуальная модель к реальному прототипу, тем качественнее созданный симулятор.

Пример тренажера показан на рисунке 1. Тренажер может быть использован для симуляции различного вида грузоподъемной техники: башенных кранов, портовых кранов, мостовых кранов и т.д.

Тренажер можно использовать как для обучения, так и для аттестации, повышения квалификации и т.д.

Известны различные тренажеры и симуляторы для обучения работе на экскаваторах, бульдозерах, кранах (автокран, башенный, мостовой,

козловой), погрузчиках (вилочный, фронтальный), тракторах, комбайнах [8]. Учебный тренажер "Экскаватор-студент" является компьютерным симулятором экскаватора, предназначенным для обучения по профессии машинист экскаватора. Он позволяет освоить управление гусеничным экскаватором и тренировать выполнение наиболее характерных для этой техники рабочих задач: разработка грунтов, рытье траншей и т.п. Тренажер содержит все основные органы управления гусеничным экскаватором. Усилия на джойстиках и рычагах близки к реальной технике



Рис. 1. Тренажер башенного крана [7]

**Методы исследований.** Важным направлением при разработке стендов и роботизированных платформ для тренажеров является использование имитационного моделирования с 3D-моделью РППК для получения и корректировки ошибок системы управления. В работе [9] рассмотрены различные методы моделирования роботизированных платформ подвижности с использованием сред численного моделирования MatlabSimulink и Catia. Выполнено сравнение полученных результатов, показывающих изменение координат верхних шарниров платформы, построенных в SimMechanics и Catia с теоретическими зависимостями, полученными с использованием приложения MathCad. Также показано, что точность симулирования в среде Matlab выше чем  $1 \times 10^{-4}$  мм, в то время как Catia обеспечила среднюю точность позиционирования шарниров  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Также необходимо отметить, что среда Matlab имеет более широкие возможности

и позволяет подключать множество инструментов для изучения модели, создавать свои собственные модули и разрабатывать собственные программы управления моделью. При этом, наглядность результатов не всегда характеризует свойства и параметры изучаемого объекта, в связи с чем возникает необходимость задавать множество свойств применяемых модулей.

В работе [9] показано, что модель, сделанная в Catia, характеризуется меньшей точностью изображения, однако визуализация результатов вычислений значительно выше. В данной программной среде построена модель РПП с фотографической точностью, при этом многие физические данные деталей, позволили упростить параметризацию модели в Matlab. На рисунке 3 приведены модели платформы Гофастюарта, построенных в MatlabSimulink и Catia [9, 10].



Рис. 2. Учебный тренажер – «Экскаватор-студент» [8]

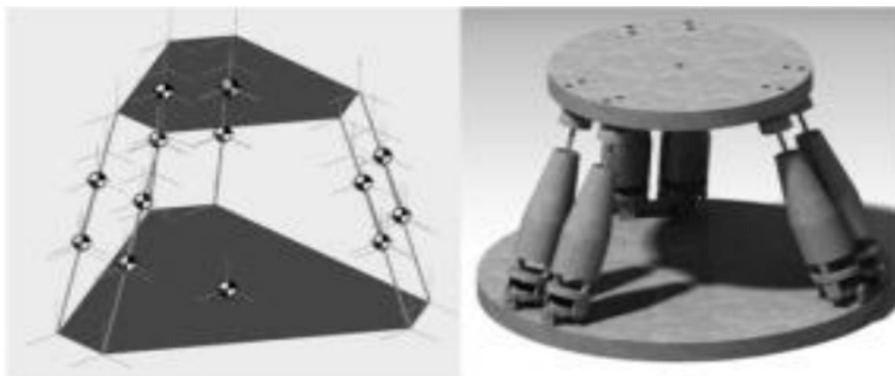


Рис. 3. Внешний вид моделей в MatlabSimulink и Catia [9, 10]

В работе [11] проведено сравнение широкого перечня средств для численного моделирования роботизированных платформ подвижности, в том числе: Maple, Mathematica, Matlab, Vissim, Maxima, Scilab, MathCad.

В работе [10] авторами представлена имитационная динамическая модель гексапода с прямолинейными приводами на основе шаговых двигателей. Приведена реализация модели динамических характеристик трения, происходящих в прямолинейном приводе, а также система управления приводом в среде численного моделирования MatlabSimulink. Проведены тесты с изменением положения верхней платформы и дальнейшим проведением расчётов.

В работах [12, 13] представлены результаты применения позиционного шагового двигателя в составе приводных механизмов платформы подвижности при наличии существенных сил трения и действии инерционной нагрузки. Кроме

того, предполагается возникновение колебательных процессов в установившемся режиме управления движением привода платформы.

Анализ кинематики РПП и результатов моделирования в среде MatlabSimulink, приведенный в [14] показал, что точность позиционирования и ориентации верхней платформы в существенной степени зависит от кинематических параметров механизма. Для увеличения точности при заданной погрешности изменения длин штанг РПП необходимо уменьшать расстояния между точками установки смежных шарниров основания и платформы, установки шарниров основания, а также значение нулевой высоты верхней платформы должно быть близким к диаметру делительной окружности установки смежных шарниров основания.

**В качестве объекта исследования** рассмотрим платформу Гофа-Стюарта, также называемую гексаподом, которая имеет 6 степеней свободы и представляет собой механизм, состоящий

из 2 платформ. Подвижная платформа соединена с неподвижной посредством 6 телескопических звеньев, имеющих на обоих концах сферические шарниры. Шарниры на неподвижной платформе расположены попарно симметрично по всей окружности с углом поворота  $120^\circ$ . Центры шарниров подвижной платформы образуют равнобедренный треугольник. Желаемое положение и ориентация подвижной платформы достигается изменением длин приводных звеньев.

**Цели и задачи.** Для построения системы управления РПП необходимо решить обратную задачу кинематики, т.е. определить зависимости изменения длин шести штанг (приводных механизмов) от шести координат (трех поступательных и трех вращательных), характеризующих положение верхней платформы в пространстве. В качестве исходных данных для расчета системы управления электроцилиндрами (ЭЦ) РПП используется результирующее положение подвижной платформы т.е. требуемые линейные координаты и углы ориентирующие подвижную платформу в пространстве (углы Эйлера). Заданием для АСУ ЭЦ являются положения штоков и скорости штоков ЭЦ. Рассмотрим численный метод решения обратной задачи кинематики для анализа свойств РПП на базе гексапода.

### Решение обратной задачи кинематики РПП.

Решение обратной задачи кинематики РПП основано на матричных преобразованиях. Для их построения рассмотрим кинематическую модель подвижной платформы Стюарта [15-20], приведенной в виде эквивалентной схемы, как показано на рисунке 4. Введем две правосторонние декартовы системы координат нижней платформы  $A - Oxyz$  и верхней платформы  $B - O'x'y'z'$ , расположенных в центрах тяжести соответствующих платформ. Оси  $z$  и  $z'$  направлены ортогонально из плоскости нижней и верхней платформ соответственно. Оси двух систем координат совмещены в моменте, когда подвижная платформа  $B$  находится в исходном положении.

Узлы  $a_i$  и  $b_i$  являются соединениями  $i$ -го подвижного стержня на нижней и верхней платформе соответственно. Положение верхней подвижной платформы может быть представлено с помощью 6 переменных:  $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ , где  $(x, y, z)$  – координаты верхней платформы в системе координат  $x'y'z'$ ,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  – углы поворота верхней платформы  $A$  относительно осей  $z', y'$  и  $x'$  соответственно.

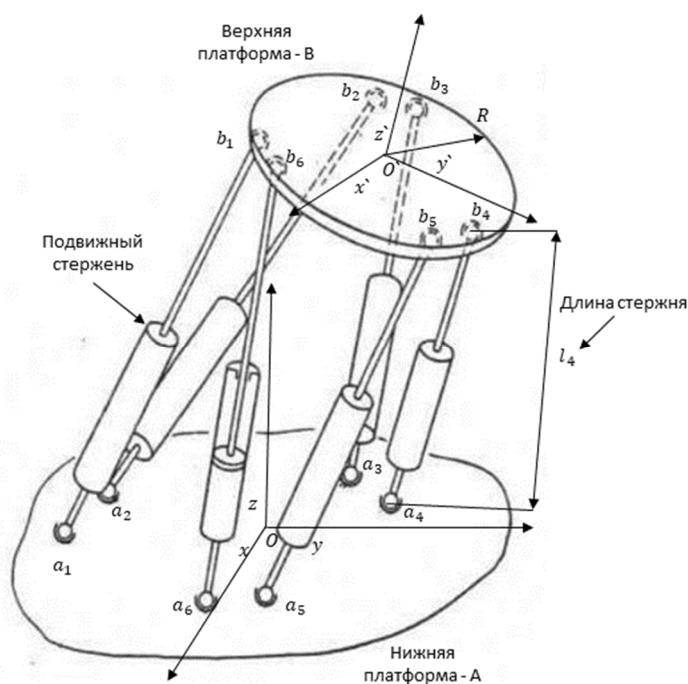


Рис. 4. Внешний вид шестистепенной платформы Стюарта 6-6

Пусть  $(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})^T$  обозначает координату узла  $a$  платформы  $A$ , а  $(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T$  – координату  $b_i$  платформы  $B$ . Тогда обратная кинематическая модель платформы Стюарта может быть записана следующим образом:

$$\|(x, y, z)^T + M(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T - (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})^T\|_2 = l_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \tag{1}$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -го подвижного стержня;  $M$  – матрица вращения, определяемая по формуле:

$$M = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Параметризация кинематической модели подвижной платформы Стюарта задается с помощью набора точек  $a_i$  нижнего основания А следующим образом:

$$\begin{aligned} a_1 &= (R \cos\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right), 0), \\ a_2 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(120 - \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(120 - \theta)}{360}\right), 0), \\ a_3 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(120 + \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(120 + \theta)}{360}\right), 0), \\ a_4 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(240 - \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(240 - \theta)}{360}\right), 0), \\ a_5 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(240 + \theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(240 + \theta)}{360}\right), 0), \\ a_6 &= (R \cos\left(\frac{2\pi(-\theta)}{360}\right), R \sin\left(\frac{2\pi(-\theta)}{360}\right), 0), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R$  – радиус нижнего основания;  $\theta$  – угол для нижнего основания.

Таким образом, обратная задача кинематики для РПП заключается в отображении вектора положения верхней платформы  $B(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$  в вектор длин подвижных стержней  $L = (l_1, \dots, l_6)^T$  платформы.

$$\vec{X} = \vec{A}_0 + \sum_{i=1}^N \vec{A}_i \sin(2\pi\vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \quad (4)$$

где  $\vec{X}$  – координаты положения платформы  $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ ;  $\vec{A}_i$  – вектор амплитуд для  $i$ -ой частоты движения координат положения платформы;  $\vec{v}_i$  – вектор частоты движения координат положения платформы;  $\vec{\Phi}_{0_i}$  – начальная фаза для

Численное решение данной задачи достигается путем моделирования заданного набора последовательных положений верхней платформы. Формирование таких наборов может быть сведено к описанию законов движения во временной области для верхней платформы в следующем виде:

$i$ -ой частоты движения координат положения платформы;  $T$  – время движения платформы.

Таким образом могут быть заданы скорость и ускорение верхней платформы для заданного момента времени  $t$ :  $\dot{\vec{X}}$ ,  $\ddot{\vec{X}}$  соответственно:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= \sum_{i=1}^N 2\pi\vec{v}_i \vec{A}_i \cos(2\pi\vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \\ \ddot{\vec{X}} &= - \sum_{i=1}^N 4\pi^2 \vec{v}_i^2 \vec{A}_i \sin(2\pi\vec{v}_i t + \vec{\Phi}_{0_i}), \quad t = 0 \dots T, \end{aligned} \quad (5)$$

Такая запись позволяет формировать законы движения верхней платформы с заданной точностью во временной области и обеспечить заданные спектральные характеристики движения.

Исходное множество позиционных параметров  $\{Q_k | k = 1, \dots, n\}$  для численного моделирования множества положений (длин) подвижных

стержней  $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$  задано в таблице 1. Графическая интерпретация положений и ориентации верхней подвижной платформы приведена на рисунках 5а и 5б.

Таблица 1

Описание множества позиционных параметров РПП первого типа

Наименование параметра	Значение параметра						Размер выборки [шт.]
	$x$ [м]	$y$ [м]	$z$ [м]	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	$\gamma^\circ$	
Значение параметра	-0,1; 0,1	-0,1; 0,1	0,73; 2,74	-10; 10	-10; 10	-10; 10	5000

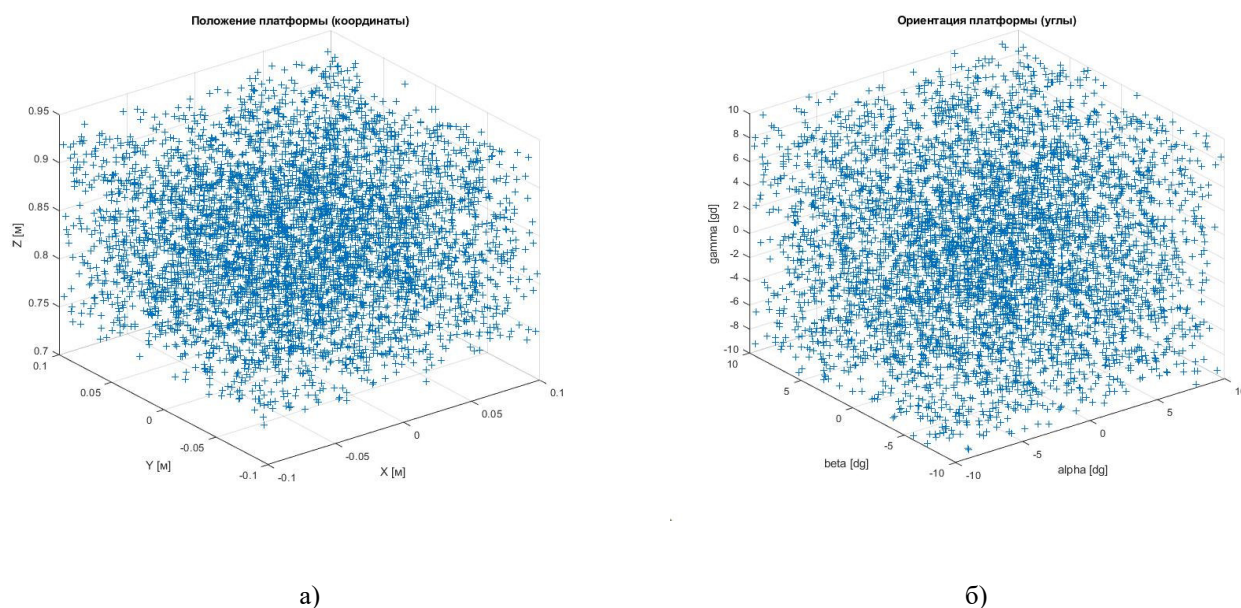


Рис. 5. Распределение позиционных переменных подвижной платформы: а) положение подвижной платформы; б) ориентация подвижной платформы

Численное моделирование поставленной оптимизационной задачи было выполнено для кон-

фигурации геометрических параметров подвижной платформы, приведенной в таблице 2, согласно обозначениям, на рисунке 4.

Таблица 2

Геометрические параметры подвижной платформы

Наименование параметра	Угол поворота между верхним и нижним основанием платформы	Угол нижнего основания	Радиус нижнего основания
Значение параметра	$\phi = 0^\circ$	$\theta = 14^\circ$	$R = 1$ м

Путем численного моделирования на основе уравнения (1) была получена выборка  $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$ . Соответствующие максимальное и минимальное значение выборки составляет  $\min(L_k) = 0,64$  и  $\max(L_k) = 1,38$ . Данные зна-

чения соответствуют требованиям по минимальной и максимальной величине ходе штока электроцилиндров, приводящих в движение РПП. На рисунке 4 изображено распределение положений шести подвижных стержней для каждого элемента выборки  $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$ .

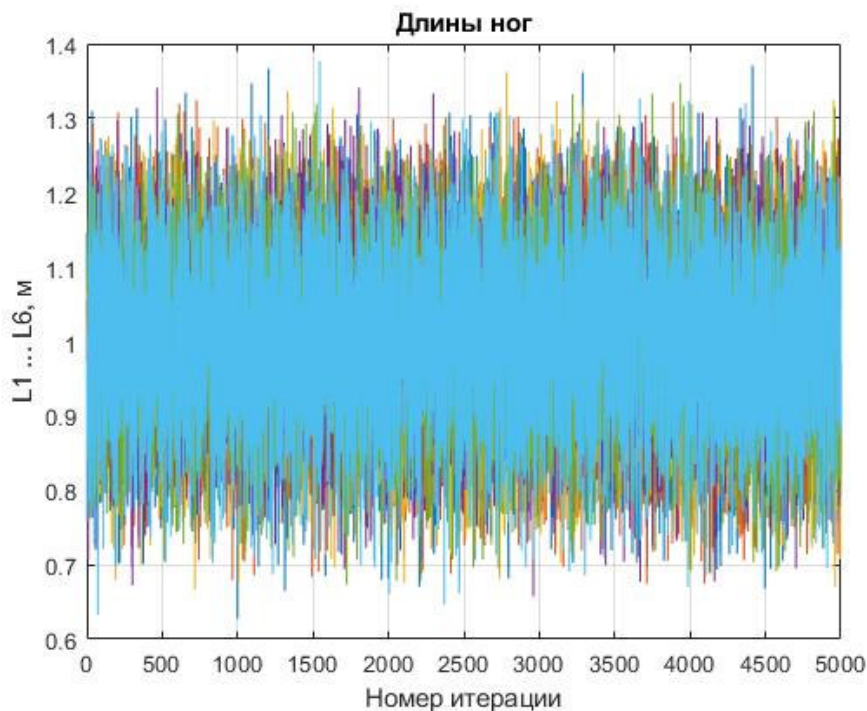


Рис. 6. Распределение положений подвижных стержней РПП, соответствующее множеству позиционных параметров  $Q_k$

**Заключение.** Выполнено математическое моделирование кинематики РПП, с применением методов численного и линейного программирования в специализированных средах таких как MatlabSimulink. В результате моделирования получена выборка длин звеньев  $\{L_k | k = 1, \dots, n\}$ . Соответствующие максимальное и минимальное значение длин составляют  $\min(L_k) = 0,64$  м. и  $\max(L_k) = 1,38$  м. Данные значения соответствуют требованиям по предельным величинам хода штоков электроцилиндров, приводящих в движение РПП. Результаты решения обратной задачи кинематики могут быть успешно использованы для формирования структуры системы управления в качестве исходных данных для выбора и настройки параметров регулятора в системе с обратной связью по ошибке.

**Источник финансирования:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-11-2021-060 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства роботизированных 6DOF платформ подвижности для тренажеров и симуляторов для авиационной и ракетно-космической отрасли» (уникальный номер 000000S407521QLB0002)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi: 10.1007/978-3-540-71990-8

2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.

3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042092

4. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0\_3.

5. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi: 10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68

6. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi: 10.3103/S1052618815070122

7. Чурин В.В. Использование компьютерных тренажеров для подготовки рабочих дорожно-строительных профессий // Молодой ученый. 2011. Т. 4. № 3. С. 28–29.

8. Белякова А.В., Савельев Б.В. анализ информационных моделей тренажеров для обучения водителей транспортных средств (обзор) // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(5). С. 558–571
9. Воронин А.В., Шпякин И.К. Моделирование кинематической модели гексапода в программных комплексах Matlab Simulink и Catia // X Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии» (13-14 ноября, 2012, г. Томск, Россия). 2012. С. 261–263
10. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
11. Сапунов Е.А., Прошин И.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Авиационно-космическое машиностроение. 2011. С. 337–340
12. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator // Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.
13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7\_23
14. Коротков Е.Б., Матвеев С.А., Яковенко Н.Г. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.
15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy // Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi: 10.1007/s00170-007-1360-x
16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators // IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi: 10.1109/TRO.2004.833801
17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm // IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi: 10.1109/ICMA.2006.257695
18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process // Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169. doi: 10.1177/0954406212444508
19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms // Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128.
20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms // CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14-17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99

#### Информация об авторах

**Бухаров Кирилл Дмитриевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: bukharovkd@gmail.com. Московский физико-технический институт. Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

**Гришин Никита Александрович**, инженер. E-mail: grishin.na@phystech.edu. Московский физико-технический институт. Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

**Кудров Максим Александрович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией информационных технологий и прикладной математики. E-mail: mkudrov@mail.ru. Московский физико-технический институт Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

**Рыбак Лариса Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Черкасов Владислав Витальевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: labbgtugos@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Поступила 13.12.2021 г.

© Бухаров К.Д., Гришин Н.А., Кудров М.А., Рыбак Л.А., Черкасов В.В., 2022



<sup>1</sup>Bukharov K.D., <sup>1</sup>Grishin N.A., <sup>1</sup>Kudrov M.A., <sup>2,\*</sup>Rybak L.A., <sup>2</sup>Cherkasov V.V.

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru

## KINEMATICS ANALYSIS OF A 6-DOF ROBOTIC MOBILITY PLATFORM FOR TEST BENCHES AND SIMULATORS

**Abstract.** The article discusses the main aspects of the application of mathematical modeling methods to analyze the properties of 6-DOF robotic mobility platforms (RMP), which can be used as complete test benches and simulators for testing various equipment, road construction equipment, vehicles, aviation, rocket and space. The application of simulators made it possible to create a virtual environment for user interaction with a special type of equipment that responds to commands like a real one. In addition, the article considers a numerical method for solving the inverse kinematics problem of the RMP, which consists in determining the dependence of the change in the lengths of six drive rods (rectilinear drives) on six coordinates (three translational and three rotational) characterizing the position of the mobile platform in space. The mathematical modeling of the RMP kinematics has been carried out. Data on the required linear and angular position of the mobile platform of the RMP, as well as the position of the rods and the speed of the rods of the drive mechanisms based on electric cylinders are selected as initial data for calculating the RMP control system. As a result of the simulation, a corresponding sample is obtained. The corresponding maximum and minimum values of the samples are obtained. These values correspond to the requirements for the minimum and maximum stroke of the rod of electric drives that drive the RMP. The results of mathematical modeling for a set of positional parameters of the RMP are presented. Numerical simulation of the optimization task is performed for the selected configuration of geometric parameters of the mobile platform of the RMP.

**Keywords:** platform, robotization, trajectory, configuration, hexapod, simulator, modeling, digitalization, design.

### REFERENCES

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi: 10.1007/978-3-540-71990-8
2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.
3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042092
4. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E., Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. 10.1007/978-3-030-65739-0\_3.
5. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi: 10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68
6. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi: 10.3103/S1052618815070122
7. Churin V.V. The use of computer simulators for training workers in road-building professions [Ispol'zovaniye komp'yuternykh trenazherov dlya podgotovki rabochikh dorozhno-stroitel'nykh professiy]. Young Scientist. 2011. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 28–29. (rus)
8. Belyakova A.V., Savelyev B.V. Analysis of information models of simulators for training drivers of vehicles (review) [Analiz informatsionnykh modeley trenazherov dlya obucheniya voditeley transportnykh sredstv (obzor)]. Bulletin of SibADI. 2019. No. 16 (5). Pp. 558–571. (rus)
9. Voronin A.V., Shpyakin I.K. Modeling the kinematic model of a hexapod in the MATLAB SIMULINK and CATIA software complexes [Modelirovaniye kinematicheskoy modeli geksapoda v programmnykh kompleksakh MATLAB SIMULINK i CATIA]. X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies" (November 13-14, 2012, Tomsk, Russia). 2012. Pp. 261–263. (rus)
10. Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Moroz A.V. A simulation model of a digital control system for a hexapod with linear drives based on stepper motors [Imitatsionnaya model' tsifrovoy sistemy upravleniya geksapodom s lineynymi privodami na baze shagovykh dvigateley]. Radio electronics issues. 2017. No. 7. Pp. 35–41. (rus)
11. Sapunov E.A., Proshin I.A. Simulation of the drive of the dynamic stand of the aviation simulator [Modelirovaniye privoda dinamicheskogo stenda aviatsionnogo trenazhera]. Aviation-Space Engineering. 2011. Pp. 337–340. (rus)

12. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator. Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.

13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures. ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7\_23

14. Korotkov E.B., Matveev S.A., Yakovenko N.G. Ways to improve the quality indicators of the control system for a mechanism with a parallel structure (hexapod, tripod) based on Russian and world accessible electronic components [Puti povysheniya kachestvennykh pokazateley sistemy upravleniya mekhanizmom s parallel'noy strukturoy (geksapod, tripod) na baze rossiyskikh i mirovykh dostupnykh elektronnykh komponentov]. Questions of radio electronics. 2016. No. 8. Pp. 85–91. (rus)

15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy. Int J Adv

Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi: 10.1007/s00170-007-1360-x

16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi: 10.1109/TRO.2004.833801

17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm. IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi: 10.1109/ICMA.2006.257695

18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process. Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169.

19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms. Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi: 10.1177/0954406212444508

20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms. CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14–17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99

#### Information about the authors

**Bukharov, Kirill D.** PhD, Leading researcher. E-mail: bukharovkd@gmail.com. Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9.

**Grishin, Nikita A.** Engineer. E-mail: grishin.na@phystech.edu. Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9.

**Kudrov, Maksim A.** PhD, Leading Researcher. E-mail: mkudrov@mail.ru. Moscow Institute of Physics and Technology Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy Lane, 9.

**Rybak, Larisa A.** DSc, Professor. E-mail: rl\_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

**Cherkasov, Vladislav V.** Research Engineer, Postgraduate student. E-mail: labbgtugos@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 4

Received 13.12.2021

#### Для цитирования:

Бухаров К.Д., Гришин Н.А., Кудров М.А., Рыбак Л.А., Черкасов В.В. Анализ кинематики шестистепенной роботизированной платформы подвижности испытательных стендов и тренажеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 81–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90

#### For citation:

Bukharov K.D., Grishin N.A., Kudrov M.A., Rybak L.A., Cherkasov V.V. Kinematics analysis of a 6-dof robotic mobility platform for test benches and simulators. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 81–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-81-90