

## АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ СТАНКА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

А. А. ЖИЛЯЕВ<sup>1</sup>, Б. А. ЕНИКЕЕВ<sup>2</sup>, О. К. АКМАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>zhiljaevartjom@gmail.com, <sup>2</sup>bulat.usatu@gmail.com, <sup>3</sup>olakm@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В статье представлен алгоритм калибровки станка с параллельной кинематикой, который учитывает влияние погрешности оборудования, описанные ранее. Разработана и доказана гипотеза о существовании таких коэффициентов геометрической погрешности, при которых достигается необходимая точность калибровки станочного оборудования. Описана методика проведения экспериментальной калибровки с использованием программного комплекса MATLAB-2018.

**Ключевые слова:** геометрическая точность; параллельная кинематика; металлорежущий станок; моделирование; позиционная точность; parallel kinematic machines; precision spc.

### ВВЕДЕНИЕ

Точность станков с параллельной кинематикой ограничивается сложностью калибровки их структур. Предполагается, что такие станки потенциально способны обеспечить более высокие показатели жесткости и точности. Для исключения совместного влияния ошибок различных кинематических цепей в связи с особенностями конструкции станка необходимо разработать алгоритм калибровки, предполагающий независимое исследование каждой кинематической цепи параллельного механизма.

Целью данной работы является разработка алгоритма калибровки станка с параллельной кинематической структурой.

Обеспечение геометрической точности станка с параллельной кинематикой связано с проведением процедуры калибровки, предполагающей определение фактических значений геометрических параметров тем или иным способом [1]. Производится предварительный анализ геометрических параметров станка для определения степени их влияния на отклонения положений инструмента.

Ранее в работе [2] получены системы уравнений прямого и обратного кинематических преобразований, которые будут использованы для анализа и калибровки гео-

метрии станка. На рис. 1 представлена схема кинематической модели, иллюстрирующая совокупность всех рассматриваемых параметров компоновки, которые определяют ее геометрию.

Точками  $K$ ,  $M$  и  $N$  с координатами  $(x, y, z)$  обозначены начала систем частных координат приводов станка в общей системе координат.  $L_1, L_2, L_3$  - длины штанг  $I, II$  и  $III$ , соединяющих шарниры кареток с шарнирами платформы.  $AS, SB, SC$  - расстояния между осью шпинделя и центрами шарниров, установленных на платформе платформы, измеренные в плоскости  $XU$ . Углы  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  определяют положение центров шарниров  $B$  и  $C$  относительно отрезка  $AS$ .  $U_1, U_2, U_3$  - частные координаты положений приводов станка.

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КАЛИБРОВКИ

Процедура калибровки станка с параллельной кинематикой заключается в нахождении таких параметров геометрических погрешностей, при которых обеспечивается достаточная геометрическая точность оборудования ( $\pm 0,01$  мм).

Процесс калибровки сопровождается решением матричного уравнения, представленного ниже:

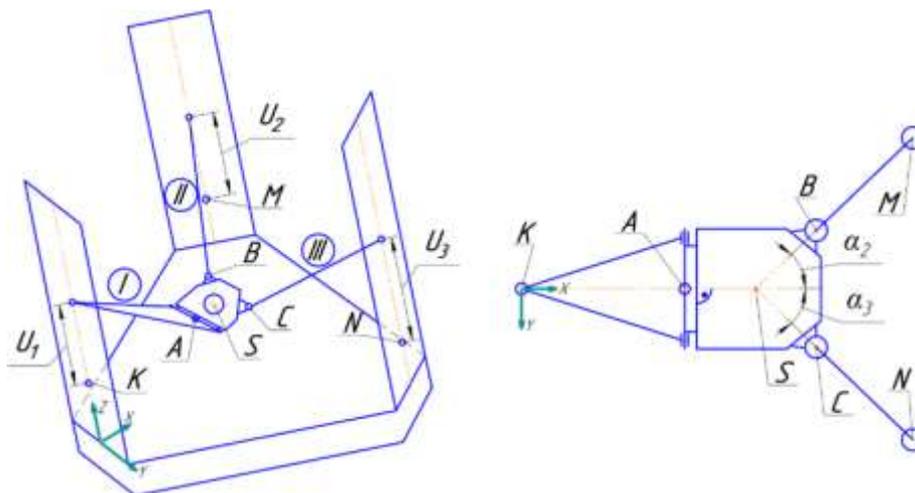


Рис. 1. Кинематическая модель станка

$$\begin{pmatrix} K_{11}^x & K_{12}^x & \dots & K_{1j}^x \\ K_{21}^x & K_{22}^x & \dots & K_{2j}^x \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1}^x & K_{i2}^x & \dots & K_{ij}^x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_i \end{pmatrix} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_j),$$

где  $K_{ij}$  – коэффициент влияния геометрической погрешности,  $\Delta X_i$  – отклонение координаты РИ по оси  $x$ ,  $x_i$  – параметр геометрической погрешности.

Матричное уравнение решается путем псевдообращения матрицы по Муру-Пенроузу. Результатом решения являются параметры геометрических погрешностей, при которых невязка (величина расхождения приближенного равенства) будет минимальна.

Величину отклонения позиционирования конечного элемента от фактически задаваемых значений необходимо находить с помощью специальных измерительных систем. На данном этапе нет возможности по-

лучить значение отклонений режущего инструмента (РИ) с требуемой точностью, поэтому была произведена имитация калибровки станка с параллельной кинематикой с использованием программного комплекса MATLAB-2018.

Экспериментальный алгоритм имитации калибровки станка представлен на рис. 2.

С помощью подбора случайных значения задаются геометрические погрешности станка, не превышающие 0,1 мм. Учитывая заданные значения, составляется экспериментальная геометрическая модель, в которой учтены погрешности изготовления деталей, шарниров, сборки и пр. Затем по уже существующим координатам кареток для каждой из исследуемых точек рассчитываем координаты РИ экспериментальной модели и сравниваем их с номинальными значениями.



Рис. 2. Алгоритм имитации калибровки



Рис. 3. Алгоритм проверки гипотезы

Зная  $\Delta X$ ;  $\Delta Y$ ;  $\Delta Z$  и полученные ранее коэффициенты влияния [3], производится расчет значения геометрических погрешностей станка с использованием программного комплекса MATLAB 2018.

Заданное значение геометрической погрешности и найденные не совпадают. Но так как решение матрицы было получено, делается предположение, что возможно в связи с особенностями геометрии станка и в рамках ограниченной рабочей зоны могут существовать такие параметры геометрической погрешности, которые не соответствуют реальным, но при которых будет обеспечиваться геометрическая точность системы порядка 0,02 мм.

Алгоритм проверки гипотезы представлен на рис. 3.

По вычисленным значениям погрешностей составляется новая расчетная геометрическая модель станка, по которой вычисляются координаты кареток для каждой из исследуемых точек. По найденным значениям кареток с помощью прямых кинема-

тических преобразований находятся координаты точек исполнительного органа при значениях геометрических погрешностей, задаваемых случайным образом, и сравниваются с номинальными (см. табл. 1). Из таблицы следует, что погрешность позиционирования не превышает значений 0,2 мкм, следовательно, гипотеза верна. В рамках ограниченной рабочей зоны могут существовать такие параметры геометрической погрешности, не соответствующие реальной модели, которые позволят получить необходимую геометрическую точность.

Таким образом, существует возможность значительно упростить процесс калибровки систем с параллельной кинематикой. Но в данной статье рассматривалась методика, в которой положение РИ должно быть максимально точно определено в пространстве, что является довольно трудно реализуемой задачей на практике. Возникает следующая задача – определение положения РИ в пространстве, которую следует решить в дальнейшем.

Таблица 1

Погрешность позиционирования откалиброванной системы

Ось	Ошибка позиционирования инструмента в различных точках рабочей зоны, мкм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X	-0,2	-0,1	-0,1	0	-0,2	-0,2	0,1	-0,1	-0,1
Y	-0,3	0	-0,1	-0,2	0	0,3	0,1	-0,4	0
Z	0,2	0,3	-0,1	-0,3	0,2	0	-0,7	-0,3	0,1

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведен анализ возможных погрешностей изготовления и сборки станка с параллельной кинематической структурой. С учетом погрешностей, обусловленных разработанной конструкцией, уточнены уравнения прямого кинематического преобразования координат станка.

Разработан алгоритм имитации калибровки станка.

Предложена и подтверждена гипотеза о существовании таких параметров геометрической погрешности, при которых возможно получить геометрическую точность станка с параллельной кинематикой порядка 0,02 мм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.Y. Elatta, Li Pei Gen, Fan Liang Zhi, Yu Daoyuan, Luo Fei, " An Overview of Robot Calibration" // Information Technology Journal 3 (1);, 2004, 74–78

2. Акмаев О. К., Еникеев Б. А., Нигматуллин А. И., " Анализ влияния погрешностей изготовления станка с параллельной кинематической структурой на точность позиционирования" // СТИН, 2016. – № 11. – С. 8–11. [О.К. Акмаев, В.А. Еникеев and А.И. Нигматуллин "Analysis of influence of manufacture errors of the machine with a parallel kinematic structure for positioning accuracy", (in Russian), in *STIN*, no. 11, pp. 8-11, 2016.]

3. О. К. Акмаев, Б. А. Еникеев, А. И. Нигматуллин, "Кинематический анализ станка с параллельной кинематикой оригинальной двухуровневой компоновки" // СТИН, 2015. – № 7. – С. 5–9. [О.К. Акмаев, В.А. Еникеев and А.И. Нигматуллин "Kinematic analysis of the machine with parallel kinematics of the original two-level layout", (in Russian), in *STIN*, no. 11, pp. 8-11, 2016.]

### ОБ АВТОРАХ

**ЖИЛЯЕВ Артем Александрович**, магистрант 2-го курса ИАТМ.

**ЕНИКЕЕВ Булат Азатович**, ассистент каф. АТП ИАТМ.

**АКМАЕВ Олег Кашафович**, доцент каф. АТП ИАТМ.

### METADATA

**Title:** Algorithm calibration machine with parallel kinematics

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> zhiljaevartjom@gmail.com, <sup>2</sup> bulat.usatu@gmail.com, <sup>3</sup> olakm@rambler.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (22), pp. 72-75, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article presents a calibration algorithm for a machine with parallel kinematics, which takes into account the influence of the equipment error described earlier.

Developed and proved the hypothesis of the existence of such factors is geometric in sinfulness, under which reached the necessary precision calibration of machine tools. The technique of experimental calibration using the MATLAB-2018 software package is described.

**Key words:** geometric accuracy, parallel kinematics; metal cutting machine; modeling; positional accuracy; parallel kinematic machines; precision cnc.

**About authors:**

**ZHILYAEV, Artem Alexandrovich**, postgraduate student 2 year, Ufa state aviation technical University.

**ENIKEEV, Bulat Azatovich**, assistant Professor, Ufa state aviation technical University

**AKMAEV, Oleg Kashafovich** Associate Professor, Dept. of Automation technological processes.