



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ С МЕХАНИЗМАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

А.В. Киричек¹, А.Г. Ивахненко¹, Е.О. Ивахненко², А.Ю. Алтухов¹

¹ ФГБОУВПО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50лет
Октября, д. 94, 305040 Курск, Россия

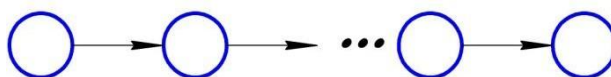
² Курский филиал ФГОБУ ВПО «Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации», ул. Ломоносова, д.3, 305016
Курск, Россия

Аннотация:

Рассмотрено влияние геометрических погрешностей механизмов параллельной структуры на точность металлорежущих станков. Получены зависимости для коррекции погрешностей таких механизмов и повышения геометрической точности станков.

Ключевые слова: геометрическая точность, металлорежущий станок, параллельный механизм, коррекция

1. Введение



а)

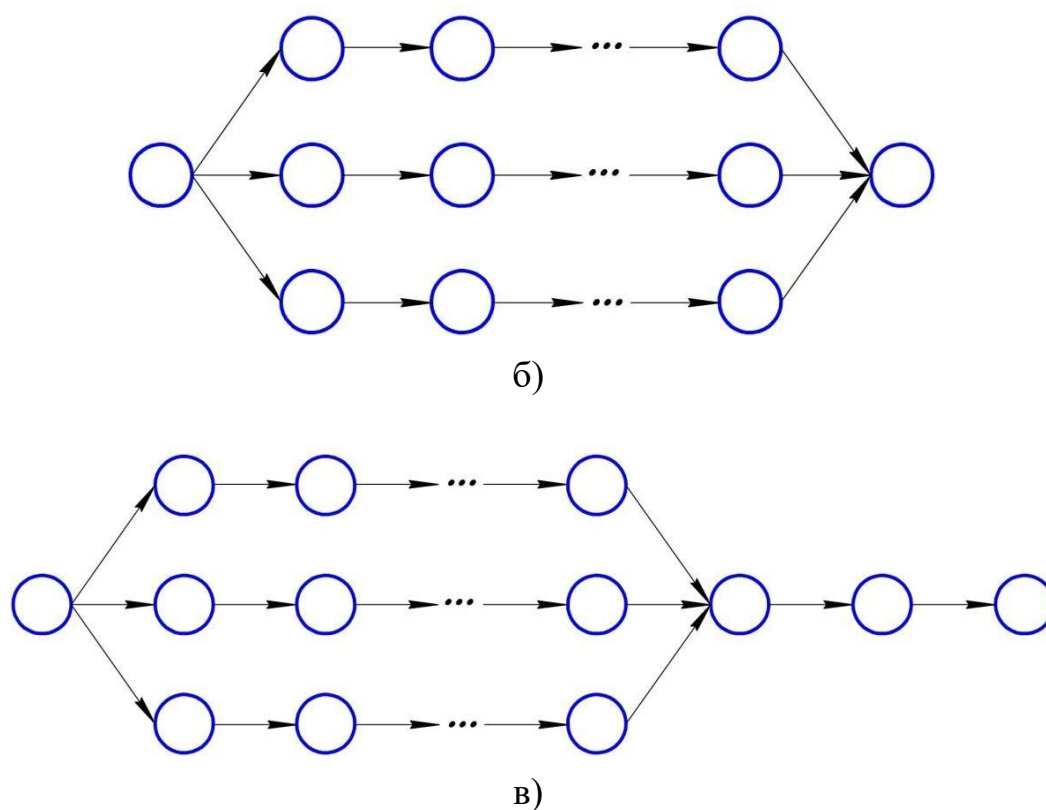


Рисунок 1 . Структуры формообразующих систем: а) цепная; б) параллельная; в) гибридная.

Общим в представленных на рисунке (б, в) схемах формообразующих систем является наличие механизма параллельной структуры, который может иметь различное количество степеней свободы – от 2 до 6.

2. Постановка задачи

В данной работе рассматривается влияние параметров геометрической точности механизма параллельной структуры на показатели геометрической точности станков и обработанной детали. Функция формообразования [1], полностью определяющая формообразующие возможности металлорежущих станков (без учета различного рода связей) представляет собой произведение матриц, представленных в таблице.

Таблица 1. Матрицы обобщенных перемещений



Вид движения	Матрицы обобщенных перемещений относительно оси		
	X	Y	Z
Поступательное вдоль оси	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Вращательное вокруг оси	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi & 0 \\ 0 & s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^5 = \begin{bmatrix} c\psi & 0 & s\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\psi & 0 & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^6 = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Принятые обозначения. Обобщенные координаты: x, y, z – линейные смещения вдоль осей; φ, ψ, θ – углы смещения относительно осей; $c \equiv \cos$; $s \equiv \sin$; верхний индекс в обозначении матрицы A – номер обобщенной координаты.			

Другое представление функции формообразования, предложенное в работе [2], характеризует структуру металлорежущей системы, в общем виде включающей в себя: обрабатываемую заготовку; приспособление для заготовки; станок; приспособление для инструмента; режущий инструмент. Здесь рассматривается представление функции формообразования r_0 , также характеризующее структуру металлорежущей системы, но отражающее ее состав, представленный на рисунке (в):

$$r_0 = A_{\text{посл.1}} A_{\text{пар}} A_{\text{посл.2}} r_l, \quad (1)$$

где $A_{\text{посл.1}}$, $A_{\text{посл.2}}$ – произведение матриц преобразований координат (табл.), последовательно соединенных звеньев формообразующей системы до и после механизма параллельной структуры (рис.), соответственно; $A_{\text{пар}}$ –



матрица преобразований координат механизма параллельной структуры; $\mathbf{r}_l = (x_l y_l z_l 1)^T$ – радиус-вектор формообразующих точек режущего инструмента.

Векторная погрешность $\Delta \mathbf{r}_0$ положения точки обработанной поверхности с радиусом-вектором $\mathbf{r}_0$ по выражению (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_0 = & \Delta(\mathbf{A}_{\text{посл.1}} \mathbf{A}_{\text{пар}} \mathbf{A}_{\text{посл.2}} \mathbf{r}_l) + \mathbf{A}_{\text{посл.1}} \Delta(\mathbf{A}_{\text{пар}} \mathbf{A}_{\text{посл.2}} \mathbf{r}_l) + \\ & + \mathbf{A}_{\text{посл.1}} \mathbf{A}_{\text{пар}} \Delta(\mathbf{A}_{\text{посл.2}} \mathbf{r}_l) + \mathbf{A}_{\text{посл.1}} \mathbf{A}_{\text{пар}} \mathbf{A}_{\text{посл.2}} \Delta \mathbf{r}_l. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) учитывает влияние на точность *всех* элементов составляющих функцию формообразования. Для установления влияния параметров геометрической точности только механизма параллельной структуры на показатели геометрической точности станков и обработанной детали сделаем допущение о том, что остальные элементы формообразующей являются идеальными, т.е. не имеют геометрических погрешностей, а также что $\mathbf{A}_{\text{посл.1}} = \mathbf{A}_{\text{посл.2}} = \mathbf{E}$ ($\mathbf{E}$ – единичная матрица). Основанием этого допущения является свойство аддитивности векторной погрешности $\Delta \mathbf{r}_0$.

3. Анализ влияния механизма параллельной структуры на точность станка

На основе сделанного выше допущения выше из выражения (2) можно выделить составляющую, характеризующую влияние на точность только параллельного механизма

$$\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}} = \Delta(\mathbf{A}_{\text{пар}} \mathbf{r}_l). \quad (3)$$

Из всего множества параллельных механизмов рассмотрим платформу Стюарта, имеющую 6 степеней свободы и применяемую в компоновках различных станков – гексаподов. При составлении функции



формообразования таких станков применяют виртуальные координаты [3], при этом матрица преобразований координат параллельного механизма имеет вид

$$A_{\text{пар}} = A^1(x) A^2(y) A^3(z) A^4(\varphi) A^5(\psi) A^6(\theta), \quad (4)$$

где составляющие выражения (4) приведены в таблице, таким образом

$$A_{\text{пар}} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -c\psi s\theta & s\psi & x \\ s\varphi s\psi c\theta + c\varphi s\theta & -s\varphi s\psi s\theta + c\varphi c\theta & s\varphi c\psi & y \\ -c\varphi s\psi c\theta + s\varphi s\theta & c\varphi s\psi s\theta + s\varphi c\theta & c\varphi c\psi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Поскольку здесь рассматриваются только геометрические погрешности (влияние деформаций штанг параллельного механизма на точность обработки рассмотрено в [3]), то выражение (3) будет эквивалентно следующему выражению:

$$\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}} = \varepsilon A_{\text{пар}} \mathbf{r}_l, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta & \delta_x \\ \gamma & 0 & -\alpha & \delta_y \\ -\beta & \alpha & 0 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где составляющие матрицы ε являются геометрическими погрешностями положения платформы Стюарта в пространстве: δ_x , δ_y , δ_z – малые абсолютные смещения вдоль осей X , Y и Z соответственно; α , β , γ – малые углы поворота вокруг осей X , Y и Z соответственно.

Тогда, компоненты вектора $\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}$ (6) будут равны:



$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}(1,1) &= -\gamma[(s\varphi s\psi c\theta + c\varphi s\theta)x_l + (-s\varphi s\psi s\theta + c\varphi c\theta)y_l + s\varphi c\psi z_l] \\
&\quad + \beta[(-c\varphi s\psi c\theta + s\varphi s\theta)x_l + (c\varphi s\psi s\theta + s\varphi c\theta)y_l + c\varphi c\psi z_l] + \delta_x; \\
\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}(2,1) &= \gamma[c\psi c\theta x_l - c\psi s\theta y_l + s\psi z_l] \\
&\quad - \alpha[(-c\varphi s\psi c\theta + s\varphi s\theta)x_l + (c\varphi s\psi s\theta + s\varphi c\theta)y_l + c\varphi c\psi z_l] + \delta_y; \\
\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}(3,1) &= -\beta[c\psi c\theta x_l - c\psi s\theta y_l + s\psi z_l] \\
&\quad + \alpha[(s\varphi s\psi c\theta + c\varphi s\theta)x_l + (-s\varphi s\psi s\theta + c\varphi c\theta)y_l + s\varphi c\psi z_l] + \delta_z; \\
\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}(4,1) &= 0.
\end{aligned} \tag{7}$$

Векторный баланс геометрических погрешностей механизма параллельной структуры (7) *полностью* характеризует потенциальные причины, приводящие к погрешности обработки на станке с платформой Стюарта. Здесь возникает искушение – определить такие значения параметров положения платформы Стюарта, которые позволили бы полностью, или частично, устранить составляющие компонентов вектора $\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}$.

Пример 1: попытка частично устранить влияние z_l в компоненте $\Delta \mathbf{r}_{0\text{пм}}(1,1)$

$$s\varphi c\psi = 0,$$

решениями этого уравнения являются значения углов $\varphi = 0$ и (или) $\psi = \pm\pi/2$.

Данный пример показывает, что такие попытки приводят только к появлению избыточных связей положения виртуальных (а значит и физических) координат платформы, и, как следствие – ограничению формообразующих возможностей станка.

Данный пример показывает также, что исследования точности станков без рассмотрения собственно самого процесса формообразования носят достаточно абстрактный характер. Влияние различных процессов,



приводящих к возникновению погрешности обработки, не может рассматриваться отдельно от главной функции металлорежущей системы – процесса резания, состоящего из двух взаимосвязанных процессов – формообразования и съема припуска [1].

Учитывая двуединый характер функции формообразования, все выражения для ее определения, данные как в [1, 2], так и в настоящей работе, основаны на том, что она ($\mathbf{r}_0$), одновременно является и радиус-вектором обрабатываемой поверхности $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(u, v)$, где u, v – криволинейные координаты обрабатываемой поверхности. В [1] предложен системный подход к получению метрологических характеристик обработанной поверхности на основе нормального баланса погрешностей обработки, определяемого как скалярное произведение вектора $\Delta \mathbf{r}_0$ и вектора нормали $\mathbf{n}$ обрабатываемой поверхности $\mathbf{n} = (n_x n_y n_z 0)^T$.

$$\Delta r_n = \Delta \mathbf{r}_0 \mathbf{n}. \quad (8)$$

Модифицируем систему уравнений (7) таким образом, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(1,1) + \text{Corr}_x &= 0; \\ \Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(2,1) + \text{Corr}_y &= 0; \\ \Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(3,1) + \text{Corr}_z &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\text{Corr}_x, \text{Corr}_y, \text{Corr}_z$ – коррекции, вносимые в программу обработки заготовки, для снижения влияния геометрических погрешностей.

Как было показано в приведенном выше примере непосредственное применение выражений (9) связано с ограничением формообразующих возможностей станка. Поэтому, используя подход [1], подставим выражения



(9) в уравнение (8), после чего получим *основное* уравнение для устранения (уменьшения) влияния геометрических погрешностей на точность обработки

$$\begin{aligned} &(\Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(1,1) + \text{Corr}_x)n_x + (\Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(2,1) + \text{Corr}_y)n_y + \\ &(\Delta \mathbf{r}_{\text{опм}}(3,1) + \text{Corr}_z)n_z = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь важно отметить:

1) значения величин коррекций Corr_x , Corr_y и Corr_z являются функциями *всех* виртуальных координат положения платформы Стюарта ($x, y, z, \varphi, \psi, \theta$), которые в свою очередь являются функциями переменных (u, v);

2) не имеет значения, используется ли параллельный механизм для перемещения заготовки или режущего инструмента (приводимого во вращение отдельным узлом формообразующей системы), поскольку при этом реализуется движение подачи, поэтому *все* переменные (виртуальные координаты) в уравнении (10) являются медленными, т.е. компенсируемыми [2] – не зависящими от скорости вращения инструмента.

Последняя тонкость позволяет рекомендовать предложенный подход к снижению влияния геометрических погрешностей станков с механизмами параллельной структуры на точность обработки. При этом матрица преобразований координат параллельного механизма (4) примет вид

$$\mathbf{A}_{\text{пар}} = \mathbf{A}^1(x + \text{Corr}_x) \mathbf{A}^2(y + \text{Corr}_y) \mathbf{A}^3(z + \text{Corr}_z) \mathbf{A}^4(\varphi) \mathbf{A}^5(\psi) \mathbf{A}^6(\theta). \quad (11)$$

Переход от виртуальных координат, обеспечивающих коррекцию по (11) к физическим координатам (длинам штанг платформы) осуществляется по зависимостям, приведенным в [3].



Пример 2: рассмотрим обработку плоской поверхности $\mathbf{n} = (0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$ на гексапODE.

Из уравнения (10) следует, что $Corr_z = \beta x_l - \alpha y_l - \delta z$.

Полученный результат похож на зависимость, приведенную в [1], однако между ними есть принципиальное отличие. В [1] рассмотрены координаты некоторых точек узла станка с целью контроля его геометрической точности. Здесь рассмотрены координаты режущего инструмента $(x_l y_l z_l)$, что позволяет снижать влияние геометрических погрешностей на точность обработки. Отметим также, что в предыдущих исследованиях [2] было установлено, что не все геометрические погрешности отдельных узлов оказывают влияние на точность обработки конкретной поверхности. Это означает, что в большом числе случаев обработки такие погрешности в компенсации не нуждаются.

Практическое применение полученных результатов связано с измерением характеристик рабочего пространства станка до начала обработки заготовки и внесением коррекций в ее положение при обработке. В том случае, если в станке используется иной механизм параллельной структуры, то выражение (4) должно быть модифицировано (усечено), например для механизма имеющего 5 степеней свободы матрица преобразований координат может иметь вид $A_{\text{пар}} = A^1(x) A^2(y) A^3(z) A^4(\varphi) A^5(\psi)$.

4. Заключение

В работе рассмотрено влияние геометрических погрешностей параллельных механизмов, применяемых в металлорежущих станках, на точность обработки заготовок. Получено уравнение для устранения (уменьшения) влияния геометрических погрешностей на точность обработки.



Показано, что полученные результаты имеют общий характер и могут быть применены для станков с различными параллельными механизмами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 2014/78, код проекта 1955.

Список литературы

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т., Точность машинного оборудования ASME Press, NY, 1988, 304 стр.
2. Ивахненко А.Г., Концепция проектирования металло-режущих устройств. Структурный синтез, Хабаровский Государственный Технологический Университет, Хабаровск, 1998, 124 стр.
3. Ивахненко А.Г., Подленко О.Н., Точность механизмов привода, Russian Engineering Research, 2007, Volume 27, Issue 12, pp. 896-900.



GEOMETRIC ACCURACY OF THE MACHINES WITH STRUT-TYPE STRUCTURES

A.V. Kirichek¹, A.G. Ivakhnenko¹, E.O. Ivakhnenko² and A.Y. Altukhov¹

¹FGBOUVPO “Southwestern State University”, 50 let Oktyabrya Str.,
94, 305040 Kursk, Russia

²Kursk branch of the FGOBU VPO “Financial University under the
government of the Russian Federation”, Lomonosova Str., 3, 305016
Kursk, Russia

Abstract:

The impact of the geometric errors of the strut-type structure mechanisms on the accuracy of the metal-cutting machines has been considered. The dependences for correction of errors of such mechanisms and improvement of the geometric accuracy of machines have been obtained.

Keywords: geometric accuracy, metal-cutting machine, parallel mechanism, correction

References:

1. Reshetov D.N., Portman V.T., Accuracy of Machine Tools, ASME Press, NY, 1988, 304 pp.
2. Ivakhnenko A.G. Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis, Khabarovsk state technical university, Khabarovsk, 1998, 124 pp.
3. Ivakhnenko A. G., Podlenko O. N. Accuracy of shaping on hexapods, Russian Engineering Research, 2007, Volume 27, Issue 12, pp. 896-900