

УДК 621.9.04

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА СТАНКА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ

**В. Б. СТРУТИНСКИЙ, А. С. ДЕМЬЯНЕНКО***Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

### Введение

Станки параллельной кинематики являются прогрессивным технологическим оборудованием. Основными преимуществами станков с параллельными кинематическими связями является низкая материалоемкость и энергоемкость [1], [2]. Соответственно, имеет место снижение жесткости несущей системы станка, что приводит к низкой точности [3] и неудовлетворительным динамическим характеристикам приводов [4]. В литературных источниках освещено значительное количество разработок по конструктивному совершенствованию станков параллельной кинематики и исследованию показателей их статической и динамической точности [4], [5]. В основном повышение точности обеспечивается совершенствованием отдельных узлов станков [6], [7]. Перспективным направлением является совершенствование приводов станков путем компенсации случайных погрешностей в статических и динамических режимах [8], [9]. Однако все приведенные разработки не обеспечивают в полной мере повышения точности станков параллельной кинематики [10], [11]. Проблема создания станков параллельной кинематики повышенной точности связана с важными научными и практическими задачами развития станкостроения и является актуальной.

Цель исследований – разработка мехатронной системы контроля текущего пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики и ее конструктивная реализация.

### Основная часть

Разработанный станок параллельной кинематики построен на основе механизма гексапода и имеет шесть штанг переменной длины  $L_1-L_6$ , которые соединены с подвижным исполнительным органом П, на котором установлен инструмент И, предназначенный для обработки фасонной поверхности детали  $D$  (рис. 1).

Станок имеет несущую систему, состоящую из двух силовых поясов  $H_1$  и  $H_2$ . На несущей системе установлены шарнирные опоры штанг переменной длины.

В процессе обработки детали на станке параллельной кинематики инструмент И перемещается по сложной траектории, меняя при этом свое поперечно-угловое положение. Изменение положения исполнительного органа в пространстве достигается с помощью изменения длины штанг станка. Положение исполнительного органа в пространстве определяется поступательным перемещением некоторой точки (полюса) и поперечно-угловым положением исполнительного органа при его повороте относительно полюса.

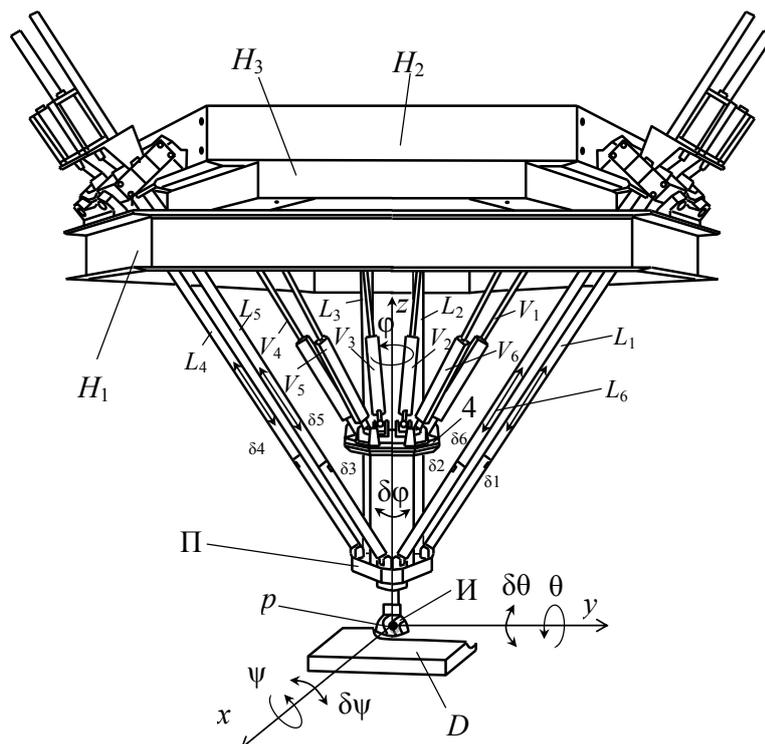


Рис. 1. Схема разработанного станка параллельной кинематики с мехатронной системой контроля текущего пространственного положения инструмента

Примем некоторую центральную точку инструмента « $p$ » в качестве полюса и, соответственно, закон движения инструмента будет описываться траекторией перемещения полюса и текущим значением некоторой системы углов Эйлера, которые определяют угловое положение инструмента в каждой точке этой траектории. В качестве системы углов приняты углы Эйлера–Крылова  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , которые определяют повороты исполнительного органа относительно осей  $O_x$ ,  $O_y$  и  $O_z$  (рис. 1). При этом положение инструмента будет определено в виде вектора, который имеет шесть компонент. Три из них представляют собой координаты центра инструмента, а три – угловые величины (набор углов  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ). Соответственно, положение каждой точки  $U$  исполнительного органа характеризуется вектором, который определен в пространстве шести измерений.

Использование введенного вектора имеет определенные неудобства в связи с разнородностью его компонент. В связи с этим предложено использовать модифицированный вектор, который отличается от приведенного переводом угловых величин в линейные. При этом вектор параметров, который определяет положение точки  $U$ , запишется в следующем виде:

$$X_U = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ m_\psi \psi \\ m_\theta \theta \\ m_\varphi \varphi \end{bmatrix},$$

где  $m_\psi, m_\theta, m_\varphi$  – соответственно, выбранные масштабные множители, которые имеют размерность координат.

В общем случае вектор, который определяет положение точки  $U$ , запишется в виде

$$X = (x_i), i = 1, 2, \dots, 6,$$

где  $x_i$  – соответствующая компонента вектора.

В процессе программирования закона перемещения для станка параллельной кинематики задается изменение во времени  $t$  компоненты вектора  $x_i$ -координат в виде

$$X_1 = (x_i(t)). \quad (1)$$

В результате решения обратной задачи кинематики рассчитывается вектор  $\ell$ -координат.

Полученный вектор  $\ell$ -координат приведен в виде

$$L = (\ell_j), j = 1, 2, \dots, 6. \quad (2)$$

Компоненты вектора, заданные как функция времени

$$\ell_i = \ell_i(t).$$

Необходимые законы изменения  $\ell$ -координат реализуются приводами. В результате изменения длин штанг исполнительный орган станка устанавливается в соответствующем положении, которое характеризуется вектором  $X$ .

Точность выхода исполнительного органа в необходимое положение определяется вектором погрешностей:

$$(\delta x_i) = X_0 - X_U. \quad (3)$$

Данный вектор зависит от многочисленных факторов случайного характера. Определение вектора погрешностей в функции времени является задачей системы контроля текущего пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики.

Разработанный метод и система контроля основывается на использовании дополнительного механизма параллельной кинематики, который имеет шесть измерительных штанг переменной длины  $V_1-V_6$ , которые соединяют исполнительный орган  $\Pi$  с силовым поясом  $H_3$ , которые жестко связаны с поясами  $H_1$  и  $H_2$ . Штанги переменной длины имеют измерители, которые регистрируют изменения длин штанг. При изменении  $x$ -координат согласно зависимости (1) изменяется длина штанг, а соответственно, и вектор:

$$V = (v_j), j = 1, 2, \dots, 6. \quad (4)$$

По данным значениям устанавливается погрешность положения исполнительного органа в соответствии с формулой (3).

Вектор  $\ell$ -координат является функционально зависимым от вектора входящих параметров  $(X_i)$ . Данная зависимость является нелинейной и в общем случае записывается в виде

$$L = F(X), \quad (5)$$

где  $F(X)$  – вектор, компоненты которого в общем виде описывают зависимости  $\ell$ -координат от компонент вектора входящих параметров и времени:

$$F(x) = [\ell_j([x_i], t)], \quad j = 1, 2, \dots, 6. \quad (6)$$

Вектор  $v$ -координат также зависит от вектора входящих параметров ( $x_i$ ) в соответствии с зависимостью

$$V = F_1(X), \quad (7)$$

где  $F_1(X) = [v_j((x_i), t)], \quad j = 1, 2, \dots, 6.$

Объединив зависимости (6) и (7), получим связь  $\ell$ -координат и  $v$ -координат станка в виде

$$V = \Phi(L). \quad (8)$$

Зависимость (8) справедлива только для конкретного закона перемещения исполнительного органа станка, заданного в виде (2).

Для исследования закономерности связи  $v$ -координат и  $\ell$ -координат выбран характерный закон движения исполнительного органа, который соответствует обработке округлой поверхности типа эллипсоида.

При обработке выпуклой поверхности инструмент движется по криволинейной траектории. Примем форму выбранного участка траектории в виде дуги окружности радиуса  $R(x=0, \theta=0, \varphi=0)$ . Для фиксированных значений угла поворота исполнительного органа  $\psi$  с помощью геометрического моделирования в программе Autodesk Inventor определены длины каждой из штанг станка.

Полученные точечные зависимости длин штанг сглажены кубическими сплайнами (рис. 2).

Из анализа графиков, которые приведены на рисунке, следует, что законы изменения длин штанг станка и законы изменения длин измерительных штанг подобны. В процессе исследований установлена взаимосвязь длин штанг дополнительного механизма и длин штанг станка (рис. 3). Данная взаимосвязь описывается неоднозначными зависимостями с экстремумами. Наличие сложной и неоднозначной связи требует специального подхода для определения функциональных зависимостей  $v$ -координат и  $\ell$ -координат. Предложено установить данные зависимости для небольших приращений координат, как это показано ниже.

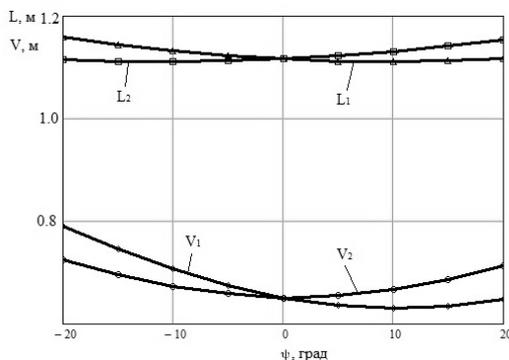


Рис. 2. Зависимость длин штанг станка от углового расстояния при перемещении инструмента в соответствии с обработкой округлой поверхности типа эллипсоида с радиусом кривизны  $R = 200$  мм

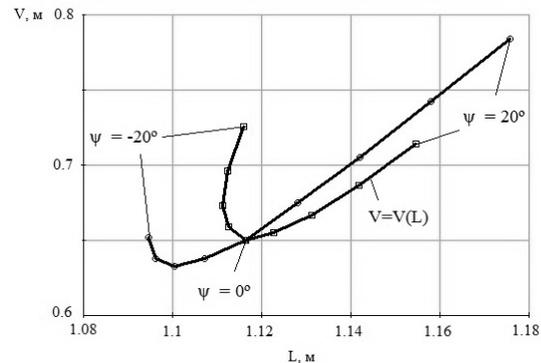


Рис. 3. Взаимосвязь длин штанг механизма параллельной кинематики от длин штанг станка

Определим взаимосвязь между бесконечно малыми изменениями  $x$ -координат и  $\ell$ -координат. Каждая из компонент вектора  $\ell$ -координат представляет из себя функцию шести переменных, которые представляют из себя  $x$ -координаты. По правилу дифференцирования функции нескольких переменных найдем вектор дифференциалов  $\ell$ -координат:

$$[d\ell_j] = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial \ell_j}{\partial x_i} dx_i, \quad j=1, 2, \dots, 6, \quad (9)$$

где  $\partial \ell_j$  – дифференциал  $j$ -й  $\ell$ -координаты.

Все величины, которые входят в зависимость (9), допускают непосредственный расчет. Расчеты проведены с помощью геометрического моделирования в системе Autodesk Inventor. В результате определены частные производные  $\frac{\partial \ell_j}{\partial x_i}$ .

Запишем равенство (10) в матрично-векторном виде:

$$dL = MdX, \quad (10)$$

где матрица  $M$  своими компонентами имеет частные производные соответствующих  $\ell$ -координат по  $x$ -координатам:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{16} \\ m_{21} & \dots & m_{26} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{61} & \dots & m_{66} \end{bmatrix}, \quad m_{ji} = \frac{\partial \ell_j}{\partial x_i}. \quad (11)$$

Если при решении задачи все входные параметры заданы функциями времени  $t$ , то компоненты матрицы находятся как дифференциалы сложной функции:

$$m_{ji} = \frac{\partial \ell_j}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x_i} = \frac{\partial \ell_j}{\partial t} \frac{\partial x_i}{\partial t}. \quad (12)$$

В процессе расчетов возможны случаи сингулярности, которые обусловлены появлением компонент матрицы  $m_{ji} = 0$  или  $m_{ji} = \infty$ . Одной из причин этого может быть условие:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = \begin{cases} 0 \\ \infty \end{cases} \quad \text{или} \quad \frac{\partial \ell_j}{\partial t} = \begin{cases} 0 \\ \infty \end{cases}. \quad (13)$$

Эти отдельные случаи должны быть проанализированы в процессе решения прямой задачи кинематики.

Аналогично определена зависимость изменений  $v$ -координат от изменения  $x$ -координат:

$$dV = QdX, \quad (14)$$

где матрица  $Q$  имеет своими компонентами частные производные соответствующих  $v$ -координат по  $x$ -координатам:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{16} \\ q_{21} & \dots & q_{26} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{61} & \dots & q_{66} \end{bmatrix}, \quad q_{ji} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i}. \quad (15)$$

На первом этапе исследований ограничимся рассмотрением случаев отсутствия бесконечных значений компонент матриц  $M$  и  $Q$ .

Для среднего положения исполнительного органа ( $\psi = 0^\circ$ ) рассчитаны компоненты матриц  $M$  и  $Q$ . Например, для матрицы  $M$  в данной точке имеем:

$$M = \begin{pmatrix} -3.761 & -2.096 & 24.75 & 4.889 & 2.849 & 1.941 \\ -1.584 & -0.883 & 10.424 & 2.059 & 1.2 & 0.818 \\ 1.375 & 0.766 & -9.047 & -1.787 & -1.041 & -0.71 \\ 1.877 & 1.046 & -12.355 & -2.441 & -1.422 & -0.969 \\ 1.957 & 1.09 & -12.88 & -2.544 & -1.482 & -1.01 \\ -2.369 & -1.32 & 15.591 & 3.08 & 1.795 & 1.223 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Полученная матрица (16) является сингулярной. Ее определитель равен нулю, а ранг – единице. Это относится также и к матрице  $Q$ .

Решим уравнение, которое связывает дифференциалы  $x$ -координат и  $\ell$ -координат. Для этого определим дифференциал каждой  $x$ -координаты как функцию шести переменных  $\ell$ -координат:

$$dx_i = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial x_j}{\partial \ell_i} d\ell_j. \quad (17)$$

Уточним, что

$$\frac{\partial x_i}{\partial \ell_j} = \frac{\frac{\partial x_i}{\partial t}}{\frac{\partial \ell_j}{\partial t}} = \frac{1}{m_{ji}}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что коэффициенты зависимости определяются через компоненты матрицы  $M$ , а именно являются обратными им. При этом

$$dX = Ndl, \quad (19)$$

где  $N$  является матрицей, компоненты которой обратны компонентам матрицы  $M$ , и над которой дополнительно проведена операция транспонирования. Таким образом, дифференциал  $x$ -координаты  $dx_i$  выражается через дифференциалы  $\ell$ -координат в соответствии с формулами

$$dx_i = \sum_{j=1}^6 p_{ji} dl_j,$$

где  $n_{ji} = \frac{1}{m_{ji}}$ .

Аналогично устанавливается связь  $x$ -координат и  $v$ -координат:

$$dX = PdV. \quad (20)$$

В индексном виде

$$dx = \sum_{j=1}^6 p_{ji} dV_j, \quad (21)$$

где компоненты матрицы  $P$  определены в виде  $p_{ji} = \frac{1}{q_{ji}}$ .

Объединив матрично векторные зависимости (19) и (20), определим:

$$NdL = PdV.$$

В индексном виде

$$\sum_{j=1}^6 n_{ji} dl_j = \sum_{j=1}^6 p_{ji} dv_j. \quad (22)$$

Соотношение (22) устанавливает взаимоднозначную связь  $l$ -координат и  $v$ -координат. Переходя от дифференциалов  $dx_i$  и  $dl_j$  к конечным приростам соответствующих величин, получим:

$$\delta x_i^l = \sum_{j=1}^6 n_{ji} \delta l_j. \quad (23)$$

Компоненты матриц  $P$  и  $N$  устанавливают связь изменений двух групп физических координат. Они позволяют установить взаимосвязь изменений координат.

Формула (23) определяет изменения пространственного положения инструмента станка в зависимости от изменений  $l$ -координат.

Аналогично определяются  $x$ -координаты по изменениям  $v$ -координат:

$$\delta x_i^v = \sum_{j=1}^6 p_{ji} dv_j. \quad (24)$$

Формула (24) устанавливает изменения положения инструмента, определенные по факту измерений  $v$ -координат. Погрешности пространственного положения инструмента будут установлены как разница векторов:

$$(\Delta_i) = (\delta x_i^l) - (\delta x_i^v). \quad (25)$$

Погрешности рассчитывают в области некоторого фиксированного положения исполнительного органа, которое определено вектором  $X_0$  и соответствующими ему векторами  $L_0$  и  $V_0$ .

Значения векторов  $L_0$  и  $V_0$  зависят от  $x$ -координат и определяются формулами (5) и (8). При этом имеет место погрешность выхода инструмента в позицию, определенная по формуле (3). Для повышения точности расчета изменений пространственного положения инструмента по формуле (25) предложено проводить периодическую коррекцию зависимости (25) с помощью экспериментальных измерений точного положения инструмента. Для этого проводятся измерения точного положения инструмента в ряде точек  $k=1, 2, \dots, K$ . Определяются фактические погрешности положения инструмента по формуле (3). Полученный массив погрешностей

$$(\delta x_i^k), i = 1, 2, \dots, 6, k = 1, 2, \dots, K$$

сглаживается в пределах рабочего пространства с получением непрерывных значений вектора погрешностей  $(\delta x_i^c)$ . При этом фактические погрешности пространственного положения будут определены модифицированной зависимостью (25) и составят:

$$(\Delta_i) = (\delta x_i^t) - (\delta x_i^v) - (\delta x_i^c).$$

Мехатронная система контроля текущего пространственного положения инструмента реализована в качестве опытного образца (рис. 4).



Рис. 4. Конструктивная реализация мехатронной системы контроля текущего пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики

Для контроля пространственного положения инструмента использован дополнительный механизм типа гексапод, который состоит из измерительных штанг  $V_i$ , установленных между шарнирами штанг переменной длины станка  $L_i$ . Основой измерительной штанги является преобразователь линейных перемещений потенциометрического типа РС-М-200 с дискретностью 0,01 В. В системе предусмотрена выборка люфтов в кинематических цепях измерительных штанг.

Полученные с преобразователя значения напряжения обрабатываются с помощью аналого-цифрового преобразователя М-DAQ14 и передаются на персональный компьютер в разработанное в среде LabView приложение для его отображения, анализа, фильтрации помех и шумов. Блок-диаграмма и интерфейс разработанного программного обеспечения приведены на рис. 5, а, б, соответственно.

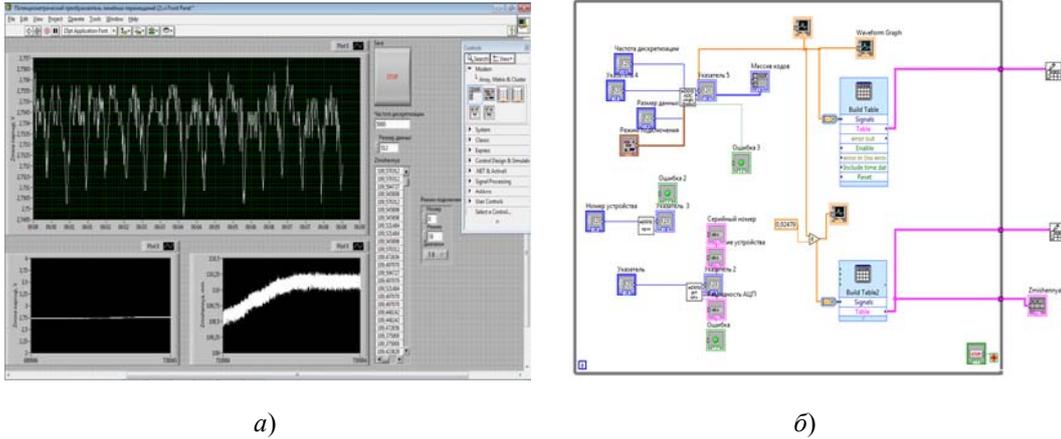


Рис. 5. Интерфейс пользователя (а) и блок-диаграмма (б) в среде LabView для отображения и записи данных системы контроля

Проводится периодическая калибровка системы, которая заключается в контроле точного положения исполнительного органа станка при его выходе в четко фиксированные позиции в пределах рабочего пространства.

Для установления фиксированных позиций разработаны специальные устройства (калибры). В качестве калибров используется система точных сфер, расположенных в точно определенных положениях в пределах рабочего пространства станка. Сферы изготовлены из карбида бора, который обеспечивает минимальные термические деформации. Сферы размещаются в отверстиях однотипных модулей в вершинах квадратов сторон  $100 \pm 0,002$  мм (рис. 6).

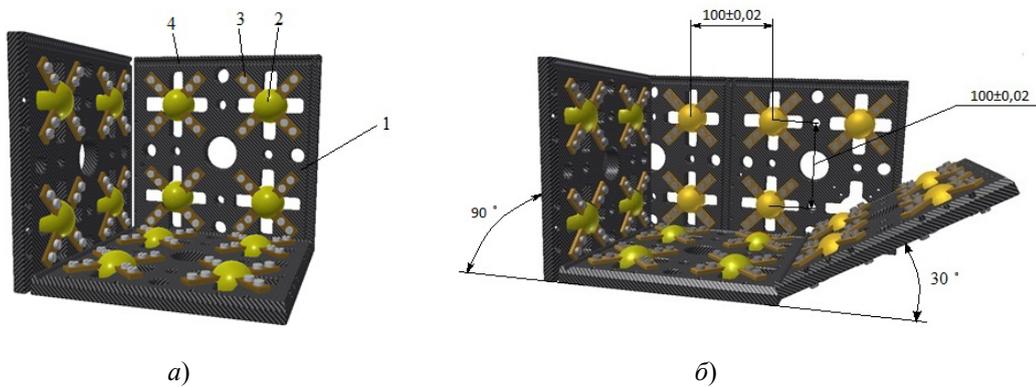


Рис. 6. Специальное оборудование из однотипных модулей для определения точности выхода исполнительного органа станка параллельной кинематики в четко фиксированные позиции:

а – расположение модулей по граням куба; б – пространственное расположение модулей

С помощью данных модулей формируются плоские или пространственные структуры различной конфигурации. Каждый модуль состоит из основы 1, в которой установлены высокоточные сферы 2 диаметром  $35 \pm 0,001$  мм. Сферы фиксируются в основе с помощью фиксаторов 3. Для определения параметров точности станка при прямолинейном движении инструмента в основе предусмотрены пазы 4.

Для осуществления операции калибровки в шпинделе станка устанавливается измеритель с контактным щупом 3. В процессе калибровки определяется положение исполнительного органа станка при его выходе в четко заданные позиции, соответствующие пространственному расположению сфер разработанного оборудования в соответствующей конфигурации.

### Заключение

1. Разработан метод и мехатронная система контроля текущего пространственного положения инструмента станка параллельной кинематики, который заключается в использовании дополнительного механизма параллельной кинематики, имеющего шесть измерительных штанг переменной длины.

2. С помощью методов геометрического моделирования рассчитаны базовые аналитические соотношения, определяющие закономерности работы мехатронной системы контроля текущего пространственного положения инструмента. Исследования показали, что законы изменения длин штанг станка и законы изменения длин измерительных штанг подобны.

3. Приведены аналитические зависимости, характеризующие погрешности пространственного положения исполнительного органа станка с параллельной кинематикой, возникающие при его выходе в позицию.

4. Предложенная мехатронная система контроля текущего пространственного положения инструмента изготовлена в качестве опытного образца, проведена ее предварительная настройка и проверка работоспособности.

5. Предложена конструкция специального оборудования для определения точного положения инструмента станка параллельной кинематики при его выходе в позицию.

### Литература

1. Сяньвень Кун. Структурный синтез параллельных механизмов / Кун Сяньвень, Клемент Госселин. – М. : Физматлит, 2012. – 275 с.
2. Афонин, В. Л. Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / В. Л. Афонин, П. В. Подзоров, В. В. Слепцов ; под общ. ред. В. Л. Афолина. – М. : Изд-во МГТУ Станкин, Янус, 2006. – 452 с.
3. Бушуев, В. В. Практика конструирования машин : справочник / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
4. Крайнев, А. Ф. Идеология конструирования / А. Ф. Крайнев. – М. : Машиностроение, 2003. – 385 с.
5. Merlet, J. P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications / J. P. Merlet. – Berlin : Springer, 2006. – 394 p.
6. Глазунов, В. А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев. – М. : Наука, 1991. – 95 с.
7. Дименберг, Ф. М. Теория пространственных шарнирных механизмов / Ф. М. Дименберг. – М. : Наука, 1982. – 336 с.
8. Струтинський, С. В. Схеми реалізації просторової системи приводів для маніпулювання об'єктами машинобудування / С. В. Струтинський // Технологічні комплекси. – 2012. – № 1, 2 (5, 6). – С. 97–103.
9. Струтинський, С. В. Забезпечення раціонального стохастичного балансу точності просторової системи приводів з використанням теорії нечітких множин / С. В. Струтинський, А. А. Гуржій // Вісник СевНТУ. – 2012. – Севастополь. – Вип. 128. – С. 226–233.
10. Calibration of parallel kinematic machine tools using mobility constraint on the tool center point / M. Abtahi, H. Pendar, A. Alasty, G. H. Vossough // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 45 (5–6). – P. 531–539.
11. Струтинський, В. Б. Наукове обґрунтування та розробка системи моніторингу фактичного просторового положення інструменту верстата паралельної кінематики / В. Б. Струтинський, А. С. Дем'яненко // Технологічні комплекси. – № 1 (7). – 2013.