

СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА ГИБРИДНОМ ПРИВОДЕ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Кузнецов В. В., Марко А. Ф., Карпович С. Е.

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск

Введение. Эффективным средством в реализации современного гибкого автоматизированного оборудования для приборостроения и микроэлектроники является широкое внедрение и использование систем перемещений, построенных на механизмах параллельной кинематики с гибридным многокоординатным приводом прямого действия [1, 2].

В статье в развитие этой концепции представлена новая разработанная авторами система перемещений с шестью степенями свободы, построенная на гибридном приводе прямого действия, компонованного из трех линейных и трех поворотных программно-управляемых координатных позиционеров кинематически связанных с исполнительным механизмом параллельной кинематики.

Система перемещений, рассматриваемая в настоящей статье, состоит из механизма параллельной кинематики, предложенного нами (патент РБ 11671 С2, МПК В25J 11/00; д. пуб. 30.04.2018), который приводится в движение также предложенной нами компоновкой соответствующего гибридного шестикоординатного привода прямого действия. Последний состоит из трехкоординатного шагового кольцевого двигателя и трех независимых шаговых двигателей, линейные направляющие которых установлены на подвижных сегментных модулях кольцевого двигателя. Структурно-кинематическая схема рассматриваемой системы перемещений представлена на рисунке 1.

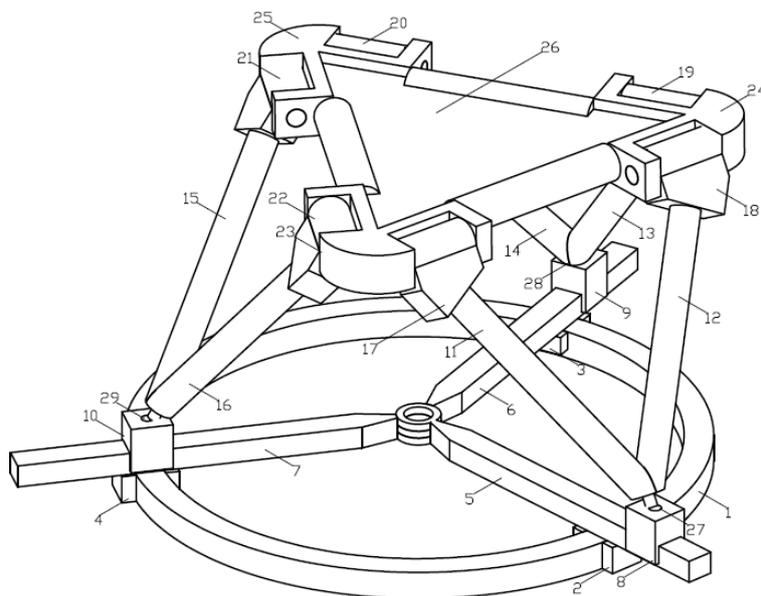


Рис. 1. Механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы

Техническая задача, на решение которой было направлено изобретение, является создание механизма параллельной кинематики на типовых координатных модулях с возможностью реализации прецизионных перемещений с шестью степенями свободы с расширенным диапазоном линейных и угловых перемещений подвижной треугольной платформы и повышенными кинематическими и динамическими характеристиками при высокой точности.

Механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы (рисунок 1) состоит из трех параллельных кинематических цепей, содержащих три подвижных треугольных шатуна в виде двойных элементов 11–12, 13–14, 15–16, связанных с одной стороны вращательными шарнирами 17–23, 18–24, 19–24, 20–25, 21–25, 22–23 с подвижной треугольной платформой 26, а с другой стороны связанных сферическими шарнирами 27, 28, 29 с тремя автономно управляемыми линейными шаговыми двигателями 8, 9, 10, линейные направляющие которых 5, 6, 7 с одной стороны, шарнирно соединены между собой, а с другой стороны жестко закреплены на соответствующих подвижных сегментных модулях 2, 3, 4 кольцевого шагового двигателя, неподвижная направляющая которых представляет основание замкнутого кольцевого статора 1. Он работает следующим образом. При секторных перемещениях трех сегментных модулей 2, 3, 4 в соответствие с заданными на входе системой управления законами их движения по неподвижной направляющей замкнутого кольцевого статора 1 кольцевого шагового двигателя и одновременно при линейных перемещениях, реализуемых тремя линейными шаговыми двигателями 8, 9, 10 в соответствие с заданными системой управления законами их движения по подвижным линейным направляющим 5, 6, 7 через сферические шарниры 27, 28, 29, шатуны 11–12, 13–14, 15–16 и соответствующие вращательные шарниры 17–23, 18–24, 19–24, 20–25, 21–25, 22–23 приводится в пространственное движение исполнительная платформа 26 (рисунок 1).

В зависимости от конкретно задаваемого секторного положения относительно статора 1 сегментных модулей 2, 3, 4 и конкретных положений линейных подвижных модулей 8, 9, 10 рабочая платформа 26 принимает однозначное и соответствующие им положение и ориентацию в трехмерном пространстве. Тем самым предложенным механизмом параллельной кинематики обеспечивается реализация перемещения платформы с шестью степенями свободы в трехмерном пространстве.

Предложенный механизм параллельной кинематики, как замкнутая кинематическая цепь, полностью удовлетворяет необходимым условием наличия шести степеней свободы благодаря тому, что он состоит из пространственной группы Ассур нулевой подвижности [3, 4], которая согласно теории структуры, будучи соединенной тремя сферическими шарнирами с ведущими элементами привода не изменяет его степени свободы.

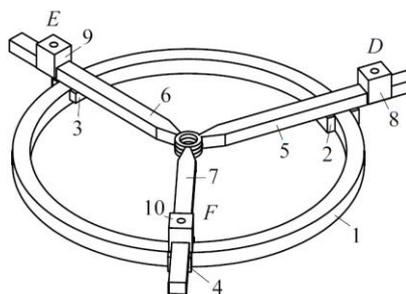


Рис. 2. Гибридный привод на кольцевом и линейных шаговых двигателях

Предложенный гибридный привод, схемное решение которого представлено на рисунке 2, состоит из кольцевого привода прямого действия с тремя степенями свободы и трех линейных шаговых двигателей, закрепленных на трех сегментных подвижных модулях.

Таким образом с помощью предложенного механизма параллельной кинематики могут быть реализованы прецизионные движения с шестью степенями свободы по шести независимым координатам в трехмерном пространстве, включая три линейные и три угловые, обеспечивая в то же время высокие кинематические и динамические характеристики перемещений при высокой точности их реализации. При этом обеспечивается реализация дополнительного управляемого разворота вокруг вертикальной оси в диапазоне ± 360 градусов, что расширяет область управляемого движения с перспективой построения на его основе современного прецизионного, фрезерного, сверлильного оборудования, прецизионных промышленных роботов и платформ, например, для телескопов, лазеров, телекоммуникационных антенн.

Алгоритмизация и имитационное моделирование. Для алгоритмизации математических моделей решения прямой и обратной задач кинематики была использована расчетная схема (рисунок 3), полученная по структурно-кинематической схеме системы.

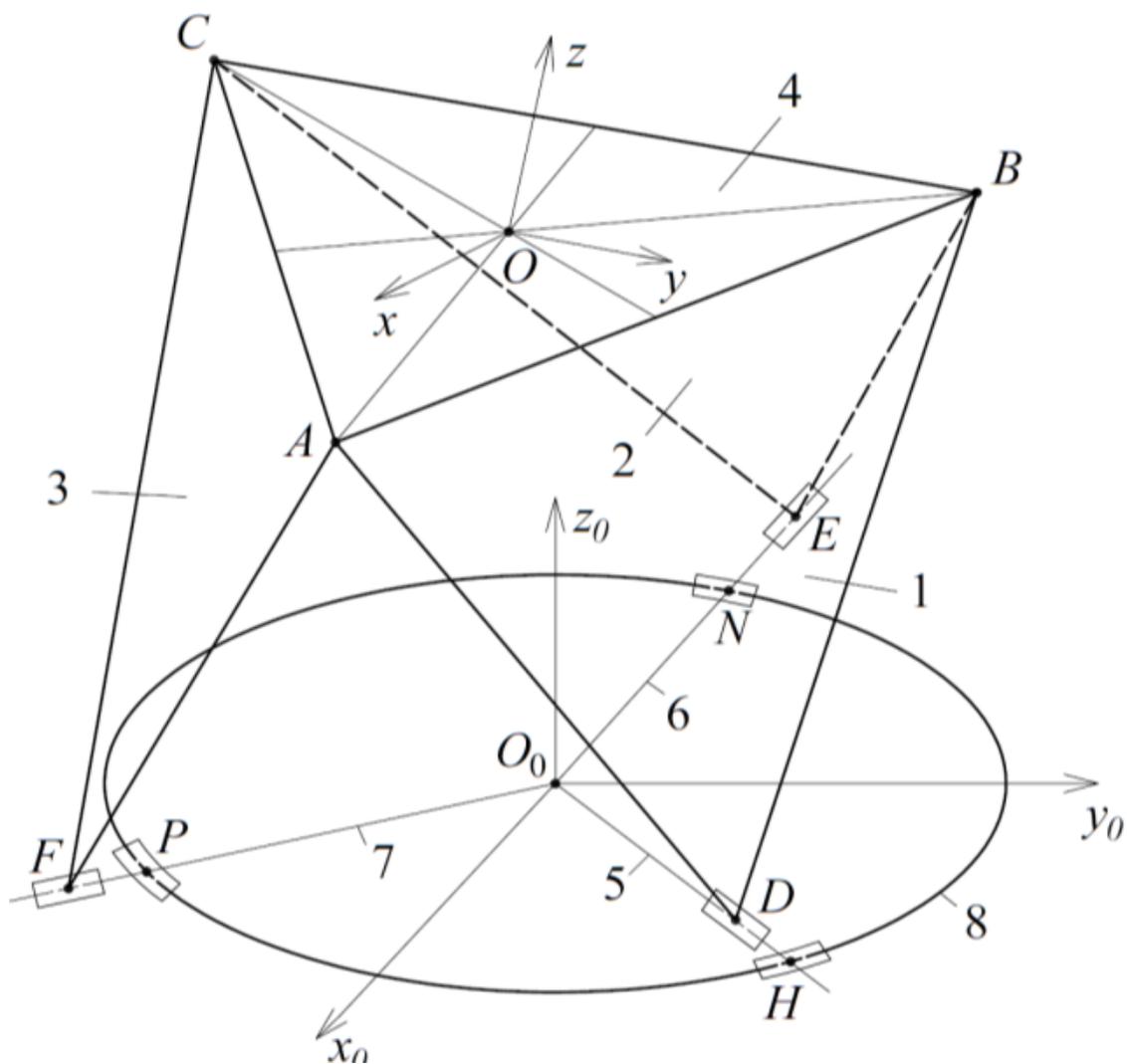


Рис. 3. Расчетная схема механизма параллельной кинематики

Конечной целью алгоритмизации явилось нахождение аналитической связи положения платформы 4, задаваемой в пространстве вершинами треугольника ABC и положением точек D , E и F , как выходными точками позиционирования шестикоординатного привода прямого действия, связанными с подвижной платформой 4 тремя параллельными кинематическими цепями 1, 2, и 3 в виде раскрывающегося тетраэдра (рисунок 3).

Проведенный в работе анализ возможных математических моделей алгоритмизации кинематики пространственных систем перемещений [5, 6] показал, что наиболее эффективные из них сводятся к системе из шести нелинейных трансцендентных уравнений. Выполненные нами исследования в этой области позволили разработать подход сведения алгоритма решения задач кинематики до трех уравнений такой же структуры.

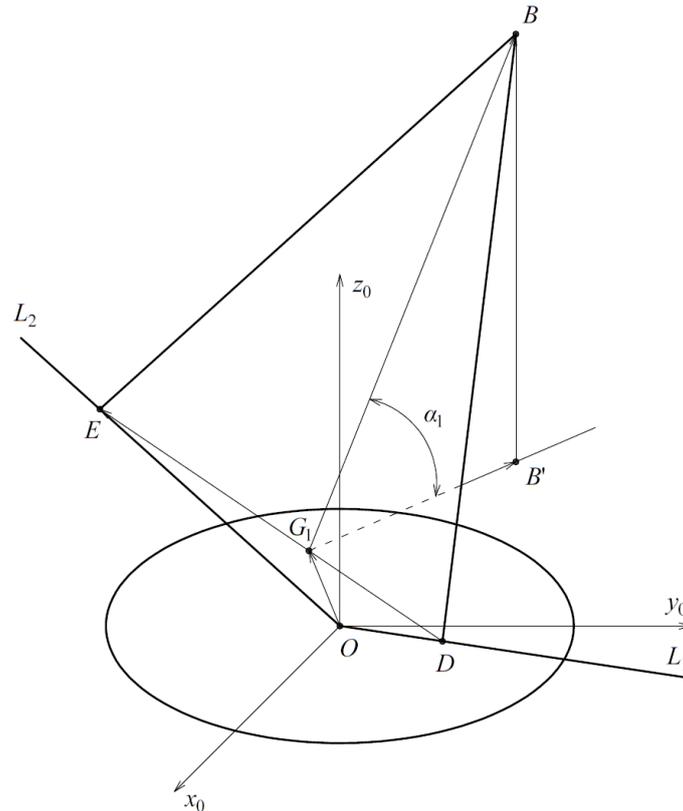


Рис. 4. Расчетная схема механизма параллельной кинематики

В результате реализации предложенного подхода по предложенной расчетной схеме, представленной на рисунке 4, удалось многопараметрическую задачу о положениях точек A , B и C , свести к однопараметрической задаче нахождения угловых параметров $\alpha_i (i=1, 2, 3)$ соответственно для каждого из трех подвижных контуров DBE , ECF и FAD . Так, для контура DBE , определяющего положение точки B , вводится угловой параметр α_1 в виде угла образованного треугольником DBE с плоскостью кольцевого двигателя совпадающей с плоскостью x_0Oy_0 . Здесь DB и EB стороны соседних треугольных звеньев ADB и BEC (рисунок 1). Необходимо отметить, что алгоритм решения задачи о положениях является главной вычислительной составляющей алгоритмизации решения прямой задачи кинематики.

Из расчетной схемы (рисунок 4), видно, что при изменении положения точек D и E на направляющих L_1 и L_2 меняется положение и ориентация контура DBE , при

этом положение определяется задаваемыми координатами точек D и E , а ориентация определяется угловым параметром α_1 , связывающим искомые координаты точки $B(x_B, y_B, z_B)$ и задаваемые координаты точек $D(x_D, y_D, 0)$ и $E(x_E, y_E, 0)$ гибридного привода. Для нахождения уравнений этой кинематической связи необходимо рассмотреть векторные контуры OG_1B и $OG_1B'B$ (рисунок 4) согласно которым получим

$$\overrightarrow{OG_1} + \overrightarrow{G_1B} = \overrightarrow{OG_1} + \overrightarrow{G_1B'} + \overrightarrow{B'B}. \quad (1)$$

Так как треугольник DBE равнобедренный с переменным по длине основанием DE , то угловой параметр α_1 будет определяться углом между векторами $\overrightarrow{G_1B'}$ и $\overrightarrow{G_1B}$, где $\overrightarrow{G_1B'} \perp \overrightarrow{DE}$ и $\overrightarrow{G_1B} \perp \overrightarrow{BE}$. В этом случае точка G_1 делит отрезок DE пополам, а это значит, что вектор $\overrightarrow{OG_1} = \left(\frac{x_E + x_D}{2}, \frac{y_E + y_D}{2} \right)$ или $G_1 \left(\frac{x_E + x_D}{2}, \frac{y_E + y_D}{2} \right)$.

Угол, образованный вектором \overrightarrow{DE} с осью x_0 , обозначим θ_1 , согласно рисунку 2 его можно определить по координатам двух точек D и E в виде

$$\theta_1 = \arctg \left(\frac{y_D - y_E}{x_D - x_E} \right). \quad (2)$$

При этом однозначное определение угла θ_1 , связанное с выбором четверти решения, выполняется по результатам вычисления $\sin \theta_1$ и $\cos \theta_1$ по сопоставлению их знаков.

Угол между вектором $\overrightarrow{G_1B'}$ и осью x_0 , обозначенный θ_1' , согласно рисунку 4 равен

$$\theta_1' = \theta_1 - 90^\circ. \quad (3)$$

В свою очередь $G_1B' = G_1B \cos \alpha_1$, а $B'B = z_B = G_1B \sin \alpha_1$.

Для нахождения уравнений связей координат точки B и углового параметра α_1 спроецируем векторное уравнение (2) на оси x_0, y_0 и z_0 . В результате окончательно получим:

$$\begin{cases} x_B = x_G + G_1B \cos \alpha_1 \cos \theta_1'; \\ y_B = y_G + G_1B \cos \alpha_1 \sin \theta_1'; \\ z_B = G_1B \sin \alpha_1. \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что исполнительный параллельный манипулятор, рассматриваемый в работе, представленный в виде раскрывающегося тетраэдра, содержит звенья в виде одинаковых равносторонних треугольников со сторонами равными a , то выражения (4) перепишем через исходные данные в виде:

$$\begin{cases} x_B = \frac{x_E + x_D}{2} + G_1 B \cos \alpha_1 \cos \theta_1; \\ y_B = \frac{y_E + y_D}{2} + G_1 B \cos \alpha_1 \sin \theta_1; \\ z_B = G_1 B \sin \alpha_1, \end{cases} \quad (5)$$

где $x_D = \rho_1 \cos \varphi_1$, $y_D = \rho_1 \sin \varphi_1$, $x_E = \rho_2 \cos \varphi_2$, $y_E = \rho_2 \sin \varphi_2$.

Переменная длина $G_1 B$, входящая в (5) определяется текущими координатами точек D и E , положение которых задается системой управления гибридного привода. В координатном представлении $G_1 B$ будет иметь вид:

$$G_1 B = \sqrt{a^2 - \frac{(x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2}{4}}. \quad (6)$$

С учетом задаваемых параметров гибридного привода, выражение (6) преобразуется к виду

$$G_1 B = \sqrt{a^2 - \frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2)}{4}}. \quad (7)$$

Координаты точек A и C находим, используя тот же подход, что и для нахождения координат точки B . Окончательно получим следующие расчетные системы уравнения.

Для точки A получим

$$\begin{cases} x_A = \frac{x_D + x_F}{2} + G_2 A \cos \alpha_2 \cos \theta_2'; \\ y_A = \frac{y_D + y_F}{2} + G_2 A \cos \alpha_2 \sin \theta_2'; \\ z_A = G_2 A \sin \alpha_2, \end{cases} \quad (8)$$

где $x_D = \rho_1 \cos \varphi_1$, $y_D = \rho_1 \sin \varphi_1$, $x_F = \rho_3 \cos \varphi_3$, $y_F = \rho_3 \sin \varphi_3$,

$$G_3 A = \sqrt{a^2 - \frac{\rho_1^2 + \rho_3^2 - 2\rho_1\rho_3(\sin \varphi_1 \sin \varphi_3 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_3)}{4}}.$$

Для точки C получим

$$\begin{cases} x_C = \frac{x_E + x_F}{2} + G_3 C \cos \alpha_3 \cos \theta_3'; \\ y_C = \frac{y_E + y_F}{2} + G_3 C \cos \alpha_3 \sin \theta_3'; \\ z_C = G_3 C \sin \alpha_3, \end{cases} \quad (9)$$

где $x_E = \rho_2 \cos \varphi_2$, $y_E = \rho_2 \sin \varphi_2$, $x_F = \rho_3 \cos \varphi_3$, $y_F = \rho_3 \sin \varphi_3$,

$$G_3 C = \sqrt{\frac{a^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2 - 2\rho_2\rho_3(\sin \varphi_2 \sin \varphi_3 + \cos \varphi_2 \cos \varphi_3)}{4}}.$$

Положение точек A, B и C , реализуемыми тремя параллельными кинематическими цепями кинематически связаны с рабочей платформой 4 (рисунок 1), которая представляет собой равносторонний треугольник ABC со сторонами равными a . С учетом этого конечная математическая модель всей системы параллельной кинематики, предложенной в работе, будет выражаться следующей системой из трех уравнений

$$\begin{cases} (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 = a^2; \\ (x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2 = a^2; \\ (x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2 = a^2, \end{cases} \quad (10)$$

где все координаты точек A, B и C определяются по ранее полученным выражениям (5), (8) и (9), сводя решение прямой задачи кинематики к решению системы из трех нелинейных уравнений относительно трех неизвестных в виде угловых параметров α_1 , α_2 и α_3 . Нахождение последних выполняется одним из численных методов реализованных в программном обеспечении MATLAB [7]. Обратной подстановкой α_1 , α_2 и α_3 в соответствующие уравнения систем (5), (8) и (9), дает искомые координаты точек A, B и C в зависимости от управляемых положения точек D, E и F шести-координатного гибридного привода прямого действия.

Предложенная нами математическая модель позволила разработать алгоритмизацию решения прямой задачи кинематики для программирования в среде MATLAB. В результате был создан программный модуль компьютерного исследования для предложенного в работе параллельного манипулятора на гибридном приводе.

Для имитационного моделирования решения задач кинематики и других связанных с ними на основе предложенной алгоритмизации исполнительного механизма рассматриваемой системы перемещений была разработана в среде MATLAB программа имитационного моделирования с интерактивной визуализацией результатов, интерфейс которой представлен на рисунке 5, где 1 – входные конструктивные параметры; 2 – изменяемые параметры состояния механизма; 3 – визуализация механизма.

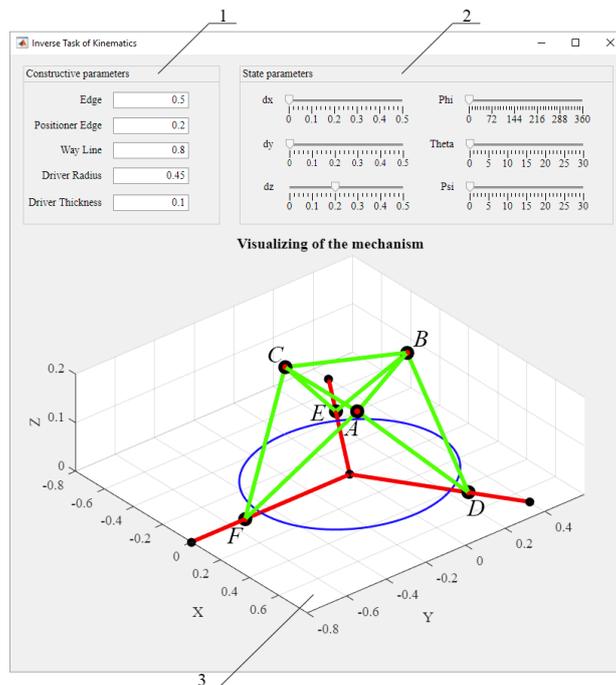


Рис. 5. Интерфейс программы моделирования кинематики

Система нелинейных уравнений (9) в алгоритме программы представлена совокупностью функциональных уравнений, содержащих переменные $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, координаты расположения шести подвижных сегментов привода и конструктивные параметры механизма. Процесс решения системы нелинейных уравнений происходит до тех пор, пока значение оценочной функции, рассчитываемой в процессе итерационного поиска, не станет меньше заданной точности или новые значения переменных $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, изменяются каждый раз на величину меньшую, чем заданная предельно допустимая. Параметры точности решения системы уравнений задаются непосредственно на программном уровне.

Следует отметить, что вычислительный процесс решения нелинейной системы уравнений может отличаться в зависимости от применяемого алгоритма оптимизации. В разработанной программе используются методы оптимизации Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта [2, 8].

Верификация результатов и макетирование системы. Верификация результатов компьютерного исследования кинематических характеристик разработанной системы перемещений выполнялась путем имитационного моделирования точности исполнения кинематических функций, задаваемых в виде тестовой калибровочной функции гармонического типа. Дискретные координаты x_i, y_i для траектории позиционеров в плоскости статора будут иметь вид

$$x_i = (R_t + \Delta R_t \sin k\varphi_i) \cos \varphi_i, \quad y_i = (R_t + \Delta R_t \sin k\varphi_i) \sin \varphi_i.$$

В результате представлены функции погрешности на сегментах, полученные в результате компьютерного моделирования кинематики в среде MATLAB/Simulink для конструктивного исполнения (рисунок 6).

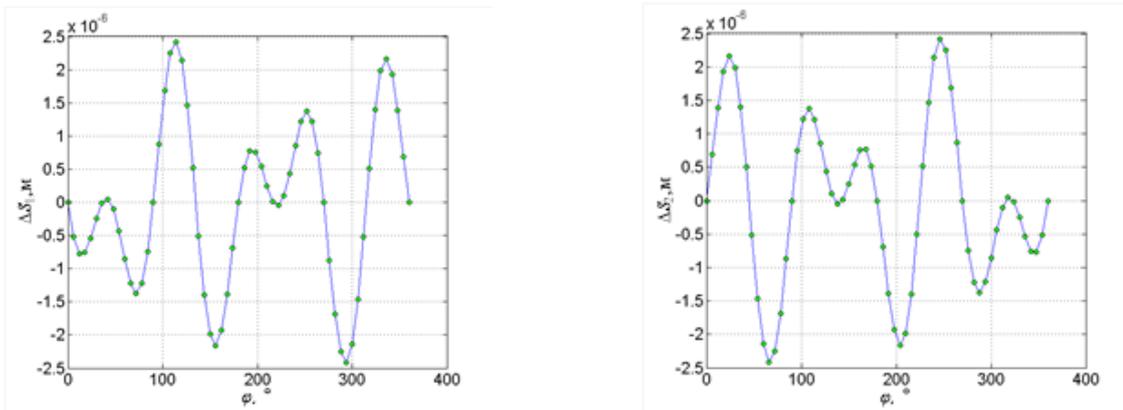


Рис. 6. Графики функций погрешности

Для натурального макетирования и наглядной верификации идеи о возможности реализации сложного пространственного движения исполнительной платформы с помощью системы перемещений (рисунок 7) на механизме параллельной кинематики в виде раскрывающегося тетраэдра на гибридном шестикоординатном приводе прямого действия был разработан и создан макет.



Рис. 7. Макет системы перемещений

Макетирование позволило подтвердить гипотезу об обеспечении предложенным исполнительным механизмом параллельной кинематики шести степеней свободы, а также позволило визуально проанализировать все выходные функции положения платформы, реализуемые по трем линейным и трем угловым координатам, сопоставить их с расчетными функциями положениями, полученными путем имитационного моделирования в среде MATLAB.

Проведенное в работе имитационное моделирование предложенной системы перемещений показало возможность реализации в рабочей области пространственных перемещений исполнительной платформы по трем линейным и трем угловым независимым координатам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпович, С. Е. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики: монография / С. Е. Карпович [и др.]; под ред. Проф. С. Е. Карповича. – Минск : Бестпринт, 2017. – 254 с.
2. Карпович, С. Е. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В. В. Жарский [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2013. – 208 с.
3. Heimann, V. Mechatronika. Komponenty, metody, przyklady / V. Heimann, W. Gerth, K. Popp. – Warszawa : PWN, 2001. – 351 s.
4. Shetty, D. Mechatronics System Design / D. Shetty, R. Kolk. – Cengage Learning, 2010. – 504 p.
5. Карпович, С. Е. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов / С. Е. Карпович, В. В. Кузнецов, М. М. Форотан // Докл. БГУИР – Минск, 2016. – №. 3. – С 22–28.
6. Кузнецов, В. В. Алгоритмизация и моделирование пространственной системы параллельной кинематики на трех планарных позиционерах / В. В. Кузнецов // Известия НАН Беларуси. – 2016. – Вып. 3. – С. 310–319.
7. MATLAB. The Language of Technical Computing – The MathWorks, Natick, MA, 2004.
8. Chapman, S. MATLAB programming for engineers / S. Chapman – Cengage Learning, USA, 2015 – 665 p.

Поступила: 07.02.2022