

УДК 62-231.1:621.313.13

С.Е. КАРПОВИЧ, д-р техн. наук; А.Ю. ВОЙТОВ; В.В. КУЗНЕЦОВ
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

В.В. ЖАРСКИЙ, д-р техн. наук
ООО «Рухсервомотор», г. Минск, Республика Беларусь

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Рассмотрена система параллельной кинематики, состоящая из параллельного манипулятора с тремя степенями свободы на кольцевом приводе прямого действия. Разработана кинематическая модель, на основании которой проведена алгоритмизация для имитационного моделирования в среде MATLAB. По разработанной программе выполнено исследование шести функций положения рабочей платформы в зависимости от обобщенных координат трех сегментов кольцевого привода с отображением трехмерного эскиза системы или динамической анимации.

Ключевые слова: система перемещений, кольцевой привод, кинематика, моделирование, имитационное моделирование

Введение. Анализ прецизионного технологического оборудования в частности для производства изделий электронной техники: оптико-механического для генерирования изображений, проекционного совмещения и экспонирования полупроводниковых пластин, контроля изображений; сборочного, включая установки зондового контроля пластин, разделения пластин на кристаллы, посадки кристаллов, монтажа проволоочных выводов и других видов, показывает, что основными узлами, в значительной степени определяющими его производительность, точность, динамику, являются устройства координатных перемещений [1], которые представляют собой автономные механо-аппаратно-программные мехатронные комплексы, предназначенные для осуществления рабочих, установочных и юстировочных перемещений кристаллов, полупроводниковых пластин, инструментов или элементов проекционной оптической системы. При этом с каждым шагом уменьшения топологической нормы и увеличения размера кремниевых пластин еще более возрастают требования к координатным системам перемещений. Поэтому разработка принципиально новых систем перемещений, в том числе и на механизмах параллельной кинематики является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение для создания современного технологического оборудования производства изделий электронной техники.

В настоящей работе в развитие этого научного направления [2, 3], предложена новая система параллельной кинематики в виде параллельного манипулятора на кольцевом приводе прямого действия, для которой разработаны ее математическая модель и алгоритмы соответствующих вычислительных процедур и выполнено компьютерное имитационное моделирование в среде MATLAB кинематических характеристик с интерактивной визуализацией результатов.

Система параллельной кинематики на кольцевом приводе прямого действия. Реализация необходимого перемещения и ориентации исполнительного элемента, связанного с инструментом или заготовкой в автоматизированном оборудовании, характеризуется подвижностью от трех до шести степеней свободы включительно. Это наиболее эффективно осуществляется при исполь-

зовании реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики [3, 4] на гибридных координатных приводах прямого действия [5, 6]. В сравнении с традиционными промышленными роботами и манипуляторами, имеющими разомкнутую структуру, такие системы перемещений отличаются высокой структурной жесткостью, модульностью конструкции и позволяют добиваться высокой динамической точности за счет устойчивости к вибрациям.

Рассматриваемая система параллельной кинематики на кольцевом приводе прямого действия, показанная на рисунке 1, предназначена для работы совместно с системой технического зрения в составе прецизионного сборочного и оптико-механического оборудования производства изделий электронной техники.

Она состоит из кольцевого статора, по которому перемещаются три сегментных модуля движения на шаговых двигателях и параллельного манипулятора в виде раскрывающегося тетраэдра из четырех треугольных подвижных звеньев, один из которых представляет собой рабочую платформу, которая кинематически вращательными парами связана с тремя другими подвижными треугольными звеньями. Кинематическое замыкание параллельного манипулятора осуществляется тремя сферическими шарнирами, расположенными на подвижных сегментах привода. В отличие от серийных кольцевых двигателей, которые обладают одной степенью свободы независимо от количества сегментов, в

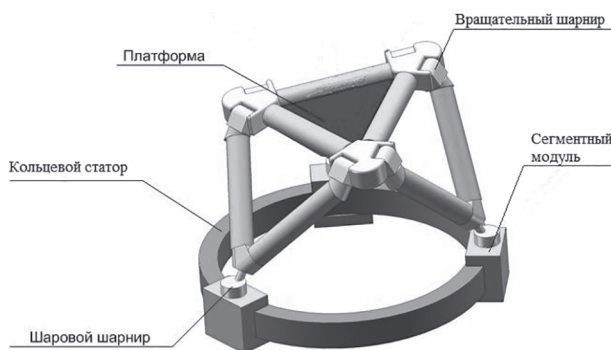


Рисунок 1 — Пространственный параллельный манипулятор с тремя степенями свободы

рассматриваемой системе неподвижный статор выполняется с магнитными дорожками как по образующей, так и по кольцевой поверхности, при этом сегменты исполняются автономно управляемыми и движение каждого программируется отдельно.

Математическая модель системы параллельной кинематики. Структурно-кинематическая схема исполнительного механизма параллельной кинематики с трехкоординатным кольцевым приводом представлена на рисунке 2. Базовыми конструктивными параметрами механизма являются параметры, определяющие его геометрическую конфигурацию: R — средний радиус кольцевого привода, длины сторон подвижных треугольных звеньев AFB , ADC и CEB , принятые в работе равными между собой и равными a . Функции положения ведущих звеньев, определяющие положение во времени каждого из трех подвижных сегментов, в работе задаются текущими значениями углов $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, определяющих положение точек, соответственно D, E и F на кольцевой направляющей (см. рисунок 2).

В качестве линейных позиционных координат платформы были приняты координаты точки O_1 начала системы координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$ в неподвижной системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$, а в качестве угловых координат ориентации платформы были приняты углы Эйлера φ, θ, ψ , выражаемые через координаты точек A, B и C этой треугольной платформы.

Целью настоящего исследования является алгоритмизация задачи позиционирования для рассматриваемой пространственной системы перемещений (см. рисунок 2), заключающаяся в нахождении в системе координат S_0 текущих координат точек A, B и C в зависимости от положения ведущих точек D, E и F , задаваемых переменными углами $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ (рисунок 3), параметрическое представление которых во времени позволяет находить в общем случае функции положения всех точек и звеньев исполнительного механизма, координаты положения и ориентации рабочей платформы. Такая задача в аналитической механике мехатронных систем

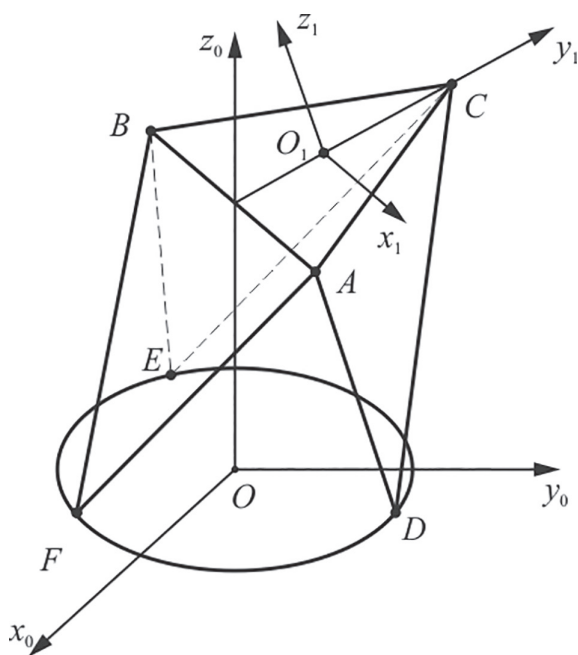


Рисунок 2 — Расчетная модель системы

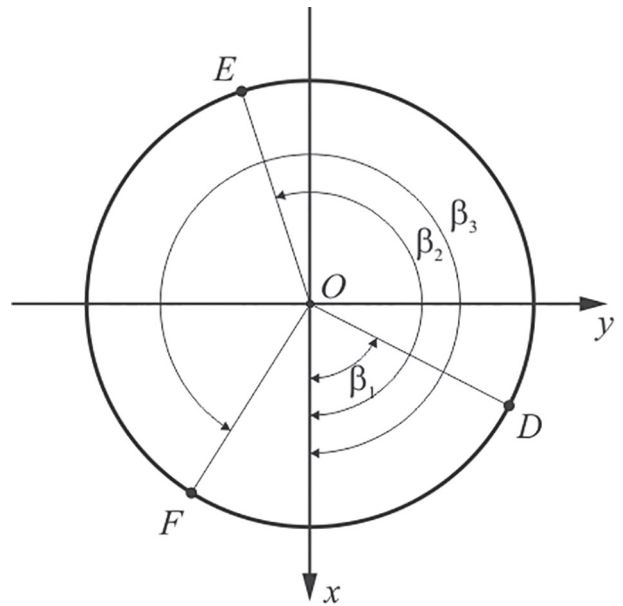


Рисунок 3 — Угловые положения точек D, E, F

перемещений и робототехнике называется прямой задачей кинематики.

Рассмотрим формирование математической модели решения прямой задачи кинематики исполнительного манипуляционного механизма, представленного на рисунке 2. Так как этот механизм относится к классу механизмов параллельной кинематики, то при выводе математической модели он допускает фрагментацию по отдельным параллельным кинематическим цепям, в данном случае в виде трех подвижных треугольников: DAF, DCE, EBF . Аналитическое описание любого из этих фрагментов может быть интерпретировано как рекуррентное аналитическое представление и для двух других. Не нарушая общности, рассмотрим фрагмент механизма DCE (рисунок 4).

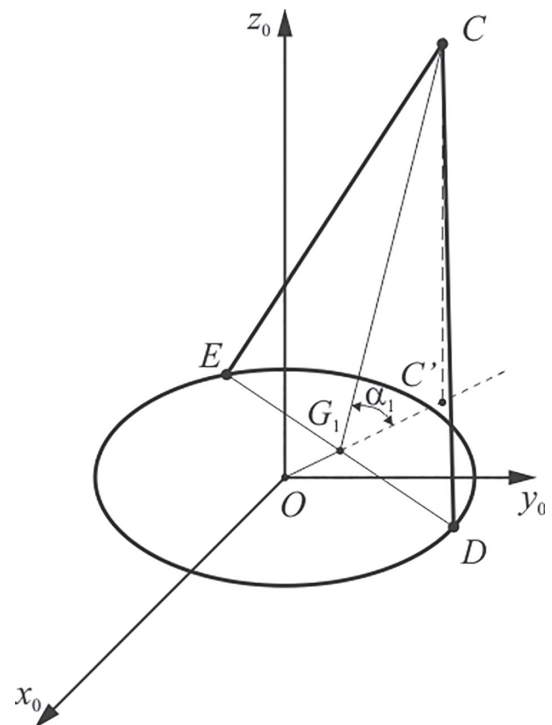


Рисунок 4 — Расчетная схема для обобщенной координаты α_1

Здесь DC и CE стороны соседних подвижных треугольных звеньев ADC и EBC . При изменении положения точек D и E , задаваемых углами β_1 и β_2 соответственно, подвижных сегментов привода на направляющей окружности статора меняется положение и ориентация треугольника DCE . В качестве обобщенной координаты, определяющей его положение в переносном движении, выберем угол α_1 наклона треугольника DCE к плоскости направляющей окружности.

Нетрудно видеть, что положение точки C в трехмерном пространстве характеризуется ее проекцией C' на плоскость x_0Oy_0 и ее проекцией на ось x_0 , при этом секущая OC' делит угол DOE пополам. В результате получаем геометрическое место точек O, D, E, C, C' , реконфигурируемое в пространстве в зависимости от положения ведущих точек D и E . Обобщенная координата α_1 определится из треугольника CGC' через координаты соответствующих точек.

Для рассматриваемого в статье случая, когда все подвижные треугольники являются равносторонними со сторонами, равными a , а радиус кольцевого привода равен R в соответствии с рисунками 3, 4 и 5, получим следующие соотношения координат, углов и констант:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2 + \beta_3}{2}; \quad \gamma_3 = \frac{\beta_1 + \beta_3 + 2\pi}{2}; \\ x_D &= R \cos \beta_1; \quad y_D = R \sin \beta_1; \\ x_E &= R \cos \beta_2; \quad y_E = R \sin \beta_2; \\ ED &= \sqrt{(x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2} = \\ &= R \sqrt{(\cos \beta_1 - \cos \beta_2)^2 + (\sin \beta_1 - \sin \beta_2)^2}; \\ CG_1 &= \sqrt{CD^2 - \left(\frac{ED}{2}\right)^2} = \\ &= \sqrt{a^2 - \frac{R^2(\cos \beta_1 - \cos \beta_2)^2 + R^2(\sin \beta_1 - \sin \beta_2)^2}{4}}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом расчетных схем, представленных на рисунках 2, 3, 4 и 5, и соотношений (1) окончательно получим расчетные зависимости для переменных координат точки C в зависимости от углов β_1 и β_2 в виде:

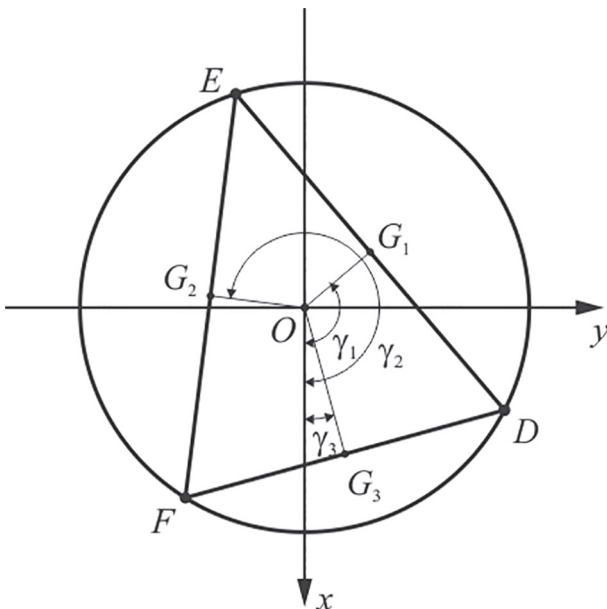


Рисунок 5 — Угловые координаты точек G_1, G_2, G_3

$$\begin{cases} x_c = \frac{R}{2}(\cos \beta_1 + \cos \beta_2) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 - 1)} \cos \alpha_1 \cos \gamma_1; \\ y_c = \frac{R}{2}(\sin \beta_1 + \sin \beta_2) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 - 1)} \cos \alpha_1 \sin \gamma_1; \\ z_c = \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 - 1)} \sin \alpha_1. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогичные расчетные модели могут быть получены для алгоритмизации двух других фрагментов исполнительного механизма EBF и DAF . В результате математические модели формирования обобщенных координат α_2 и α_3 будут отличаться только на уровне обозначений используемых переменных. В первом случае вместо α_1 будем использовать α_2 , а во втором — α_3 .

Аналогично (2) получим алгоритмы расчета текущих координат для точек B и A соответственно:

$$\begin{cases} x_B = \frac{R}{2}(\cos \beta_2 + \cos \beta_3) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_2 \sin \beta_3 + \cos \beta_2 \cos \beta_3 - 1)} \cos \alpha_2 \cos \gamma_2; \\ y_B = \frac{R}{2}(\sin \beta_2 + \sin \beta_3) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_2 \sin \beta_3 + \cos \beta_2 \cos \beta_3 - 1)} \cos \alpha_2 \sin \gamma_2; \\ z_B = \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_2 \sin \beta_3 + \cos \beta_2 \cos \beta_3 - 1)} \sin \alpha_2. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_A = \frac{R}{2}(\cos \beta_1 + \cos \beta_3) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_3 + \cos \beta_1 \cos \beta_3 - 1)} \cos \alpha_3 \cos \gamma_3; \\ y_A = \frac{R}{2}(\sin \beta_1 + \sin \beta_3) + \\ + \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_3 + \cos \beta_1 \cos \beta_3 - 1)} \cos \alpha_3 \sin \gamma_3; \\ z_A = \sqrt{a^2 + \frac{R^2}{2}(\sin \beta_1 \sin \beta_3 + \cos \beta_1 \cos \beta_3 - 1)} \sin \alpha_3. \end{cases} \quad (4)$$

Выражения (2)–(4), определяющие расчетные координаты точек A, B и C , позволяют получить систему нелинейных уравнений относительно неизвестных $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ в виде:

$$\begin{cases} (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 = a^2; \\ (x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2 = a^2; \\ (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 = a^2. \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) представляет собой нелинейную трансцендентную систему, решение которой возможно только численными методами. Особенность нахождения неизвестных $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ состоит в том, что в данном случае мы располагаем хорошим первым приближением, определяемым известной начальной конфигурацией механизма. Поэтому выбор метода оптимизации не является критичным. Для численного решения систе-

мы (5) нами был использован пакет оптимизации программной среды MATLAB [3, 4]. В результате компьютерного численного решения системы (5) могут быть получены текущие значения углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, однозначно соответствующие текущим положениям точек D, E и F , определяющим входные позиционные характеристики управляемых сегментов на кольцевом приводе. Подставляя найденные значения углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ в системы уравнений (3), (4) и (5), получим текущие координаты точек A, B и C , которые полностью характеризуют текущее положение и ориентацию плоского звена ABC в трехмерном пространстве. В конечном виде их необходимо представлять, как положение и ориентацию системы координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, жестко связанной с подвижной платформой.

Алгоритм нахождения независимых функций положения. Положение системы координат S_1 будем характеризовать линейными координатами $x_{O_1}, y_{O_1}, z_{O_1}$, а ориентацию — углами Эйлера φ, θ, ψ . Положение начала O_1 системы координат S_1 по известным координатам вершин треугольника ABC определим по формулам:

$$\begin{aligned} x_{O_1} &= \frac{x_A + x_B + x_C}{3}; & y_{O_1} &= \frac{y_A + y_B + y_C}{3}; \\ z_{O_1} &= \frac{z_A + z_B + z_C}{3}. \end{aligned} \quad (6)$$

Углы Эйлера φ, θ, ψ , определяющие ориентацию системы координат S_1 в неподвижной системе координат S_0 (см. рисунок 2), определяются также через известные координаты точек A, B, C . Вначале найдем вектор $\overrightarrow{O_1A}$ x :

$$\overrightarrow{O_1A} = (x_A - x_{O_1}, y_A - y_{O_1}, z_A - z_{O_1}). \quad (7)$$

С учетом того, что

$$|\overrightarrow{O_1A}| = \sqrt{(x_A - x_{O_1})^2 + (y_A - y_{O_1})^2 + (z_A - z_{O_1})^2}, \quad (8)$$

получим элементы a_{11}, a_{12}, a_{13} матрицы M_{01} , определяющие направление оси x_1 в неподвижной системе координат S_0 :

$$a_{11} = \frac{x_A - x_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1A}|}; \quad a_{12} = \frac{y_A - y_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1A}|}; \quad a_{13} = \frac{z_A - z_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1A}|}. \quad (9)$$

Аналогично, в соответствии с рисунком 2 можно записать выражения для расчета элементов a_{21}, a_{22}, a_{23} , определяющих направление оси y_1 в неподвижной системе координат S_0 в виде:

$$a_{21} = \frac{x_B - x_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1B}|}; \quad a_{22} = \frac{y_B - y_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1B}|}; \quad a_{23} = \frac{z_B - z_{O_1}}{|\overrightarrow{O_1B}|}, \quad (10)$$

где $|\overrightarrow{O_1B}| = a$ — сторона равностороннего треугольника подвижной платформы.

Для нахождения оставшихся трех элементов a_{31}, a_{32}, a_{33} , определяющих направление оси z_1 в системе координат S_0 , воспользуемся векторным произведением ортов $\vec{i}(a_{11}, a_{12}, a_{13})$ и $\vec{j}(a_{21}, a_{22}, a_{23})$, в результате найдем орт \vec{k} по выражению:

$$\vec{k} = \begin{vmatrix} \vec{i}_0 & \vec{j}_0 & \vec{k}_0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} = (a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) \cdot \vec{i}_0 - (a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}) \cdot \vec{j}_0 + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \cdot \vec{k}_0. \quad (11)$$

Отсюда получим искомые a_{31}, a_{32}, a_{33} в виде:

$$\begin{aligned} a_{31} &= (a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}); & a_{32} &= (a_{21}a_{13} - a_{11}a_{23}); \\ a_{33} &= (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}). \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, получены все расчетные значения элементов матрицы M_{01} :

$$M_{01} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_{O_1} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_{O_1} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_{O_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

определяющей положение и ориентацию платформы через координаты вершин подвижного треугольника ABC .

С другой стороны эта же матрица M_{01} , выраженная через углы Эйлера [5], имеет вид:

$$M_{01} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\theta\sin\psi & -\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi & x_{O_1} \\ \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & y_{O_1} \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & z_{O_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

С учетом этого получим:

$$a_{11} = \cos\varphi\cos\theta; \quad a_{21} = \sin\varphi\cos\theta; \quad a_{31} = -\sin\theta, \quad (15)$$

или

$$\cos\theta = \pm\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}; \quad \sin\theta = -a_{31}. \quad (16)$$

В вычислительном алгоритме для однозначности можно выбрать знак для $\cos\theta$, возьмем знак «плюс», тогда окончательно для угла θ будем иметь выражение:

$$\cos\theta = \sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}; \quad \sin\theta = -a_{31}. \quad (17)$$

Для расчета угла ψ воспользуемся следующими соотношениями, вытекающими из сопоставления матриц (13) и (14):

$$a_{32} = \cos\theta\sin\psi; \quad a_{33} = \cos\theta\cos\psi. \quad (18)$$

С учетом найденного ранее значения $\cos\theta$ получим выражение для $\sin\psi$ и $\cos\psi$:

$$\sin\psi = \frac{a_{32}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \cos\psi = \frac{a_{33}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}. \quad (19)$$

Для расчета угла φ воспользуемся соотношениями, воспользуемся соотношениями, вытекающими из сопоставления матриц (13) и (14):

$$a_{11} = \cos\varphi\cos\theta; \quad a_{21} = \sin\varphi\sin\theta. \quad (20)$$

Отсюда получим:

$$\cos\varphi = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \sin\varphi = \frac{a_{21}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}. \quad (21)$$

Таким образом, зная $x_{O_1}, y_{O_1}, z_{O_1}$ и углы φ, θ, ψ , с помощью матрицы M_{01} однозначно определяется положение подвижной платформы механизма в пространстве по отношению к неподвижному кольцу основания.

В данном разделе описана предложенная алгоритмизация задачи позиционирования для системы перемещений на механизме параллельной кинематики с треугольными подвижными звеньями, приводимыми в движение трехкоординатным гибридным приводом кольцевого типа. Получены вычислительные алгоритмы, позволяющие находить параметрические функции положения точек A, B и C треугольной подвижной

платформы в зависимости от задаваемых законов перемещений ведущих сегментов привода. Последующее компьютерное моделирование предложенной системы перемещений в среде MATLAB по разработанным алгоритмам решения прямой задачи кинематики позволяет получить все необходимые для ее разработки характеристики, включая рабочую область в зависимости от конструктивной конфигурации, кинематические характеристики скорости и ускорения в рабочей области, калибровку траекторий в рабочей области по требуемой скорости и точности, выбор оптимальных траекторий в зависимости от конкретной геометрии и кинематики технологической операции.

Компьютерное моделирование. На основании разработанной математической модели, построенной на сегментированных алгоритмах кинематики параллельных кинематических цепей рассматриваемого исполнительного механизма, была разработана программа компьютерного имитационного моделирования функций положения, определяющих положение и ориентацию платформы в зависимости от положения ведущих элементов, управляемых сегментов кольцевого привода. Положения последних определяются координатами точек D, E, F (рисунок 6).

Программа кинематического исследования построена на разработанных алгоритмах решения прямой задачи кинематики. Интерфейс программы, показанный на рисунке 6, разработан в среде MATLAB с помощью инструмента GUI [3]. Он включает окна задания конструктивных параметров и исходных данных, панель результатов вычислений и окно визуализации эскиза исполнительного механизма. Для числовых расчетов были приняты следующие базовые конструктивные размеры (см. рисунок 6): размер стороны равностороннего треугольника ABC рабочей платформы равен $a = 14$, размеры сторон подвижных равносторонних треугольников ADC, AFB и BEC , кинематически связанных с управляемыми сегментами привода равны $a = 14$. Радиус кольцевого привода, средней траектории движения сегментов был принят равным радиусу описанной окружности равностороннего треугольника рабочей

платформы $R = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 8,08$. В этом случае при равномер-

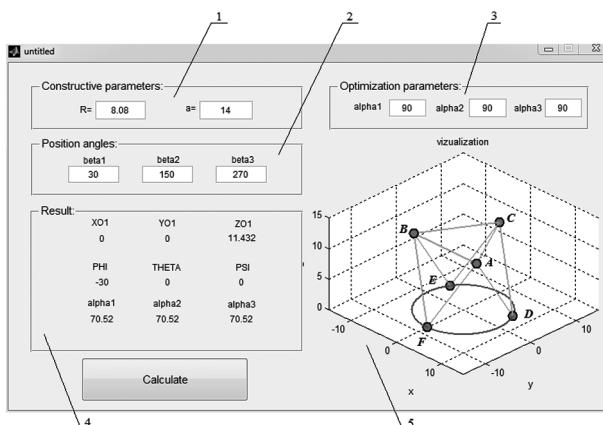


Рисунок 6 — Интерфейс программы моделирования:

- 1 — задаваемые конструктивные параметры механизма;
- 2 — задаваемые координаты трёх подвижных сегментов привода;
- 3 — вектор начальных значений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$;
- 4 — найденные координаты положения, ориентации платформы и углы наклона плоскостей механизма

ном расположении сегментов через 120° проекция треугольной платформы вписывается в окружность радиуса R . Для тестового примера были приведены компьютерные исследования шести функций положения рабочей платформы, включая линейные: $x_0(\beta_1), y_0(\beta_1), z_0(\beta_1), \varphi(\beta_1), \theta(\beta_1), \psi(\beta_1)$. Полученные результаты в виде графиков, выведенных программой из среды MATLAB, приведены на рисунке 7.

Анализ результатов показывает, что для выбранной конструктивной схемы перемещение платформы вдоль оси x_0 лежит в пределах от 0 до 7,39; перемещение платформы вдоль оси y_0 — в пределах от 0 до 1,47; перемещение платформы вдоль оси z_0 — в пределах от 11,43 до 10,77. Угловые диапазоны перемещения лежат в пределах: $\varphi = 0...32^\circ; \theta = 0...7^\circ; \psi = 0...18^\circ$.

Были также исследованы функции взаимного влияния и связанности выходных координат платформы, включая $\psi(\varphi), \theta(\varphi), \theta(\psi), y_0(x_0), z_0(x_0), z_0(y_0)$. Полученные результаты в виде графиков выведены программой из среды моделирования MATLAB и представлены на рисунке 8. Эти зависимости имеют важные значения при разработке конструкции системы перемещений, так как позволяют находить передаточные функции между координатами, и их учитывают при разработке программного обеспечения системы управления комплекса в целом.

На основании проведенной алгоритмизации по описанной выше математической модели была разработана программа, позволяющая выполнять динамическую анимацию движения механизма между двумя крайними положениями. Визуализация такого перемещения позволяет проводить верификацию математической модели, реализовывать интерактивное управление координатными приводами.

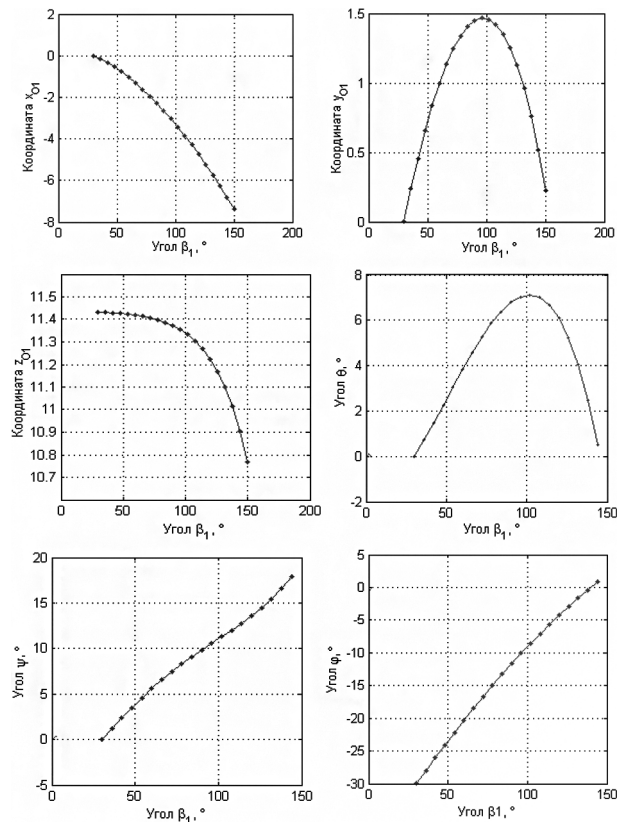


Рисунок 7 — Графики функций положения и ориентации подвижной платформы

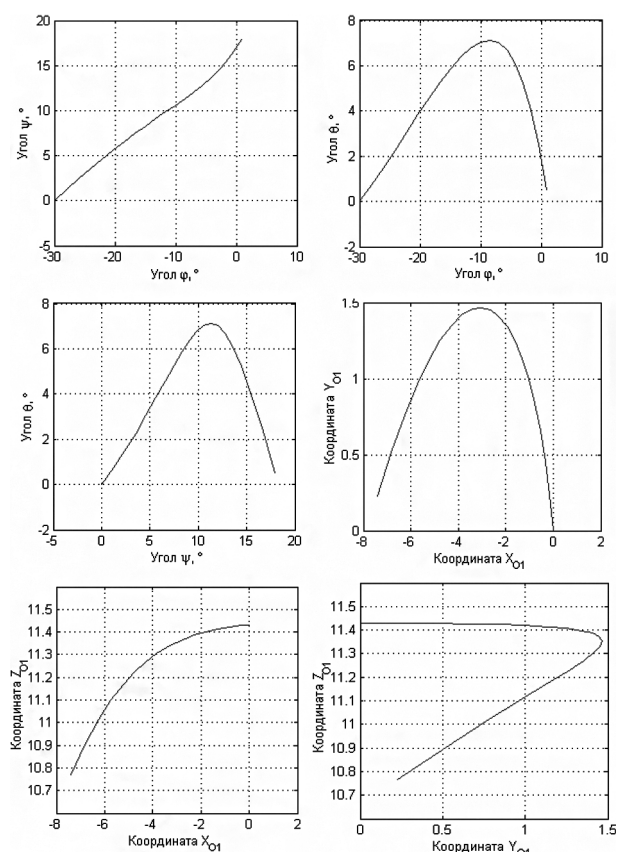


Рисунок 8 — Графики взаимной зависимости угловых и линейных координат подвижной платформы

Заключение. Для системы перемещения в виде параллельного манипулятора на кольцевом трехкоординатном приводе прямого действия разработана математическая модель системы перемещений с тремя связанными степенями свободы и общей поворотной подвижностью платформы вокруг вертикальной оси. Выполнена алгоритмизация математической модели,

позволившая сформировать сегментированные алгоритмы для кинематического описания каждой параллельной кинематической цепи. Разработаны программы имитационного моделирования кинематики параллельного манипулятора в среде MATLAB. Выполнено исследование функций положения и ориентации платформы и их взаимного влияния. Разработана программа динамической анимации движения системы между двумя крайними положениями.

Разработанные алгоритмы имитационного моделирования в среде MATLAB, в отличие от известных основаны на полученных сегментированных алгоритмах кинематики в виде явных аналитических выражений, специфичных только для рассматриваемой системы параллельной кинематики на трех планарных позиционерах.

Список литературы

1. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В.В. Жарский [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Е. Карповича. — Минск: Бестпринт, 2013. — 208 с.
2. Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink / С.Е. Карпович [и др.]. — Минск: Бестпринт, 2013. — 153 с.
3. Карпович, С.Е. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, М.М. Фуртан // Докл. БГУИР. — Минск, 2016. — № 3. — С. 22–28.
4. Heimann, V. Mechatronika. Komponenty, metody, przyklady / V. Heimann, W. Gerth, K. Popp. — Warszawa: PWN, 2001. — 351 p.
5. Frederick, G.M. Electromechanical Motion Systems: Design and Simulation. — Wiley, 2014. — 308 p.
6. Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications / T. Sobh [et al.]. — Springer Science & Business Media, 2007. — 552 p.
7. MATLAB. The Language of Technical Computing. — The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2004.
8. Zentner, J. Zur optimalen Gestaltung von Parallelkinematikmaschinen mit Planarantrieben / J. Zentner. — Illmenau : ISLE, 2006. — 123 p.

Karpovich S.E., Voitau A.Y., Kuzniatsov V.V., Jarski V.V.

Algorithmization and simulation of displacement system with three degrees of freedom

A system of parallel kinematics consisting of a parallel manipulator with three degrees of freedom in the ring drive of direct action. A kinematic model was developed on the basis of carried algorithmization for simulation in MATLAB. According to the developed program analyzed the functions of the six position of the platform, depending on the generalized coordinates of three ring segments with the three-dimensional drive system sketch map or dynamic animation.

Поступил в редакцию 03.11.2016.