

Многочисленные структуры управления для сокращения ошибок вычисления траектории и проблем жесткости станка, такие как ограничение темпа ускорения, предварительная установка частоты вращения и момента, повышают производительность обработки и точность деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоскоростное фрезерование (HSC). По материалам проработок фирмы Hermle // Galika AG [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.galika.ru/article\\_8.htm](http://www.galika.ru/article_8.htm). 2. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с. 3. Высокоскоростное фрезерование. Информационные материалы департамента "Автоматизация и приводы" фирмы Siemens. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.automation-drives.ru/mc/archive/press/hsc\\_ito.pdf](http://www.automation-drives.ru/mc/archive/press/hsc_ito.pdf). 4. Аркадов А.Ю., Николаев П.М. Программирование обработки сложных поверхностей с повышенными точностью и производительностью // Информационные технологии в проектировании и производстве (ИТПП). – М.: 2000, №1. – С.54-57. 5. В.И.Шпорт, В.Ф.Кузьмин, С.Б.Марьин. Высокоскоростное фрезерование криволинейных поверхностей // Теория и практика машиностроения. – Мн.: 2003, №1. – С.53-56.

УДК 621.313.84

*Литвинов Е.А., Карпович С.Е., Агранович А.А.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь*

### ВВЕДЕНИЕ

Механизм, представленный на рис. 1, относится к классу параллельных манипуляционных механизмов с шестью степенями свободы. Данный класс исполнительных робототехнических устройств нашёл широкое применение в промышленных роботах, станках с ЧПУ, системах тестирования и контроля параметров объекта [1]. Манипуляционные механизмы с шестью степенями свободы позволяют создавать управляемые электромеханические системы, реализующие любые перемещения исполнительного элемента в пространстве, задаваемые шестью независимыми законами движения, например, тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами, характеризующими пространственное, плоскопараллельное и угловое перемещение при переходе исполнительного элемента из одного положения в другое [2].

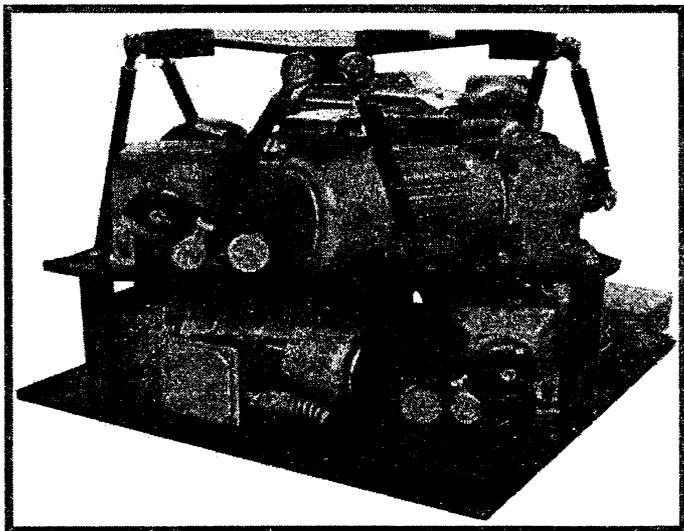


Рисунок 1 - Манипуляционный механизм с шестью степенями свободы

### АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Рассматриваемый механизм, в соответствии с его схемой (рис. 2), состоит из подвижной площадки  $P$ , звеньев 1, 2, ..., 6, жёстко связанных с вращающимися элементами

двигателей  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$  которые, в свою очередь, посредством сферических шарниров и промежуточных шатунов 7, 8, ..., 12 связаны с площадкой  $P$  [3].

В соответствии со структурной схемой (рис. 2) механизма звенья 1, 2, ..., 6 являются входными, законы перемещения которых, задаются непосредственно управляемыми двигателями. Выходное звено механизма – это подвижная площадка  $P$ , связанная с подвижными входными звеньями посредством шести подвижных шатунов 7, 8, 9, 10, 11, 12, образующих, как с подвижной площадкой, так и с входными звеньями сферические кинематические пары  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$  и  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ .

Моделирование перемещений платформы манипуляционного механизма с шестью степенями свободы сводится к определению положения и ориентации подвижной площадки  $P$  относительно абсолютной (неподвижной) системы координат  $OXYZ$  по заданным геометро-конструктивным параметрам механизма, входным переменным параметрам, задаваемым обобщёнными угловыми координатами поворота подвижных элементов шести приводов.

Для механизма, изображённого на рис. 2, входными задаваемыми переменными будут углы поворота валов двигателей ( $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ ), выраженные как углы поворота соответствующих кривошипов  $O_1N_1, O_2N_2, \dots, O_6N_6$ . Таким образом, по известным углам  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) ставится задача в определении соответствующего положения и ориентации платформы в пространстве. Под положением платформы понимают  $x, y, z$  смещения, а под ориентацией – углы поворота вокруг оси  $z$  (угол  $\varphi$ ), поворота вокруг оси  $y$  (угол  $\theta$ ), поворота вокруг оси  $x$  (угол  $\psi$ ).

Сферические шарниры, характеризующиеся на схеме (рис.2) точками  $N_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), связаны с рабочей площадкой  $P$  шестью шатунами, представленными длинами  $N_iA_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ), которые в точке  $A_i$  сопрягаются с площадкой тоже сферическими шарнирами. Это конструктивное исполнение механизма может быть аналитически описано векторным условием неизменности в процессе движения длин самих шатунов:

$$|\vec{R}^{(N_i)} - \vec{R}^{(A_i)}| = l, \quad (1)$$

где  $\vec{R}^{(N_i)}, \vec{R}^{(A_i)}$  – радиус-векторы соответственно точек  $N_i$  и  $A_i$  в декартовой системе координат  $OXYZ$ .

Радиус-вектор  $\vec{R}^{(A_i)} = (x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i})$  определяет положение каждой точки  $A_i$  принадлежащей площадке  $P$  в системе координат  $OXYZ$ . Для пересчёта координат точек  $A_i$  из системы координат площадки  $P$  неподвижную систему координат  $OXYZ$  необходимо воспользоваться матричным равенством:

$$\vec{R}^{(A_i)} = M \cdot \vec{R}_i, \quad (2)$$

где

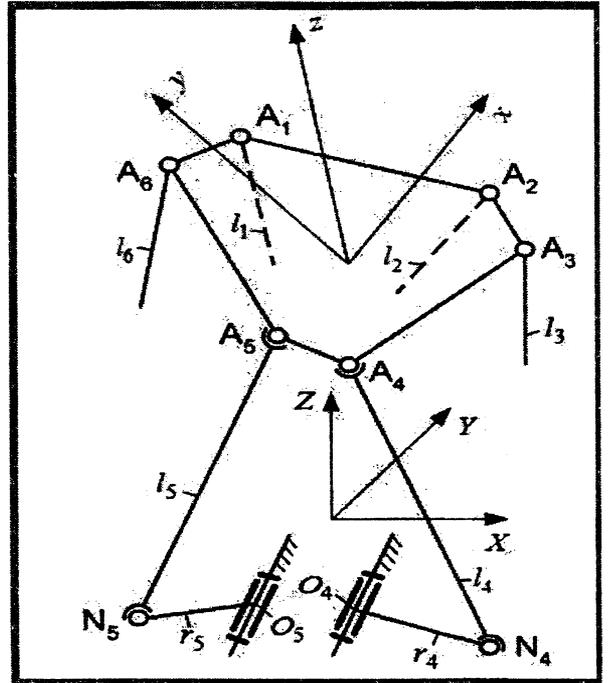


Рисунок 2 - Структурная схема механизма

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi & x_0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi & y_0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Векторное условие (1) для всех шести шатунов можно записать в скалярном виде:

$$(x^{A_i} - x^{N_i})^2 + (y^{A_i} - y^{N_i})^2 + (z^{A_i} - z^{N_i})^2 = l_i^2, \quad (i=1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

Выполнив подстановку в выражение (4) координат  $x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i}$  и  $x^{N_i}, y^{N_i}, z^{N_i}$  на функциональном уровне получим систему из шести уравнений:

$$\begin{cases} F_1(x^{A_1}, x^{N_1}, y^{A_1}, y^{N_1}, z^{A_1}, z^{N_1}) - l^2 = 0 \\ F_2(x^{A_2}, x^{N_2}, y^{A_2}, y^{N_2}, z^{A_2}, z^{N_2}) - l^2 = 0 \\ F_3(x^{A_3}, x^{N_3}, y^{A_3}, y^{N_3}, z^{A_3}, z^{N_3}) - l^2 = 0 \\ F_4(x^{A_4}, x^{N_4}, y^{A_4}, y^{N_4}, z^{A_4}, z^{N_4}) - l^2 = 0 \\ F_5(x^{A_5}, x^{N_5}, y^{A_5}, y^{N_5}, z^{A_5}, z^{N_5}) - l^2 = 0 \\ F_6(x^{A_6}, x^{N_6}, y^{A_6}, y^{N_6}, z^{A_6}, z^{N_6}) - l^2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Если в системе уравнений (5) координаты точек  $x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i}, x^{N_i}, y^{N_i}, z^{N_i}$  выразить через переменные  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$  и  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ , то станет очевидно, что входные переменные  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$  и выходные переменные  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$  связаны через трансцендентные нелинейные выражения, не позволяющие разрешить выходные переменные в явном виде. Поэтому вычислительное решение в сделанной постановке возможно только численными методами [4].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK

На программном уровне моделирование перемещений платформы манипуляционного механизма формулируется в нахождении искомых величин  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$  определяющих положение и ориентацию подвижной площадки, в зависимости от входных значений углов поворота подвижных элементов шести приводов, входного вектора начальных значений  $(x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0)$  поиска решений и заданного метода оптимизации.

Под вектором начальных значений поиска решений понимают значения переменных  $x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0$  в области поиска решений начиная с которых происходит процесс оптимизации. Система нелинейных уравнений в вычислительном алгоритме – это совокупность уравнений с искомыми переменными  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ . Процесс оптимизации происходит до тех пор пока значение оценочной функции в процессе итерационного поиска решений не станет меньше заданной точности или новые значения искомого переменных параметров в процессе оптимизации изменятся на величину меньшую чем заданную предельно допустимую.

Для моделирования перемещений платформы манипуляционного механизма в пакете моделирования MATLAB/SIMULINK была создана расчётная программа. Интерфейс программы приведён на рис. 3.

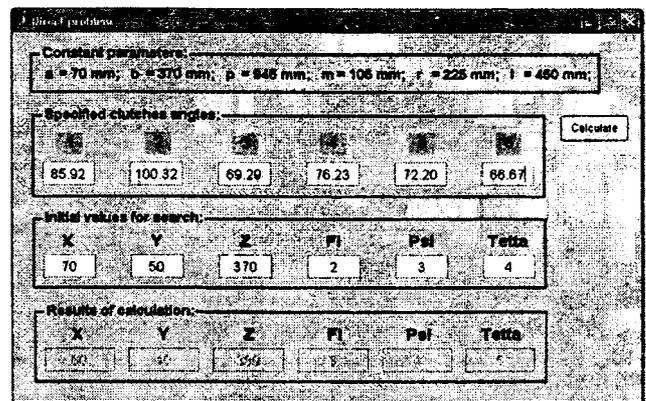


Рисунок 3 - Интерфейс программы моделирования перемещений

Для тестового примера рассмотрим случай нахождения положения (координаты  $x, y, z$ ) и ориентации (углы  $\varphi, \theta, \psi$ ) подвижной площадки платформы относительно абсолютной (неподвижной) системы координат  $OXYZ$  для заданных углов поворота  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$  подвижных элементов (валов) шести приводов. Зададим следующие входные данные:  $\sigma_1 = 85, 92^\circ, \sigma_2 = 100, 32^\circ, \sigma_3 = 69, 29^\circ, \sigma_4 = 76, 23^\circ, \sigma_5 = 72, 20^\circ, \sigma_6 = 66, 67^\circ$ . Зададимся вектором начальных значений поиска решений  $(x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0)$ , где величины  $x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0$  определяют начало поиска решений (точку спуска). Примем  $x_0 = 70$  мм,  $y_0 = 50$  мм,  $z_0 = 370$  мм,  $\varphi_0 = 2^\circ, \theta_0 = 4^\circ, \psi_0 = 3^\circ$ .

Выходом из данной ситуации служит разработанный и реализованный в данной программе подход последовательных решений, в соответствии с которым, решение предыдущего этапа прямой задачи (значения искомым переменных  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ ) является входной начальной точкой спуска итерационного процесса нахождения новых конечных решений  $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$  для следующих значений  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ . Как показывают результаты, такой подход имеет существенное преимущество при моделировании перемещений платформы манипуляционного механизма для плавно изменяющихся значений углов поворота управляющих валов двигателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. Ahranovich, S. Karpovich, K. Zimmermann, J. Zentner Multicoordinate Positioning System for Industrial Equipment Design Method // Proceedings of 51<sup>st</sup> International Scientific Colloquium Ilmenau (Germany), September 11-15, 2006 TU-Ilmenau, 2006. - p.139-140.
2. Русецкий А.М. Координатные позиционеры гибких производственных систем для электронного машиностроения. – Мн.: Военная академия РБ, 1998. – 177 с.
3. Межинский Ю.С. Построение систем перемещений для гибкого автоматизированного оборудования. – Минск: Технопринт, 2002. – 120 с.
4. Карпович С.Е., Жарский В.В., Ляшук Ю.Ф., Межинский Ю.С. Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия. – Минск: ГНПКТМ «Планар», 2001. – 198 с.

УДК 621.313.84

*Карпович С.Е., Поляковский В., Жарский В.В., Агранович А.А.*

## АНАЛИЗ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КОЛЛИЗИЙ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРИПЛАНАР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в станках с ЧПУ, промышленных роботах, автоматизированном измерительном и спецтехнологическом оборудовании все чаще используются параллельные манипуляционные системы (ПМС), которые характеризуются высокой структурной жесткостью, повышенными кинематическими и динамическими свойствами, хорошими массогабаритными показателями. К такому классу механизмов относится рассматриваемый в настоящей статье Трипланар [1], созданный совместными усилиями технического университета г. Ильменау (Германия), БГУИР (Минск) и СП Рухсервомотор (Минск).

Трипланар представляет собой ПМС в виде раскрывающегося тетраэдра (рис. 1,а), верхние ребра которого определяют подвижный треугольник (исполнительный элемент), с которым жестко связывается рабочая платформа с инструментом или заготовкой. Верхние ребра представляют собой шарнирные соединения, нижние выполнены таким образом, что