

ДИНАМИКА МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ*

Н.Ю. Носова, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин

В данной работе рассматривается манипулятор параллельной структуры, совершающий поступательное движение, с приводами, расположенными на основании. Представлена динамическая модель и проведен динамический анализ механизма. Требуемые законы движения входных звеньев определяются в результате решения обратной задачи динамики. На основе решения прямой задачи динамики определены реальные законы движения выходного звена манипулятора. Проанализировано влияние начальных условий и коэффициентов обратных связей на ошибку реального закона движения выходного звена.

Ключевые слова: манипулятор параллельной структуры, динамика, задача управления, уравнения связи.

DYNAMICS OF A PARALLEL STRUCTURE MECHANISM WITH PROVISION FOR THE LAW OF CONTROL

N.Yu. Nosova, V.A. Glazunov, S.V. Palochkin

In this paper there is considered a parallel structure mechanism which performs translational motion with actuators located on the base. Also the dynamic model and analysis of the mechanism are presented. Required laws of motion for the input units are determined by solving the inverse task of dynamics. The real laws for output manipulator link motion are determined on the base of solution for the direct problem of dynamics. The initial conditions and feedback factors influence on the error of the real law for output link motion has being analyzed.

Keywords: manipulator of parallel structure, dynamics, task of control, communication equations.

Введение

Одним из эффективных средств решения задач автоматизации является использование манипуляторов параллельной структуры. Эти устройства отличаются тем, что входное звено связано с выходным звеном несколькими кинематическими цепями, и поэтому они воспринимают нагрузку как пространственные фермы, что существенно увеличивает жесткость конструкции по сравнению с другими типами механизмов [1–6]. Это обстоятельство обуславливает повышенные показатели по точности и грузоподъемности. Кроме того, механизмы данного типа позволяют реализовывать движения с относительно высокими скоростями в силу того, что приводы иногда устанавливаются на основании, а звенья имеют относительно малую массу [7–9].

Однако механизмы параллельной структуры имеют и недостатки, которые связаны с взаимным влиянием приводов. Любое простейшее движение, даже, например, по прямой, требует совместного действия всех двигателей. Динамические свойства механизмов параллельной структуры относительно мало исследованы. Как правило, анализ ограничивается обратными задачами динамики, когда по требуемому закону движения выходного звена определяются усилия в приводах [10–14].

Между тем, динамический анализ представляет собой более широкую проблему, чем кинематический анализ. Это обусловлено необходимостью учета характеристик двигателей, законов управления, параметров обратных связей и т.д. Подобным образом задача ставилась лишь в относительно немногочисленных

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-05493а «Разработка метода выбора параметров энергетического канала автоматизированного привода».

публикациях [15–17], где рассматривались, прежде всего, плоские, поступательно-направляющие и сферические механизмы с тремя степенями свободы. При этом моделировалась динамика движения манипулятора при разных законах требуемого движения, при несоответствии динамической модели реальным параметрам механизма. Использовались различные алгоритмы управления, один из которых основан на минимизации интегральной ошибки по координате, скорости или ускорению [5, 10, 11, 15, 18]. На основе различных численных экспериментов установлено, что данный алгоритм эффективен для механизмов параллельной структуры.

Целью данной работы была отработка алгоритма управления поступательно-направляющим манипулятором, основанного на решении прямой и обратной задач динамики. Основной задачей исследования является определение по заданному закону движения выходного звена моментов и сил (законов движения), развиваемых приводами, на основе минимизации отклонения реального закона движения выходного звена от заданного.

Постановка задачи

Классическим примером систем параллельной структуры является известный манипулятор *ORTHOGLIDE* [7–9] с тремя степенями свободы, разработанный французскими исследователями (рис. 1).

Манипулятор *ORTHOGLIDE* состоит из трех кинематических цепей, расположенных ортогонально, с тремя поступательными двигателями. В каждой цепи имеет место шарнир-

ный параллелограмм, что обеспечивает постоянство ориентации выходного звена. Данная схема во многом сходна со схемой манипулятора *DELTA* [19], однако двигатели вращательного перемещения заменены на поступательные.

Впоследствии, для повышения функциональных возможностей манипулятора *ORTHOGLIDE* французскими исследователями было предложено снабдить две кинематические цепи карданными валами и двигателями вращательного перемещения рабочего органа (рис. 2) [9].

Данный пространственный механизм имеет пять степеней свободы и включает: основание – неподвижную раму 1; неподвижные направляющие 2, 2', 2'', которые расположены вдоль осей x , y , z ; ориентирующий механизм 3; рабочий орган 4 и три кинематические цепи. Каждая цепь содержит двигатель поступательного перемещения (5, 5', 5''), расположенный параллельно одной из ортогональных осей координат; подвижную каретку (6, 6', 6''), которая имеет поступательное движение вдоль одной из осей координат за счет двигателя поступательного перемещения. Также каждая цепь имеет шарнирный параллелограмм (7, 7', 7''). В двух кинематических цепях расположены карданные валы (8, 8''), необходимые для передачи вращения на рабочий орган 4. Каждая

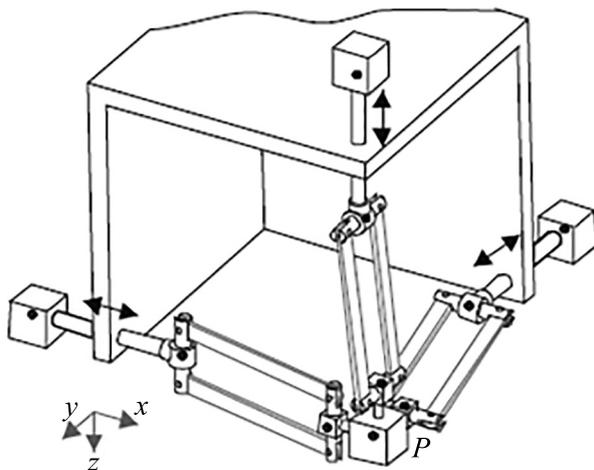


Рис. 1. Манипулятор *ORTHOGLIDE* с тремя степенями свободы

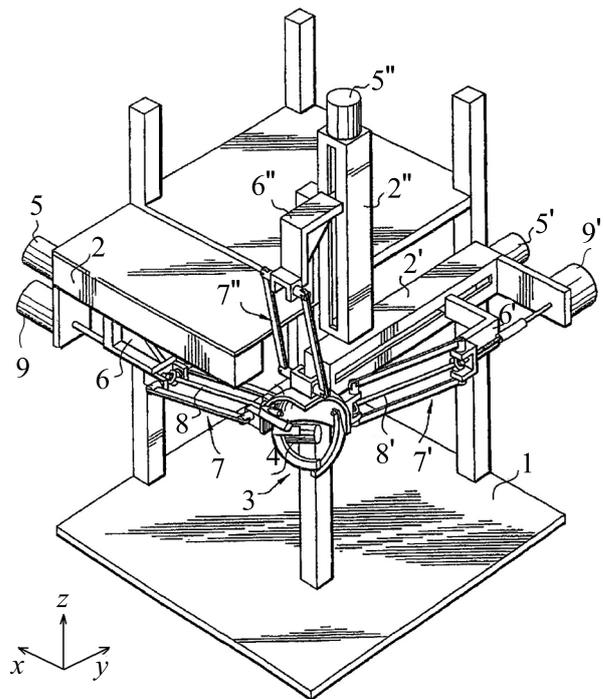


Рис. 2. Манипулятор *ORTHOGLIDE* с пятью степенями свободы

из этих двух цепей содержит двигатель вращательного перемещения (9, 9).

В отличие от рассмотренного решения (см. рис. 2), в работах авторов [20–22] для передачи вращений вместо карданных валов было предложено использовать в каждой кинематической цепи те же шарнирные параллелограммы, которые используются и для передачи поступательных движений (кинематическая схема подобного механизма представлена на рис. 3). Для этого на выходном звене размещается сферический механизм, передающий вращение и служащий для ориентации рабочего органа. При этом обеспечивается кинематическая развязка между поступательными и вращательными движениями. Кроме того, можно говорить и о динамической развязке, поскольку поступательные движения связаны с большими амплитудами перемещений и скоростей, в то время как вращательные движения не обуславливают больших динамических нагрузок.

В настоящей работе ставится задача динамического анализа манипулятора параллельной структуры [23], выполняющего только поступательное колебательное движение, в котором используются три шарнирных параллелограмма, имитирующих наличие двух карданных шарниров в соответствующей кинематической цепи (рис. 4). На вход каждого из приводов подается управляющий сигнал. Выходом системы является движение рабочего органа – выходного звена механизма в рабочем пространстве. В качестве приводов используются электрические двигатели постоянного тока с механизмом преобразования вращательного движения в поступательное, установленные на основании механизма.

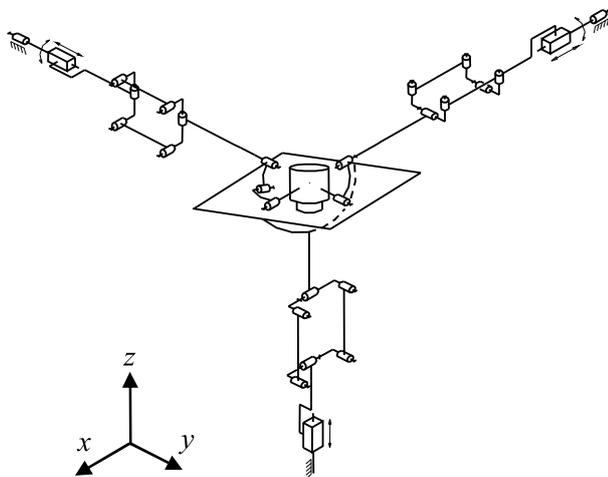


Рис. 3. Манипулятор с пятью степенями свободы

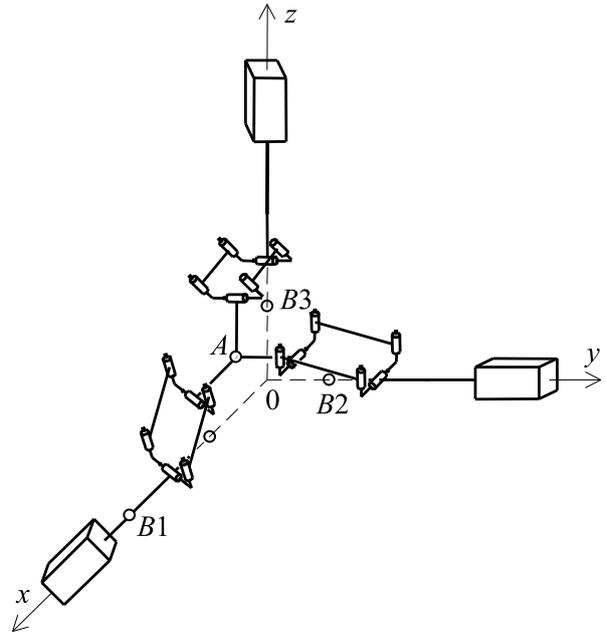


Рис. 4. Поступательно-направляющий механизм с тремя степенями свободы

При поступательном движении каждая точка выходного звена имеет одинаковые скорости, поэтому в расчетной схеме выходное звено может быть заменено материальной точкой, а параллелограммы заменяются соответствующими звеньями типа сферического шарнира (рис. 5).

Следует отметить, что данная структура манипулятора ранее не рассматривалась с точки зрения динамики.

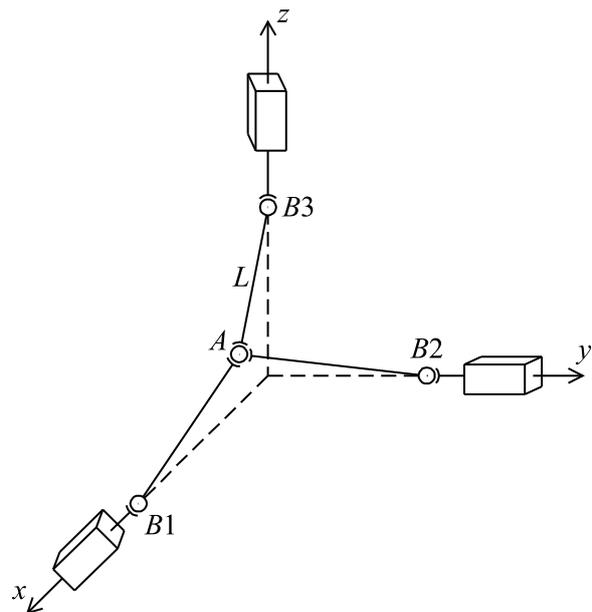


Рис. 5. Расчетная схема механизма с тремя степенями свободы

Основные уравнения

Решение поставленной задачи основано на анализе динамической модели движения рассматриваемого механизма. По заданному (требуемому) закону движения выходного звена длиной L решается обратная задача динамики и определяются необходимые законы движения приводов. Система управления двигателями по соответствующему алгоритму вычисляет требуемые напряжения в обмотке якоря двигателя. Затем на основе решения прямой задачи динамики определяются реальные движения выходного звена манипулятора, которые сопоставляются с требуемыми движениями.

Для составления уравнений движения данного механизма используются принцип Даламбера и принцип возможных перемещений. Задавая элементарные приращения входным координатам $\delta q_1, \delta q_2, \delta q_3$, получаем следующие уравнения движения относительно координат выходного звена:

$$\begin{aligned} & m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_1} \delta q_1 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_1} \delta q_1 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_1} \delta q_1 + \\ & + mg \frac{\partial z}{\partial q_1} \delta q_1 + P_1 \delta q_1 = 0; \\ & m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_2} \delta q_2 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_2} \delta q_2 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_2} \delta q_2 + \\ & + mg \frac{\partial z}{\partial q_2} \delta q_2 + P_2 \delta q_2 = 0; \\ & m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_3} \delta q_3 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_3} \delta q_3 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_3} \delta q_3 + \\ & + mg \frac{\partial z}{\partial q_3} \delta q_3 + P_3 \delta q_3 = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где m – масса выходного звена; P_1, P_2, P_3 – силы в приводах; $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ – ускорения выходного звена.

Для определения коэффициентов $\frac{\partial x}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial z}{\partial q_3}$ необходимо рассмотреть уравнения связей, записанные в виде неявных функций от координат системы

$$F_i(x, y, z, q_i) = 0, \quad i = 1, 2, 3.$$

В данных функциях переменная q_i в свою очередь представлена как функция переменных x, y, z . Дифференцируя каждую из этих неявных функций по переменным x, y, z , получаем систему уравнений, связывающую скорости входных и выходных звеньев:

$$\frac{\partial F_i}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial F_i}{\partial y} \dot{y} + \frac{\partial F_i}{\partial z} \dot{z} + \frac{\partial F_i}{\partial q_i} \dot{q}_i = 0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Из полученных выражений получаем формулы для определения искомых переменных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial q_i} &= -\frac{\partial F_i}{\partial q_i} / \frac{\partial F_i}{\partial x}, \quad \frac{\partial y}{\partial q_i} = -\frac{\partial F_i}{\partial q_i} / \frac{\partial F_i}{\partial y}, \\ \frac{\partial z}{\partial q_i} &= -\frac{\partial F_i}{\partial q_i} / \frac{\partial F_i}{\partial z}. \end{aligned} \tag{2}$$

Предполагается, что алгоритм управления механизмом параллельной структуры, связанный с вычислением моментов и сил по заданному закону движения, должен минимизировать ошибки по ускорению, скорости и координате. Ранее [15] этот подход применялся для манипулятора параллельной структуры с двумя параллелограммами в каждой цепи.

Уравнения связи для расчетной схемы механизма с тремя степенями свободы манипулятора (см. рис. 5) представляют собой систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} F_1 = (x - q_1)^2 + y^2 + z^2 - L^2 = 0 \\ F_2 = x^2 + (y - q_2)^2 + z^2 - L^2 = 0 \\ F_3 = x^2 + y^2 + (z - q_3)^2 - L^2 = 0. \end{cases} \tag{3}$$

Запишем уравнение скоростей, основанное на изучении свойств матрицы Якоби, в общем виде:

$$\mathbf{A}\mathbf{V} = (-\mathbf{B})\mathbf{V}_{il}; \tag{4}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial z} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial q_3} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{V}_{il} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где \mathbf{A} – матрица частных производных от неявной функции по x, y, z ; \mathbf{B} – матрица частных производных от неявной функции по обобщенным координатам q_1, q_2, q_3 ; \mathbf{V} – вектор скорости выходного звена, расположенный на осях x, y, z ; \mathbf{V}_{il} – вектор обобщенных скоростей во входных звеньях (входные скорости).

Предположим, что известны требуемые законы изменения координат $x_T(t)$, $y_T(t)$, $z_T(t)$ и, соответственно, требуемые скорости $\dot{x}_T(t)$, $\dot{y}_T(t)$, $\dot{z}_T(t)$ и ускорения $\ddot{x}_T(t)$, $\ddot{y}_T(t)$, $\ddot{z}_T(t)$, где t – время.

Необходимо найти силы (моменты) в приводах, при которых происходит минимизация ошибки:

- по координате
 $\Delta_1(t) = x_T(t) - x(t)$; $\Delta_2(t) = y_T(t) - y(t)$;
 $\Delta_3(t) = z_T(t) - z(t)$;
- по скорости
 $\dot{\Delta}_1(t) = \dot{x}_T(t) - \dot{x}(t)$; $\dot{\Delta}_2(t) = \dot{y}_T(t) - \dot{y}(t)$;
 $\dot{\Delta}_3(t) = \dot{z}_T(t) - \dot{z}(t)$;
- по ускорению
 $\ddot{\Delta}_1(t) = \ddot{x}_T(t) - \ddot{x}(t)$; $\ddot{\Delta}_2(t) = \ddot{y}_T(t) - \ddot{y}(t)$;
 $\ddot{\Delta}_3(t) = \ddot{z}_T(t) - \ddot{z}(t)$.

Из работ [5, 10, 11, 15] известно, что закон изменения ошибки должен соответствовать движению колебательного звена, при котором обеспечивается устойчивость и минимизация ошибки по положению, скорости и ускорению.

Законы ускорений выходного звена в системе с обратными связями имеют вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{x}_T + \gamma_1(\dot{x}_T - \dot{x}) + \gamma_0(x_T - x); \\ \ddot{y} &= \ddot{y}_T + \gamma_1(\dot{y}_T - \dot{y}) + \gamma_0(y_T - y); \\ \ddot{z} &= \ddot{z}_T + \gamma_1(\dot{z}_T - \dot{z}) + \gamma_0(z_T - z), \end{aligned} \quad (6)$$

где γ_0, γ_1 – коэффициенты обратных связей.

Эти соотношения определяют искомые законы формирования управляющих сил и моментов, реализующих движение по назначенной траектории.

Численное решение задачи динамики

В настоящей работе для получения обобщающих результатов задавались различные начальные условия движения манипулятора, различные коэффициенты обратных связей (γ_0, γ_1), а также различные частоты ω закона движения по траектории.

Зададим значения координат для точки $A(x, y, z)$, где $x = 1$ м, $y = 1$ м; $z = 1$ м. Длина звена $L = 3$ м.

Значения частных производных, входящих в (5), равны:

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{\partial F_1}{\partial x} &= 2x - 2q_1; \quad \frac{\partial F_1}{\partial y} = 2y; \\ \frac{\partial F_1}{\partial z} &= 2z; \quad \frac{\partial F_1}{\partial q_1} = 2q_1 - 2x; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) \quad \frac{\partial F_2}{\partial x} &= 2x; \quad \frac{\partial F_2}{\partial y} = 2y - 2q_2; \\ \frac{\partial F_2}{\partial z} &= 2z; \quad \frac{\partial F_2}{\partial q_2} = 2q_2 - 2y; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3) \quad \frac{\partial F_3}{\partial x} &= 2x; \quad \frac{\partial F_3}{\partial y} = 2y; \\ \frac{\partial F_3}{\partial z} &= 2z - 2q_3; \quad \frac{\partial F_3}{\partial q_3} = 2q_3 - 2z. \end{aligned}$$

Тогда, уравнения скоростей (4) принимают вид:

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} 2x - 2q_1 & 2y & 2z \\ 2x & 2y - 2q_2 & 2z \\ 2x & 2y & 2z - 2q_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \\ &= - \begin{pmatrix} 2q_1 - 2x & 0 & 0 \\ 0 & 2q_2 - 2y & 0 \\ 0 & 0 & 2q_3 - 2z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

В уравнения движения (1) входят значения ускорений входных и выходных звеньев. Для дальнейшего решения задачи динамики необходимо выразить ускорения входных звеньев через ускорения выходных. Дифференцируя уравнения (3) второй раз по t , получаем уравнения, связывающие ускорения входных и выходных звеньев:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \ddot{x} - \frac{(2y\dot{y} + 2z\dot{z})^2}{4(L^2 - y^2 - z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2y\ddot{y} + 2z\ddot{z} + 2y\dot{y} + 2z\dot{z}}{2\sqrt{L^2 - y^2 - z^2}}; \\ \ddot{q}_2 &= \ddot{y} - \frac{(2x\dot{x} + 2z\dot{z})^2}{4(L^2 - x^2 - z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2x\ddot{x} + 2z\ddot{z} + 2x\dot{x} + 2z\dot{z}}{2\sqrt{L^2 - x^2 - z^2}}; \\ \ddot{q}_3 &= \ddot{z} - \frac{(2x\dot{x} + 2y\dot{y})^2}{4(L^2 - x^2 - y^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{2x\ddot{x} + 2y\ddot{y} + 2x\dot{x} + 2y\dot{y}}{2\sqrt{L^2 - x^2 - y^2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Входящие в уравнения (3) абсолютные скорости выражаются из уравнения скоростей через обобщенные скорости.

Зададим постоянную времени $\tau \approx 0,018$ с, характеризующую длительность протекания переходного процесса, время переходного процесса при этом будет $t = 0,076$ с, а коэффициенты обратной связи $\gamma_0 = 3086$, $\gamma_1 = 78,5$. Для упрощения пренебрегаем массой входных звеньев и силой веса.

При моделировании движения манипулятора по заданному закону используем уравнения (1).

Силы в приводах P_i могут быть получены из уравнений движения манипулятора [5, 10, 11]:

$$P_i = m \cdot (\ddot{x}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{x}_T - \dot{x}) + \gamma_0 \cdot (x_T - x)) \cdot \frac{\partial x}{\partial q_i} +$$

$$+ m \cdot (\ddot{y}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + \gamma_0 \cdot (y_T - y)) \cdot \frac{\partial y}{\partial q_i} +$$

$$+ m \cdot (\ddot{z}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + \gamma_0 \cdot (z_T - z)) \cdot \frac{\partial z}{\partial q_i} + mg \frac{\partial \lambda_i}{\partial q_i},$$

где $i = 1, 2, 3$; $\lambda_i \rightarrow x, y, z$.

Зададим закон движения исполнительного звена в виде:

$$x_T(t) = 0,1 \sin \omega t; y_T(t) = 0,1 \sin \omega t; z_T(t) = 0,1 \sin \omega t.$$

1. Рассмотрим движение при частоте $\omega = 40$ рад/с. Начальные условия: $x(0) = 0, y(0) = 0, z(0) = 0$. Расчетное время $t = 0,4$ с. Дифференциальные уравнения ошибки принимают вид:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_T + 78,5(\dot{x}_T - \dot{x}) + 3086(x_T - x);$$

$$\ddot{y} = \ddot{y}_T + 78,5(\dot{y}_T - \dot{y}) + 3086(y_T - y); \quad (8)$$

$$\ddot{z} = \ddot{z}_T + 78,5(\dot{z}_T - \dot{z}) + 3086(z_T - z).$$

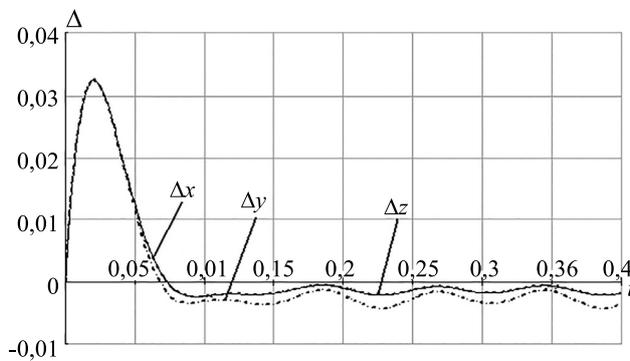


Рис. 6. Изменение ошибки по координате

В результате расчета были получены графики изменения ошибок по различным координатам (рис. 6). Для наглядности на рис. 7 представлены графики требуемого закона движения $x_T(t)$, фактического закона $x(t)$ и абсолютной ошибки $\Delta x(t)$, где $\Delta x = x_T - x$.

Анализируя графики на рис. 6, можно сделать вывод, что при принятых начальных условиях и приложении к динамической системе внешнего воздействия в виде синусоиды система принимает установившиеся значения в пределах установленного переходного процесса. При этом можно отметить появление незначительной ошибки движения выходного звена, которая также имеет установившиеся значения.

2. Рассмотрим случай, когда начальные условия составляют $x(0) = 1,5$ м, $y(0) = 0, z(0) = 0$, при этом угловая частота и коэффициенты обратных связей остаются неизменными: $\omega = 40$ рад/с, $\gamma_0 = 3086, \gamma_1 = 78,5$; время переходного процесса $t = 0,076$ с, расчетное время $t = 0,25$ с. Соответствующие графики показаны на рис. 8, 9, 10.

Анализ графиков на рис. 8, 9 и 10 показывает, что при начальных условиях, значительно не соответствующих предписанному закону, увеличилась ошибка по положению, а также время переходного процесса.

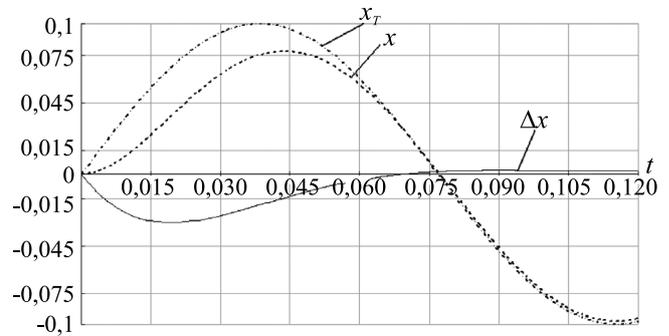


Рис. 7. Изменения ошибки положения Δx , координат x_T и x при управлении механизмом с обратной связью

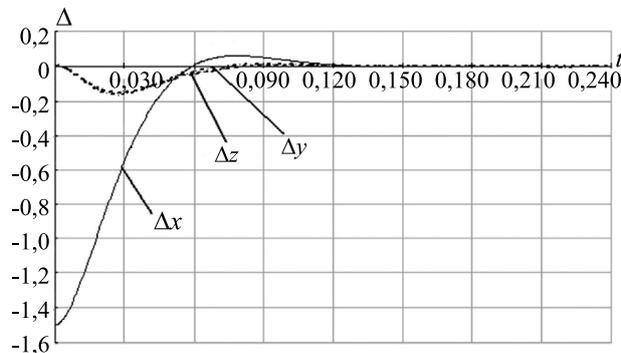


Рис. 8. Изменения ошибки по координате

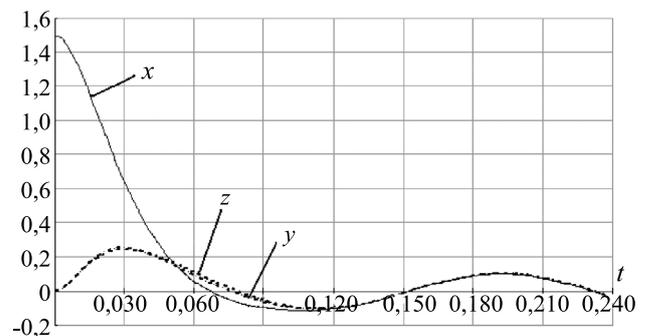


Рис. 9. Движение выходного звена

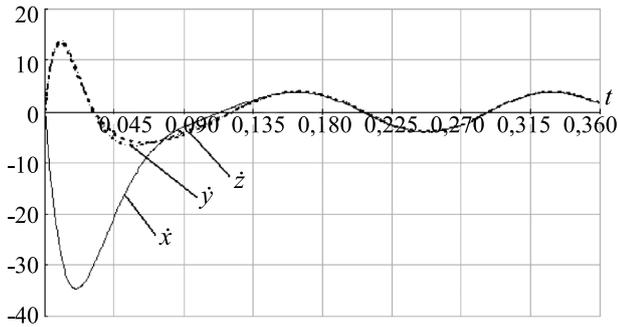


Рис. 10. Изменения скоростей выходного звена

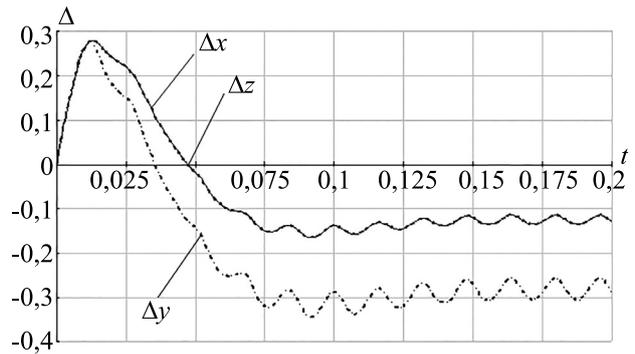


Рис. 11. Изменения ошибки по координате

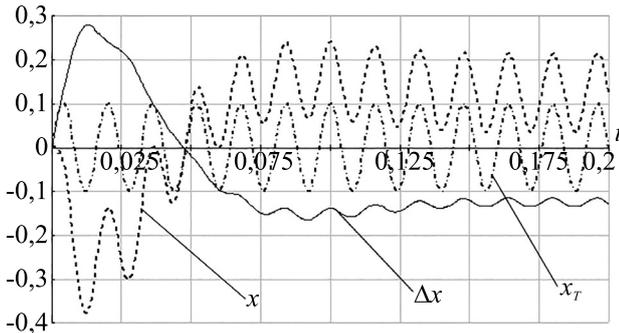


Рис.12. Изменения ошибки положения Δx , координат x_T и x при управлении механизмом с обратной связью

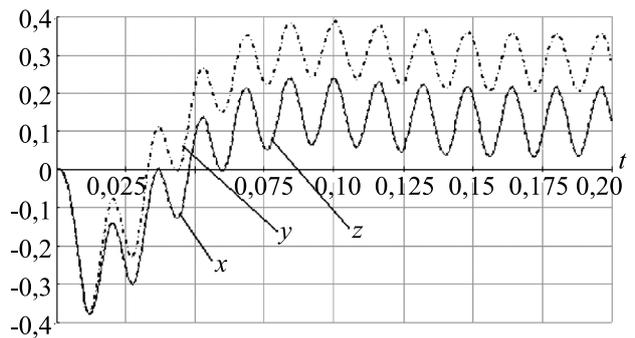


Рис. 13. Движение выходного звена

3. Рассмотрим случай, когда в 10 раз увеличена угловая частота $\omega = 400$ рад/с, при неизменных начальных условиях: $x(0) = 0$, $y(0) = 0$, $z(0) = 0$, а коэффициенты обратных связей $\gamma_0 = 3086$, $\gamma_1 = 78,5$. Время переходного процесса также не изменилось и составляет $t = 0,076$ с. Соответствующие графики показаны на рис. 11, 12, 13.

Из графиков на рис. 11, 12 и 13 следует, что при увеличении угловой частоты увеличилась ошибка по положению, а также время переходного процесса.

Заключение

Для рассматриваемого манипулятора параллельной структуры с пятью степенями свободы (для поступательной части данного механизма) была составлена динамическая модель для решения задач динамики. На основе этих задач был отработан алгоритм управления требуемого движения выходного звена. Для анализа работоспособности предложенного манипулятора и оценки пригодности данного алгоритма рассматривались различные начальные условия движения и коэффициенты обратных связей (γ_0 , γ_1), а также различные частоты движения по траектории (ω). При этом ошибка движения по заданному закону имела приемлемые значения.

Список литературы

1. Merlet J.P. Parallel robots. Solid mechanics and its applications. Kluwer Academic Publishers, 2000. – 355 p.
2. Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2007. – 272 p.
3. Gogu G. Structural synthesis of parallel robots. Part 2: Translational topologies with two and three degrees of freedom. Springer Science, Business Media, 2009. – 761 p.
4. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука. 1991. – 94 с.
5. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control / J.J. Craig: 2nd ed. Reading. MA: Addison-Wesley, 1989. – 544 p.
6. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. и др. Манипуляционные системы роботов / под ред. А.И. Корендясева. М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.
7. Chablat D., Wenger Ph., Staicu S. Dynamics of the orthoglide parallel robot // UPB Scientific Bulletin. Series D: Mechanical Engineering. 2009. Vol. 71. No. 3. P. 3–16.
8. Ur-Rehman R., Caro S., Chablat D., Wenger Ph. Kinematic and dynamic analysis of the 2-DOF spherical wrist of orthoglide 5-axis //

- 3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM'2009. P. 1–8.
9. Пат. 2007/0062321 США. Device for the movement and orientation of an object in space and use thereof in rapid machining / D. Chablat, Ph. Wenger; United States Patent Application Publication. Оpubл. 22.03.2007. Sainte Luce Sur Loire (FR).
10. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1988. – 328 с.
11. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
12. Козлов В.В., Макаров В.П., Тимофеев А.В., Юревич Е.И. Динамика промышленных роботов. М.: Наука, 1984. – 336 с.
13. Коловский М.З. Динамика машин. Л.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
14. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.П. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. – 400 с.
15. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В., Выборнов А.П. Решение задачи управления плоским механизмом параллельной структуры // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 3. С. 2–7.
16. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Динамический анализ и управление: монография. М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2014. – 87 с.
17. Глазунов В.А., Хейло С.В. Некоторые актуальные проблемы развития теории механизмов и машин: монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 62 с.
18. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. – 768 с.
19. Clavel R. Delta, a fast robot with parallel geometry // Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robot. Lausanne, 1988. P. 91–100.
20. Пат. 2534706 Российская Федерация, МПК В 25 J 1/00. Пространственный механизм с четырьмя степенями свободы / Н.Ю. Носова, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло: патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГУДТ» – № 2013132024/02; заявл. 11.07.2013; опубл. 10.12.2014, бюл. № 34.
21. Пат. 135283 Российская Федерация, МПК В 25 J 1/00. Пространственный механизм с пятью степенями свободы / Н.Ю. Носова, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло: патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГУДТ» – № 2013132023/02; заявл. 11.07.2013; опубл. 10.12.2013, бюл. № 34.
22. Пат. № 2536735 Российская Федерация, МПК В 25 J 1/00. Пространственный механизм с шестью степенями свободы / Н.Ю. Носова, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, Л.В. Комисарук: патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГУДТ» – № 2013132023/02; заявл. 11.07.2013; опубл. 27.12.2014, бюл. № 36.
23. Носова Н.Ю., Глазунов В.А., Палочкин С.В., Терехова А.Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 5. С. 34–40.

Материал поступил в редакцию 25.08.2015

**НОСОВА
Наталья Юрьевна**

E-mail: natahys@mail.ru.
Тел.: (915) 122-29-20

Аспирантка третьего года обучения Московского государственного университета дизайна и технологии. Сфера научных интересов – машиностроение, манипуляторы параллельной структуры, текстильные машины и аппараты. Автор двух научных статей, двух изобретений.

**ГЛАЗУНОВ
Виктор Аркадьевич**

E-mail: vaglznv@mail.ru.
Тел.: (916) 822-15-06

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная механика» Московского государственного университета дизайна и технологии. Сфера научных интересов – робототехника, манипуляторы параллельной структуры, философия наук. Автор пяти монографий, более 200 научных публикаций, 25 изобретений.

**ПАЛОЧКИН
Сергей Владимирович**

E-mail: palnigs@mail.ru.
Тел.: (903) 617-77-70

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика» Московского государственного университета дизайна и технологии. Сфера научных интересов – машиноведение, привод машины, подъемно-транспортные машины и манипуляторы, динамика и демпфирование колебаний машин, текстильные машины и технологии. Автор четырех монографий, 66 научных статей, 23 изобретений.