

УДК 621.01

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОСКИМ МЕХАНИЗМОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ*

С.В. Хейло, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, А.П. Выборнов

Представлено решение задачи управления плоским механизмом параллельной структуры с двумя степенями свободы, используемым в установках лазерной резки и сварки. Алгоритм управления, основанный на решении обратных задач динамики, позволяет обеспечить движение выходного звена по назначенной траектории. Также рассмотрена задача управления механизмом при переходе через особые положения и выводе его из области сингулярностей. Приведен пример численного решения задачи управления таким механизмом.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, управление, обратная задача динамики

Введение

Механизмы параллельной структуры находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Среди манипуляционных механизмов параллельной структуры широко применяются плоские механизмы с двумя и тремя степенями свободы, предназначенные для различных технологических операций. В настоящее время в заготовительном производстве широко применяются установки лазерной резки листовых материалов (сталей, цветных сплавов, неметаллических материалов). Это связано с большой производительностью, с высокой точностью вырезаемых заготовок и качеством поверхности реза, не требующим дополнительной обработки.

Современные промышленные установки для лазерной резки можно подразделить на три основных типа: установки с перемещением стола с обрабатываемыми материалами, установки с системами «летающей оптики» и гибридные установки [1]. Основные различия этих типов связаны с перемещением разрезае-

мого материала и режущей головки. Для перемещения координатного стола с закрепленным материалом и для перемещения режущей головки требуются высокоточные (прецизионные) механизмы. Одним из таких видов механизмов являются механизмы параллельной структуры [2–4]. Установки с этими механизмами позволяют проводить высокоточную резку плоских объектов с большой производительностью и надежностью.

Однако в процессе работы звенья механизмов параллельной структуры могут попадать в особые положения внутри рабочей зоны. В них теряется степень свободы или происходит потеря управляемости. Кроме того, вблизи особых положений у манипуляторов параллельной структуры снижается нагрузочная способность. Одной из важных задач при создании манипуляционных механизмов является управление исполнительным органом и обеспечение им заданного закона движения. Цель данного исследования заключается в разработке алгоритма управления механизмом для вывода его из особых положений, что представляет практический интерес.

* Работа поддержана грантом РФФИ 13-08-12056 офи-м.

Сложности управления в области особых положений

Рассмотрим плоский механизм параллельной структуры с двумя степенями свободы (рис. 1). Этот механизм предусмотрен в качестве устройства лазерной сварки и резки, где луч отклоняется системой двух зеркал [5, 6]. Он может быть использован в установках с «летающей оптикой». Рассматриваемый механизм был предметом ранних публикаций [6, 7], однако здесь имеют место иные параметры механизма и другие законы движения.

В механизме ведущие звенья BD и CE (длиной L_1) соединены с приводами, установленными на основании, а два других звена AB и AE (длиной L_2), связанные шарнирно между собой, перемещают цепь, сопряженную с лазером. Звенья перемещают кинематическую цепь AF . Вдоль оси вращательной пары F расположена оптическая ось лазера. Луч отклоняется с помощью зеркал, расположенных в точках A и F . Таким образом, рассматриваемый механизм состоит из пяти кинематических цепей.

Сложность задачи управления обуславливается тем, что механизмы роботов параллельной структуры являются многоконтурными. При этом имеет место нелинейность уравнений связей, взаимовлияние между степенями свободы, непостоянство передаточных отношений между входными (обобщенными) и выходными (абсолютными) координатами выходного звена (рабочего органа). Любое простейшее движение по прямой или окружности требует согласованного движения приводов. Кроме того, нужно обеспечить минимизацию ошибки движения по заданному закону.

В особых положениях (сингулярностях) происходит потеря управляемости и усилия в приводах возрастают до недопустимых значений. Превышение установленного максимума обобщенной силы считается динамическим

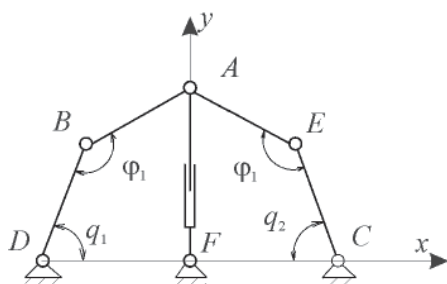


Рис. 1. Схема плоского механизма параллельной структуры

критерием близости к сингулярности. Для выполнения технологических операций манипулятором необходимо решить задачу управления при переходе через области сингулярностей. В механизме необходимо предусмотреть дополнительные приводы, включающиеся при приближении к особым положениям. После выхода из особых положений дополнительные приводы должны отключаться, а основные вновь включаться. Таким образом, в области особых положений управление механизмом должно быть передано дополнительным приводам.

Создание алгоритма управления механизмом

В робототехнике существуют разные подходы к решению задачи управления механизмами, при этом в большинстве публикаций рассматривались только роботы последовательной структуры [7, 8]. При решении задачи управления воспользуемся алгоритмом компенсационного управления [9–11].

При заданном законе движения требуется найти моменты в приводах, обеспечивающие минимизацию ошибки:

$$\begin{aligned}\Delta_i &= q_i(t) - q_{pi}(t), \dot{\Delta}_i = \dot{q}_i(t) - \dot{q}_{pi}(t), \\ \ddot{\Delta}_i &= \ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_{pi}(t), \quad i=1, 2,\end{aligned}\quad (1)$$

где $q_i(t)$, $\dot{q}_i(t)$, $\ddot{q}_i(t)$ – реальные значения обобщенных координат, скоростей и ускорений входного звена (обобщенные координаты); $q_{pi}(t)$, $\dot{q}_{pi}(t)$, $\ddot{q}_{pi}(t)$ – заданные значения координат, скоростей и ускорений входного звена; Δ_i , $\dot{\Delta}_i$, $\ddot{\Delta}_i$ – ошибки положения, скорости, ускорения.

Для оценки величины и быстроты затухания ошибки отклонения выходного звена используем квадратичную интегральную оценку переходного процесса [12]:

$$G_i = \int_{t_0}^T (\Delta_i^2 + k_{1i} \cdot \dot{\Delta}_i^2 + k_{2i} \cdot \ddot{\Delta}_i^2) dt, \quad i=1, 2, \quad (2)$$

где k_{1i}, k_{2i} – постоянные коэффициенты.

Интегралы G_i , величины которых должны принимать минимальное значение, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}G_i &= \int_{t_0}^T (\Delta_i^2 + k_{1i} \cdot \dot{\Delta}_i^2 + k_{2i} \cdot \ddot{\Delta}_i^2) dt = \\ &= \int (\ddot{\Delta}_i + \gamma_{1i} \cdot \dot{\Delta}_i + \gamma_{0i} \cdot \Delta_i)^2 dt + C_i(\Delta_0, \dot{\Delta}_0),\end{aligned}\quad (3)$$

где $C_i(\Delta_0, \dot{\Delta}_0)$ – некоторые постоянные, зависящие от начального состояния управляемого механизма; γ_{li}, γ_{oi} – постоянные коэффициенты.

Минимум функционала реализуется при условии [10, 12]:

$$\ddot{\Delta}_i + \gamma_{li} \cdot \dot{\Delta}_i + \gamma_{oi} \cdot \Delta_i = 0. \quad (4)$$

Для обеспечения управления необходимо выполнение условия, чтобы ошибки в переходном процессе являлись решением уравнения (4). Для нахождения коэффициентов уравнения (4) представим данное выражение в форме, соответствующей колебательному звену:

$$\tau_i^2 \ddot{\Delta}_i + 2\zeta_i \tau_i \cdot \dot{\Delta}_i + \Delta_i = 0; \quad \tau_i^2 = \frac{1}{\gamma_{oi}}, \quad 2\zeta_i \tau_i = \frac{\gamma_{li}}{\gamma_{oi}}, \quad (5)$$

где τ_i – постоянные времени; ζ_i – коэффициенты затухания (демпфирования) собственных колебаний.

Используя принцип возможных перемещений, можно записать уравнения движений:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_1} \delta q_1 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_1} \delta q_1 + J\ddot{q}_1 \delta q_1 + M_1 \delta q_1 &= 0; \\ m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_2} \delta q_2 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_2} \delta q_2 + J\ddot{q}_2 \delta q_2 + M_2 \delta q_2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где J – момент инерции входных звеньев; m – масса выходного звена; $\frac{\partial x}{\partial q_i}, \frac{\partial y}{\partial q_i}$ – переменные коэффициенты; M_1, M_2 – моменты в приводах.

Уравнения связей можно представить системой уравнений в общем виде:

$$\begin{aligned} F_1 &= L_2^2 - (x_c + L_1 \cdot \cos(q_1) - x)^2 - \\ &- (y_c + L_1 \cdot \sin(q_1) - y)^2 = 0; \\ F_2 &= L_2^2 - (x_D + L_1 \cdot \cos(q_2) - x)^2 - \\ &- (y_D + L_1 \cdot \sin(q_2) - y)^2 = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $(x_D, y_D), (x_C, y_C)$ – координаты точек D, C , в которых расположены приводы; L_1, L_2 – длины звеньев; q_1, q_2 – обобщенные координаты (углы поворота в приводах); (x, y) – координаты выходного звена (см. рис. 1).

Из уравнений связей (7) выразим обобщенные координаты q_1, q_2 :

$$q_1 = 2 \arctg \frac{\sqrt{-(K_1)(K_2)} + 2L_1 y}{K_6}; \quad (8)$$

$$q_2 = 2 \arctg \frac{\sqrt{-(K_3)(K_4)} + 2L_1 y}{K_5},$$

$$K_1 = x^2 - 2xx_c + y^2 + x_c^2 + 2L_1 L_2 - L_1^2 - L_2^2;$$

$$K_2 = x^2 - 2xx_c + y^2 + x_c^2 - 2L_1 L_2 - L_1^2 - L_2^2;$$

$$K_3 = x^2 - 2xx_D + y^2 + x_D^2 + 2L_1 L_2 - L_1^2 - L_2^2;$$

$$K_4 = x^2 - 2xx_D + y^2 + x_D^2 - 2L_1 L_2 - L_1^2 - L_2^2;$$

$$K_6 = x^2 + y^2 + 2xL - 2Lx_c + 2xx_c + x_c^2 + L_1^2 - L_2^2;$$

$$K_5 = x^2 + y^2 + 2xL - 2Lx_D + 2xx_D + x_D^2 + L_1^2 - L_2^2.$$

Особые положения могут быть определены исследованием свойств матриц, составленных из уравнений связи. Уравнение скоростей запишем в виде:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{B} \cdot \dot{\mathbf{q}}; \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial q_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} \end{pmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{V}$ – вектор скоростей выходного звена; $\dot{\mathbf{q}}$ – вектор скоростей входных звеньев.

В особых положениях определитель одной из матриц $\mathbf{A}$ или $\mathbf{B}$ равен нулю. Например, одним из особых положений является точка с координатами $(0; L_1 \cdot \sin(\frac{L_2 - x_D}{L_1}))$. В данной точке звенья механизма выстраиваются в одну линию (рис. 2), а определитель матрицы $\mathbf{A}$ равен нулю.

На основании представленного алгоритма можно найти обобщенные ускорения:

$$\ddot{q}_i = \ddot{q}_{pi} + \gamma_{li} \cdot (\dot{q}_i - \dot{q}_{pi}) + \gamma_{oi} \cdot (q_i - q_{pi}), \quad i=1,2. \quad (10)$$

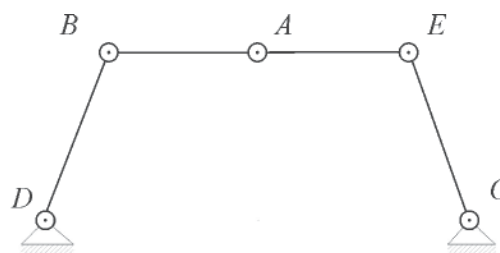


Рис. 2. Особое положение механизма

Моменты M_i в основных приводах могут быть найдены подстановкой ускорений $\ddot{q}_i$ из уравнений (10) в уравнения движения (6):

$$M_i = J_i (\ddot{q}_{pi} + \gamma_{i1}(\dot{q}_i - \dot{q}_{pi}) + \gamma_{i0}(q_i - q_{pi})) + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_i} + m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_i}. \quad (11)$$

Ускорения $\ddot{x}$, $\ddot{y}$ выходного звена определяются из уравнений, полученных при дифференцировании уравнения скоростей (9).

Дополнительные приводы располагаем в точках B , E . В этом случае задача о положении записывается следующим образом:

$$F_1^* = (L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \varphi_1) - (x - x_D)^2 - (y - y_D)^2; \quad (12)$$

$$F_2^* = (L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \varphi_2) - (x - x_C)^2 - (y - y_C)^2.$$

Выразим φ_1 , φ_2 из уравнений (12) задачи о положении:

$$\varphi_1 = 2 \arccos \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - y^2 - (x - x_D)^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \right); \quad (13)$$

$$\varphi_2 = 2 \arccos \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - y^2 - (x - x_C)^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \right).$$

Используя принцип возможных перемещений (поворот приводов на углы $\delta\varphi_1$, $\delta\varphi_2$), составим уравнения движения:

$$m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial \varphi_1} \delta\varphi_1 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial \varphi_1} \delta\varphi_1 - J\ddot{q}_1 \frac{\partial q_1}{\partial \varphi_1} \delta\varphi_1 + M_1^* \delta\varphi_1 = 0; \quad (14)$$

$$m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial \varphi_2} \delta\varphi_2 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial \varphi_2} \delta\varphi_2 - J\ddot{q}_2 \frac{\partial q_2}{\partial \varphi_2} \delta\varphi_2 + M_2^* \delta\varphi_2 = 0,$$

где m – масса выходного звена; $\frac{\partial x}{\partial \varphi_i}$ – переменные коэффициенты; M_1^*, M_2^* – моменты в дополнительных приводах.

Уравнение скоростей запишем в виде:

$$\mathbf{A}^* \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{B}^* \cdot \dot{\Phi}; \quad (15)$$

$$\mathbf{A}^* = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1^*}{\partial x} & \frac{\partial F_1^*}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2^*}{\partial x} & \frac{\partial F_2^*}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B}^* = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1^*}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial F_1^*}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial F_2^*}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial F_2^*}{\partial \varphi_2} \end{pmatrix}; \quad \dot{\Phi} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix}$$

где $\mathbf{V}_i$ – вектор скоростей выходного звена; $\dot{\Phi}_i$ – вектор скоростей входных звеньев.

Переменные коэффициенты $\frac{\partial x}{\partial \varphi_i}$, $\frac{\partial y}{\partial \varphi_i}$ определяются из уравнения скоростей (15).

Пример решения задачи управления

Зададим закон движения, при котором выходное звено пересекает точку особого положения $y = 0,25 \cdot \sin(10 \cdot t)$; $x=0$.

Масса выходного звена $m=9$ кг, длины звеньев $L_1=L_2=0,2$ м, координаты точек D , C соответственно $(-0,3$ м; $0)$, $(0,3$ м; $0)$.

Известно, что наиболее предпочтительным является режим с коэффициентом затухания

свободных колебаний $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$ [10]. При этом величина перерегулирования $\sigma \approx 5\%$, длительность переходного процесса составляет $t \approx \frac{3 \cdot \tau}{\zeta}$ с, а постоянные γ_0 , γ_1 равны

$$\gamma_0 = \frac{1}{\tau^2}, \quad \gamma_1 = \frac{\sqrt{2}}{\tau}.$$

Зададим коэффициент демпфирования $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$, время переходного процесса $t=0,05$ с.

При этом постоянная времени будет равна $\tau \approx 0,011$ с, а коэффициенты обратной связи будут равны $\gamma_0 = 7200$, $\gamma_1 = 120$. В данном случае принимает-

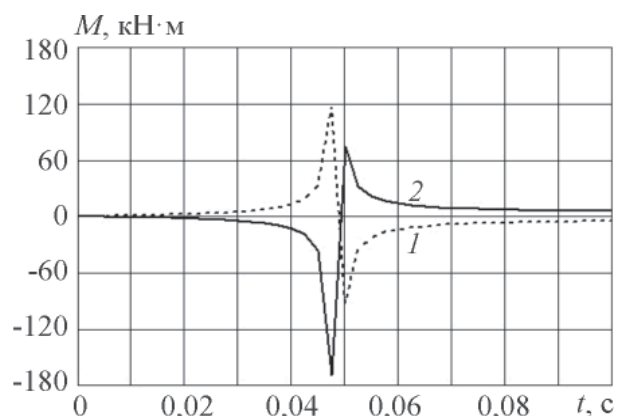


Рис. 3. График изменения моментов в приводах (1 – M_1 , 2 – M_2)

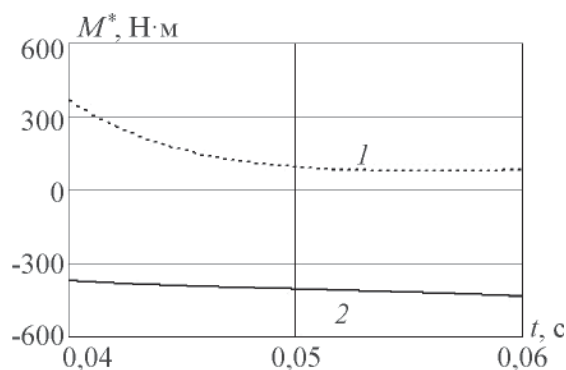


Рис. 4. График изменения моментов дополнительного привода (1 – M_1^* , 2 – M_2^*)

ся во внимание масса выходного звена. В результате численного решения задачи управления механизмом по заданному закону получены значения моментов в приводах (рис. 3).

Точка особого положения имеет координаты (0; 0,173 м). При приближении к особому положению происходит резкое увеличение момента в приводе, поэтому необходимо предусмотреть перераспределение нагрузки с учетом дополнительного привода.

В рассматриваемом примере при приближении к особому положению в интервале $t = (0,04; 0,05)$ с происходит резкое увеличение моментов M_1 , M_2 в основных приводах, а при $t > 0,05$ с происходит их резкое уменьшение до допустимой величины. На этом интервале времени происходит отключение основного привода и включение дополнительного привода. Значения моментов в дополнительном приводе показаны на рис. 4.

Заключение

Таким образом, показано, что при приближении к особому положению механизма происходит резкое увеличение нагрузки в основном приводе. При этом необходимо отключение двух основных приводов и включение двух дополнительных. После вывода механизма из особого положения должно происходить выключение дополнительных приводов и включение основных. Исследование показало, что дополнительные приводы позволяют избежать перегрузок основных двигателей и обеспечить выполнение технологических операций.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. – М.: Физматлит, 2005. – 312 с.
2. Merlet J. P. Parallel robots. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 372 p.
3. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. – Springer, 2007. – 275 p.
4. Tsai L.-W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. – John Wiley & Sons, 1999. – 505 p.
5. Патент РФ 2060135, 01.12.1992.
6. Glazunov V., Kraynev A., Bykov R., Rashoyan G., and Novikova N. Parallel manipulator control while intersecting singular zones. / Theory and Practice of Robots and Manipulators. (RoManSy), Proceedings of XV CISM-IFTOMM Symposium, Montreal, 2004. P. 267 – 273.
7. Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 78–84.
8. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением роботоманипулятора. – М.: Наука, 1976. – 104 с.
9. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов / под ред. С.Л. Зенкевича – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
10. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, 1988. – 328 с.
11. Хейло С.В., Глазунов В.А. Решение задачи об управлении поступательно-направляющим механизмом параллельной структуры // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. № 10. – С. 17–24.
12. Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования и управления – М.: Наука, 1989. – 301 с.

Материал поступил в редакцию 16.04.14

ХЕЙЛО Сергей Валерьевич E-mail: sheilo@yandex.ru Тел.: +7 (495) 955-37-87	Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет дизайна и технологий" (МГУДТ). Сфера научных интересов: робототехника, манипулятора параллельной структуры. Автор более 60 научных публикаций.
ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич E-mail: vaglznv@mail.ru Тел.: +7 (495) 624-00-28	Доктор технических наук, доктор философских наук, профессор, заведующий лабораторией теории механизмов и структуры машин института машиноведения им. А.А. Благодного РАН. Сфера научных интересов: робототехника, манипуляторы параллельной структуры, философия науки. Автор более 250 научных публикаций.
ПАЛОЧКИН Сергей Владимирович E-mail: palings@mail.ru Тел.: +7 (495) 955-37-87	Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика» ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет дизайна и технологий" (МГУДТ). Сфера научных интересов: машиноведение, робототехника, организация науки. Автор более 120 научных публикаций.
ВЫБОРНОВ Андрей Петрович E-mail: ac-mvtu@yandex.ru Тел.: +7 (926) 5813052	Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сфера научных интересов: машиноведение, механика разрушения, диагностика, сертификация. Автор 26 научных публикаций.