

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.865.8

В. А. СМИРНОВ, Л. Н. ПЕТРОВА

РЕШЕНИЕ ТРАЕКТОРНОЙ ЗАДАЧИ
В ОБОРУДОВАНИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРИВОДАМИ
РАБОЧЕГО ОРГАНА

Рассмотрен вопрос формирования линейной траектории движения рабочего органа применительно к оборудованию с параллельными приводами. Показаны особенности управления таким оборудованием, предложена методика, реализующая метод оценочной функции. *Оборудование с параллельными приводами; интерполяция траектории; метод оценочной функции*

В настоящее время в мировом станкостроении проявляется устойчивый интерес к оборудованию, имеющему нетрадиционные компоновочные схемы, в частности, к оборудованию с параллельными приводами рабочего органа [1].

В основе оборудования с параллельными приводами (ОПП) лежат механизмы с параллельными кинематическими цепями (МПКЦ). В таких механизмах связь между входными и выходными координатами является нелинейной, поэтому решение траекторной задачи применительно к ОПП будет иметь по сравнению с оборудованием традиционных компоновочных схем свои особенности.

ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ИНТЕРПОЛЯЦИИ В ОБОРУДОВАНИИ
ТРАДИЦИОННЫХ КОМПОНОВОЧНЫХ
СХЕМ

Под траекторной понимается задача обеспечения движения рабочего органа оборудования по заданной траектории с требуемой контурной скоростью. В большинстве практических случаев требуется обеспечить движение характерной точки рабочего органа по траектории, представляющей собой отрезок прямой линии, либо по дуге окружности [2]. Причем в систему управления передается информация о координатах начальной и конечной точек траектории, требуемой контурной скорости и, при необходимости, радиусе дуги. Обеспечение движения по заданной таким образом траектории возлагается на систему управления и назы-

вается интерполированием траектории. Различают два вида интерполяции: линейную и круговую. Способы решения задач интерполяции траектории применительно к оборудованию традиционных компоновочных схем рассмотрены в литературе достаточно подробно [2, 3].

Наиболее простой является интерполяция по методу оценочной функции. Применительно к формированию линейной траектории она осуществляется следующим образом. Примем, что оценочная функция $F = 0$ при совпадении реальной траектории с идеальной; $F > 0$ – если точка реальной траектории находится над заданной траекторией; $F < 0$ – если точка реальной траектории находится под заданной траекторией (см. рис. 1). В начальной точке $F = 0$ и выполняется перемещение по координате X . Новая точка $(x_C^{\text{нач}} + \Delta_{\text{ПР}}, y_C^{\text{нач}})$ попадает в область $F < 0$ и для приближения к идеальной траектории следует выполнить перемещение по координате Y . Третья точка попадает в область $F > 0$ и для приближения к идеальной траектории следует выполнить перемещение по координате X .

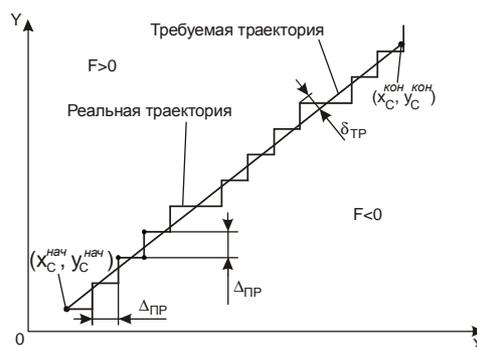


Рис. 1. Линейная интерполяция по методу оценочной функции

Таким образом, знак оценочной функции определяет координату, по которой следует осуществлять перемещение из текущей точки. Шаг, с которым производится перемещение, равен дискрете $\Delta_{\text{ПР}}$ привода, осуществляющего перемещение рабочего органа по соответствующей координате. Погрешность формирования траектории $\delta_{\text{ПР}}$ для данного метода не превышает величину $\Delta_{\text{ПР}}$ [2].

При линейной интерполяции выражение для оценочной функции в i -й точке траектории может иметь вид [2]

$$F_i = y_i - \frac{y_C^{\text{кон}} - y_C^{\text{нач}}}{x_C^{\text{кон}} - x_C^{\text{нач}}} x_i.$$

МЕТОД ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБОРУДОВАНИЮ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРИВОДАМИ

Для ОПП можно реализовать метод, аналогичный рассмотренному выше применительно к оборудованию традиционной компоновке методом оценочной функции.

Рассмотрим МПКЦ типа «гексапод» (рис. 2), имеющий 6 входных координат и, соответственно, 6 управляемых приводов. Под входными координатами будем понимать длины $L_j = |A_j B_j|$ штанг данного механизма.

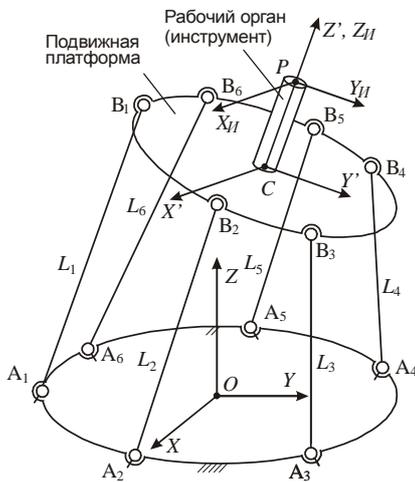


Рис. 2. Механизм с параллельными кинематическими цепями

В качестве характерного элемента МПКЦ примем точку C подвижной платформы механизма. Выходными координатами будут являться три линейные координаты этой точки в неподвижной системе координат $OXYZ$, а также три угла ψ, ϑ, γ , определяющие разворот платформы вокруг точки C .

Особенностью МПКЦ является нелинейные перекрестные связи между входными и выход-

ными координатами, вследствие чего изменение любой из входных координат может влиять на несколько выходных. Поэтому для выбора входной координаты, используемой для перемещения из текущей точки, потребуется оценочная функция более сложного вида, чем в рассмотренном выше примере для станка традиционной компоновки.

Пусть требуется переместить характерный элемент МПКЦ из точки O_H в точку O_K по прямой линии. Характер изменения выходных координат ψ, ϑ, γ пока принимать во внимание не будем.

Переход точки C из состояния $(x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i})$ в состояние $(x_{C_{i+1}}, y_{C_{i+1}}, z_{C_{i+1}})$ назовем тактом движения. Примем, что для перемещения выходного звена механизма в течение такта будет задействован привод только одной из штанг (изменяется только одна входная координата).

Если точка C имеет текущие координаты $(x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i})$, то изменение первой входной координаты на величину $\Delta_{\text{ПР}}$ приведет к тому, что координаты точки C станут равны $(x_{C_{i+1}}^{<1>}, y_{C_{i+1}}^{<1>}, z_{C_{i+1}}^{<1>})$. При этом изменятся и угловые координаты: из состояния $(\psi_i, \vartheta_i, \gamma_i)$ в состояние $(\psi_{i+1}^{<1>}, \vartheta_{i+1}^{<1>}, \gamma_{i+1}^{<1>})$. Таким образом, изменение первой обобщенной координаты переведет вектор выходных координат $U_{\text{ВЫХ}}$ в состояние $U_{\text{ВЫХ}_{i+1}}^{<1>} = (x_{C_{i+1}}^{<1>}, y_{C_{i+1}}^{<1>}, z_{C_{i+1}}^{<1>}, \psi_{i+1}^{<1>}, \vartheta_{i+1}^{<1>}, \gamma_{i+1}^{<1>})$. Если первая входная координата изменится на величину $-\Delta_{\text{ПР}}$, то вектор выходных координат будет равен

$$U_{\text{ВЫХ}_{i+1}}^{<-1>} = (x_{C_{i+1}}^{<-1>}, y_{C_{i+1}}^{<-1>}, z_{C_{i+1}}^{<-1>}, \psi_{i+1}^{<-1>}, \vartheta_{i+1}^{<-1>}, \gamma_{i+1}^{<-1>}).$$

Независимое изменение каждой из шести входных координат на величину $\Delta_{\text{ПР}}$ или $-\Delta_{\text{ПР}}$ позволит получить массив возможных значений вектора выходных координат $U_{\text{ВЫХ}_{i+1}}^{<j>}$ (рис. 3), из анализа которого можно выбрать ту обобщенную координату, которая будет использоваться для формирования перемещения из текущей точки $U_{\text{ВЫХ}_i}$.

Свяжем с точкой O_H прямоугольную систему координат $O_H X_{\text{Тр}} Y_{\text{Тр}} Z_{\text{Тр}}$ (см. рис. 3): ось $O_H Y_{\text{Тр}}$ направлена по требуемой траектории движения, ось $O_H X_{\text{Тр}}$ лежит в плоскости, параллельной HOY , ось $O_H Z_{\text{Тр}}$ дополняет тройку осей до правой. На рис. 4 показаны проекции точек, образующих массив возможных значений вектора выходных координат $U_{\text{ВЫХ}_{i+1}}^{<j>}$ (отражены

только три линейные координаты) на плоскость $Y_{Tr}O_H Z_{Tr}$.

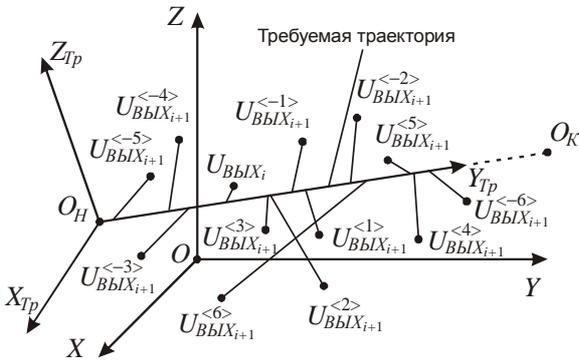


Рис. 3. Массив возможных значений вектора выходных координат

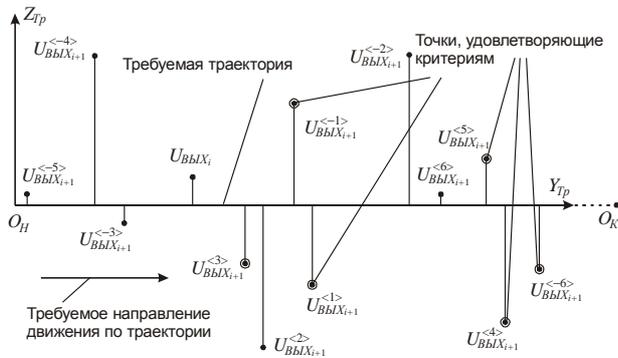


Рис. 4. Проекция точек массива возможных значений на плоскость, в которой лежит траектория

Из рис. 4 видно, что некоторые точки ($U_{BbYX_{i+1}}^{<-5>}$, $U_{BbYX_{i+1}}^{<-4>}$, $U_{BbYX_{i+1}}^{<-3>}$) расположены ближе к начальной точке траектории, чем текущая точка U_{BbYX_i} . Следовательно, приращения некоторых входных координат заставляют характерный элемент механизма перемещаться в «неправильном» направлении. Такие варианты приращений должны исключаться из рассмотрения.

На рис. 5 показаны проекции точек, образующих массив возможных значений вектора выходных координат $U_{BbYX_{i+1}}^{<j>}$, на плоскость $X_{Tr}O_H Z_{Tr}$. Данный рисунок позволяет оценить величину отклонения $\delta^{<j>}$ каждой из точек от требуемой траектории. Если задано некоторое допустимое отклонение $\delta_{доп}$, то можно исключить из рассмотрения точки (следовательно, соответствующие приращения входных координат), для которых $\delta^{<j>} > \delta_{доп}$. На рис. 5 это точки $U_{BbYX_{i+1}}^{<-4>}$, $U_{BbYX_{i+1}}^{<-2>}$, $U_{BbYX_{i+1}}^{<2>}$, $U_{BbYX_{i+1}}^{<6>}$.

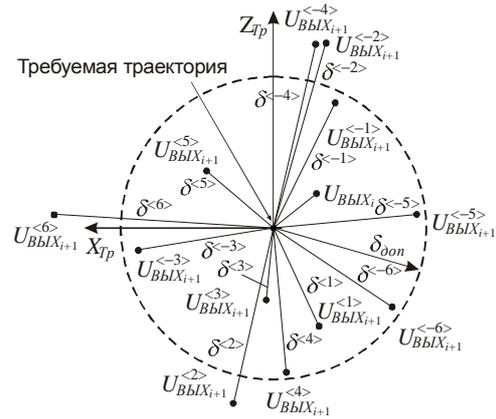


Рис. 5. Оценка отклонения точек массива возможных положений от требуемой траектории

На рис. 4 выделены точки, удовлетворяющие рассмотренным выше критериям по направлению перемещения и по отклонению от требуемой траектории. Именно из этих точек необходимо выбрать реализуемую точку, которая определит, для какой обобщенной координаты и с каким знаком будет осуществлено приращение, обеспечивающее перемещение из текущей точки U_{BbYX_i} в направлении точки O_K на очередном такте. Так как изменения угловых выходных координат в процессе движения характерного элемента не рассматриваются, то в качестве реализуемой целесообразно выбрать точку, наиболее близкую к O_K (точка $U_{BbYX_{i+1}}^{<-6>}$ на рис. 4). Это позволит осуществить полный переход по траектории за меньшее количество тактов.

Рассмотренный алгоритм позволяет определить входную переменную, приращение по которой будет сформировано при движении из текущей точки траектории. Алгоритм может быть отнесен к методу оценочной функции, хотя сама функция в явном виде не сформирована.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБОРУДОВАНИЮ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРИВОДАМИ

Основу математической модели рассматриваемого МПКЦ составляет система нелинейных алгебраических уравнений вида

$$L_j = L_j(x_c, y_c, z_c, \psi, \vartheta, \gamma), j = \overline{1,6},$$

связывающих входные и выходные координаты [4]. В качестве выходных координат ψ, ϑ, γ могут выступать углы Крылова.

На рис. 6 показаны результаты моделирования движения по прямой характерного эле-

мента для МПКЦ, показанного на рис. 2, имеющего следующие геометрические размеры: радиус расположения нижних шарниров 400 мм, радиус расположения верхних шарниров 200 мм, шарниры платформы попарно сведены. В качестве характерного элемента выступает инструмент, точка P которого отстоит от подвижной платформы (плоскости расположения шарниров B_j) на величину 150 мм. Выходными координатами являются координаты (x_P, y_P, z_P) этой точки, а также углы Крылова, описывающие разворот связанной с инструментом системы координат $PX_{II}Y_{II}Z_{II}$ относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. Принято, что начальной точки траектории соответствуют выходные координаты $(-50, 0, 500, 0, 0, 0)$, конечной $(50, 0, 500, 0, 0, 0)$; дискретность приводов $\Delta_{пр} = 0,01$ мм, отклонение от заданной траектории не должно превышать величины $\delta_{доп} = 0,01$ мм.

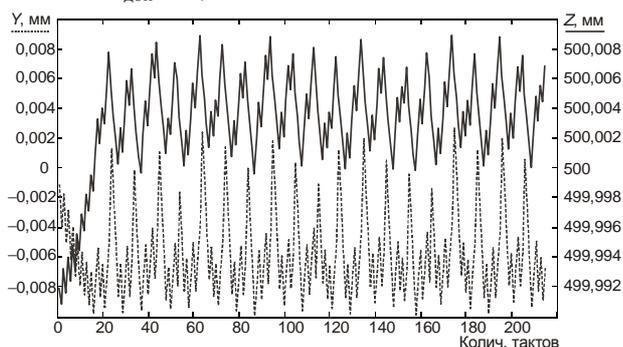


Рис. 6. Изменения выходных координат для случая изменения в такте одной из входных координат

Рис. 6 отражает изменения выходных координат y_P и z_P при смещении характерного элемента на 1 мм по заданной траектории. Данное смещение реализовано за 215 тактов. На каждом такте осуществлялось изменение длины только одной штанги, что соответствует рассмотренному выше методу управления оборудованием традиционных компоновочных схем (см. рис. 1). Характер изменения угловых координат при формировании траектории не учитывался.

Моделирование управления МПКЦ, при котором в каждом такте меняется длина только одной штанги показало, что возможно обеспечение отклонения точки P от требуемой траектории, не превышающее дискретности привода $\Delta_{пр}$. Важной особенностью МПКЦ можно считать возможность обеспечения отклонения точки P от требуемой траектории гарантированно меньшего, чем $\Delta_{пр}$. Это иллюстрирует рис. 7, отражающий результаты моделирования для

случая $\delta_{тр} = 0,006$ мм. Данная особенность объясняется нелинейностью связей между входными и выходными координатами.

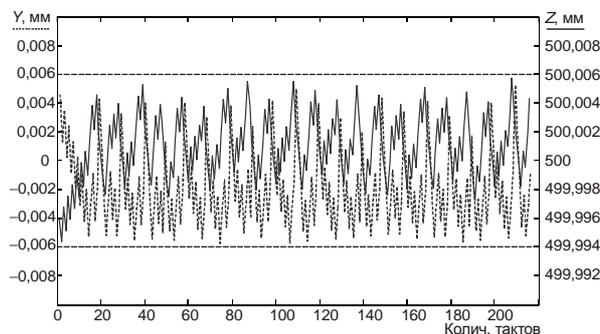


Рис. 7. Обеспечение погрешности формирования траектории, меньшей дискретности приводов

Как развитие метода оценочной функции возможно управление, при котором реализуется одновременное изменение нескольких входных координат. Применительно к МПКЦ это соответствует случаю, когда на каждом такте изменяется длина более чем одной штанги. В таблице приведены результаты моделирования, показывающие, за сколько тактов в этом случае будет произведено перемещение рабочего органа на 1 мм вдоль требуемой траектории, а также общее количество возможных положений точки P при построении траектории. Последний параметр косвенно характеризует время, затраченное на расчет траектории.

Результаты моделирования

Кол-во штанг, длина которых изменяется в такте	Кол-во тактов	Кол-во возможных положений точки P	
		на такт	всего
1	215	12	2580
2	107	60	6420
3	72	160	11520
4	56	240	13440
5	55	192	10560
6	54	64	3456
от 1 до 6	54	728	39312

Возможное положение точки P находится из численного решения записанной выше системы уравнений для заданных входных координат.

Анализ данных в таблице показывает, что увеличение количества штанг, длина которых изменяется в каждом такте, ведет к уменьшению количества тактов, требующихся для обработки траектории. Задействование в каждом такте всех шести штанг обеспечивает минимальное количество тактов при относительно малом объеме вычислений.

Последняя строка в таблице отражает случай анализа всех возможных положений точки P на каждом такте. Детальное изучение полученных для этого случая результатов показало, что в каждом такте были задействованы либо 5, либо 6 штанг. Так как задействование 6 штанг требует существенно меньшего времени расчета, данное управление можно считать оптимальным. Характер изменения выходных координат для случая изменения в такте длин всех штанг показан на рис. 8.

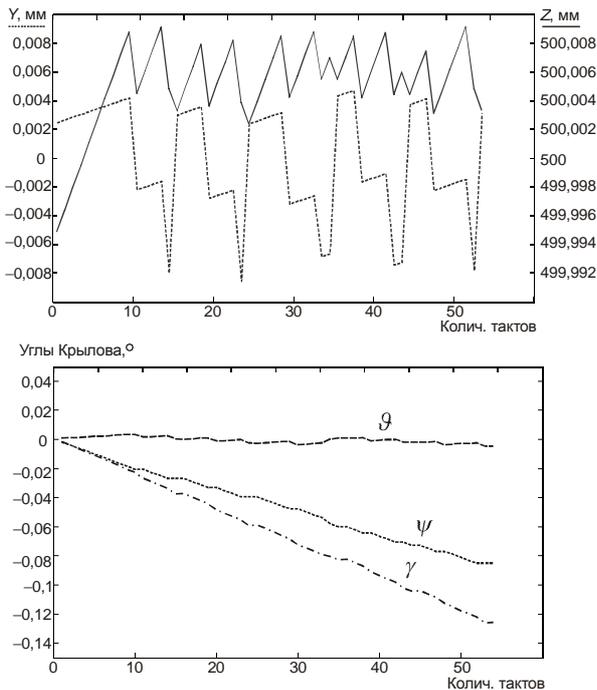


Рис. 8. Изменения выходных координат для случая изменения в такте шести входных координат

Следует отметить еще одну особенность МПКЦ, также определяемую нелинейными связями между входными и выходными координатами. Результаты, приведенные в таблице, получены для отработки участка линейной траектории длиной $L_{\text{уч}} = 1$ мм при дискретности изменения входных координат $\Delta_{\text{ПР}} = 0,01$ мм. В случае реализации такой траектории на станке традиционной компоновки, с учетом того, что требуется изменять одну выходную координату, привод должен будет отработать $L_{\text{уч}}/\Delta_{\text{ПР}} = 100$ тактов. Для рассматриваемого МПКЦ при задействовании в каждом такте трех и более штанг количество тактов, необходимое для отработки такого участка траектории, меньше этой величины. Следовательно, перемещение по траектории за такт может превышать величину $\Delta_{\text{ПР}}$. Если определить минимально допустимое перемещение (по направлению требуемой траектории) за такт на уровне

$\Delta_{\text{ПР}}$, то среди точек, для которых перемещение за такт не меньше $\Delta_{\text{ПР}}$, возможно найти такую, которая обеспечит выполнение дополнительных оценочных условий. В качестве дополнительного условия может выступать, например, неизменность выходных угловых координат в процессе отработки такта. На рис. 9 показано изменение угловых выходных координат для случая изменения на каждом такте длин всех шести штанг с учетом этого условия. Обработка дополнительного условия не привела к существенному увеличению количества тактов.

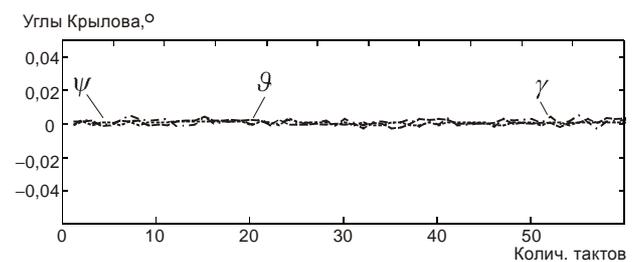


Рис. 9. Минимизация изменения выходных угловых координат

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПП

Общая методика реализации метода оценочной функции применительно к ОПП выглядит следующим образом.

1. Для текущей точки реальной траектории необходимо сформировать массив возможных следующих положений. При формировании массива предполагается изменение длин всех шести штанг на величину дискретности привода $\Delta_{\text{ПР}}$ как в сторону увеличения соответствующих входных координат, так и в сторону уменьшения.

2. В полученном массиве отбрасываются точки, удаленные от требуемой линейной траектории на величину, большую заданной.

3. Среди оставшихся точек выбираются те, которые обеспечивают смещение по направлению требуемой траектории на величину, не меньшую дискретности привода $\Delta_{\text{ПР}}$.

4. Если дополнительных условий не задано, то среди полученных точек выбирается та, которая обеспечивает максимальное смещение по направлению требуемой траектории. Этим обеспечивается минимизация количества тактов, требующихся для отработки траектории.

5. Если заданы дополнительные оценочные условия, то среди полученных точек находят ту, которая обеспечит наилучшее выполнение этих условий. В качестве дополнительного условия может выступать требование минимизации

ции изменения угловых выходных координат при отработке такта.

Найденная точка будет являться (после отработки текущего такта) начальной точкой следующего такта.

Аналогичным образом может строиться управление, обеспечивающее перемещение рабочего органа по произвольной пространственной траектории.

ВЫВОДЫ

Моделирование решения траекторной задачи применительно к ОПП с использованием описанной методики показало, что:

1. В данном оборудовании возможно формирование линейных траекторий движения характерной точки рабочего органа с погрешностью, не превышающей дискретность приводов.

2. При формировании траектории целесообразно изменение всех входных координат (изменение длин всех штанг) в каждом такте.

3. Изменение выходных линейных координат в такте может превышать величину дискретности изменения входных координат.

4. В процессе формирования линейной траектории движения характерной точки рабочего органа может быть обеспечена минимизация изменения угловых выходных координат.

5. На каждом такте требуется анализировать 64 возможных положения характерной точки рабочего органа. Так как в ходе анализа требуется численно решать систему шести нелинейных уравнений, то это требует достаточно больших вычислительных мощностей. Поэтому использование данной методики в реальном времени может быть затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подзоров, П. В. Механизмы параллельной кинематики в станкостроении / П. В. Подзоров // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 2005. № 8. С. 2–24.
2. Сосонкин, В. Л. Программное управление технологическим оборудованием: Учебник для вузов / В. Л. Сосонкин. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
3. Байков, В. Д. Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ / В. Д. Байков, С. Н. Вашкевич. Л.: Машиностроение, 1986. 106 с.
4. Сулацкая, Е. Ю. Моделирование рабочего пространства станка с параллельной кинематикой / Е. Ю. Сулацкая, Л. Н. Петрова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2005. Вып. 13. № 11 (144). С. 42–45.

ОБ АВТОРАХ



Смирнов Владимир Алексеевич, доц. каф. автоматизации механосборочного производства Южно-Уральск. гос. ун-та. Дипл. инж.-мех. (ЧГТУ, 1992). Канд. техн. наук по системам обработки информации и управления (ЮУрГУ, 2000). Иссл. в обл. проект. и управл. оборудованием с параллельными приводами.



Петрова Лина Николаевна, ст. преп. той же каф. Дипл. инж.-электрик (ЧГТУ, 1991). Иссл. в обл. проект. и управл. оборудованием с параллельными приводами.