

УДК 621.01

Ф.Н. Притыкин, О.И. Гордеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА СЕРВИСА НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА ДВИЖЕНИЙ МАНИПУЛЯТОРА ПО ВЕКТОРУ СКОРОСТЕЙ

Оценка функциональных возможностей робототехнических устройств при наличии кинематической избыточности в различных точках зоны обслуживания остается актуальной задачей. Возможность изменения ориентации схвата при размещении его центра в заданной точке зоны обслуживания характеризуется углом сервиса (для плоских механизмов этот угол является плоским). Угол сервиса, характеризует подвижность механизма при неподвижном схвате [1]. В [2] приведен способ определения указанного параметра на основе использования метода объемов. Однако при сложной структуре кинематических цепей манипуляторов, заданных предельных значений обобщенных координат и значении двигательной избыточности равной трем и более использование указанного способа затруднено.

Исследуем точность определения угла U_s [3], который с определенным допущением определяет угол сервиса U , при использовании способа основанного на реализации мгновенных состояний, на примере плоского семизвездного механизма манипулятора, длины звеньев которого равны 120 мм. Геометрическая модель в соответствии с обозначением открытых кинематических цепей принятой в работе [4] будет следующей М3-3-3-3-3-3-3. Для конфигурации указанного манипулятора, представленной на рис. 1а, угол сервиса U для заданной точки зоны обслуживания A_2 графическими построениями определится пересечением двух

окружностей. Центры указанных окружностей совпадают с точками O_o и A_2 , а их радиусы равны соответственно $120\cdot 5=600$ и 120 мм. Для конфигурации задающей положение центра схвата заданного точкой A_2 ($\varphi_1=11.5^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_6=90^\circ$) указанный угол сервиса равен 169° , параметры φ_i – определяют значения обобщенных координат.

Определим угол U_s реализацией мгновенных состояний для конфигураций, при которых точка A_i (центр схвата) будет располагаться на отрезке A_1A_3 , длина которого равна двум длинам последнего подвижного звена ($A_1A_3 = 240$ мм), при этом $\varphi_{2-5} = 0^\circ$. Рассмотрим семь различных положений указанной точки на отрезке A_1A_3 . Соседние точки A_i располагаем на расстоянии 30 мм. Способ определения угла U_s основан на построении конфигураций, удовлетворяющих заданной точности позиционирования центра выходного звена (которую обозначим величиной d_{min}) реализацией значений векторов обобщенных скоростей $Q(\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dots, \dot{\varphi}_n)$ [3]. Данные конфигурации удовлетворяют заданным погрешностям реализаций d_{min} . В работе при проведении исследований значение параметра d_{min} принято $d_{min} \leq 1$ мм. Значение вектора Q определяется в соответствии с заданной линейной системой уравнений, задающей взаимосвязь обобщенных скоростей Q со скоростями выходного звена манипулятора заданного вектором V [1]. Первоначальное направление век-

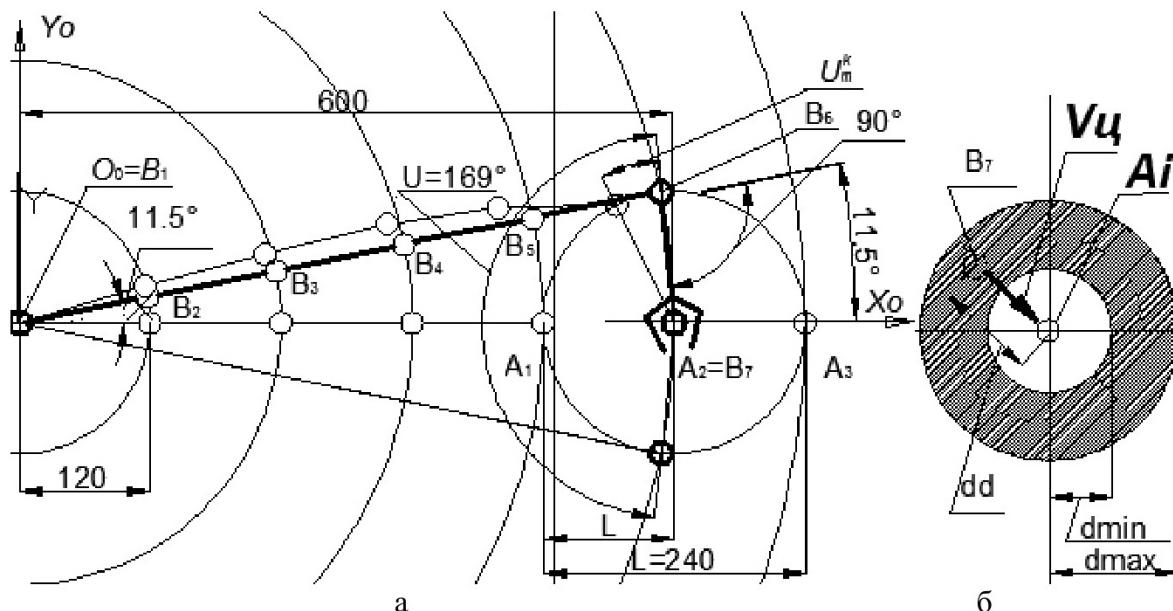


Рис. 1 Определение углов U и U_s : а – определение угла U с помощью графических построений, б – зона положений точек центров схвата для которых обеспечивается перемещения к целевой точке A_i при нахождении угла U_s

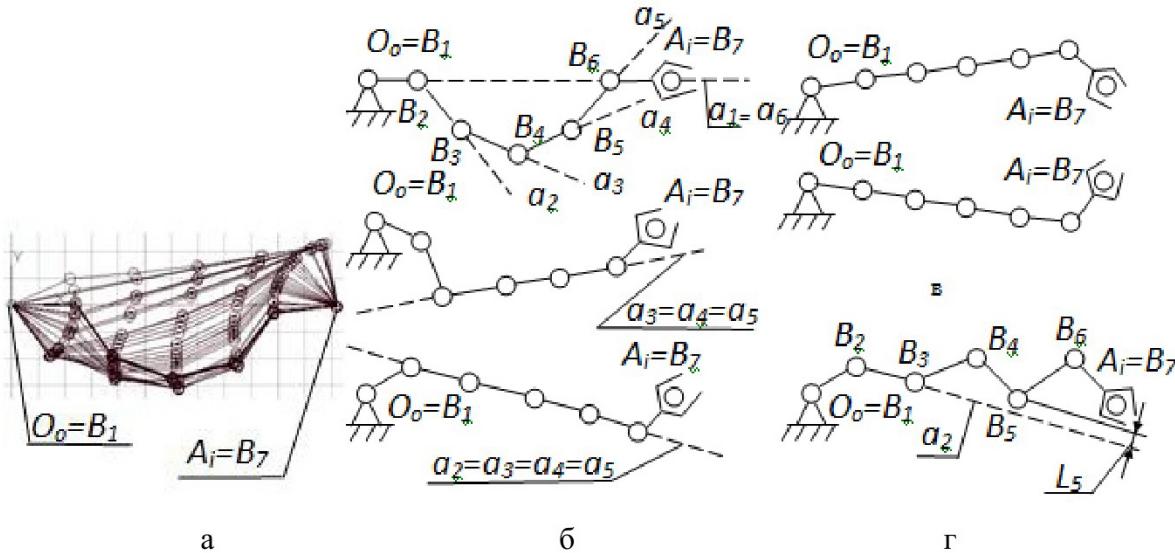


Рис. 2 Изображения конфигураций: а – синтез конфигураций с возникновением тупиковой ситуации, б – особые конфигурации, в – крайние положения конфигураций, г – анализ положения точек B_i относительно прямых a_i

тора V при проведении исследований принято параллельным оси O_0x_0 неподвижной системы координат. Размерность указанного вектора при проведении исследований принята равной двум, т.е. ориентация выходного звена при синтезе движений не учитывается. При этом $V_x = 1$ мм/сек, $V_y = 0$.

Строим совокупность конфигураций [3,4], для которых значение угла U_m^k положительно и больше предыдущего значения U_m^{k-1} , рассчитанного на предыдущей итерации. Данный угол U_m^k определяют выходные звенья двух конфигураций рассчитанных на начальной и k -ой итерации (рис. 1а). Начальное положение конфигурации для точки A_2 соответствует значениям обобщенных координат $\varphi_1=11.5^\circ$, $\varphi_2=0$, $\varphi_6=90^\circ$ (см. рис. 1а). При этом для этой конфигурации принимается угол $U_m^k=0$. После определения конфигурации методом, изложенным в [3,4], и удовлетворяющей условиям:

$$U_m^{k+1} > U_m^k, dd < d_{min}, \quad (1)$$

находят следующую конфигурацию $k+2$. При этом за исходно заданную конфигурацию принимается конфигурация $k+1$. Центр выходного звена после этого отклоняется на некоторую величину $dd < d_{min}$. При построении следующих конфигураций данная величина dd увеличивается и принимает значение $dd > d_{min}$. С целью уменьшения отклонения центра выходного звена от заданной точки A_i зоны обслуживания (при синтезе малых движений), при выполнении условия $d_{min} < dd < d_{max}$ необходимо рассчитать новое значение вектора V_u перемещения центра выходного звена к целевой точке A_i (рис. 1б). Данный вектор имеет

направление к целевой точке, а его модуль определяется величиной dd . Параметр d_{max} при проведении исследований принят 3мм. После реализации вектора V_u происходит перемещение точки B_7 к целевой точке A_i . При этом вновь параметр dd принимает значение $dd < d_{min}$.

При построении конфигураций, удовлетворяющих условиям (1), с использованием алгоритма, изложенного в [3,5], могут быть случайным образом рассчитаны особые конфигурации, при которых происходит зацикливание и возникновение тупиковых ситуаций. Пример синтеза движений с возникновением тупиковой ситуации представлен на рис. 2а. Изображения некоторых особых конфигураций представлены на рис. 2б.

Как видно из рисунка, особые конфигурации возникают, когда центры вращательных шарниров заданные точками B_i (три и более) начинают располагаться на одной и той же прямой a_i . Прямые a_i определяются узловыми точками B_i плоского манипулятора.

Например, прямая a_1 определяется точками B_1 и B_2 , соответственно прямая a_2 – точками B_2 и B_3 , и т. д. (см. рис. 2б). Особые конфигурации возникают, если один из центров вращательных шарниров (точка B_i) приближается к одной из прямых a_i . Заметим, что конфигурации задающие крайние положения звеньев манипулятора (см. рис. 1а и 2б) в качестве особых конфигураций не принимаются. Для обеспечения исключения ситуаций возникновения особых конфигураций при синтезе малых движений необходимо построение конфигураций с наложением условий на изменение той или иной обобщенной координаты. Это возможно благодаря заданию фиксированных значений определенным

обобщенным скоростям. При использовании указанных условий система расчета конфигураций изменяет определенным образом отдельные обобщенные координаты при синтезе движений. В этом случае, если среди точек B_i , задающих текущую конфигурацию близкую к особой, n_δ – точек B_i близки к прямым a_i необходимо на n_δ значений обобщенных координат наложить условия. Например если центр пятого вращательного шарнира (точка B_5 см. рис. 2г) приближается к прямой a_2 определяющей точками B_2 и B_3 необходимо изменять четвёртую обобщенную координату с заданной скоростью $\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_{4\delta}$. В этом случае расстояние L_5 меньше допустимого L_{don} (см. рис. 2г). Следовательно, необходимо на четвертую обобщенную координату наложить условие $\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_{4\delta}$, где за $\dot{\phi}_{4\delta}$ принятое фиксированное значение обобщенной координаты. В общем случае необходимо наложить условия на n_δ обобщенных координат. Например, если расстояния L_5 и L_6 меньше допустимого, необходимо наложить условия на следующие обобщенные координаты:

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_{4\delta}, \quad \dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{5\delta}. \quad (2)$$

Для однозначности расчета вектора \mathbf{Q} определяющего положение точки $M_Q \in \Gamma$ принадлежащей шестимерному пространству обобщенных скоростей, задаются n_δ обобщенными скоростями, но при этом используются $l = n - r - n_\delta$ уравнений гиперплоскостей Δ [3]. Параметры n и r соответственно определяют размерности векторов \mathbf{Q} и \mathbf{V} . l -плоскость Γ в многомерном пространстве обобщенных скоростей задает линейная система уравнений, отражающая взаимосвязь векторов \mathbf{Q} и \mathbf{V} . Для определения точки M_Q для общего случая используются зависимости:

$$\begin{aligned} J_{1,1t} \dot{\phi}_{1t} + J_{1,2t} \dot{\phi}_{2t} + \dots + J_{1,n-n\delta} \dot{\phi}_{n-n\delta,t} &= \\ &= V_x + D_x; \\ J_{2,1t} \dot{\phi}_{1t} + J_{2,2t} \dot{\phi}_{2t} + \dots + J_{2,n-n\delta} \dot{\phi}_{n-n\delta,t} &= \\ &= V_y + D_y, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} D_x &= J_{1,1\delta} \dot{\phi}_{1\delta} + J_{1,2\delta} \dot{\phi}_{2\delta} + \dots + J_{1,n\delta} \dot{\phi}_{n\delta}; \\ D_y &= J_{2,1\delta} \dot{\phi}_{1\delta} + J_{2,2\delta} \dot{\phi}_{2\delta} + \dots + J_{2,n\delta} \dot{\phi}_{n\delta} \end{aligned} \quad (4)$$

В зависимостях (3-4) используются следующие величины: $\dot{\phi}_{it}$ – обобщенные скорости на которые не накладываются дополнительные условия (2) ($it = 1, 2, \dots, n - n_\delta$), $\dot{\phi}_{i\delta}$ – обобщенные скорости, на которые накладываются условия (2) ($i\delta = 1, 2, \dots, n_\delta$), $J_{1,n-n\delta}, J_{2,n-n\delta}, J_{1,n\delta}, J_{2,n\delta}$ – элементы матрицы частных передаточных отношений \mathbf{J} [1]. Уравнения (3-4) определяют новый критерий перемещения. При использовании указанных условий, система расчета конфигураций, позволяет обходить особые конфигурации. Заметим, что при проведении расчетов максимальное значение параметра n_δ принималось равное двум.

Алгоритм построения конфигураций удовлетворяющих условиям (1-2) представлен на рис. 3. На рис. 3 используются обозначения: 1 – начало, задание вектора \mathbf{L}_n ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$); 2 – вычисление точки A_i зоны обслуживания; 3 – вычисление матрицы частных передаточных отношений \mathbf{J} [1] и вектора \mathbf{Q} ; 4 – расчет положения конфигурации L_n^{k+1} , $\varphi_i = \varphi_i + \dot{\phi}_i$ (принимается допущение $\Delta\varphi_i \approx \dot{\phi}_i$); 5 – вычисление точности позиционирования dd ; 6 – $dd < d_{\min}$; 7 – проверка условий $\varphi_i^{\min} > \varphi_i > \varphi_i^{\max}$, где φ_i^{\min} , φ_i^{\max} – заданные предельные значения обобщенных

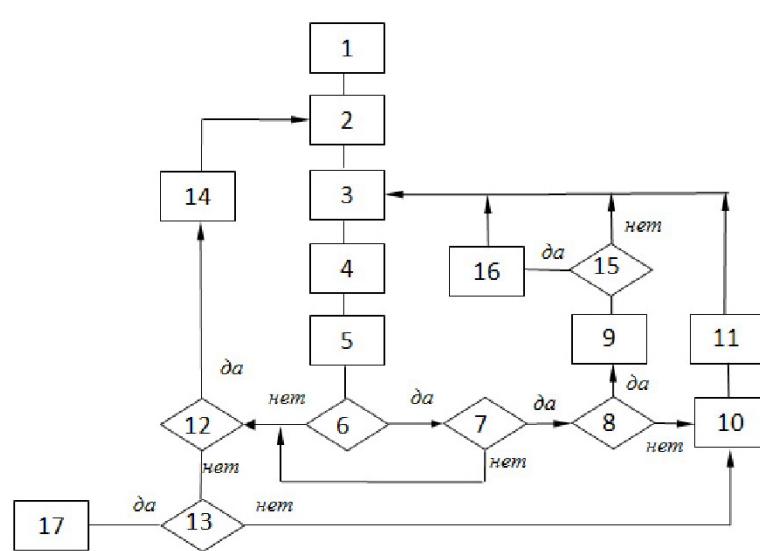


Рис. 3 Блок-схема построения угла U_s реализацией мгновенных состояний

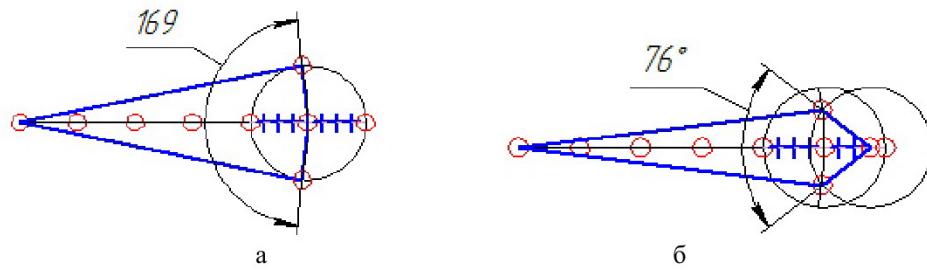


Рис. 4 Определение угла сервиса с помощью графических построений: а – ($\varphi_l=11.5^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_b=90^\circ$); б – ($\varphi_l=7.4^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_b=45.5^\circ$)

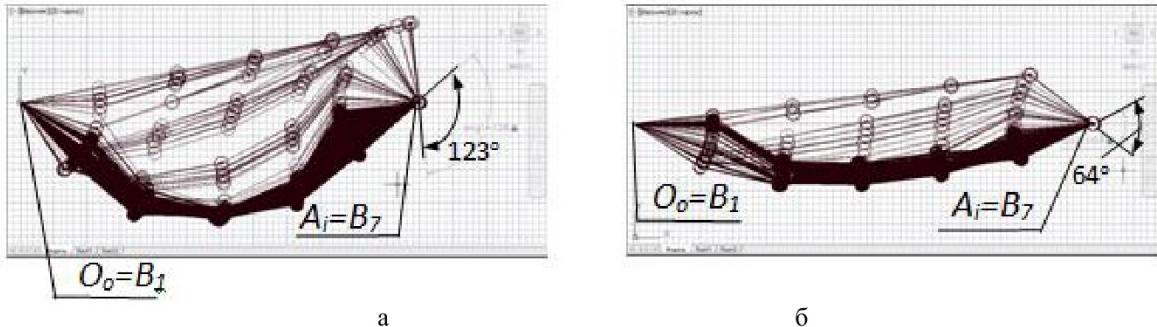


Рис. 5 Определение угла U_s с помощью реализаций мгновенных состояний: а – ($\varphi_l=11.5^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_b=90^\circ$); б – ($\varphi_l=7.4^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_b=45.5^\circ$);

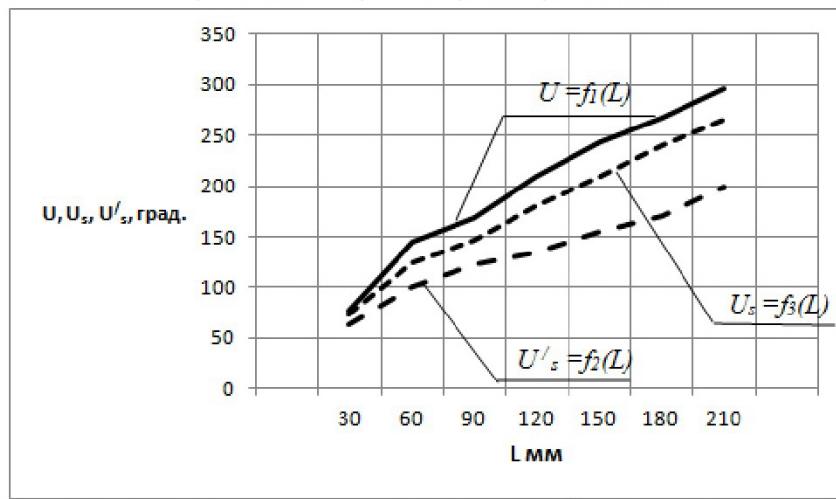


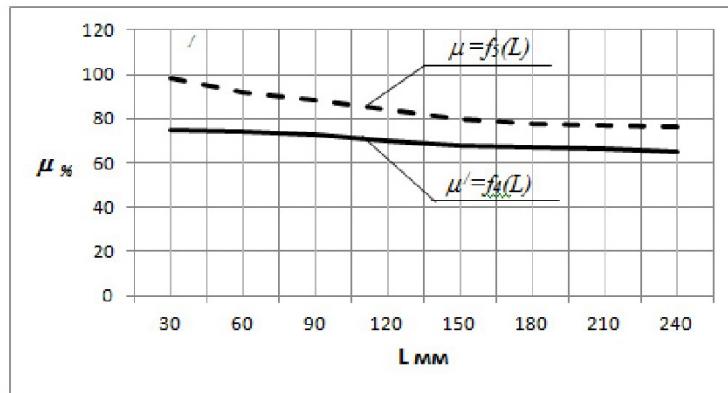
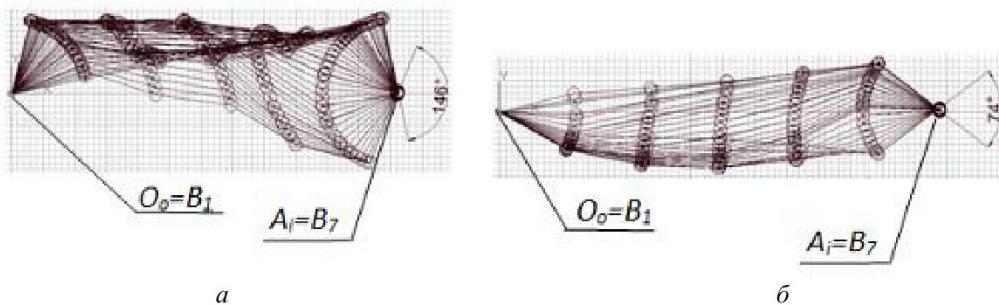
Рис. 6 Графики зависимостей $U = f_1(L)$, $U' = f_2(L)$, $U_s = f_3(L)$

ных координат; 8 – $U_m^k > U_m^{k+1}$; 9 – формирование изображения конфигурации; 10 – изменение значений параметров k_p (k_1 , k_2 , ..., k_4) координат точки N^Q в p -плоскости Γ [3]; 11 – изменение номера итерации $kk = kk + 1$; 12 – $dd < dd_{max}$; 13 – $kk_{max} = 200$ (kk_{max} – предельно заданное число итераций); 14 – вычисление модуля вектора V_u в соответствии со значением dd ; 15 – проверка условия $L_i > L_i^{\min}$ (анализ близости возникновения особых конфигураций); 16 – задание значений обобщенных скоростей $\dot{\phi}_{i\delta}$; 17 – конец.

При определении угла U_s и отсутствии синтеза движений с наложением условия (2), точность определения угла сервиса реализацией мгновенных состояний в зависимости от положения точки A_i на отрезке A_1A_3 составляет от

65 до 75 %. Результаты определения угла сервиса для двух заданных точек A_i с помощью графических построений представлены на рисунке 4а,б. Соответственно результаты расчета угла U_s реализацией мгновенных состояний без использования зависимости (2) представлены на рис. 5. На рис. 6 и 7 представлены графики зависимостей $U = f_1(L)$, $U' = f_2(L)$, $U_s = f_3(L)$ отражающие изменение угла сервиса и угла U'_s для этого случая. Параметр L определяет удаление точки A_i от точки A_1 (см. рис. 1а).

Здесь μ' – точность определения угла сервиса реализацией мгновенных состояний. Значительное расхождение с углом сервиса объясняется наличием особых конфигураций, в которых происходит зацикливание и возникновение тупиковых ситуаций. Графики функций $U_s = f_2(L)$

Рис. 7 График зависимостей $\mu' = f_4(L)$, $\mu = f_5(L)$ Рис. 8 Результаты определения угла U_s при использовании условий (1-3).
а – ($\varphi_1=11.5^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_6=90^\circ$); б – ($\varphi_1=7.4^\circ$, $\varphi_{2-5}=0$, $\varphi_6=45.5^\circ$);

и $\mu = f_5(L)$ отражают определение угла U_s и точность определения угла сервиса с использованием условий (2-3).

На рис. 8 представлен синтез малых движений при определении угла U_s при использовании зависимостей (2-4). Анализ графиков функций показывает что отличие значений угла U_s от угла сервиса составляет от 75 до 97 % в зависимости от положения центра захвата на отрезке $A_1 A_3$.

Предлагаемый алгоритм определения U_s , с определенным допущением задающий угол сервиса, характеризуется универсальностью и может быть использован для манипуляторов имеющих произвольную структуру плоских кинематических цепей, произвольную степень двигательной избыточности и заданные предельные значения обобщенных координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобринский, А. А. Манипуляционные системы роботов / А. А. Кобринский, А. Е. Кобринский. – М. : Наука. 1985. – 343 с.
2. Лебедев, П.А. Аналитический метод определения коэффициента сервиса манипулятора // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – №5. – С. 93 – 98.
3. Притыкин, Ф.Н. Графическое представление телесного угла и окружающего пространства руки при реализации мгновенных состояний манипуляторов / Ф.Н. Притыкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – №3.–С. 93 – 101.
4. Притыкин, Ф. Н. Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных промышленных роботов с использованием средств компьютерной графики / Ф. Н. Притыкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 6. – С. 34 – 41.
5. Притыкин, Ф. Н. Анализ показателей маневренности механизмов манипуляторов, имеющих различную структуру кинематических цепей / Ф. Н. Притыкин, Е. А. Чукавов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 1. – С. 35-39.

□ Авторы статьи:

Притыкин

Федор Николаевич ,
д. т. н., доцент, проф. каф. инженер-
ной геометрии и САПР (Омский гос.
техн. университет),
e-mail - pritykin@mail.ru

Гордеев

Олег Игоревич,
студент 2 курса РТФ (Омский гос.
техн. университет),
e-mail - oki.gordeev_ai@rambler.ru