

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДЕЛЬТА-РОБОТА ПО ПРОГРАММНОЙ ТРАЕКТОРИИ

С.В. Кузнецова (КГТА)

Разработана математическая модель сборочного робота с тремя параллельными кинематическими цепями. Представлены результаты моделирования процесса отработки позиционных и поисковых траекторий движения исполнительным органом робота.

Ключевые слова: законы управления положением рабочего органа, математическая модель, робот с параллельными кинематическими связями, траектория движения.

Введение

Особый интерес в области развития роботизированной сборки представляет перспективное направление, связанное с разработками и исследованием сборочных систем на базе роботов с параллельными кинематическими связями. При этом публикации, охватывающие вопросы сущности процесса управления манипуляционной роботизированной сборочной системой с параллельной структурой, в отечественной литературе весьма немногочисленны. Поэтому целесообразным является рассмотрение вопросов, касающихся разработки математической модели данной сборочной системы и ее исследования с помощью современных средств математического моделирования с целью получения обобщенных результатов, применимых к системам данного класса.

Одной из главных задач управления сборочным роботом является манипулирование рабочим органом, воспроизводящим траекторию совмещения присоединяемой детали в процессе сборки. Сложность реализации данной задачи зависит от: особенностей структуры сборочной системы, характера воспроизводимой траектории движения, наличия широкого спектра неопределенностей в процессе управления. Структуры механизмов с замкнутой кинематикой весьма разнообразны [1]. При проектировании сборочного робота выбор той или иной кинематической структуры зависит от требуемого числа степеней подвижности. Для простейших манипуляций (перемещений) в пространстве исполнительного органа робота минимальное число степеней подвижности соответствует трем. Поэтому в качестве базовой конструкции с параллельными связями будем рассматривать простейшего представителя семейства параллельных роботов — дельта-робота. Конструкция, некоторые особенности кинематики и рабочего пространства дельта-робота рассмотрены в работах [2, 3].

В задачу манипулирования рабочим органом входят построение динамической модели манипулятора и выбор на основе этой модели законов управления, обеспечивающих заданное поведение системы. В статье представлены основные этапы разработки математической модели сборочного дельта-робота, приведены результаты моделирования процесса воспроизведения сборочным дельта-роботом траекторий совмещения присоединяемой детали.

Разработка математической модели дельта-робота

Разработка математической модели начинается с выделения основных функциональных элементов, входящих в состав робота с тремя параллельными кинематическими

связями. На функциональной схеме (рис. 1) представлены: управляющее устройство, формирующее сигналы управления движением манипулятора; приводы первой, второй и третьей кинематических цепей, реализующие угловые перемещения входных звеньев манипулятора; механизм с тремя параллельными кинематическими связями, осуществляющий манипулирование рабочим органом робота, конструктивным исполнением которого является захватное устройство. Рассмотрим математические модели перечисленных выше элементов.

Математическая модель управляющего устройства

Управляющее устройство включает блок формирования координат X_p, Y_p, Z_p и блок преобразования координат.

Блок формирования координат X_p, Y_p, Z_p осуществляет выработку линейных координат в соответствии с заданным законом движения рабочего органа робота. Он имеет три выходных параметра $X_{pex}, Y_{pex}, Z_{pex}$, которые соответствуют положению центра рабочего органа на участке заданной траектории его движения. Его модель может быть реализована с помощью источника сигналов, изменение уровня которых соответствует зависимости заданных координат от времени. С выхода блока формирования координат сигналы $X_{pex}, Y_{pex}, Z_{pex}$ поступают в блок преобразования координат.

Блок преобразования координат осуществляет решение обратной задачи кинематики манипулятора, а именно определяет заданные перемещения $\varphi_{1ex}, \varphi_{2ex}, \varphi_{3ex}$ в активных кинематических парах для заданной траектории движения рабочего органа в соответствии с зависимостями, представленными в [2]. С выхода блока преобразования координат заданные угловые перемещения $\varphi_{1ex}, \varphi_{2ex}, \varphi_{3ex}$ поступают на приводы первой, второй и третьей кинематических цепей соответственно.

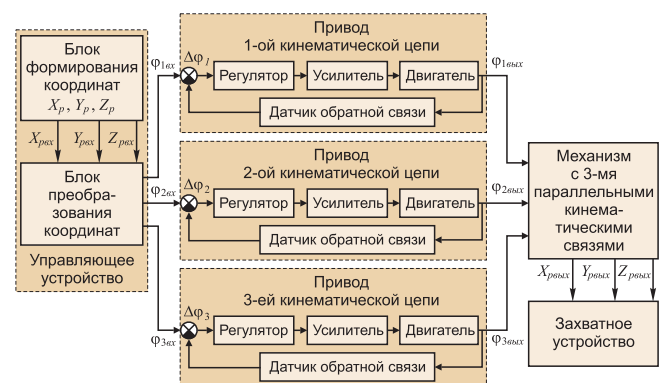


Рис. 1. Функциональная схема робота с тремя параллельными кинематическими связями

Как бы быстро ни летело время, оно движется крайне медленно для того, кто лишь наблюдает за его движением.

Сэмюэл Джонсон

Математическая модель приводов

Математическая модель привода первой кинематической цепи представлена на рис. 2.

Входными параметрами математической модели привода являются $\varphi_{1вх}$ — заданное угловое перемещение активного звена первой кинематической цепи; $M_{с1}$ — статический момент нагрузки. Основными элементами модели привода являются: ПИД-регулятор, усилитель мощности, электродвигатель, редуктор и датчик обратной связи.

Сигнал рассогласования между заданным угловым перемещением и текущим угловым положением привода первой кинематической цепи в виде напряжения поступает на вход ПИД-регулятора, реализующего пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления. Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{ПД}(p) = K_n + \frac{1}{T_u p} + \frac{T_{dp}}{T_d p + 1}.$$

ПИД-регулятор имеет следующие параметры настройки: K_n — коэффициент передачи, T_u — постоянную времени интегрирования, T_d — постоянную времени дифференцирования и $K_{на}$ — постоянную времени предварения.

С выхода ПИД-регулятора сигнал управления поступает на вход усилителя мощности, который усиливает сигнал до уровня, необходимого для управления электродвигателем. Параметры усилителя мощности: K_u — коэффициент усиления усилителя, U_m — максимальное выходное напряжение усилителя мощности. С выхода усилителя сигнал управления в виде напряжения подается на электродвигатель.

Передаточная функция электродвигателя по управлению $W(p)$, связывающая его угол поворота с напряжением управления, может быть представлена в виде:

$$W_g(p) = \frac{1}{C_E} \frac{1}{p(T_M T_{я} p^2 + T_M p + 1)},$$

где T_M — электрохимическая постоянная времени, $T_{я}$ — постоянная времени якорной цепи, C_E — коэф-

фициент противо-ЭДС. Входным параметром является выходное напряжение усилителя мощности.

Динамические процессы в двигателе зависят не только от действия управляющего сигнала в виде напряжения управления якорной цепи. Динамика привода определяется также динамическим моментом $M_{дин}$, представляющим собой результат сложения вращающего момента двигателя $M_{дв}$, момента нагрузки механизма M_n , и момента трения $M_{тр}$:

$$M_{дин} = M_{дв} + M_n + M_{тр}.$$

Передаточная функция электродвигателя по возмущению $W(p)$, связывающая его угол поворота с моментом, приложенным к оси, определяемым нагрузкой механизма имеет вид:

$$W_f(p) = \frac{R_{я}}{C_E C_M} \frac{-(1 + T_{я} p)}{p(T_{я} T_M p^2 + T_M p + 1)},$$

где T_M — электрохимическая постоянная времени, $T_{я}$ — постоянная времени якорной цепи, C_E — коэффициент противо-ЭДС, C_M — коэффициент момента, $R_{я}$ — сопротивление цепи якоря.

При исследовании динамики в режиме отработки программной траектории перемещения одного из собираемых компонентов при отсутствии контакта с базовой деталью будем полагать, что в статическом моменте нагрузки привода преобладает потенциальный момент. Тогда приближенное значение статического момента нагрузки привода без учета реактивного момента может быть рассчитано следующим образом:

$$M_c = M_n = |\vec{r}| \times |\vec{G}|,$$

где $\vec{G}$ — вес объекта манипулирования; $\vec{r}$ — радиус-вектор от оси вращения привода до точки приложения силы $\vec{G}$ — центра подвижного основания, перемещаемого по программной траектории.

Выходной параметр модели электродвигателя — отработанное угловое перемещение — поступает на вход модели редуктора. Модель редуктора представлена в виде звена с передаточной функцией:

$$W_p(p) = \frac{1}{i_p}.$$

В модели редуктора осуществляется учет зазора в механической передаче — Δ путем введения нелинейности типа "люфт". Выходным параметром модели привода первой кинематической цепи является $\varphi_{1вых}$ — отработанное угловое перемещение.

В приводе реализована обратная связь (ОС) по положению. Параметром настройки ОС является $K_{ос}$ — коэффициент обратной связи.

С выходов приводов первой, второй и третьей кинематических цепей отработанные угловые перемещения $\varphi_{1вых}$, $\varphi_{2вых}$, $\varphi_{3вых}$ поступают на вход математической модели манипулятора.

Математическая модель манипулятора

Подсистема математической модели, имитирующая манипулятор с тремя параллельными кинематическими

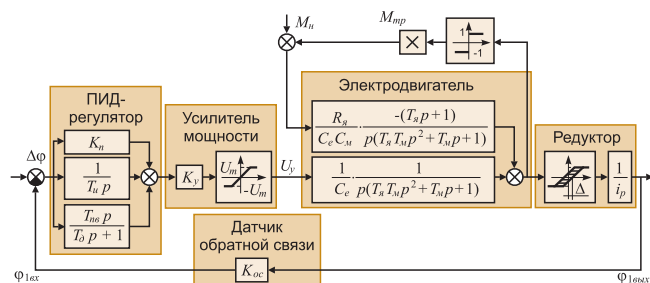


Рис. 2. Математическая модель привода 1-ой кинематической цепи

ми связями, осуществляет вычисление линейных координат центра подвижной платформы $X_{pвых}$, $Y_{pвых}$, $Z_{pвых}$ при отработке приводами угловых перемещений $\varphi_{1вых}$, $\varphi_{2вых}$, $\varphi_{3вых}$ в активных кинематических парах в соответствии с уравнениями кинематики, приведенными в [2].

Конечная точность позиционирования рабочего органа определяется не только точностью отработки угловых перемещений в активных кинематических парах манипулятора, но и погрешностями изготовления звеньев манипулятора.

Точность позиционирования, определяемая погрешностями изготовления звеньев манипулятора

Расчет ошибок позиционирования по линейным координатам X_p , Y_p , Z_p осуществляется путем вычисления следующих параметров: ΔX_{pL_1} , ΔX_{pL_2} , ΔX_{pr} — ошибок позиционирования по координате X_p ; ΔY_{pL_1} , ΔY_{pL_2} , ΔY_{pr} — ошибок позиционирования по координате Y_p ; ΔZ_{pL_1} , ΔZ_{pL_2} , ΔZ_{pr} — ошибок позиционирования по координате Z_p , определяемых погрешностями изготовления звеньев — ΔL_1 , ΔL_2 и Δr соответственно.

Формулы для вычисления во многом зависят от конструкции роботов и для упрощения изложения материала в статье не приводятся. Учет влияния погрешностей ΔL_1 , ΔL_2 и Δr на точность позиционирования манипулятора при движении по программной траектории позволяют осуществить зависимости коэффициентов влияния от угловых перемещений в активных кинематических парах. На рис. 3 приведены зависимости: 1 — зависимости коэффициентов влияния параметра ΔL_1 от соответствующего углового перемещения: φ_1 — на рис. 3, а); φ_2 — на рис. 3, б); φ_3 — на рис. 3, в); 2 — зависимости коэффициентов влияния параметра ΔL_2 от соответствующего углового перемещения: φ_1 — на рис. 3, а); φ_2 — на рис. 3, б); φ_3 — на рис. 3, в); 3 — зависимости коэффициентов влияния параметра Δr от соответствующего углового перемещения: φ_1 — на рис. 3, а); φ_2 — на рис. 3, б); φ_3 — на рис. 3, в). Как видно из графиков, точность при движении по некоторой программной траектории, определяемая погрешностями изготовления звеньев, существенно меняется на протяжении всего диапазона угловых перемещений в активных кинематических парах. При этом не исключены особые положения, безразличные к точности изготовления звеньев (в случае, когда коэффициент влияния равен нулю).

Результаты моделирования

Значения параметров элементов математической модели первой кинематической цепи приведены в

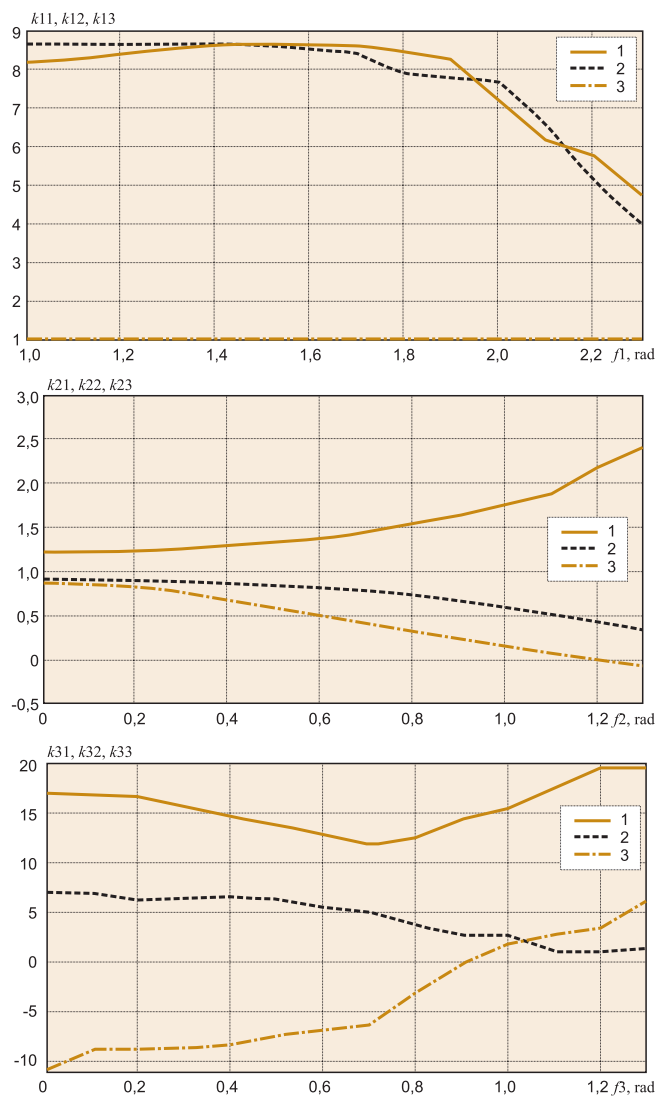


Рис. 3. Зависимости коэффициентов влияния погрешностей изготовления звеньев манипулятора от угловых перемещений в активных кинематических парах

таблице. Значения параметров второй и третьей кинематических цепей в силу симметричности конструкции принимаются соответственно равными параметрам первой цепи. Конструктивные параметры звеньев рассчитаны, исходя из оптимизации конфигурации рабочего пространства робота [2]; значения параметров нагрузки получены на основе анализа номенклатуры собираемых изделий; параметры приводов кинематических цепей представляют собой ре-

Таблица

Конструктивные параметры звеньев 1-ой кинематической цепи					Параметры нагрузки	
L_1 , м	L_2 , м	r_a , м	r_b , м	Θ_1 , °	$\vec{G}$, Н	$M_{сmax}$, Н·м
1,33	0,85	0,55	0,15	0	25	21
Параметры привода 1-ой кинематической цепи						
ПИД-регулятор				Усилитель мощности		
K_P	$T_{и}$, с	$T_{пв}$	$T_{д}$, с	K_m	U_m , В	$T_{я}$, с
1,4	50	0,15	0,001	250	110	$3,527 \cdot 10^{-4}$
				Электродвигатель постоянного тока		
				T_M , с	C_E , В·с/рад	C_E , Н·м/А
				0,143	0,163	0,163
				$R_{я}$, Ом	i_p	$K_{ос}$
				25,8	224	1

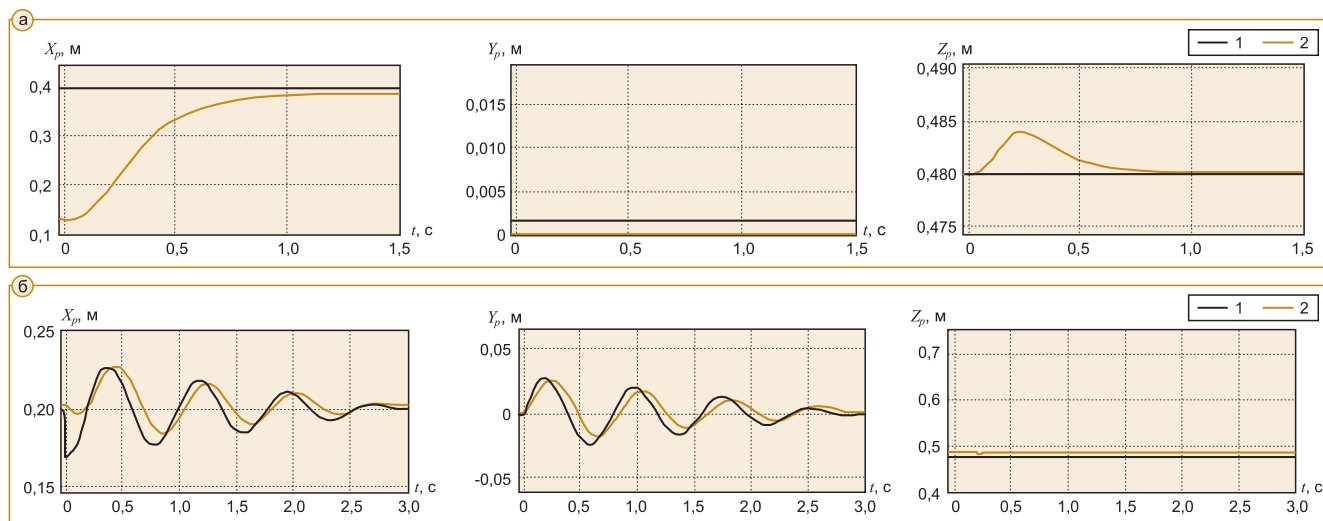


Рис. 4. Законы изменения линейных координат X_p , Y_p , Z_p центра подвижной платформы от времени при движении по прямолинейной (позиционной) траектории (а), поисковой траектории в форме спирали Архимеда (б): 1 – законы изменения заданной линейной координаты $X_{pax}(t)$, $Y_{pax}(t)$, $Z_{pax}(t)$; 2 – законы отработки перемещений по линейным координатам $X_{pвых}(t)$, $Y_{pвых}(t)$, $Z_{pвых}(t)$

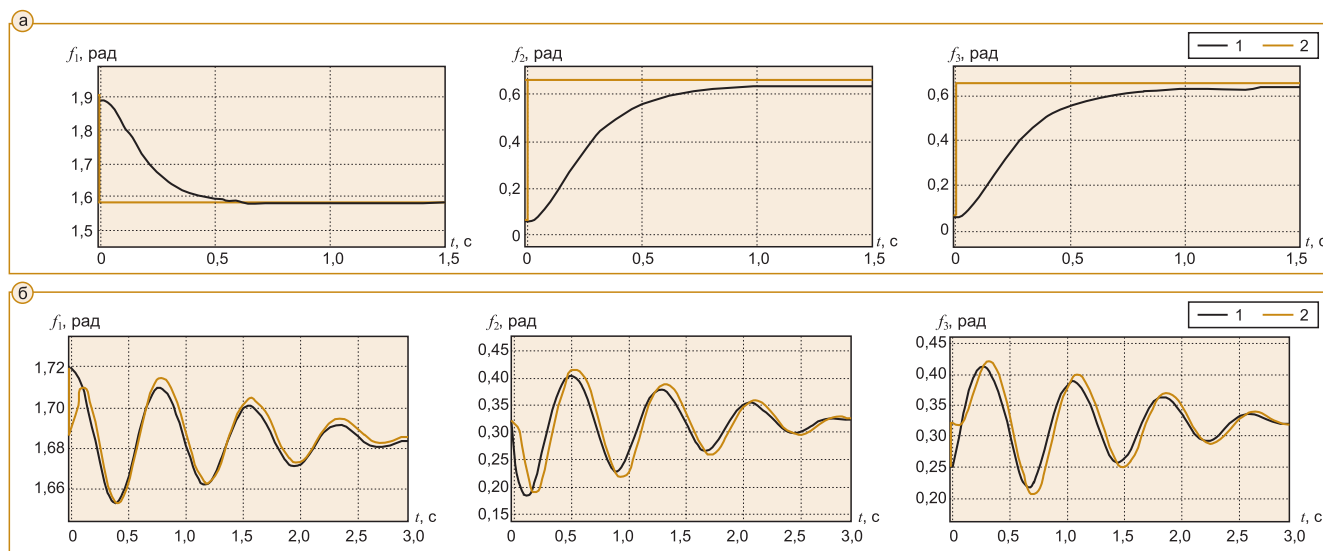


Рис. 5. Зависимости угловых перемещений ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 приводов от времени при движении по прямолинейной (позиционной) траектории – (а), поисковой траектории в форме спирали Архимеда – (б): 1 – закон изменения заданного углового перемещения $\phi_{iax}(t)$; 2 – график отработки углового перемещения $\phi_{iвых}(t)$

результаты энергетического расчета за исключением коэффициентов настройки ПИД-регулятора, подобранных в процессе моделирования перемещений рабочего органа по траекториям совмещения собираемых компонентов.

В качестве примера, демонстрирующего возможности разработанной математической модели робота, представим результаты моделирования отработки роботом некоторых движений, характерных для процесса сборки, а именно прямолинейное движение (позиционное) и движение по кривой автопоиска (спирали Архимеда). Математическое моделирование робота с тремя параллельными кинематическими связями выполнено в среде программных средств MATLAB. Представлены графики зависимо-

стей от времени перемещений (заданных и отработанных) рабочего органа робота по линейным координатам X_p , Y_p , Z_p (рис. 4 (а) – для прямолинейной траектории (позиционной); рис. 4 (б) – для траектории в форме спирали Архимеда (поисковой)), и соответствующих им угловых перемещений приводов (заданных и отработанных) для каждой кинематической цепи (рис. 5 (а) – для позиционной, рис. 5 (б) – для поисковой) при воспроизведении заданной траектории движения. Построены программная и воспроизведенная рабочим органом траектории движения робота с тремя параллельными кинематическими связями (рис. 6 (а) – для прямолинейного движения (позиционирования), рис. 6 (б) – для поискового движения).

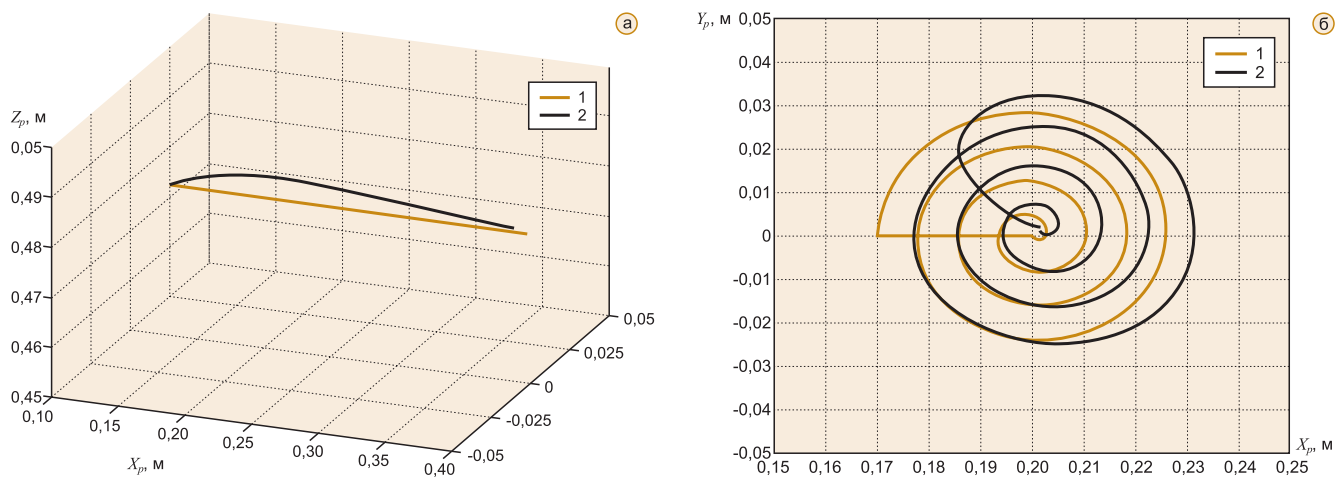


Рис. 6. Траектории движения центра подвижной платформы: прямая (позиционная) – (а), поисковая в форме спирали Архимеда – (б):
1 – программная (заданная) траектория движения; 2 – воспроизведенная (отработанная) траектория движения

Выводы

Предложенная система моделирования предназначена для решения вопросов в области управления движением рабочего органа манипулятора с параллельной кинематикой. Представленные результаты моделирования свидетельствуют о возможности внедрения манипуляторов данного класса в сферу сборки. На базе дельта-робота возможно создать сборочную систему, реализующую как метод направленного, так и ненаправленного автоматического поиска согласованного положения соединяемых деталей.

В процессе моделирования были выявлены некоторые закономерности, свойственные манипуляторам данного класса.

Во-первых, характер отработанной траектории движения существенным образом зависит от качества переходных процессов угловых перемещений в активных кинематических парах манипулятора. Исследование модели при различных параметрах настройки регуляторов приводов показало необходимость в достижении аperiodических переходных процессов отработки угловых перемещений. Наличие перерегулирований в переходных режимах может послужить причиной заклинивания механизма, особенно при движении рабочего органа вблизи окраин рабочего пространства манипулятора робота. Кроме того, существенное искривление траектории возникает вследствие наличия инерционности силовой части приводов, а также присутствия нелинейностей, обусловленных люфтами механических передач, сухим трением, ограничениями по уровню сигнала управления и присутствия помех в каналах управления.

Во-вторых, конечная точность позиционирования манипулятора определяется не только точностью отработки угловых перемещений приводами кинема-

тических цепей, но и точностью изготовления конструкции манипулятора, а именно длин кинематических звеньев и зазоров в кинематических парах. Причем влияние погрешностей изготовления звеньев существенным образом зависит от комбинаций угловых перемещений в активных кинематических парах, а следовательно, и от характера воспроизводимой траектории движения. Значительнее всего влияние сказывается на окраинах рабочего пространства, нежели в его центральной зоне.

Таким образом, разработанная математическая модель робота позволяет исследовать особенности манипуляторов с тремя параллельными кинематическими связями; дает возможность подобрать параметры звеньев манипулятора для достижения желаемых диапазонов перемещений, определяемых конфигурацией рабочего пространства; осуществляет расчет законов управления положением рабочего органа для заданной траектории движения; демонстрирует траекторию, воспроизводимую роботом; дает возможность оценить влияние негативных факторов, таких как конструктивные погрешности, нелинейности, присущие всем реальным объектам, на точность и быстродействие воспроизводимых роботом движений.

Список литературы

- 1 Бушуев В.В., Хольшев И.Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТИН. 2001. №1.
- 2 Кузнецова С.В. Анализ возможностей воспроизведения позиционных и поисковых траекторий совмещения соединяемых деталей рабочим органом робота с замкнутой кинематической цепью // Автоматизация в промышленности. 2010. №4.
- 3 Давыдова Н.С., Коновалов Д.А., Симаков А.Л. Анализ законов изменения углов отклонения входных звеньев дельта-робота при поисковом совмещении соединяемых деталей по спирали Архимеда // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. №10.

Кузнецова Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры "Приборостроение" Ковровской государственной технологической академии.
Контактный телефон (49232) 3-20-99. E-mail: svkuznecova@gmail.com