Упрощенный метод приближения функций в синтезе адаптивной системы управления упругим четырехзвенным манипуляционным роботом с исполнительными электроприводами

Нгуен Дык Фу, В. В. Путов, Чу Чонг Шы
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
e-mail: Phubongchut@gmail.com

***Аннотация*. Разработана адаптивная система управления упругим четырехзвенным манипуляционным роботом с исполнительными электроприводами типовой конструкции, синтезированная на основе пошагового синтеза и метода приближения функций. В докладе предлагается упрощенная модификация известного метода приближения функции, позволяющая снизить порядок синтезированной адаптивной системы и объем вычислений. Приведены результаты сравнительного компьютерного исследования эффективности исходного модифицированного методов приближения функций в задаче управления динамикой четырехзвенного упругого манипуляционного робота.**

Ключевые слова: упругий четырехзвенный манипуляционный робот; исполнительный электропривод; метод приближения функций

I. Введение

В докладе представлена разработка адаптивной системы управления упругим многозвенным манипуляционным роботом с исполнительными электроприводами обеспечивающая устойчивость и удовлетворительное качество аттрактивности в широком диапазоне изменения массоинерционных параметров манипулятора.

В начале 1990-х годов сформировался новый подход в синтезе адаптивных систем названным методом пошагового синтеза адаптивных систем с методом адаптивного обхода интегратора, в том числе, с функциями настройки [2−4], ставший весьма популярным в синтезе адаптивных систем управления нелинейными объектами каскадной структуры, доставляя возможность синтеза законов управления и алгоритмов адаптации для каскадных подобъектов и избавляя от необходимости громоздкого синтеза объединенной системы [5, 6], базируясь на представлении нелинейного объекта управления как многозвенного жёсткого манипулятора робота, каскадно соединенного посредством упругих связей с исполнительными электроприводами степеней подвижности, в докладе применен указанный пошаговый синтез метод и показана возможность его реализации.

В традиционном подходе к построению точных алгоритмов адаптивного управления манипуляционными роботами без учета динамики привода, как правило, предполагается, что модель робота линейно параметризуется в форме регрессора [5−7], однако такой подход является довольно сложным и громоздким в расчетах.

В начале двухтысячных годов заявляется новый подход к синтезу адаптивных систем управления сложными нелинейными объектами, параметризованными так называемым методом приближения функций (МПФ) (или прямым методом), довольно простым в реализации [8, 9]. Однако алгоритмы управления, синтезированные МПФ, требуют большого вычислительного ресурса для реализации в силу их высокой размерности, поэтому в докладе предлагается новая упрощенная модификация метода приближения функций, позволяющая снизить размерность задачи и объем вычислений.

II. Постановка задачи управления и основы МПФ

Дифференциальные уравнения, описывающие упругий четырехзвенный манипуляционный робот с исполнительными электроприводами, имеют вид:

$$D(q)\ddot{q}+C(\dot{q},q)\dot{q}+G(q)=\tau \qquad (1а)$$

$$J_t\ddot{\tau}+B_t\dot{\tau}+\tau=I-f_q(\dot{q},\ddot{q}) \qquad (1б)$$

$$L\dot{I}+RI+K\dot{q}=u \qquad (1в)$$

где $\tau=K_c(a-q)$; $J_t=JK_c^{-1}$; $B_t=K_bK_c^{-1}$; $I=K_mI_я$; $f_q(\dot{q},\ddot{q})=J\ddot{q}+K_b\dot{q}$; $L=L_яK_m^{-1}$; $R=R_яK_m^{-1}$; $K=K_e$; q − 4-мерные вектор обобщённых координат (углов вращения сочленений) манипулятора; D, C − 4x4 функциональные матрицы инерции манипулятора, и кориолисовых и центробежных сил; G, τ, a, $I_я$ − 4-мерные векторы гравитационных сил; обобщённых сил, создаваемых силовыми приводами в сочленениях манипулятора; обобщённых координат (углов вращения) роторов; и токов якоря; $K_c, J, K_b, L_я, R_я, K_m, K_e$ − 4x4 диагональные постоянные матрицы, определяемые соответственно коэффициентами упругости трансмиссий, моментами инерции электроприводов, вязким трением, индуктивностью, активным сопротивлением якорных цепей электроприводов и конструктивными данными электрических машин; $u_я$ − 4-мерные вектор напряжений усилителей мощности.

Цель управления заключается в построении закона управления, обеспечивающего следующее целевое неравенство:

$$\left|q_i(t) - qd_i(t)\right| \le \varepsilon, \quad i = \overline{1,4}, \quad \forall t \ge \mathrm{T},$$

где ε − ошибка, характеризующая точность управления; Т − заданное время настройки, $qd_i(t)$ − заданный (желаемый) угол вращения каждого звена.

Полагаем, что все параметры в матрицах *D, C, G, L, R*, и *K* постоянны, неизвестны и характеризуются известной интервальной неопределенностью, и компоненты векторов $q, \dot{q}, I$ доступны измерению.

Из уравнений (1,*а,б,в*) очевидно, что система имеет каскадную структуру соединения; это позволяет использовать пошаговой синтез «backstepping».

Метод приближения функций основан на том, что любая определенная и ограниченная функция *f(t)* может быть аппроксимирована с произвольно заданной точностью (ε) конечными линейными комбинациями ортонормированного базиса $\{z_i(t)\}$ как

$$f(t) = \sum_{1}^{n} w_i z_i(t) + \varepsilon = w^T z(t) + \varepsilon \, ;$$

$$z(t) = \left[z_1(t) \cdots z_n(t)\right]^T ; \, w = \left[w_1 \cdots w_n\right]^T ,$$

где ε – ошибка преобразования (аппроксимации). При условии, что используется достаточное количество базисных функций (*n*), функция приближения *f(t)* может быть записана как:

$$\hat{f}(t) = \hat{w}^T z(t) \tag{3}$$

В синтезе управления уравнение (3) используется для представления изменяющихся во времени параметров $f(t)$ (переменных параметров) в виде линейной комбинации компонентов ортонормированного базисного вектора $z(t)$ по компонентам неизвестного постоянного весового вектора w. Таким образом, оценки неизвестной изменяющейся во времени функции $f(t)$ сводится к оценке вектора неизвестных постоянных w.

Пусть все элементы вектора ($f(t)$) – определенные и ограниченные функции времени, что удовлетворяет всем элементам матриц и векторов в математической модели объекта (1,*а, б, в*).

Предположим, что все элементы некоего m-мерного вектора *A* аппроксимируются с использованием одного и того же числа разложений (β) и полинома с ортонормированными функциями, тогда вектор *A(t)* можно представить в общепринятом виде произведения матриц

$$A = \{A_i\} = W_A^T Z_A + \varepsilon \tag{4}$$

где ε − ошибка приближения; W_A^T и Z_A имеет следующий вид:

$$W_A^T = \begin{bmatrix} w_1^T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_m^T \end{bmatrix}^T ; \; Z_A = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \cdots & z_m \end{bmatrix}^T$$

каждые элементы этих матриц – это β-мерный вектор как в (3).

Очевидно, что

$$W_A^T Z_A = \begin{bmatrix} w_1^T z_1 & w_2^T z_2 & \cdots & w_m^T z_m \end{bmatrix};$$

$$A_i = w_i^T z_i = \sum_{k=1}^{\beta} w_{i_k}^T z_{i_k} + \varepsilon_i$$

$W_A^T - m\beta$xm -мерная матрица неизвестных весовых параметров; $Z_{L_1} - m\beta$ -мерный вектор известных базовых функций.

III. Синтез алгоритма адаптивного управления

<u>*Шаг 1*</u> − *Найти закон управления τ в* (1a).

Уравнение (1a) можно преобразовать следующим образом:

$$\ddot{q} = \tau_d + e_\tau + L_1 \tag{5}$$

где

$$L_1 = \left[E_4 - D(q)\right]\ddot{q} - C(\dot{q}, q) - G(q) \, ,$$

$$e_\tau = \tau - \tau_d \, .$$

E − единичная матрица, τ_d − вектор желаемых восстанавливающих сил (моментов) упругих связей.

Будем искать закон управления для τ_d имеет вид

$$\tau_d = -K_p q - K_d \dot{q} + K_p \upsilon(t) \tag{6}$$

где $\upsilon(t)$ − некий сигнал управления для получения $\tau \to \tau_d$, K_p и K_d – положительно определенные матрицы пропорциональной и дифференциальной частей.

Уравнение (5) с учетом (6) можно преобразовать к виду:

$$\dot{x}(t) = \mathrm{A}_0 x(t) + B_0\left[e_\tau + K_p \upsilon(t) + \mathrm{L}_1\right] \tag{7}$$

где

$$x(t) = \begin{bmatrix} q^T & \dot{q}^T \end{bmatrix},$$

$$\mathrm{A}_{0[8\mathrm{x}8]} = \begin{bmatrix} 0_4 & E_4 \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}; \; \mathrm{B}_{0[8\mathrm{x}4]} = \begin{bmatrix} 0_4 \\ E_4 \end{bmatrix}.$$

Видно, что при выборе (6), (1a) преобразуется в некую квази-линейную систему (7). Будем искать закон управления $\upsilon(t)$ так, чтобы (7) становилась линейной и управляемой.

<u>*Шаг 2*</u> − *Найти закон управления* υ *в* (6).

В качестве эталонной модели системы (7) возьмем

$$\dot{x}_d(t) = A_0 x_d(t) + B_0 K_p \upsilon_d(t), \tag{8}$$

где:

$$\upsilon_d(t) = K_p^{-1}(\ddot{q}_d + K_d \dot{q}_d + K_p^{-1} q_d). \tag{9}$$

Из (7) и (8) следует

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A_0 \tilde{x}(t) + B_0 \left[e_\tau + K_p L_2 + L_1 \right], \tag{10}$$

где $\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t)$; $L_2 = \upsilon(t) - \upsilon_d(t)$.

Так как все элементы матриц *D, C* и *G* непрерывно ограниченны, выражение L_1 можно переписать следующим образом с использованием (4):

$$L_1 = W_{L_1}^T Z_{L_1} + \varepsilon_{L_1};$$

$W_{L_1}^T - 4\beta_{L_1}$x4 - мерная матрица; $Z_{L_1} - 4\beta_{L_1}$ -мерный вектор; β_{L_1} – число разложения (размерность) функционального вектора L_1.

Из соотношения между векторами L_1 и L_2 в (10), L_2 строена так, чтобы система (10) была устойчива. Для этого положим:

$$L_2 = -K_p^{-1} \hat{W}_{L_1}^T Z_{L_1}.$$

Тогда (10) имеет вид:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A_0 \tilde{x}(t) + B_0 \left(e_\tau + \tilde{W}_{L_1}^T Z_{L_1} + \varepsilon_{L_1} \right) \tag{11}$$

где $\tilde{W}_{L_1} = W_{L_1} - \hat{W}_{L_1}$.

Видно, что при выборе (9), (7) сближается с (11). Система (11) будет устойчива, если пара (A_0, B_0) – управляемая и возможно найти такой закон настройки для $\hat{W}_{L_1}$ так, чтобы $\hat{W}_{L_1} \to W_{L_1}$.

Шаг 3 – Найти закон управления по I в (1б).

Чтобы найти закон управления для *I*, построим следующую эталонную модель системы (1б):

$$J_r \ddot{\tau}_r + B_r \dot{\tau}_r + K_r \tau_r = J_r \ddot{\tau}_d + B_r \dot{\tau}_d + K_r \tau_d, \tag{12}$$

где τ_r – вектор состояния эталонной модели (12); J_r, B_r, K_r – 4x4-мерные матрицы, выбранные так, чтобы τ_r стремилось к τ_d.

Уравнения (1б) и (12) можно переписать следующим образом:

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p I - B_p f_q, \tag{13а}$$

$$\dot{x}_м = A_м x_м + B_м(\tau_d + f_\tau); \tag{13б}$$

где

$$x_{p[8x1]} = \left[\tau^T \quad \dot{\tau}^T \right]^T; \; x_{м[8x1]} = \left[\tau_r^T \quad \dot{\tau}_r^T \right]^T; \; f_\tau = K_r^{-1}(J_r \ddot{\tau}_d + B_r \dot{\tau}_d);$$

$$A_{p[8x8]} = \begin{bmatrix} 0_{4x4} & E_{4x4} \\ -J_t^{-1} & -J_t^{-1} B_t \end{bmatrix}; \; A_{м[8x8]} = \begin{bmatrix} 0_{4x4} & E_{4x4} \\ -J_r^{-1} K_r & -J_r^{-1} B_r \end{bmatrix};$$

$$B_{p[8x4]} = \begin{bmatrix} 0_{4x4} \\ J_t^{-1} \end{bmatrix}; \; B_{м[8x4]} = \begin{bmatrix} 0_{4x4} \\ J_r^{-1} K_r \end{bmatrix}.$$

Пусть $\tau = C_p x_p$; $\tau_r = C_м x_м$ – выходной вектор системы (13а) и (13б), тогда $C_p = C_м = \left[E_{4x4} \quad 0_{4x4} \right]$. Для системы (13б) считаем пару $(A_м, B_м)$ управляемой, а пару $(A_м, C_м)$ наблюдаемой. Тогда для адаптивной системы с эталонной моделью [9–11] желаемое I_d будем выбирать в следующем виде:

$$I_d = \Theta x_p + \Phi \tau_d + \hat{h}(f_q, f_\tau) \tag{14}$$

где Θ и Φ – матрицы, удовлетворяющие условиям $A_p + B_p \Theta = A_м$ и $B_p \Phi = B_м$; $h(f_q, f_\tau) = \Phi f_\tau + f_q$.

Подставив (14) в (13а), получаем:

$$\dot{x}_p = A_м x_p + B_м(\tau_d + f_\tau) + B_p(I - I_d)$$

Пусть $e_м = x_p - x_м$ тогда (13) можно преобразовать следующим образом:

$$\dot{e}_м = A_м e_м + B_p e_I + B_p(\hat{h} - h) \tag{15}$$

$$e_\tau = C_м e_м.$$

где $e_I = I - I_d$.

Видно, что при выборе (14), система (1б) представляется в виде (15). Система (15) будет устойчива, если пара (A_M, B_p) – управляемая и возможно найти такий закон настройки для $\hat{h}$, чтобы $\hat{h} \to h$.

Шаг 4 – Найти закон управления u в (1в).

Будем искать закон управления *u* в следующем виде:

$$u = \hat{L} \dot{I}_d + \hat{R} I + \hat{K} \dot{q} - K_c e_I.$$

Введем следующие дополнительные переменные:

$$\hat{f}(\dot{I}_d, I, \dot{q}) = \hat{L} \dot{I}_d + \hat{R} I + \hat{K} \dot{q}$$

тогда

$$u = \hat{f} - K_c e_I \tag{17}$$

Поставляя (17) в (1в), получаем

$$L \dot{e}_I + K_c e_I = \hat{f} - f. \tag{18}$$

Видно, что при выборе (17) система (1в) представляется в виде (18). Система (18) будет устойчива, если выбрать $K_c > 0$ и мы смогли найти такой закон настройки для $\hat{f}$ так, чтобы $\hat{f} \to f$. Известно, что $L > 0$.

Доказательство асимптотической устойчивости тривиального решения построенной адаптивной системы с ниже найденными законами настройки для $\hat{W}_{L_1}$, $\hat{h}$ *и* $\hat{f}$.

Сделаем следующее преобразование как в (4):

$$h = W_h^T Z_h + \varepsilon_h; \; f = W_f^T Z_f + \varepsilon_f,$$

где $W_h^T, W_f^T - 4\beta_h$x4 и $4\beta_f$x4 -мерные матрицы; Z_h, Z_f – $4\beta_h$ и $4\beta_f$ -мерные векторы; β_f, β_h – числа разложения функциональных векторов f и h.

Рассмотрим следующую функцию Ляпунова:

$$V(\tilde{x}, e_м, e_I, \tilde{W}_{L_1}, \tilde{W}_h, \tilde{W}_f) = \frac{1}{2} \left[\tilde{x}^T P \tilde{x} + e_м{}^T P_t e_м + e_I^T L e_I \right] +$$

$$+\frac{1}{2}\left[Tr(\tilde{W}_{L_1}^T \Gamma_{L1} \tilde{W}_{L_1}) + Tr(\tilde{W}_h^T Q_h \tilde{W}_h) + Tr(\tilde{W}_f^T \Gamma_f \tilde{W}_f)\right]$$

где $\Gamma_{L_1} \in \Re^{4\beta_{L_1} x 4\beta_{L_1}}; Q_h \in \Re^{4\beta_h x 4\beta_h}; \Gamma_f \in \Re^{4\beta_f x 4\beta_f}$ – положительно определенные весовые матрицы.

Тогда

$$\dot{V}(\tilde{x}, e_M, e_I, \tilde{W}_{L_1}, \tilde{W}_h, \tilde{W}_f) = -\frac{1}{2}\tilde{x}^T Q \tilde{x} - e_I^T K_c e_I + \tilde{x}^T P B_0 e_\tau + \tilde{x}^T P B_0 \varepsilon_{L_1} +$$
$$+ e_\tau^T e_I + e_\tau^T \varepsilon_2 + e_I^T \varepsilon_3 - Tr\left[\tilde{W}_{L_1}^T (\Gamma_{L1} \dot{\hat{W}}_{L_1} - Z_{L_1} \tilde{x}^T P B_0)\right] +$$
$$- Tr\left[\tilde{W}_h^T (Z_h e_M^T P_t B_p + Q_h \dot{\hat{W}}_h)\right] - Tr\left[\tilde{W}_{f_1}^T (\Gamma_f \dot{\hat{W}}_f + Z_f e_I^T)\right] \quad (19)$$

Если принять $B_M = B_p$, тогда $e_M^T P_t B_p = e_\tau^T$ (следует из (13)) и в (19) матрица P будет выбрана так, чтобы Q была определено положительной матрицей

$$A_0^T P + P A_0 = -Q.$$

При выборе следующих законов настройки:

$$\dot{\hat{W}}_{L_1}^T = \Gamma_{L_1}^{-1}(Z_{L_1} \tilde{x}^T P B_0 - \sigma_{L_1} \hat{W}_{L_1}); \quad (20а)$$

$$\dot{\hat{W}}_h = -Q_f^{-1}(Z_h e_\tau^T + \sigma_h \hat{W}_h); \quad (20б)$$

$$\dot{\hat{W}}_f^T = -\Gamma_f^{-1}(Z_f e_I^T + \sigma_f \hat{W}_f), \quad (20в)$$

получаем

$$\dot{V} = -X \Lambda_1 X^T + X \Lambda_2 \varepsilon_s + \sigma_{L_1} Tr(\tilde{W}_{L_1}^T \hat{W}_{L_1}) + \sigma_h Tr(\tilde{W}_h^T \hat{W}_h) + \sigma_f Tr(\tilde{W}_f^T \hat{W}_f),$$

где:

$$X = \begin{bmatrix} \tilde{x}^T & e_\tau^T & e_I^T \end{bmatrix}; \varepsilon_s^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{L_1}^T & \varepsilon_2^T & \varepsilon_3^T \end{bmatrix};$$

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}Q & -\frac{1}{2}PB_0 & 0_{8x4} \\ -\frac{1}{2}(PB_0)^T & -0_4 & -\frac{1}{2}E_4 \\ 0_{4x8} & -\frac{1}{2}E_4 & K_c \end{bmatrix}; \Lambda_2 = \begin{bmatrix} PB_0 & 0_{8x4} & 0_{8x4} \\ 0_{8x4} & E_4 & 0_4 \\ 0_{8x4} & 0_4 & E_4 \end{bmatrix}.$$

При правильном выборе K_C, P и $\sigma_{(.)}$ можно обеспечить $\dot{V} < 0$, где $\sigma_{(.)}$– положительные числа, являющиеся сигма-модификациями (σ-modification) соответствующих матриц или векторов (.); они подбираются по условию сохранения робастности системы управления с ошибкой приближения и учетом внешнего возмущения [9, 10].

Принимая законы управления в виде (6), (9), (14) и (17), и законы настройки в виде (20) и соответствующем выборе K_p, K_d, K_C, J_r, B_r, K_r, P и $\sigma_{(.)}$ будет иметь место $V > 0$ и $\dot{V} < 0$, следовательно, можно утверждать, что тривиальное решение синтезированной адаптивной системы асимптотически устойчиво [10].

Замечание: Данный метод синтеза управления не требует вычисления матрицы регрессора, но требует измерения угловых скоростей вращения каждого звена манипулятора. По сравнению с прямым МПФ [8, 9] данный упрощенный метод уменьшает размерности матриц (от $4^2\beta x4$ до $4\beta x4$, т.е. в 4 раза) в законе управления и законах настройки, что позволяет снизить объем вычислений.

IV. Результаты компьютерного моделирования

В качестве номинальных параметров (или средних значений) объекта были выбраны следующие значения: m_1=50 кг; m_2=30 кг; m_3=20 кг; m_4=10 кг; Ix_1=0.1 кг.м^2; Iy_1=0.1 кг.м^2; Iz_1= 0.1 кг.м^2; Ix_2=0.07 кг.м^2; Iy_2=0.07 кг.м^2; Iz_2=0.07 кг.м^2; Ix_3=0.05 кг.м^2; Iy_3=0.05 кг.м^2; Iz_3=0.05 кг.м^2; Ix_4=0.03 кг.м^2; Iy_4=0.03 кг.м^2; Iz_4=0.03 кг.м^2; l_1 = 0.4 м; l_2 = 1.5 м; l_3 = 1.2 м; l_4 = 0.6 м; r_1 = 0.2 м; r_2 = 0.7 м; r_3 = 0.6 м; r_4 = 0.3 м; g = 9.8м/с^2; L_{0i}= 0.025 Гн; R_{0i}=1 Ом; $K_{м0i}$=10 Н.м/А; K_{b0i}=5 Н.м.с/рад; . J_{0i}= 0.02 кг.м^2; K_{c0i}=100 Н.м/рад; K_{e0i}=1 В.рад/с; $i = \overline{1,4}$.

Для оценки качества функционирования разработанной адаптивной системы управления робота-манипулятором были рассчитаны ошибки выполнения им движения по заданной траектории в течение заданного времени $t_в$ по формуле:

$$A = \int_0^{t_в} |e(t)| dt = \sum_{i=1}^{4} \int_0^{t_{вi}} |q_i(t) - q_{di}(t)| dt.$$

Для параметров управления были выбраны следующие значения (полином Лежандра) $\beta_f = 5$: $K_d = 6 \cdot 10^4 diag(1, 1, 1, 0.1)$; $K_p = 2 \cdot 10^6 diag(1, 1, 1, 0.1)$; $K_c = 18E_4$; $P = 0.1E_8$; $Q_h = E_4$; $J_r = 10^{-4} diag(1, 1, 1, 0.1)$; $B_r = diag(2, 2.5, 6, 4)$; $K_r = 10^3 E_4$; $\omega_0 = \pi/10$; $\Gamma_{L_1}^{-1} = \Gamma_f^{-1} = 0.1E_{20}$; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 22$.

Воспроизведение движения схвата робота по окружности показано на рис. 1.

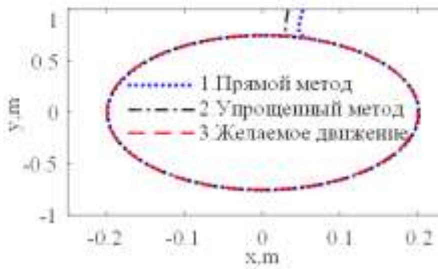

Рис. 1. Воспроизведение движения схвата робота по окружности

Результаты расчета значений ошибки A приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I ОШИБКА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ [РАД.С.]

Воздействие		m_{04}/m_4		
		1/3	**1**	**3**
Ступенчатое	*	0.1214	0.1231	0.1287
	**	0.1866	0.1900	0.1906
Синусоидальное	*	0.1239	0.1270	0.1368
	**	0.1927	0.1953	0.2039
По окружности	*	0.0494	0.0509	0.0559
	**	0.0757	0.0770	0.0798

a. * - расчет по упрощенному МПФ, ** - расчет по прямому МПФ.

Как показано на рисунке и в таблице, разработанная адаптивная система имеет высокое качество (ошибки порядка 0.12) при различных условиях, тогда как для адаптивной системы, построенным известным прямым методом приближения функций, ошибка имеет большее значение при одном и том же коэффициенте управления. Параметры управления были получены пошаговым методом синтеза, что позволяет сэкономить время синтеза системы и ограничить ошибки в ее разработке.

V. Заключение

В докладе была разработана адаптивная система, базирующаяся на методе адаптивного пошагового синтеза и упрощенного метода приближения функций. Данная система, как и процедура синтеза, имеют несомненное практическое значение благодаря простоте и умеренным требованиям к объему вычислительного ресурса.

Список литературы

[1] Ozgoli S., Taghirad H.D. A survey on the control of flexible joint robots // Asian J. Control. 2006. 8(4), pp. 1–15.

[2] Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. and Morse A.S., "Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems // in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36, no. 11, pp. 1241-1253, Nov. 1991.

[3] Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Adaptive nonlinear control without overparametrization// Systems & Control Letters Volume 19, Issue 3, September 1992, Pages 177-185

[4] Kokotovic P.V. The Joy of Feedback: Nonlinear and Adaptive // 1991 Bode Price Lecture, IEEE Control Systems Magazine, 1991. Vol. 12. pp. 7-17.

[5] Qinglei Hu, Liang Xu, Aihua Zhang Adaptive backstepping trajectory tracking control of robot manipulator // Journal of the Franklin Institute. 2012. Vol. 349. Issue 3. pp. 1087-1105.

[6] Patel B., Pan Y. and Ahmad U. Adaptive backstepping control approach for the trajectory tracking of mobile manipulators // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Macau, 2017, pp. 1769-1774.

[7] J.-J. E. Slotine and W. Li, On the adaptive control of robot manipulators // The International Journal of Robotics Research, vol. 6, no. 3, pp. 49–59, Sep. 1987.

[8] Huang A.C., Kuo Y.S. Sliding control of nonlinear systems containing time-varying uncertainties with unknown bounds // International Journal of Control. 2001. vol. 74, no. 3, pp. 252-264.

[9] Huang A.C., Chien M.C. Adaptive Control of Robot Manipulators: A Unified Regressor-free Approach // Singapore: World Scientific. 2010. 276 pages.

[10] Ioannou P. and Sun J. Robust Adaptive Control // Prentice Hall, Inc in 1996 (out of print in 2003), 848 pages, Available at: http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/Robust_Adaptive_Control.htm (accessed: 12.07.2019).

[11] Roy S.B., Bhasin S., & Kar I.N. Combined MRAC for Unknown MIMO LTI Systems With Parameter Convergence // IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(1), pp. 283–290.