УДК 62-503.57

Comparative Analysis of the Regulator Parameters Adaptation Methods of the Control System of the Robot Manipulator

Ruslan T. Galemov* and Gennadiy B. Masalsky
Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 19.01.2017, received in revised form 27.03.2017, accepted 16.05.2017

In case of action of internal and external uncontrollable influences the control of the multi-axis robot manipulator requires continuous adaptation of the controller. The methods of adaptation of the classical PID-regulator on the basis of a direct search method, namely, the simplex invariant method are offered. The structure of the offered algorithms is similar to the structure of the known algorithms on the basis of artificial neural networks. Two configurations of the adaptive PID-regulator are considered: in the first direct setup of coefficients is carried out; in the second an additional influence which is added to the PID-regulator output is created in the function of the error of tracking. In this paper the two-link robot manipulator with loading in a gripper is used as a control object. The comparison of the paths of the movement of the robot with use of different adaptive regulators on the basis of artificial neural networks and a simplex invariant method is provided. The results of the control of the robot manipulator with a permanent and alternating load are given, zones of effective application of the offered adaptation algorithms are defined. Mathematical simulation showed that the offered method effectively solves adaptation problems in the conditions of drift of the parameters of the robot manipulator.

Keywords: robot manipulator, simplex invariant method, PID-regulator, parameter tuning, artificial neural network.

Citation: Galemov R.T., Masalsky G.B. Comparative analysis of the regulator parameters adaptation methods of the control system of the robot manipulator, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(4), 508-522. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-4-508-522.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: galemovruslan@gmail.com

Сравнительный анализ методов адаптации параметров регулятора системы управления робота-манипулятора

Р.Т. Галемов, Г.Б. Масальский
Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

При действии внутренних и внешних неконтролируемых воздействий управление многозвенным манипулятором требует постоянной адаптации регулятора. Предложены методы адаптации классического ПИД-регулятора на основе алгоритма поисковой оптимизации, а именно симплексного инвариантного метода. Структура предложенных алгоритмов совпадает со структурой известных алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей. Рассмотрены две конфигурации адаптивного ПИД-регулятора: в первой осуществляется непосредственная настройка коэффициентов; во второй в функции ошибки слежения формируется дополнительное воздействие, которое суммируется с выходом ПИД-регулятора. В работе в качестве объекта управления использован двухзвенный робот-манипулятор с нагрузкой в схвате. Представлено сравнение траекторий движения робота с применением различных адаптивных регуляторов на основе нейронных сетей и симплексного инвариантного метода. Приведены результаты управления манипулятором с постоянной и переменной нагрузкой, определены зоны эффективного применения предложенных алгоритмов адаптации. Математическое моделирование показало, что предлагаемый метод эффективно решает задачи адаптации в условиях дрейфа параметров робота-манипулятора.

Ключевые слова: робот-манипулятор, симплексный инвариантный метод, ПИД-регулятор, настройка параметров, нейронная сеть.

Введение

Цель данной статьи – выбор эффективной системы управления манипулятором, основанной на адаптивном ПИД-регуляторе. Робот-манипулятор есть нелинейная динамическая система, и для его управления часто используют методы, основанные на линеаризации обратной связи [1]. Для эффективного управления необходимо знать точные динамические характеристики манипулятора, такие как, например, тензоры инерции звеньев при переменной нагрузке и коэффициенты трения в сочленениях. В реальной практике определение значений этих характеристик крайне трудозатратный процесс. Их влияние соответствует дрейфу параметров объекта управления. Один из подходов адаптивного управления подобными системами является ПИД-регулятор с настройкой параметров в реальном масштабе времени. Настройка регулятора может производиться нейронной сетью [2, 3], нечеткой логикой [4], нейро-нечеткой сетью [5].

В данной статье разработана процедура адаптации параметров регулятора на основе симплексного инвариантного метода [6], приведены результаты моделирования и сравнение с другими системами управления манипуляторами, основанными на ПИД-регуляторе.

Методы адаптации

В общем случае динамика n -звенного манипулятора описывается нелинейным уравнением

$$\tau(t) = \mathbf{M}(\mathbf{q}(t)) \cdot \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{V}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{G}(\mathbf{q}(t)) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}(t)), \quad (1)$$

где $\tau(t)$ – вектор $n \times 1$ моментов в сочленениях, Нм, $\mathbf{q}(t)$ – вектор $n \times 1$ угловых координат в сочленениях, рад; $\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))$ – матрица $n \times n$ инерций звеньев манипулятора; $\mathbf{V}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$ – вектор $n \times 1$ кориолисовых и центробежных сил; $\mathbf{G}(\mathbf{q}(t))$ – вектор $n \times 1$ гравитационных сил; $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}(t))$ – вектор $n \times 1$ сил трения в сочленениях.

Параметры уравнения (1) зависят от многих неконтролируемых возмущений, например тензоры инерции звеньев при переменной нагрузке и коэффициенты трения в сочленениях, а следовательно, изменяются во времени с различной интенсивностью. В этой связи разработаны различные подходы адаптации параметров системы управления манипулятором [2-5].

Рассмотрим непрерывную систему управления на основе классического ПИД-регулятора (рис. 1).

ПИД-регулятор реализует управление

$$\tau(t) = (\mathbf{K}_{p0} + \Delta\mathbf{K}_p(t)) \cdot \mathbf{e}(t) + (\mathbf{K}_{i0} + \Delta\mathbf{K}_i(t)) \cdot \int_0^t \mathbf{e}(t) dt + (\mathbf{K}_{d0} + \Delta\mathbf{K}_d(t)) \cdot \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $\mathbf{K}_{p0}$, $\mathbf{K}_{i0}$, $\mathbf{K}_{d0}$ – векторы $n \times 1$ пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов регулятора соответственно; $\Delta\mathbf{K}(t)_p$, $\Delta\mathbf{K}_i(t)$, $\Delta\mathbf{K}_d(t)$ – векторы $n \times 1$ приращения коэффициентов регулятора; $\mathbf{e}(t) = (\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t))$ – вектор $n \times 1$ ошибки слежения, рад; $\mathbf{q}_d(t)$ – вектор $n \times 1$ заданных значений угловых координат, рад; $\mathbf{q}(t)$ – вектор $n \times 1$ текущих значений угловых координат, рад; $\dot{\mathbf{q}}(t)$ – измеренный вектор $n \times 1$ значений скоростей, рад/с.

Адаптация параметров регулятора реализуется в соответствии с критерием (целевой функцией)

$$\mathbf{Q}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^2(t) \rightarrow \min_{\Delta\mathbf{K}(t) \in \mathbf{K}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{K} = \{ \Delta\mathbf{K}(t) : \Delta\mathbf{K}(t) \in E^3, \Delta\mathbf{K}_{\min} \leq \Delta\mathbf{K}(t) \leq \Delta\mathbf{K}_{\max} \}$.

Рис. 1. Структурная схема непрерывной системы управления манипулятором на основе классического ПИД-регулятора без адаптации (ПИД)

Первая схема адаптации предусматривает коррекцию векторов приращений коэффициентов регулятора относительно векторов базовых значений коэффициентов $\mathbf{K}_{p0}$, $\mathbf{K}_{i0}$, $\mathbf{K}_{d0}$ (рис. 2).

При настройке регулятора нейронной сетью ПИД-регулятор представляет собой однослойную нейронную сеть (рис. 3).

В качестве адаптера используется алгоритм обратного распространения ошибки на основе градиентного метода [3].

Настройка параметров регулятора происходит по выражению

$$\begin{aligned} K_{pj}(t) &= K_{pj0} + \eta_{pj} \cdot \int_0^t \frac{\partial Q_j}{\partial K_{pj}} dt, \\ K_{ij}(t) &= K_{ij0} + \eta_{ij} \cdot \int_0^t \frac{\partial Q_j}{\partial K_{ij}} dt, \\ K_{dj}(t) &= K_{dj0} + \eta_{dj} \cdot \int_0^t \frac{\partial Q_j}{\partial K_{dj}} dt, \\ j &= 1, n \text{ - номер сочленения,} \end{aligned} \quad (4)$$

Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления с настройкой параметров ПИД-регулятора нейронной сетью (ПИД-НС)

Рис. 3. Структура нейронной сети ПИД-регулятора

где η_{pj} , η_{ij} , η_{dj} – векторы $n \times 1$ скоростей обучения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих для j -го сочленения соответственно.

Данный алгоритм является нелинейным и способен обучаться во время работы. Рассмотрим возможность использования в качестве адаптера метод поисковой оптимизации. Целевая функция (3) зависит от времени, и закон её изменения априори неизвестен. Большинство методов оптимизации неэффективны в условиях дрейфа целевой функции, а при определенных скоростях дрейфа и неустойчивы. Если в качестве контролируемого возмущения использовать время проведения эксперимента в текущей точке, то можно применить симплексный инвариантный метод (СИМ) [6].

Процесс поиска СИМ реализуется в дискретные моменты времени $t_k = k \cdot T_0$, где T_0 – интервал дискретизации; k – шаг поиска (дискретное время). На интервале T_0 происходит вычисление целевой функции и принятие решения о направлении поиска в пространстве приращений $\Delta \mathbf{K}$.

Обобщенно алгоритм метода:

1) на k -м шаге поиска вычисляется целевая функция $Q(k)$ и фиксируется время её вычисления $z(k)$. Предполагается, что время измерения невязки $e(k)$ и функции $Q(k)$ совпадают;

2) аппроксимируем на k -м шаге целевую функцию $Q(k)$ выражением

$$\tilde{Q}(k) = \mathbf{a}^T \mathbf{x}, \quad (5)$$

рассчитывается текущая оценка дрейфа целевой функции рекуррентным методом наименьших квадратов;

$$\mathbf{a}(k) = \mathbf{a}(k-1) + \frac{\mathbf{C}(k-1) \cdot \mathbf{x}(k)}{1 + \mathbf{x}^T(k) \cdot \mathbf{C}(k-1) \cdot \mathbf{x}(k)} [\mathbf{Q}(k) - \mathbf{a}^T(k-1) \cdot \mathbf{x}(k)], \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(k) = (\Delta K_p(k) \Delta K_i(k) \Delta K_d(k) \Delta z(k))^T$ – составной вектор воздействий; $\mathbf{a}(k) = (a_1(k) a_2(k) a_3(k))^T$ – составной вектор оценок целевой функции на k -м шаге поиска; $a_i(k)$ – оценки зависимости целевой функции от приращений параметров регулятора на k -м шаге поиска; $b(k)$ – текущая оценка дрейфа целевой функции; $\mathbf{C}(k-1)$ – ковариационная матрица оценок.

В области экстремума целевой функции оценки $a_1(k)$, $a_2(k)$, $a_3(k)$ близки к нулю. Это является признаком достижения области экстремума;

3) вычитание влияния дрейфа на значение целевой функции в вершинах текущего симплекса

$$\hat{Q}_j(k) = Q_j^* - b(k) \cdot \Delta z_j, \quad j = 1, \dots, m+1, j \neq s; \quad (7)$$

4) принятие решения о направлении поиска, а именно отражение худшей точки (вершины, имеющей максимальное значение $\hat{Q}_j(k)$);

5) переход к пункту 1.

Эффективность алгоритма зависит от длины ребра симплекса (приращения K_p , K_i , K_d), скорости дрейфа, уровня помех, а также от процедур адаптации параметров и стратегии поиска.

Вторая схема адаптации предполагает непосредственное воздействие на формируемое управление вектором моментов $\mathbf{\tau}(t)$ в сочленениях. Структурная схема такой адаптивной САУ с использованием нейронной сети приведена на рис. 4 [7].

Рис. 4. Схема адаптивной САУ с коррекцией вектора моментов τ нейронной сетью (АДСАУ-НС)

Рис. 5. Структура нейронной сети

Структура нейронной сети изображена на рис. 5.

Управление рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(t) &= \mathbf{q}(t)_d - \mathbf{q}(t), \\ \mathbf{r}(t) &= \dot{\mathbf{e}}(t) + \Lambda \mathbf{e}(t), \\ \boldsymbol{\tau}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{K}_v \cdot \mathbf{r}(t) - \mathbf{v}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mathbf{q}(t)$ – вектор $n \times 1$, рад; $\mathbf{e}(t)$ – вектор ошибки $n \times 1$, рад; Λ – положительно определенная квадратная матрица параметров $n \times n$; $\mathbf{K}_v$ – диагональная матрица параметров внешнего контура; $\mathbf{v}(t)$ – функция, обеспечивающая робастность; $\mathbf{x}$ – входной вектор, состоящий из $(\mathbf{q}_d^T, \dot{\mathbf{q}}_d^T, \ddot{\mathbf{q}}_d^T, \mathbf{e}^T, \dot{\mathbf{e}}^T)^T$ размерностью $n_x \times 1$, $n_x = 5 \cdot n$, $f(x)$ – описывается уравнением

$$f(x) = \mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{x}), \quad (9)$$

где $\mathbf{W}$ – матрица весовых коэффициентов выходного слоя; $\mathbf{H}$ – матрица весовых коэффициентов скрытого слоя; $\boldsymbol{\sigma}(\cdot)$ – активационная функция нейронов скрытого слоя.

Весовые коэффициенты изменяются по следующим правилам:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{W}} &= \mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{r}^T, \\ \dot{\mathbf{H}} &= \mathbf{G} \cdot \mathbf{x} \cdot (\boldsymbol{\sigma}'^T \mathbf{W} \cdot \mathbf{r})^T,\end{aligned}\quad (10)$$

где $\mathbf{F}$ и $\mathbf{G}$ – положительно определенные диагональные матрицы коэффициентов; $\boldsymbol{\sigma}'$ – производная от активационной функции. Подробное описание алгоритма дано в [7].

Для реализации подобной адаптивной САУ на базе СИМ предлагается структурная схема, приведенная на рис. 6. Компенсирующее воздействие $\Delta\tau(k)$ формируется симплексным инвариантным методом по вектору ошибок $\mathbf{e}$. В данной схеме ПИД-регулятор является классическим и описывается уравнением (2). При такой схеме возможно реализовать СИМ в n -мерном пространстве или n СИМ в одномерном пространстве. В качестве целевой функции в постановке задачи адаптации (3) используется функция

$$\mathbf{Q}(t)_{\text{сим}} = \frac{1}{2} \sqrt{\mathbf{e}^2(t)}, \quad (11)$$

обеспечивающая постоянство градиента в процессе поиска.

Исследование методов адаптации

Проведем сравнительный анализ приведенных схем адаптации на двухступенном манипуляторе (рис. 7), динамика которого подробно описана в работе [3], с параметрами: $a_1 = 1$, м; $a_2 = 1$, м; $m_1 = 2$, кг; $m_2 = 0.5$, кг; $m_l = 3.75$, кг; $B = 0.3$, где a_j – длина j -го звена, m_j – масса j -го звена, m_l – масса груза в последнем звене, B – коэффициент трения в сочленениях.

Заданная траектория описывается гармоническими воздействиями:

$$\begin{aligned}q_{d1} &= 20 \sin(\omega t), q_{d2} = 15 \sin(\omega t), \omega = 0.2\pi, \\ \dot{q}_{d1} &= \frac{dq_{d1}}{dt}, \dot{q}_{d2} = \frac{dq_{d2}}{dt},\end{aligned}\quad (12)$$

В качестве контролируемого возмущения примем время $z(k) = k, k = 0 \dots N, N = 1000$. Время дискретизации $T_0 = 0.02$ с, время моделирования $T = 20$ с.

Эффективность метода адаптации оценивается для каждого сочленения функцией

$$J_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N \sqrt{e_j^2(k)}, j = 1, \dots, n. \quad (13)$$

Рис. 6. Схема адаптивной САУ с корректировкой вектора моментов τ с использованием СИМ (АдСАУ-СИМ)

Рис. 7. Кинематическая схема двухзвенного манипулятора

Рис. 8. Качество слежения ПИД: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

Для большей наглядности при вычислении показателя управления значение ошибки переводится из радиан в градусы, поэтому качество (13) представлено на рисунках и в таблицах в градусах.

Обычный ПИД-регулятор без адаптации (ПИД) (см. рис. 1). Значения коэффициентов регулятора (2) равны $\mathbf{K}_{p0} = (1000 \ 1000)^T$, $\mathbf{K}_{i0} = (100 \ 100)^T$, $\mathbf{K}_{d0} = (75 \ 75)^T$, $\Delta\mathbf{K}_p = \Delta\mathbf{K}_i = \Delta\mathbf{K}_d = (0 \ 0)$. Результаты работы ПИД-регулятора для двух звеньев показаны на рис. 8.

На рис. 8 видим, что ошибка слежения первого сочленения всегда больше ошибки второго сочленения.

Эффективность адаптации $\mathbf{J} = (J_1 \ J_2)^T = (2.1635 \ 0.9102)^T$, град.

ПИД-регулятор с настройкой параметров нейронной сетью (ПИД-НС) (см. рис. 2). Нейронная сеть (см. рис. 3) выполняет функцию регулятора. Активационная функция выходного нейрона

$$\sigma(x) = \frac{2(1 - e^{-\alpha x})}{\alpha(1 + e^{-\alpha x})}. \quad (14)$$

Функцию адаптера выполняют выражения (4) с целевой функцией (3). Начальные значения коэффициентов регулятора $\mathbf{K}_{p0} = (1000 \ 1000)^T$, $\mathbf{K}_i = (100 \ 100)^T$, $\mathbf{K}_d = (75 \ 75)^T$, векторы скоростей обучения равны $\boldsymbol{\eta}_p = (600 \ 800)^T$, $\boldsymbol{\eta}_i = (500 \ 600)^T$, $\boldsymbol{\eta}_d = (800 \ 800)^T$.

Результаты работы алгоритма представлены на рис. 9.

На рис. 9 видим, что ошибка слежения ПИД-НС в целом идентична ошибке ПИД-регулятора, но спадает в область малых значений в два раза быстрее.

Эффективность адаптации $\mathbf{J} = (J_1 \ J_2)^T = (1.4089 \ 0.7173)^T$, град.

Адаптивная САУ с корректировкой вектора моментов τ нейронной сетью (АдСАУ-НС) (см. рис. 4). Для моделирования использовали следующие значения параметров: количество слоев нейронной сети $L = 2$, количество нейронов во входном, скрытом и выходном слоях равны соответственно $l_1=10$, $l_2=10$, $l_3=2$, $\mathbf{K}_v = 75 \cdot I_{2 \times 2}$, $\Delta = 13.3 \cdot I_{2 \times 2}$, $I_{2 \times 2}$ – единичная матрица размером 2×2 , $\mathbf{W}$ – нулевая матрица размерностью 10×11 , $\mathbf{H}$ – нулевая матрица размером 10×11 .

Результат исследования АдСАУ-НС представлен на рис. 10. Регулятор в пределах 1 с обеспечивает подстройку дополнительного воздействия $\Delta \tau$ и удерживает ошибку слежения в области нуля. ПИД-регулятор с нейронной сетью имеет высокие показатели адаптации $\mathbf{J} = (J_1 \ J_2)^T = (0.11 \ 0.07)^T$, град.

ПИД-регулятор с корректировкой вектора моментов дискретной нейронной сетью (АдСАУ-ДНС). Система управления имеет такую же структуру, как АдСАУ-НС, за исключением нейронной сети, которая является дискретной. При моделировании использовалась однослойная нейронная сеть с $l=25$, $\Delta = 13.3 \cdot I_{2 \times 2}$ и временем дискретизации T_0 . Результаты работы АдСАУ-ДНС приведены на рис. 11.

Эффективность адаптации $\mathbf{J} = (J_1 \ J_2)^T = (0.44 \ 0.25)^T$, град.

ПИД-регулятор с адаптацией симплексным инвариантным методом (ПИД-СИМ) (см. рис. 2). Регулятор – классический ПИД-регулятор (2). В качестве адаптера используется СИМ. Для каждого звена ведется независимый процесс адаптации по критерию (11). Поиск

Рис. 9. Качество слежения ПИД-НС: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

Рис. 10. Качество управления АдСАУ-НС: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

Рис. 11. Качество управления АдСАУ-ДНС: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

ведется в пространстве приращений (ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d). Начальные условия идентичны регулятору с настройкой нейронной сетью: базовые значения коэффициентов регуляторов равны $K_{p0} = (1000 \ 1000)^T$, $K_{i0} = (100 \ 100)^T$, $K_{d0} = (75 \ 75)^T$. Стартовая точка симплекса находится в начале системы координат пространства поиска. Начальная длина ребра симплекса равна $L_0 = (42 \ 42)$ для первого и второго звеньев соответственно и рассчитывается исходя из количества шагов поиска, пространственных ограничений пространства поиска (10) и условия, что начальная точка поиска лежит в центре этого пространства [8]. Конечная длина ребра симплекса выбиралась из минимально допустимой ошибки поиска и равна $L_N = (0.1 \ 0.1)$ для обоих сочленений. Для оценки скорости дрейфа экстремума функции (11) используется рекуррентный алгоритм (6). Результаты работы приведены на рис. 12.

Динамика изменения параметров при настройке ПИД-НС и ПИД-СИМ показана на рис. 13.

Рис. 12. Качество управления ПИД-СИМ: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

в)

Рис. 13. Динамика параметров при настройке нейронной сетью (непрерывная линия) и симплексным инвариантным методом (пунктирная линия): а – пропорциональный; б – интегральный; в – дифференциальный

Эффективность адаптации $\mathbf{J} = (J_1 J_2)^T = (0.7508 \ 0.3375)^T$, град. ПИД-СИМ показывает более высокую скорость достижения экстремума целевой функции по сравнению с аналогичным регулятором, использующим нейронную сеть. Это является следствием более активного изменения параметров во время настройки. Как видим на рис. 12 и рис. 13, при большой ошибке слежения происходит настройка, при которой параметры ПИД-СИМ изменяются в большем, чем у ПИД-НС, диапазоне значений. Чем больше значение ошибки слежения, тем больше значение параметров, что позволяет ПИД-СИМ быстрее устранить эту ошибку. Когда ошибка слежения близка к нулю, параметры ПИД-СИМ уменьшаются и в последующем либо не меняются, либо меняются незначительно.

Адаптивная САУ с корректировкой вектора моментов τ с использованием СИМ (АдСАУ-СИМ)

Параметры ПИД-регулятора равны базовым значения ПИД-НС, стартовая точка симплекса находится в начале координат поиска. Для оценки возмущения используется рекуррентный алгоритм (6). Для большей гибкости поиска для каждого звена применен одномерный симплекс. Начальная и конечная длины ребра симплекса вычисляется по тому же принципу, как для ПИД-СИМ, и равны $\mathbf{L0} = (0.1 \ 0.6)$, $\mathbf{LN} = (0.1 \ 0.1)$. Результаты моделирования представлены на рис. 14.

Качество управления $\mathbf{J} = (J_1 J_2)^T = (0.968 \ 0.233)^T$, град. АдСАУ-СИМ показывает схожую с ПИД-СИМ динамику ошибки при меньшем размере пространства поиска.

Определим частоту задающего воздействия, при которой обеспечивается устойчивость адаптации. Работоспособность регуляторов проверена при следующих значениях угловой скорости $\omega = \{0.2, 0.4, 1, 2, 4, 10\}$ воздействия (12). Результаты моделирования представлены на рис. 15.

Как видим на рис. 15а на низких частотах входного сигнала ПИД-СИМ и ПИД-НС показывают сопоставимую ошибку, но с возрастанием частоты система с адаптацией нейронной сетью теряет устойчивость, а регулятор с адаптацией СИМ при схожих условиях сохраняет

Рис. 14. Качество управления АдСАУ-СИМ: а – заданные и реальные углы сочленений; б – ошибки слежения в сочленениях

Рис. 15. Среднеквадратичная ошибка управления в зависимости от частоты задающего воздействия для настройки ПИД-регулятора (а), для вычисления дополнительного воздействия $\Delta\tau$ (б)

Рис. 16. Управление с переменной массой: а – график изменения массы; б – ошибка следования по траектории манипулятора с изменяющимися параметрами: 1 – АдСАУ-СИМ; 2 – ПИД-СИМ; 3 – ПИД-НС; 4 – АдСАУ-НС

устойчивость адаптации. Рис. 15б показывает, что нейронная сеть обеспечивает более высокую точность управления на высоких частотах, чем СИМ.

Проведены испытания алгоритмов в условиях изменений параметров манипулятора, а именно массы груза m_i , приложенной к конечному звену манипулятора. Параметр изменяется по следующему закону:

$$m_i = \begin{cases} 3,38 \text{ кг, при } t < 2,5; 5 \leq t < 7,5 \\ 0 \text{ кг, при } 2,5 \leq t < 5; 7,5 \leq t < 10 \\ 5,07 \text{ кг, при } 10 \leq t < 20 \end{cases} \quad (15)$$

Графики ошибок слежения приведены на рис. 16б. Из результатов моделирования следует, что АдСАУ-НС меньше всего подвержен влиянию изменения массы в схвате. ПИД-СИМ

Показатели эффективности методов адаптации

№	Регулятор	J_1 , град	J_2 , град
1	АдСАУ-НС	0.11	0.07
2	АдСАУ-ДНС	0.44	0.25
3	ПИД-СИМ	0.7508	0.3375
4	АдСАУ-СИМ	0.968	0.233
5	ПИД-НС	1.4089	0.7173
6	ПИД	2.1635	0.9102

и АдСАУ-СИМ имеют схожие графики ошибки, несмотря на разные схемы управления, и заметно меньшую эффективность, чем у АдСАУ-НС. Алгоритм ПИД-НС склонен к большому перегулированию и созданию колебаний.

Результаты работы рассматриваемых алгоритмов с постоянной массой нагрузки сведены в таблицу для удобства сравнения в порядке убывания.

При сравнении можно выделить АдСАУ-НС для настройки схемы с дополнительным воздействием и ПИД-СИМ для настройки параметров регуляторов, так как они показали наибольшую эффективность среди алгоритмов адаптации на рассмотренных схемах управления.

Заключение

Для проведения сравнительного анализа методов адаптации параметров регулятора системы управления робота-манипулятора:

- разработано программное обеспечение известных методов адаптации в среде MATLAB;
- разработано алгоритмическое и программное обеспечение метода адаптации на базе симплексного инвариантного метода;
- выделены зоны эффективного применения исследованных методов адаптации как первый шаг в формировании интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором.

Проведенные исследования показали, что настройка параметров при помощи симплексного инвариантного метода приводит к управлению, которое обеспечивает ошибку на уровне адаптивных регуляторов на основе нейронных сетей. Установлены приоритеты использования алгоритмов при различных схемах управления.

Предлагаемые регуляторы, как и нейронные сети, не требуют знания динамических характеристик робота, и благодаря настройке в реальном времени система не теряет устойчивость даже при быстрых изменениях параметров манипулятора. Характерная черта рассмотренных адаптивных регуляторов – отсутствие необходимости в предварительном сборе данных и настройке параметров до начала работы. Преимуществом регуляторов, основанных на СИМ, является простота операций вычисления, что упрощает их задачу реализации во встроенных системах.

Список литературы

- [1] Lewis F.L., Dawson D.M., Abdallah C.T. *Robot manipulator control: theory and practice*. CRC Press, 2003.
- [2] Al-Khayyt S.Z.S. Tuning PID Controller by Neural Network for Robot Manipulator Trajectory Tracking. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 2013, 8(1), 19-28.
- [3] Razmi H., & Kashtiban A.M. Nonlinear PID-based analog neural network control for a two link rigid robot manipulator and determining the maximum load carrying capacity. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2012, 2(1), 228-234.
- [4] Tang K.S., Man K.F., Chen G., & Kwong S. An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(4), 757-765.
- [5] AL-Saedi M.I., Wu H., & Handroos H. ANFIS and fuzzy tuning of PID controller for trajectory tracking of a flexible hydraulically driven parallel robot machine. *J. Autom. Control Eng*, 2013, 1(2), 70-77.
- [6] Круг Г.К., Масальский Г.Б. Симплексный инвариантный метод экспериментальной оптимизации. *Вопросы кибернетики, планирование эксперимента и оптимизация в системах управления*, под ред. Г.К. Круга, А.П. Вощина, 1981, (84), 3-32. [Krug G.K., Masalsky G.B. A simplex invariant method of the experimental optimization, *Cybernetics questions, scheduling of an experiment and optimization in control systems*: edited by of G.K. Krug, A.P. Voshchina, 1981, (84), 3-32. (in Russian)]
- [7] Lewis F.W., Jagannathan S., Yesildirak A. *Neural network control of robot manipulators and non-linear systems*. CRC Press, 1998.
- [8] Дамбраускас А.П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979, 13, 175. [Dambrauskas A.P. *Simplex search*. М.: Energy, 1979, 13, 175. (in Russian)]