



Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур

Р. В. Рудаков^а, аспирант, orcid.org/0009-0000-8345-2800

М. В. Сержантова^б, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0006-7629-7316

В. И. Бойков^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-2561-0270, viboikov@mail.ru

А. Б. Бушуев^б, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-7826-4645

О. С. Нуйя^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0005-7857-3137

Ю. В. Литвинов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-0714-4624

С. В. Быстров^б, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-6900-0506

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

^бНациональный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

Введение: специфика работы роботов-манипуляторов в высокотемпературных зонах с точки зрения управления связана с изменением параметров модели их движения. Обеспечение качественной и эффективной работы роботов в таких условиях возможно при использовании адаптивных систем управления, способных подстраиваться под изменяющиеся условия работы и парящих воздействия окружающей среды. **Цель:** для нелинейного нестационарного объекта синтезировать адаптивный регулятор с эталонной моделью и обобщенным пропорционально-интегральным законом регулирования, работающий в скользящем режиме. **Результаты:** показано, что движение робота-манипулятора может быть задано нелинейным уравнением с характерной нелинейностью, удовлетворяющей секторным ограничениям. Для принятой модели движения робота синтезирован адаптивный пропорционально-интегральный закон управления, использующий скользящий режим работы с настраиваемой поверхностью переключения. Основное отличие процедуры синтеза от существующих решений связано с использованием в законе управления дополнительной интегральной компоненты по сигналу рассогласования и с рассмотрением сходимости алгоритма по части переменных вектора состояния. Моделирование показало, что за счет подстройки параметров поверхности переключения установившаяся ошибка стремится к нулю во всех точках рабочего пространства робота. Показатели качества работы системы управления в области неопределенности параметров движения соответствуют качеству, заданному эталонной моделью. **Практическая значимость:** синтезированный регулятор формирует управление в виде бинарного релейного сигнала, что обеспечивает работу силовых модулей в ключевом режиме. При практической реализации это позволяет добиться максимальной энергетической эффективности и минимальных габаритных размеров устройства управления.

Ключевые слова – робот-манипулятор, адаптивное управление, скользящий режим, пропорционально-интегральное управление.

Для цитирования: Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И., Бушуев А. Б., Нуйя О. С., Литвинов Ю. В., Быстров С. В. Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 4, с. 12–23. doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVV

For citation: Rudakov R. V., Serzhantova M. V., Boikov V. I., Bushuev A. B., Nuyya O. S., Litvinov Y. V., Bystrov S. V. Adaptive control of robots for high-temperature operations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 12–23 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVV

Введение

Специфика работы роботов-манипуляторов в высокотемпературных зонах с точки зрения управления связана с изменением параметров их модели движения. В первую очередь это изменение параметров электроприводов: активного сопротивления обмоток статора и ротора, магнитных свойств материалов. Кроме того, в механизмах изменяются силы сухого и вязкого трения, изменяются КПД подвижных сочленений и т. д. Для робота-манипулятора характерно также изменение массы переносимой детали в зависимости от выполняемой работы и, как следствие, изменение моментов инерции его подвижных ча-

стей. Обеспечение качественной и эффективной работы в условиях параметрической неопределенности возможно при применении адаптивных систем управления, способных парировать негативное влияние окружающей среды на показатели качества функционирования роботов.

В данной работе на простом примере управления одним подвижным звеном рассмотрены основные особенности синтеза адаптивного регулятора, характерные для роботов-манипуляторов. Учтено базовое требование современной электронной преобразовательной техники: силовые элементы должны работать в ключевом режиме. Этим обеспечивается высокий КПД силового преобразователя и его малые габариты.

Другими словами, требуется, чтобы выходной управляющий сигнал регулятора либо был релейным, либо имел широтно-импульсную модуляцию. Поэтому из большого разнообразия адаптивных систем был выбран способ адаптации с эталонной моделью и обобщенным пропорционально-интегральным регулятором, работающим в скользящем режиме. Синтезированный регулятор формирует релейный двухпозиционный управляющий сигнал.

Предполагается, что желаемая траектория движения робота в операционном пространстве задана последовательностью реперных точек. В этом случае задающий сигнал системы можно рассматривать как последовательность ступенчатых функций, а движение робота представлять суммой реакций на ступенчатые входные воздействия. При этом считаем, что конструкция робота рассчитана на работу в высокотемпературных зонах и физические неисправности не возникают.

Обзор существующих решений

Изменение параметров роботов в процессе функционирования влечет за собой ухудшение качества их работы. Для борьбы с подобным явлением в теории управления разработан ряд методов, базирующихся на теории инвариантности, теории комбинированного управления, теории адаптации, теории нечеткого управления и др. Основной особенностью динамической модели робота является ее существенная нелинейность и параметрическая нестационарность [1]. Нелинейность характеристик робота порождает целый ряд проблем, связанных с принципиальной возможностью определения параметров объекта в процессе его функционирования [2, 3].

Неопределенность параметров модели объекта управления зачастую можно рассматривать как некоторое внешнее возмущение, действующее на объект. В этой связи интересен обзор методов оценки возмущений, построенных на основе теории наблюдателей [4, 5].

В данной статье рассматриваются особенности управления роботом, представляемым нелинейной непрерывной моделью, с использованием адаптивного регулятора с настраиваемыми переменными параметрами. Некоторые алгоритмы адаптации, применимые в системах управления роботами-манипуляторами, рассмотрены в работах [6–10]. Как правило, рассматриваемые регуляторы формируют либо пропорциональные, либо комбинированные релейно-пропорциональные сигналы управления, приводящие к снижению КПД управляющих устройств. Синтезируемый в работе регулятор

формирует исключительно релейный сигнал управления.

Для обеспечения работы в скользящем режиме с заданным качеством функционирования необходимо, чтобы изображающая точка системы двигалась в фазовом пространстве по поверхности переключения, зависящей от параметров объекта. При неопределенности параметров объекта управления поверхность переключения оказывается также неопределенной. В этой связи является актуальной задача адаптивной настройки поверхности переключения в процессе функционирования. Анализ способов решения указанной задачи приводится, например, в работах [11, 12]. Следует отметить, что в обеих работах для подстройки параметров поверхности переключения использован известный алгоритм скоростного градиента.

В настоящей работе рассмотрены основные особенности синтеза адаптивного регулятора с эталонной моделью и подстраиваемой поверхностью переключения для однозвенного роботоманипулятора. Робот представлен нелинейной непрерывной моделью известной структуры с медленно меняющимися неопределенными параметрами. Подстройка параметров выполняется по методу скоростного градиента. Основное отличие рассматриваемой процедуры синтеза регулятора от процедуры, описанной в работе [12], связано с использованием в законе управления дополнительной интегральной компоненты по сигналу рассогласования. В частности, указанное отличие приводит к сходимости алгоритма по части переменных вектора состояния системы.

Модель движения звена робота-манипулятора с электродвигателем постоянного тока

Основные проблемы и особенности управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности их параметров рассмотрим на примере простейшего однозвенного робота, перемещающего груз заранее неизвестной массы.

Рассмотрим звено робота, состоящее из самого звена, электродвигателя постоянного тока и редуктора. Считаем, что звено закреплено на выходном валу редуктора. Таким образом, электропривод создает вращающий момент M_0 , а поворачивающееся звено робота создает момент нагрузки M_H .

При выводе модели движения звена робота будем придерживаться следующих допущений:

– привод устанавливается на звене, предшествующем вращаемому сочленению, поэтому

масса двигателя и масса редуктора не оказывают влияния на динамику рассматриваемого звена;

– рассматриваемое звено робота закреплено на выходном валу редуктора;

– момент инерции ротора двигателя и момент инерции редуктора учитываются в общей кинетической энергии рассматриваемого звена, т. е. приводятся к оси сочленения;

– скорости, ускорения и моменты сил приводятся к оси сочленения;

– редуктор считается обратимым;

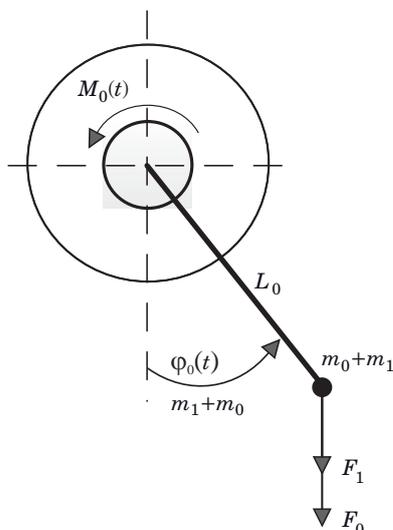
– люфт в редукторе отсутствует;

– редуктор считаем абсолютно жестким.

Расчетная схема звена робота показана на рис. 1. Звено имеет длину L_0 и массу m_0 , которая приведена к дальнему от сочленения концу звена. В процессе функционирования к звену может подключаться внешняя масса m_1 , которая обычно априорно неизвестна. Массы определяют силы веса F_0 и F_1 и, соответственно, момент нагрузки $M_H(t)$. Электропривод создает вращающий момент $M_0(t)$, под действием которого звено поворачивается на угол $\varphi_0(t)$. Угол отсчитывается от вертикали для того, чтобы состояние $\varphi_0(t) = 0$ соответствовало устойчивому положению равновесия звена.

Для вывода уравнений движений робота в обобщенных координатах используем уравнение Лагранжа второго рода [13, 14]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$



■ **Рис. 1.** Расчетная схема звена робота-манипулятора
 ■ **Fig. 1.** Calculation diagram of the robot manipulator link

где $T(q_i, \dot{q}_i, t)$ – кинетическая энергия системы; q_i – обобщенные координаты; Q_i – обобщенная сила. Отметим, что уравнение (1) описывает движение механической системы, подчиненной идеальным связям.

Уравнение (1) для рассматриваемого объекта принимает вид

$$(J_0 + J_1) \ddot{\varphi}(t) + K_0 \dot{\varphi}(t) + (m_0 + m_1) g L_0 \sin \varphi(t) = M_0(t), \quad (2)$$

где J_0, J_1 – моменты инерции звена робота и переносимой детали соответственно; K_0 – коэффициент вязкого трения; g – ускорение свободного падения.

В частности, уравнение содержит параметры, зависящие от массы m_1 переносимой детали, и поэтому априорно неизвестны.

Вращающий момент $M_0(t)$ создается электроприводом постоянного тока.

Если сформированные регулятором токи в обмотках управления считать известными (могут быть измерены), то математическое описание электродвигателя постоянного тока можно упростить и представить следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} L_{я} \frac{dI_{я}(t)}{dt} + R_{я} I_{я}(t) + e(t) &= u_{я}(t); \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} &= M_{вр}(t) - M_H(t); \\ e(t) &= K_e \cdot \omega(t); \\ M_{вр}(t) &= K_M \cdot I_{я}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $L_{я}, R_{я}$ – индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря; $I_{я}(t), u_{я}(t)$ – сила тока и напряжение в цепи якоря; J – суммарный момент инерции ротора и редуктора, приведенный к валу двигателя; $\omega(t)$ – угловая скорость вращения ротора двигателя; $M_{вр}(t), M_H(t)$ – момент вращения и момент нагрузки на валу двигателя; K_e, K_M – коэффициенты передачи двигателя по напряжению и по моменту (конструктивные параметры).

В уравнениях (3) момент инерции J , моменты $M_{вр}$ и M_H приведены к ротору двигателя. Так как двигатель передает вращение на манипулятор через редуктор с коэффициентом редукции i , то требуется согласование переменных уравнений (2) и (3).

За счет редуктора скорость вращения ротора связана со скоростью вращения манипулятора соотношением

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{1}{i} \omega(t).$$

Вращающий момент на выходе редуктора

$$M_0(t) = \eta \cdot i \cdot M_{\text{вр}}(t),$$

где η – КПД редуктора.

Суммарный момент инерции J ротора и момент инерции редуктора, приведенные к оси сочленения, увеличивают общий момент инерции звена:

$$J_0 = m_0 L_0^2 + Ji^2.$$

В результате с учетом момента инерции редуктора объединение уравнений (2) и (3) приводит к следующей модели звена робота:

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}(t)}{dt} + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t) + i \cdot K_e \cdot \dot{\varphi}(t) &= u_{\text{я}}(t); \\ (J_0 + J_1) \ddot{\varphi}(t) + K_0 \dot{\varphi}(t) + (m_0 + m_1)gL_0 \sin \varphi(t) &= \\ &= i \cdot K_M \cdot I_{\text{я}}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Следует отметить, что параметры базовой конфигурации робота без нагрузки и при обычной температуре могут быть определены заранее и их можно считать известными. В процессе работы при изменении температуры часть параметров подвержены медленным изменениям, и их значения оказываются заранее неизвестными (например, сопротивление якорной цепи, коэффициент вязкого трения, КПД редуктора и др.), однако перечисленные параметры можно считать условно постоянными. Параметры J_1 и m_1 обычно неизвестны и могут изменяться скачкообразно в процессе функционирования, оставаясь постоянными достаточно длительное время при перемещениях манипулятора.

Используя терминологию пространства состояний (физический базис), уравнения (4) запишем в виде [15, 16]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -a_{22} & a_{23} \\ 0 & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \sin(x_1(t)) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix} u(t); \\ y(t) &= [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $x_1(t) = \varphi(t)$, $x_2(t) = \dot{\varphi}(t)$, $x_3(t) = I_{\text{я}}(t)$ – компоненты вектора состояния; $y(t) = \varphi(t)$ – выход модели звена;

$$\begin{aligned} a_{22} &= \frac{K_0}{J_0 + J_1}, \quad a_{23} = \frac{\eta \cdot i \cdot K_M}{J_0 + J_1}, \quad a_{32} = \frac{i \cdot K_e}{L_{\text{я}}}, \\ a_{33} &= \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}, \quad b_2 = \frac{(m_0 + m_1)gL_0}{J_0 + J_1}, \quad b_3 = \frac{1}{L_{\text{я}}} \end{aligned}$$

– параметры модели.

При задании численных значений параметров моделей (4), (5) следует учитывать энергетические соотношения, связывающие мощность выбранного электродвигателя и мощность, требуемую для перемещения звена с необходимыми скоростью и ускорением в условиях ограничения величины переносимой детали массой m_1 . Так, при моделировании системы в среде MatLab были использованы численные значения электропривода постоянного тока мощностью 100 Вт. Напряжение питания двигателя 24 В, активное сопротивление цепи якоря двигателя $R_{\text{я}} = 1,16$ Ом, коэффициент передачи по моменту 0,019 Н·м/А. Длина звена робота $L_0 = 0,5$ м, масса $m_0 = 1,5$ кг. Коэффициент передачи редуктора $i = 80$, КПД $\eta = 0,7$, коэффициент вязкого трения $K_0 = 0,031$ Н·м·с. Максимальная масса переносимой детали 0,5 кг.

Линеаризованная модель робота и синтез базового закона управления

Разработка регулятора, работающего в скользящем режиме, обычно выполняется в два этапа. На первом этапе определяется поверхность скольжения $s(x)$, движение по которой задает «желаемую» (эталонную) динамику системы. На втором этапе разрабатывается адаптивный регулятор с переменной структурой, который обеспечивает достижение поверхности скольжения за конечное время при заданной области начальных условий [17].

Специфика нелинейного уравнения (5) заключается в том, что нелинейность $f(\varphi(t)) = \sin(\varphi(t))$ в области изменения $|\varphi(t)| < n$ относится к нелинейностям, удовлетворяющим секторному условию $\varphi(t) \cdot f(\varphi(t)) \leq k\varphi^2$. О динамических свойствах таких систем можно судить, исследуя динамику линеаризованной системы (так называемой системы первого приближения). В частности, известно, что если тривиальное решение линеаризованной системы экспоненциально устойчиво, то тривиальное решение исходной нелинейной системы будет устойчиво асимптотически [17, 18]. Используем указанную теорему для синтеза базового закона управления нелинейной системы.

Зададим параметры базовой конфигурации робота без нагрузки и при обычной температуре, которые считаем известными. Линеаризуем

уравнение (5) в точке $\varphi = 0$ и запишем получившееся линейное уравнение в регулярной форме

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{10}(t) &= \mathbf{A}_{11}^0 \mathbf{X}_{10}(t) + \mathbf{A}_{12}^0 \mathbf{X}_{20}(t); \\ \dot{\mathbf{X}}_{20}(t) &= \mathbf{A}_{21}^0 \mathbf{X}_{10}(t) + \mathbf{A}_{22}^0 \mathbf{X}_{20}(t) + \mathbf{B}_2^0 u(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{X}_{10}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{X}_{20}(t) = \mathbf{x}_3(t)$ – переменные состояния; $\mathbf{A}_{11}^0, \mathbf{A}_{12}^0, \mathbf{A}_{21}^0, \mathbf{A}_{22}^0, \mathbf{B}_2^0$ – матрицы с известными постоянными параметрами линеаризованной системы. Для модели (5) указанные матрицы равны:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}^0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -a_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{12}^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ a_{23} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_{21}^0 &= [0 - a_{32}]; \quad \mathbf{A}_{22}^0 = -a_{33}; \quad \mathbf{B}_2^0 = b_3. \end{aligned}$$

Нетрудно проверить, что объект (6) полностью управляем. Закон управления для работы в скользящем режиме будем искать в виде

$$u(t) = -\gamma \cdot \text{sign}(s(X(t))), \quad (7)$$

где γ – максимальное значение управляющего сигнала, подаваемого на исполнительное устройство (в примере – электродвигатель, $\gamma = 24$ В); $s(X(t)) = K_1 \cdot X_1(t) + X_2(t) = 0$ – поверхность переключения.

Непосредственное применение закона управления (7) в системе управления роботом-манипулятором при отработке постоянного задающего воздействия $g(t) = \text{const} \neq 0$ (движение к очередной реперной точке заданной траектории) приводит к возникновению ненулевой установившейся ошибки. Устранить установившуюся ошибку в случае точно известных параметров объекта можно путем масштабирования величины задающего воздействия $g(t)$. Однако при наличии изменяющихся и неизвестных параметров объекта такой подход оказывается малопродуктивным. Поэтому для компенсации статической ошибки слежения введем в закон управления интегральную составляющую по ошибке. Для этого будем рассматривать расширенные векторы состояния объекта (6) в виде

$$\mathbf{X}_1(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ \mathbf{X}_{10}(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{X}_{20}(t) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{X}_{10}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{X}_{20}(t) = \mathbf{x}_3(t)$ – векторы состояния объекта; $x_i(t)$ – дополнительная интегральная компонента от выходной переменной: $\dot{x}_i(t) = x_1(t)$.

Соответственно, должны быть изменены размеры матриц $\mathbf{A}_{11}^0, \mathbf{A}_{12}^0, \mathbf{A}_{21}^0, \mathbf{A}_{22}^0, \mathbf{B}_2^0$.

При движении по поверхности переключения из условия $s(X) = 0$ следует, что

$$\mathbf{X}_2(t) = -K_1 \mathbf{X}_1(t). \quad (8)$$

Выполнение условия (8) требует, чтобы движения системы (6) подчинялись редуцированной системе уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_1^*(t) &= \mathbf{A}_{11}^* \mathbf{X}_1^*(t) - \mathbf{A}_{12}^* U(t), \\ U(t) &= \mathbf{K}_1^* \mathbf{X}_1^*(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Выбор параметров матрицы \mathbf{K}_1^* обратной связи для (9) произведем из условия экспоненциальной устойчивости системы. Экспоненциальная устойчивость определяет наиболее сильные притягивающие свойства для положения равновесия.

Для этого, следуя результатам работы, зададим желаемую степень сходимости $\lambda > 0$ и интегральный критерий качества функционирования системы (9) в виде

$$J = \int_0^t (\mathbf{X}_1^{*T} \mathbf{Q} \mathbf{X}_1^* + U^T R U) dt, \quad (10)$$

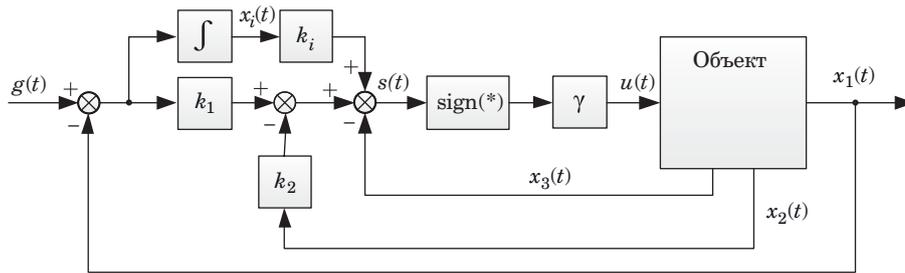
где \mathbf{Q} – симметричная, положительно определенная матрица; $R = r$ – в данной модели положительное число, определяющее штрафы по состоянию и управлению. Искомое управление U для системы (9) находится на основе второго метода Ляпунова путем решения матричного уравнения типа Риккати относительно симметричной положительно определенной матрицы \mathbf{P} :

$$\mathbf{A}_{11}^{*T} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_{11}^* - 2\mathbf{P} \mathbf{A}_{12}^* R^{-1} \mathbf{A}_{12}^* \mathbf{P} + \mathbf{Q} + 2\lambda \mathbf{P} = 0; \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_1 = R^{-1} \mathbf{A}_{12}^* \mathbf{P}. \quad (12)$$

Получившаяся в результате схема базовой системы управления манипулятором показана на рис. 2. Манипулятор обрабатывает входную последовательность кусочно-постоянных входных воздействий (последовательность реперных точек), определяющих заданную траекторию движения робота с нулевой установившейся ошибкой [19].

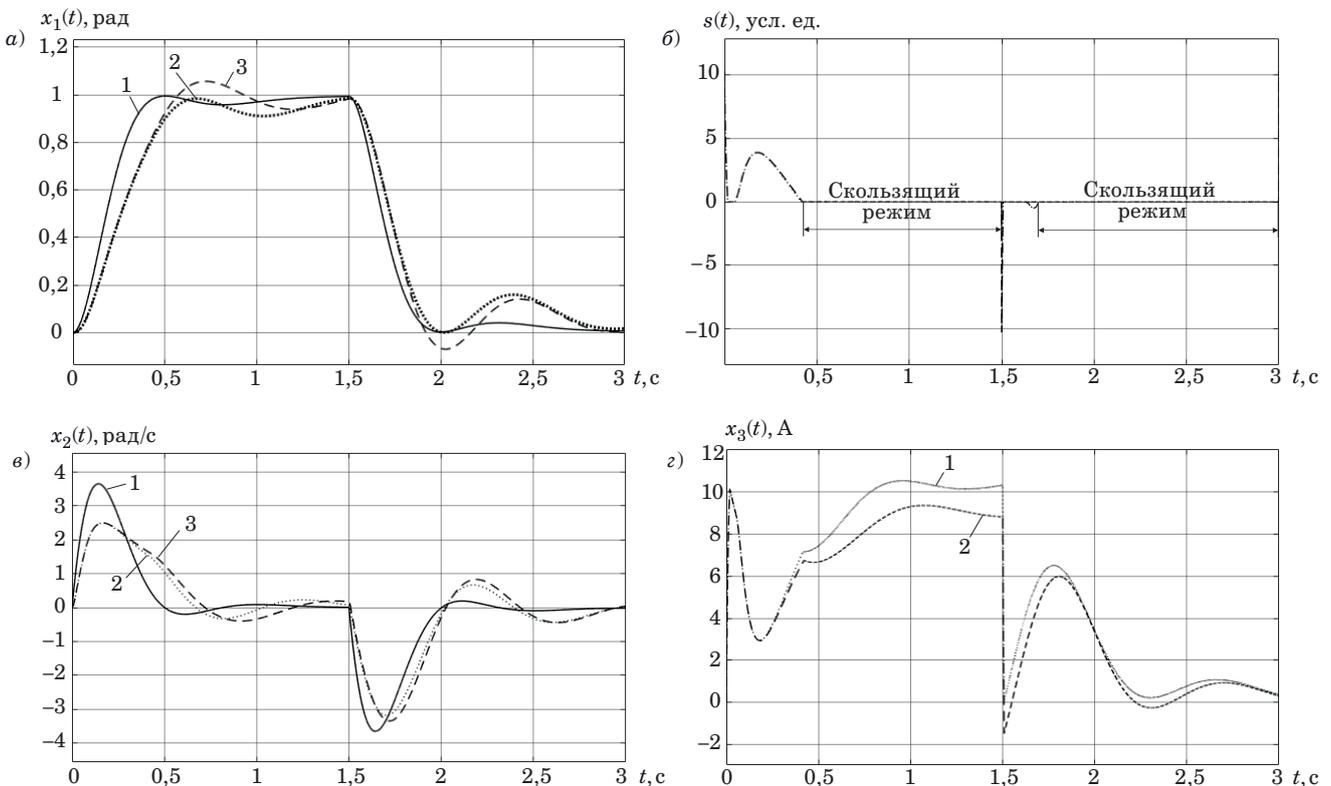
Проверку сходимости траекторий движения замкнутой системы к поверхности переключения $s(X) = 0$ удобно осуществлять, наблюдая изменение скалярной переменной $s(t)$. При функционировании робота эта переменная должна сходиться к нулю за конечное время, что означает факт возникновения в системе устойчивого скользящего режима. На рис. 3, а показаны реакции $x_1(t)$ систем на кусочно-постоянное за-



■ **Рис. 2.** Схема базовой системы управления роботом-манипулятором
 ■ **Fig. 2.** Diagram of the basic control system of the robot manipulator

дающее воздействие $g(t) = 1(t) - 1(t - 1,5)$ при базовых значениях параметров регулятора и объекта управления. Кривая 1 – изменение угла поворота редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управления; кривая 2 – изменение угла поворота линеаризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угла поворота нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Видно, что кривые подобны и выходные

сигналы стремятся к значению задающего воздействия (т. е. ошибка отработки стремится к нулю). На рис. 3, б показаны кривые $s(t)$ линеаризованной и нелинейной систем. Кривые почти совпадают. В обеих системах возникает устойчивый скользящий режим за конечное время функционирования. На рис. 3, в показаны реакции $x_2(t)$ систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение угловой скорости редуцированной эталонной си-



■ **Рис. 3.** Динамические свойства замкнутой системы при базовых значениях параметров: а – переходные характеристики эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; б – кривые изменения переменной $s(X)$; в – сравнение угловых скоростей эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; г – сравнение токов линеаризованной 1 и нелинейной 2 систем

■ **Fig. 3.** Dynamic properties of a closed system at basic parameter values: а – transient characteristics of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; б – curves of change of the variable $s(X)$; в – comparison of angular velocities of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; г – comparison of currents of linearized 1 and nonlinear 2 systems

стемы (9) с линейным законом управления; кривая 2 – изменение угловой скорости линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угловой скорости нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Кривые у расширенных систем подобны кривой в редуцированной эталонной системе. На рис. 3, *з* показаны реакции $x_3(t)$ систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение силы тока в электроприводе линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 2 – изменение силы тока в электроприводе нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). У эталонной системы эта переменная отсутствует, поэтому задача приведения переменных к одинаковому значению не ставится. Из рис. 3 видно, что переменные $x_3(t)$ линейризованной и нелинейной систем сходятся к различным установившимся значениям.

Адаптивное управление в условиях неопределенности параметров объекта

Полученную по уравнениям (9) с линейным законом управления и параметрами из уравнений (11) и (12) базовую редуцированную модель поведения системы будем рассматривать как эталонную. Целью данного этапа синтеза регулятора является определение закона изменения параметров поверхности переключения (8), стабилизирующего динамические показатели качества расширенной нелинейной системы управления в условиях неопределенности части ее параметров. При этом нас будет интересовать только изменение переменных $x_1(t)$ и $x_2(t)$ модели (5), относительно которых потребуем сходимость их поведения к поведению редуцированной эталонной модели (9) с обратной связью (12).

Изменение параметров объекта управления в процессе функционирования требует подстройки параметров поверхности переключения (8) [20, 21]. В частности, одним из возможных подходов к решению данной задачи является метод скоростного градиента.

Введем вектор отклонения движения системы от эталонного поведения по интересующим переменным

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{X}_1(t) - \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_1^*(t),$$

где \mathbf{C}_1, \mathbf{C} – матрицы «выходов» систем, определяющие требуемые переменные. Следуя работе, введем целевой функционал, характеризующий различия в поведении систем:

$$\mathbf{J} = \mathbf{E}^T(t) \mathbf{H} \mathbf{E}(t),$$

где \mathbf{H} – симметричная положительно определенная матрица. В рассматриваемом примере размерность вектора \mathbf{E} равна двум.

Тогда, в соответствии с методом скоростного градиента, закон изменения параметров поверхности переключения будет иметь вид

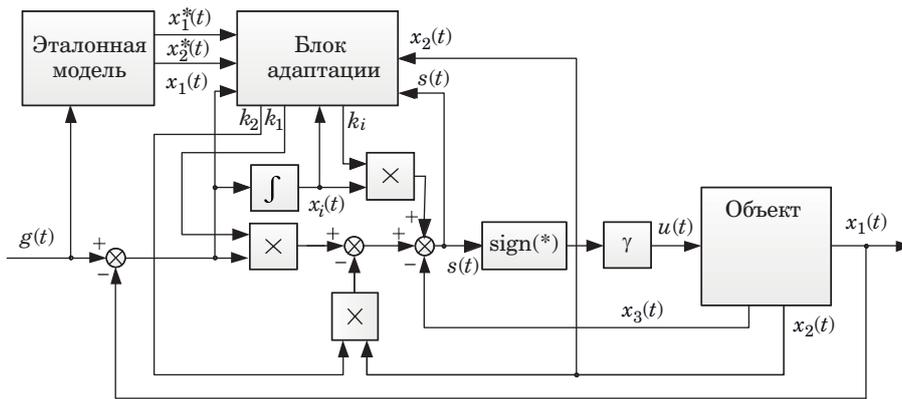
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{K}}_1 &= -\alpha \mathbf{A}_{12}^{*T} \mathbf{C}^T \mathbf{H} \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{X}_1^T(t); \\ \mathbf{K}_1(0) &= \mathbf{K}_1^*. \end{aligned} \quad (13)$$

В законе управления (13) использована матрица базовой конфигурации робота с известными параметрами. Кроме того, в качестве весовой матрицы \mathbf{H} выберем матрицу $\mathbf{H} = \mathbf{C} \mathbf{P} \mathbf{C}^T$, где \mathbf{P} – положительно определенная матрица, полученная при синтезе параметров закона управления базовой модели и гарантирующая ее устойчивость. В этом случае для сходимости процедуры подстройки параметров (13) требуется, чтобы матрица неизвестных параметров \mathbf{A}_{12} удовлетворяла неравенству $\mathbf{A}_{12}^T \cdot \mathbf{A}_{12}^* > 0$, которое в рассматриваемом примере сводится к положительности значений неопределенных параметров матрицы \mathbf{A}_{12} .

Итоговая схема адаптивной системы управления показана на рис. 4. Адаптивный регулятор содержит редуцированную линейную эталонную модель системы по уравнениям (9) с базовыми параметрами поверхности переключения из решения (11), (12). Блок адаптации в соответствии с уравнением (13) вычисляет текущие параметры поверхности переключения, реализуемые адаптивным регулятором по уравнению (7). Так как подстройка параметров (13) требует работы системы в скользящем режиме, в блок адаптации добавлена проверка условия его работы $S(\mathbf{X}) < \Delta$, где $\Delta > 0$.

Как и в случае базовой конфигурации системы, переменная $s(\mathbf{X})$ при функционировании робота должна сходиться к нулю за конечное время, что означает факт возникновения в системе устойчивого скользящего режима. Кроме того, скалярная переменная $w(t) = \mathbf{A}_{12}^{*T} \mathbf{C}^T \mathbf{H} \mathbf{E}(t)$ закона адаптации (13) при постоянном входном воздействии должна сходиться к нулю, что означает факт завершения процесса адаптации. Эти две скалярные переменные являются удобными индикаторами корректного функционирования регулятора.

На рис. 5, *а* показаны реакции $x_1(t)$ систем на кусочно-постоянное задающее воздействие $g(t) = 1(t) - 1(t - 3)$ при переносе роботом детали массой $m_1 = 0,5$ кг, изменившихся активном сопротивлении цепи якоря двигателя $R_a = 1,66$ Ом и КПД редуктора $n = 0,6$. Кривая 1 показывает изменение угла поворота редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управ-

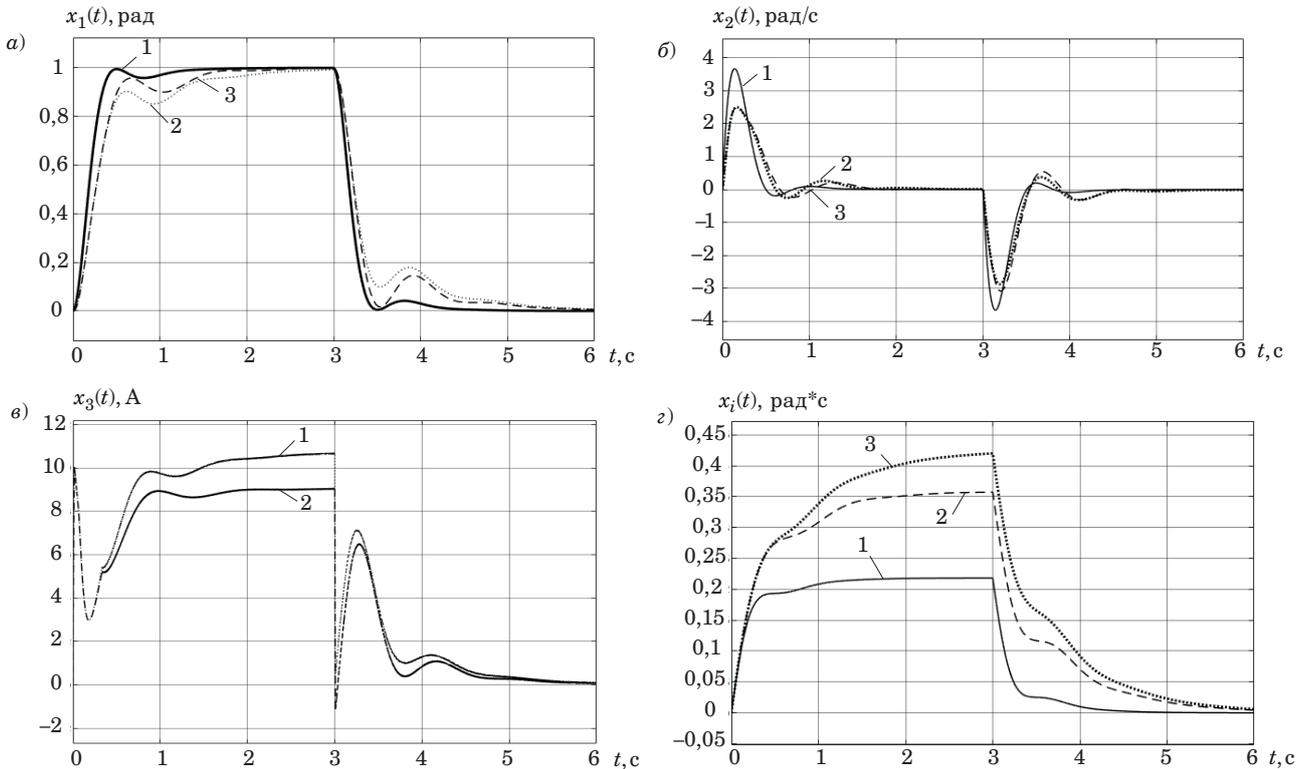


■ **Рис. 4.** Схема адаптивной системы управления манипулятором
 ■ **Fig. 4.** Diagram of the adaptive manipulator control system

ления; кривая 2 — изменение угла поворота линеаризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 — изменение угла поворота нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Видно, что кривые подобны и выходные сигналы стремятся к значению

задающего воздействия (т. е. ошибка обработки стремится к нулю). Длительность переходных процессов в системе увеличилась из-за влияния процесса адаптации параметров.

На рис. 5, б показаны реакции $x_2(t)$ систем при том же кусочно-постоянном задающем



■ **Рис. 5.** Динамические свойства замкнутой адаптивной системы: а — переходные характеристики эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем; б — кривые изменения переменной $s(t)$; в — сравнение угловых скоростей линеаризованной 1 и нелинейной 2 систем; з — сравнение интегральных компонент управления эталонной 1, линеаризованной 2 и нелинейной 3 систем

■ **Fig. 5.** Dynamic properties of a closed adaptive system: а — transient characteristics of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems; б — curves of change of the variable $s(t)$; в — comparison of angular velocities of linearized 1 and nonlinear 2 systems; з — comparison of the integrated control components of the reference 1, linearized 2 and nonlinear 3 systems

воздействии. Кривая 1 показывает изменение угловой скорости редуцированной эталонной системы (9) с линейным законом управления и базовыми значениями параметров [22, 23]; кривая 2 – изменение угловой скорости линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 3 – изменение угловой скорости нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). Кривые изменения переменных у расширенных систем подобны кривой в редуцированной эталонной системе. На рис. 5, в показаны реакции $x_3(t)$ систем при том же кусочно-постоянном задающем воздействии. Кривая 1 – изменение силы тока в электроприводе линейризованной системы (6) с релейным законом управления (7); кривая 2 – изменение силы тока в электроприводе нелинейной системы (5) с релейным законом управления (7). У эталонной системы эта переменная отсутствует, поэтому задача приведения переменных к одинаковому значению не ставится. Из приведенного рисунка видно, что переменные $x_3(t)$ линейризованной и нелинейной систем сходятся к различным установившимся значениям. Аналогично поведение дополнительных пере-

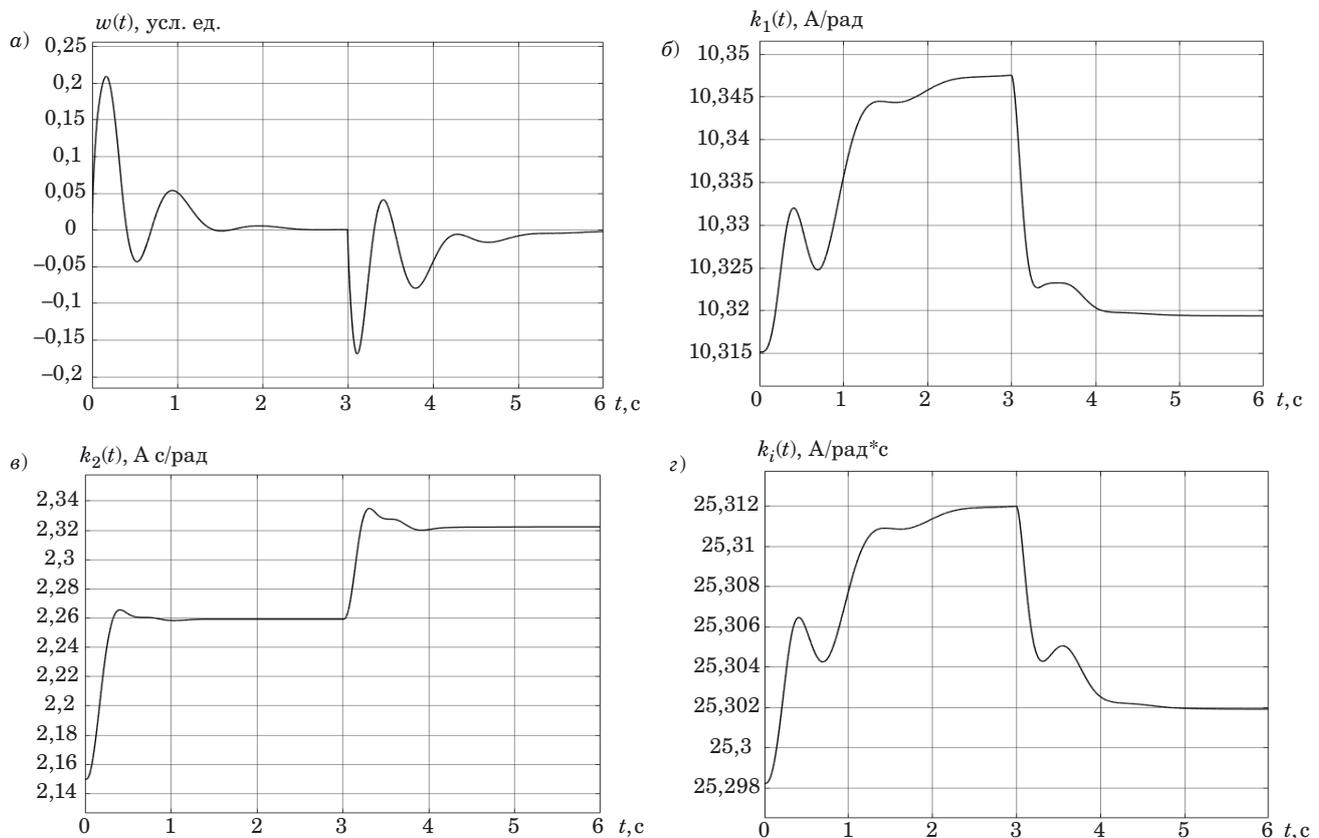
менных $x_i(t)$ эталонной 1, линейризованной 2 и нелинейной 3 систем на рис. 5, з.

На рис. 6, а показана кривая индикатора процесса адаптации $w(t)$ адаптивной нелинейной системы. Видно, что индикатор $w(t)$ сходится к нулю, т. е. подстраиваемые параметры $k_1(t)$, $k_2(t)$ и $k_i(t)$ стремятся к постоянным значениям. На рис. 6, б–г показаны кривые изменения параметров $k_1(t)$, $k_2(t)$ и $k_i(t)$ нелинейной системы соответственно при обработке кусочно-постоянного задающего воздействия.

Подводя итог моделирования, выделим следующие особенности алгоритма управления.

1. Введение интегральной составляющей в закон управления позволило полностью скомпенсировать установившуюся ошибку при обработке постоянного задающего воздействия. За счет подстройки параметров поверхности переключения установившаяся ошибка стремится к нулю во всех точках рабочего пространства робота и при изменениях его параметров в широких пределах. При этом силовая электроника функционирует в ключевом режиме, обеспечивая высокий КПД.

2. Получено упрощенное управление алгоритма и расчета параметров робота благодаря



■ **Рис. 6.** Изменение параметров нелинейной системы при обработке ступенчатого воздействия: а – индикаторная переменная $w(t)$; б–г – коэффициенты регулятора $k_1(t)$, $k_2(t)$ и $k_i(t)$ соответственно

■ **Fig. 6.** Changing parameters of a nonlinear system when working out a stepwise effect: а – the indicator variable $w(t)$; б–г – the coefficients of the regulator $k_1(t)$, $k_2(t)$ and $k_i(t)$ respectively

использованию линеаризованных уравнений движений робота в качестве эталонной модели. Применение линеаризации обосновано секторными ограничениями, характерными для типовой нелинейности модели робота-манипулятора.

3. При номинальных значениях параметров робота в системе через небольшое конечное время возникает устойчивый скользящий режим. При возникновении скользящего режима начинает функционировать алгоритм адаптации, приводя показатели качества системы к показателям эталонной модели.

4. По графикам результатов моделирования можно сделать вывод, что алгоритм адаптации достаточно быстро сходится, т. е. приводит параметры поверхности переключения к установившимся значениям. За счет подстройки параметров происходит компенсация нежелательного влияния условий работы на показатели качества системы.

5. В качестве индикаторов успешной работы алгоритма удобно использовать скалярные переменные $s(t)$ (регулятор силы тока) и $w(t)$ (алгоритм адаптации). Равенство нулю переменной $s(t)$ указывает на наличие в системе скользящего режима. Равенство нулю переменной $w(t)$ указывает на сходимость подстраиваемых параметров поверхности переключения к постоянным значениям.

Заключение

Адаптивные системы управления играют решающую роль в обеспечении безопасной и эф-

фективной работы роботов в высокотемпературных процессах. По мере дальнейшего развития технологий адаптивного управления ожидается, что такого типа алгоритмы будут занимать ведущее положение в системах управления роботами, используемых в различных отраслях промышленности.

В модели движения робота выделена характерная нелинейность, удовлетворяющая секторным ограничениям. Кроме того, из-за влияния внешней среды и условий работы модель движения робота получается для класса непрерывных нелинейных динамических уравнений с медленно меняющимися неопределенными параметрами.

В данной работе была успешно решена задача синтеза релейного адаптивного регулятора робота-манипулятора, работающего в скользящем режиме, с подстройкой параметров поверхности переключения. В законе управления использованы эталонная модель и обобщенный адаптивный пропорционально-интегральный алгоритм регулирования. Подстройка параметров поверхности переключения позволяет обеспечить показатели качества работы системы, определяемые линейной стационарной эталонной моделью, во всей области неопределенности параметров модели робота.

Регулятор формирует управление в виде бинарного релейного сигнала, что обеспечивает работу силовых модулей в ключевом режиме. При практической реализации алгоритма управления это позволяет добиться максимальной энергетической эффективности и минимальных габаритных размеров устройства управления.

Литература

1. Пыркин А. А., Бобцов А. А., Нгуен Х. Т. Алгоритм адаптивного оценивания параметров для класса нелинейных нестационарных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2023, т. 66, № 4, с. 266–275. doi:10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275
2. Авдеенко Т. В. Проблемы параметрической идентификации в математическом моделировании процессов. *Образовательные ресурсы и технологии*, 2014, № 1 (4), с. 115–124. EDN: RVDRQF
3. Нгуен Х. Т., Власов С. М., Пыркин А. А., Попков И. В. Новый алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала с постоянными параметрами. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2022, т. 22, № 1, с. 18–24. doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-18-24, EDN: UECMLF
4. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Ч. 1. Методы. *Автоматика и телемеханика*, 2020, № 9, с. 3–61. doi:10.31857/S0005231020090019, EDN: GZYVGA
5. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Ч. 2. Приложения. *Автоматика и телемеханика*, 2020, № 10, с. 35–92. doi:10.31857/S0005231020100025, EDN: IBYUUE
6. Туан Л. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А. Новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2017, т. 17, № 5, с. 952–955. doi:10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955, EDN: ZQQFQB
7. Дыда А. А., Оськин Д. А. Адаптивное субоптимальное управление приводом манипуляционного робота. *Современные наукоемкие технологии*, 2015, № 12-2, с. 230–233.
8. Та М. Ш., Пыркин А. А. Алгоритм параметризации нестационарных систем с использованием динамического регулятора. *Изв. вузов. Приборостро-*

- ение, 2023, т. 66, № 12, с. 1050–1059. doi:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1050-1059
9. Маргун А. А., Зименко К. А., Базылев Д. Н., Бобцов А. А., Кремлев А. С. Адаптивное управление двухзвенным роботом-манипулятором на базе метода последовательного компенсатора. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2014, № 2 (90), с. 79–85.
 10. Добриборщ Д., Колюбин С. А. Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2017, т. 60, № 9, с. 850–857. doi:10.17586/0021-3454-2017-60-9-850-857, EDN: ZITFBL
 11. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Адаптивное управление летательным аппаратом с идентификацией на скользящих режимах. Управление большими системами: сб. тр. М., ИПУ РАН, 2009. Вып. 26. EDN: KWATCB. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-upravlenie-letatelnyy-apparatom-s-identifikatsiey-na-skolzyaschih-rezhimah> (дата обращения: 23.05.2024).
 12. Мышляев Ю. И. Алгоритмы адаптивного управления на основе настраиваемого скользящего режима: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, Тул. гос. ун-т., 2009. 20 с.
 13. Крутиков С. Л. Базовые инерционные параметры манипуляционных роботов. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*, 2011, № 1(82), с. 28–45. EDN: NDXJND
 14. Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И. Идентификация n-звенных робототехнических манипуляторов. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2024, № 1(139). doi:10.23670/IRJ.2024.139.166
 15. Быстров С. В., Григорьев В. В., Рабыш Е. Ю., Черевко Н. А. Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2011, № 3(73), с. 44–47. EDN: NRAJUP
 16. Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р. *Математическая теория конструирования систем управления*. М., Высш. шк., 2003. 447 с.
 17. Хоанг Дык Тхинь, Пыркин А. А. Синтез алгоритма робастного управления движением мобильного робота вдоль гладкой траектории. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2022, т. 65, № 7, с. 500–512. doi:10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512
 18. Андриевский Б. Р., Бобцов А. А., Фрадков А. Л. *Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления*. СПб., ИПМаш РАН, 2018. 336 с.
 19. Kozachek O., Nikolaev N., Slita O., Bobtsov A. A. Parameter identification algorithm for a LTV system with partially unknown state matrix. 2024, *arXiv preprint arXiv:2402.13772*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13772>
 20. Romero J. G., Ortega R., Bobtsov A. A. Parameter estimation and adaptive control of Euler – Lagrange systems using the power balance equation parameterisation. *International Journal of Control*, 2021, vol. 96, iss. 2, pp. 475–487. <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2002935>
 21. Хак Б. Д., Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А. Идентификация полиномиальных параметров нестационарных линейных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 6, с. 459–468. doi:10.17586/0021-3454-2021-64-6-459-468
 22. Уткин В. И. *Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. 272 с.
 23. Фрадков А. Л. Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления. *Автоматика и телемеханика*, 1979, вып. 9, с. 90–101.

UDC 681.50

doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23

EDN: SMXJVV

Adaptive control of robots for high-temperature operationsR. V. Rudakov^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0009-0000-8345-2800M. V. Serzhantova^b, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-7629-7316V. I. Boikov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2561-0270, viboikov@mail.ruA. B. Bushuev^b, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-7826-4645O. S. Nuyya^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0005-7857-3137Y. V. Litvinov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-0714-4624S. V. Bystrov^b, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-6900-0506^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation**Introduction:** The peculiarities of robot manipulator operation in high-temperature zones from the point of view of control are associated with the changes in the parameters of their motion model. To ensure high-quality operation and efficiency of robots in such

conditions it is possible to use adaptive control systems that are capable to adjust to changing operating conditions and parrying external influences. **Purpose:** To synthesize an adaptive controller with a reference model and a generalized proportional integral control law operating in a sliding mode for a nonlinear nonstationary object. **Results:** We demonstrate that the motion of a robot manipulator can be specified by a nonlinear equation with a characteristic nonlinearity satisfying sectoral constraints. For the adopted robotic motion model we synthesize an adaptive proportional integral control law using the sliding mode operation with a tunable switching surface. The main difference between the synthesis procedure and the existing solutions consists in the use of an additional integral component in the control law for the mismatch signal and in the consideration of the convergence of the algorithm on the part of state vector variables. Modeling has shown that by adjusting the parameters of the switching surface, the steady-state error tends to zero in all points of the robot workspace. The quality indicators of the control system operation in the area of uncertainty of motion parameters correspond to the quality given by the reference model. **Practical relevance:** The synthesized controller forms the control as a binary relay signal, which ensures the operation of power modules in the key mode. In practical implementations it allows one to maximize energy efficiency and minimize overall dimensions of the control device.

Keywords – robot manipulator, adaptive control, sliding mode, proportional integral control.

For citation: Rudakov R. V., Serzhantova M. V., Boikov V. I., Bushuev A. B., Nuyya O. S., Litvinov Y. V., Bystrov S. V. Adaptive control of robots for high-temperature operations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 4, pp. 12–23 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-4-12-23, EDN: SMXJVV

References

1. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nguyen K. T. Algorithm of adaptive estimation of parameters for a class of non-linear non-stationary systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 4, pp. 266–275 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275
2. Avdeenko T. V. Parameter identification problems in mathematical modelling of processes. *Educational Resources and Technologies*, 2014, no. 1 (4), pp. 115–124 (In Russian). EDN: RVDRQF
3. Nguyen K. T., Vlasov S. M., Pyrkin A. A., Popkov I. V. A new algorithm for the identification of sinusoidal signal frequency with constant parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2022-22-1-18-24
4. Andrievsky B. R., Furtat I. B. Disturbance observers: Methods and applications. I. Methods. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, no. 9, pp. 1563–1610. doi:10.1134/S0005117920090015, EDN: LHWYGH
5. Andrievsky B. R., Furtat I. B. Disturbance observers: Methods and applications. II. Applications. *Prilozheniya. Automation and Remote Control*, 2020, no. 10, pp. 1775–1818. doi:10.1134/S0005117920100021, EDN: GRKGYO
6. Tuan Le Van, Bobtsov A. A., Pyrkin A. A. New algorithm of variable parameters identification for linear regression model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 952–955 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955, EDN: ZQQFQB
7. Dyda A. A., Oskin D. A. An adaptive sub-optimal control for robot manipulator drive. *Modern High Technologies*, 2015, no. 12-2, pp. 230–233 (In Russian).
8. Ta M. S., Pyrkin A. A. Parameterization algorithm for non-stationary systems using a dynamic controller. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 12, pp. 1050–1059 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2023-66-12-1050-1059
9. Margun A. A., Zimenko K. A., Bazylev D. N., Bobtsov A. A., Kremlev A. S. Adaptive control of two-link robot manipulator based on the method of consecutive compensator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 2 (90), pp. 79–85 (In Russian).
10. Dobriborsci D., Kolyubin S. A. Adaptive control of parallel kinematics robot manipulator. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 850–857 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2017-60-9-850-857, EDN: ZITFBL
11. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. *Adaptivnoe upravlenie letatel'ny'm apparatom s identifikatsiej na skol'zashhix rezhimakh*. In: *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Adaptive aircraft control with sliding mode identification. In: Collection of works "Managing Large Systems"]. Moscow, IPU RAN Publ., 2009, iss. 26. EDN: KWATCB. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-upravlenie-letatel'ny'm-apparatom-s-identifikatsiej-na-skol'zashhix-rezhimakh> (accessed: 23 May 2024) (In Russian).
12. Myshlyaev Yu. I. *Algoritmy adaptivnogo upravleniya na osnove nastraivaemogol'zashhego rezhima*. Dis. kand. tekhn. nauk [Adaptive control algorithms based on tunable sliding mode. PhD Tech. sci. diss.]. Tula, TGU Publ., 2009. 20 p.
13. Krutikov S. L. Base inertia parameters of manipulation robots. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2011, no. 1(82), pp. 28–45 (In Russian). EDN: NDXJND
14. Rudakov R. V., Sergeantova M. V., Boikov V. I. Identification of n-link robotic manipulators. *International Scientific Research Journal*, 2024, no. 1(139) (In Russian). doi:10.23670/IRJ.2024.139.166
15. Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Rabysh E. Y., Cherevko N. A. Exponential stability of continuous dynamic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 3(73), pp. 44–47 (In Russian). EDN: NRAJUP
16. Afanasev V. N., Kolmanovskij V. B., Nosov V. R. *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* [Mathematical theory of control system design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 447 p. (In Russian).
17. Hoang D., Pyrkin A. A. Synthesis of an algorithm for robust control of a mobile robot movement along a smooth trajectory. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, vol. 65, no. 7, pp. 500–512 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512
18. Andrievsky B. R., Bobczov A. A., Fradkov A. L. *Metody analiza i sinteza nelinejnykh sistem upravleniya* [Methods of analysis and synthesis of nonlinear control systems]. Saint-Petersburg, IPMash RAN Publ., 2017. 327 p. (In Russian).
19. Kozachek O., Nikolaev N., Slita O., Bobtsov A. A. Parameter identification algorithm for a LTV system with partially unknown state matrix. 2024. *arXiv preprint arXiv:2402.13772*, <https://doi.org/10.48550/arXiv:2402.13772>
20. Romero J. G., Ortega R., Bobtsov A. A. Parameter estimation and adaptive control of Euler – Lagrange systems using the power balance equation parameterisation. *International Journal of Control*, 2021, vol. 96, iss. 2, pp. 475–487. <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2002935>
21. Khak B. D., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Vedyakov A. A. Identification of polynomial parameters of nonstationary linear systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 459–468 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2021-64-6-459-468
22. Utkin V. I. *Skol'zashchie rezhimy i ih primenenie v sistemah s peremennoj strukturoj* [Sliding modes and their application in systems with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 272 p. (In Russian).
23. Fradkov A. L. Scheme of a velocity gradient and its application in problems of adaptive control. *Automation Remote Control*, 1979, no. 9, pp. 90–101 (In Russian).