

# Расчет и конструирование машин

УДК 681.5.03

## Моделирование движения трехзвенного робота с безредукторным приводом с использованием робастных регуляторов

**Т.А. Макарова**

*При решении многих современных технических задач удобно представлять объект в виде интервальной системы дифференциальных уравнений. Для работы с такими системами необходимы робастные алгоритмы стабилизации. В данном исследовании представлен пример разработки регулятора, основанного на алгоритме стабилизации интервальных квадратичных систем методом форм. Эта разработка является одним из вариантов динамического управления манипуляторами. Задача такого управления актуальна при проектировании роботов с традиционными приводами в случае больших масс и/или скоростей, а также роботов с более перспективным с современной точки зрения безредукторным приводом в связи с взаимовлиянием степеней подвижности. В статье приведено математическое преобразование уравнений динамики робота к интервальному виду; дано подробное описание математической модели регулятора, использующего векторные обратные связи тактического уровня. Для доказательства эффективности такого вида стабилизации проведено компьютерное моделирование движения трехзвенного стержневого робота с использованием регулятора, что выявило существенное уменьшение динамической ошибки. Робастный регулятор может быть использован как часть общей системы управления роботами.*

**Ключевые слова:** взаимовлияние степеней подвижности, регулятор, безредукторный привод, манипулятор, моделирование, робастный алгоритм.



**МАКАРОВА**

Татьяна Александровна  
(МГТУ «СТАНКИН»)

**MAKAROVA**

Tat'yana Aleksandrovna  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State University  
of Technology «STANKIN»)

## Simulation of motion of a three-link robot with a gearless drive using robust regulators

**T.A. Makarova**

*Many modern technological problems can be described by interval systems of differential equations. To solve these systems, robust stabilization algorithms are required. In this paper, an approach for developing a regulator on the basis of the algorithm for stabilizing interval quadratic systems by the method of forms is presented. This problem of dynamic control of manipulators is relevant in the design of robots with conventional drives in the case of large masses and/or velocity, as well as robots with more advanced gearless drives taking into account interactions of axes. The mathematical transformation of robot dynamics equations to an interval form is given and the mathematical model of a regulator using vector tactical level feedbacks is described in detail. The efficiency of stabilization is proved by the computer simulation of motion of a three-link robot with a regulator. The results showed a significant reduction in dynamic error. A robust regulator can be used as part of a general robot control system.*

**Keywords:** interaction of axes, regulator, gearless drive, manipulator, modeling, robust algorithm.

Промышленный робот с последовательной кинематической структурой представляет собой многосвязную систему. Применение редукторов позволяет рассматривать ее в составе сепаратных приводов, что обеспечивает достаточность использования скалярных по координатам обратных связей исполнительного уровня.

Одним из перспективных направлений робототехники является применение безредукторных электроприводов (direct drive), благодаря отсутствию в них упругого люфта механической передачи. Однако в этом случае очень существенно взаимовлияние степеней подвижности робота, причем с увеличением скоростей движения оно ощутимо возрастает [1–4]. Следует отметить, что повышение уровня взаимо-

влияния является существенным фактором и для роботов, использующих электродвигатели с редуктором в случае больших масс и скоростей, например, крупных манипуляторов космического базирования.

При построении исполнительной многосвязной системы безредукторного типа особое значение приобретает тактический уровень управления и векторные обратные связи, для синтеза которых необходима разработка специальных алгоритмов [5–7]. Динамическая компенсация с помощью обратных связей по силам и моментам рассмотрена в работах [3, 8]. Другая постановка задачи — отказ от использования специальных силомоментных измерителей и вычисление динамической коррекции на основе обратных связей по скоростям и положению.

В качестве примера многосвязной системы рассмотрим трехзвенный робот с вращательными степенями подвижности (рис. 1). Для упрощения математической модели звенья робота аппроксимированы стержнями длиной  $l_i$  и массой  $m_i$ , груз в схвате представлен точечной массой  $m_0$  [9, 10]. В качестве уравнений динамики манипулятора использованы уравнения Лагранжа 2-го рода. Все расчеты и моделирование проведем для следующих параметров:

$m_1$ , кг	15
$m_2$ , кг	10
$m_3$ , кг	6
$m_0$ , кг	1,5
$l_1$ , м	0,4
$l_2$ , м	0,5
$l_3$ , м	0,5

В качестве программной траектории выберем окружность в плоскости с наклоном  $\alpha$  к плоскости  $O_0x_0z_0$ , по которой эффектор робота движется равномерно. Параметры окружности представлены ниже:

Координаты центра окружности $(x_0, y_0, z_0)$	$(0; 0,55; -0,75)$
Координаты начальной точки движения	$(0; 0,6; -0,837)$
Радиус окружности $r$ , м	0,1

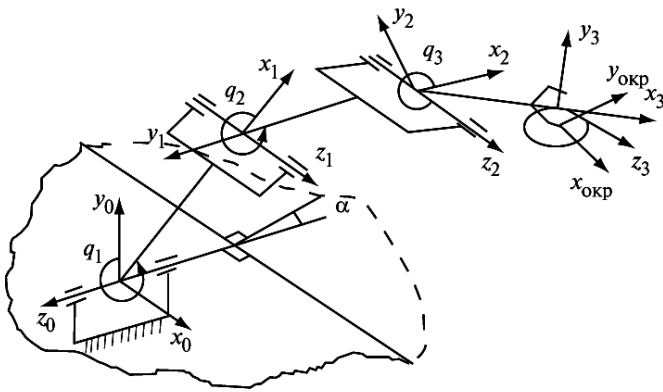


Рис. 1. Схема трехзвенного робота с вращательными степенями подвижности и траектория движения

Уравнения для задания окружности:

$$\begin{aligned} x &= r \sin(\omega t) + x_0; \\ y &= r \cos(\omega t) \sin \alpha + y_0; \\ z &= -r \cos(\omega t) \cos \alpha + z_0, \end{aligned}$$

где  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\omega = 4$  рад/с.

Цель вычислительного эксперимента — исследовать движение робота при моментном управлении в условиях некомпенсированного взаимовлияния приводов и определить эффективность использования робастных регуляторов.

**Модель трехзвенного робота для вычислительного эксперимента.** Модель робота создана в среде Simulink MATLAB. Ее общая схема представлена на рис. 2.

Блок трехзвенного робота описывается известными уравнениями динамики стержневого робота рассматриваемой кинематической схемы.

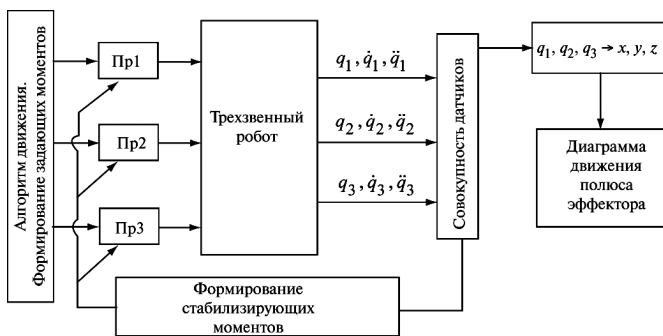


Рис. 2. Общая схема модели:  
Пр1–Пр3 — приводы

Определение задающего момента представляет собой решение второй задачи динамики манипулятора в программном движении.

Запишем уравнения динамики в форме Лагранжа 2-го рода в общем виде [3]:

$$\begin{aligned} a_{11}\ddot{q}_1 + 2b_{112}\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2b_{113}\dot{q}_1\dot{q}_3 + d_1 &= \mu_1; \\ a_{22}\ddot{q}_2 + a_{23}\ddot{q}_3 + b_{211}\dot{q}_1^2 + 2b_{223}\dot{q}_2\dot{q}_3 + \\ &+ b_{233}\dot{q}_3^2 + d_2 = \mu_2; \\ a_{32}\ddot{q}_2 + a_{33}\ddot{q}_3 + b_{311}\dot{q}_1^2 + b_{322}\dot{q}_2^2 + d_3 &= \mu_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mu_1$ – $\mu_3$  — обобщенные моменты;  $a_{ij}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $d_i$  — функциональные коэффициенты, зависящие от массогабаритных показателей и обобщенных координат, например

$$\begin{aligned} b_{311} &= \left(\frac{1}{2}m_3 + m_o\right)l_1l_3 \sin(q_2 + q_3) + \\ &+ 0,5\left(\frac{1}{3}m_3 + m_o\right)l_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) + \\ &+ \left(\frac{1}{2}m_3 + m_o\right)l_2l_3 \cos q_2 \sin(q_2 + q_3). \end{aligned}$$

Приведем систему (1) к нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} q_i &= u_i, \quad i = 1, 2, 3; \\ \dot{u}_1 &= u_4; \\ \dot{u}_2 &= u_5; \\ \dot{u}_3 &= u_6; \\ \dot{u}_4 &= w_2u_4u_5 + w_3u_4u_6 + w_1\mu_1; \\ \dot{u}_5 &= w_6 + w_7u_4^2 + w_8u_5^2 + w_9u_6^2 + \\ &+ w_{10}u_5u_6 + w_4\mu_2 + w_5\mu_3; \\ \dot{u}_6 &= w_{13} + w_{14}u_4^2 + w_{15}u_5^2 + w_{16}u_6^2 + \\ &+ w_{17}u_5u_6 + w_{12}\mu_2 + w_{11}\mu_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $w_i$  — функции от массогабаритных показателей и обобщенных координат, например,

$$\begin{aligned} w_5 &= - \left[ \left(\frac{1}{3}m_3 + m_o\right)l_3 + (0,5m_3 + m_o)l_2 \cos q_3 \right] / \\ &/ \left[ \left(\frac{1}{3}m_2 + m_3 + m_o\right) \left(\frac{1}{3}m_3 + m_o\right)l_2^2l_3 - \right. \\ &\left. - (0,5m_3 + m_o)^2l_2^2l_3 \cos^2 q_3 \right]. \end{aligned}$$

При моделировании используются уравнения ПЗК и ОЗК трехзвенного робота:

$$\begin{aligned} x &= -\sin q_1 [l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos q_2 + l_1], \\ y &= \cos q_1 [l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos q_2 + l_1], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 z &= l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin q_2; \\
 q_1 &= -\arctg \frac{x}{y}, \\
 q_2 &= \arcsin[x^2 + y^2 + z^2 + l_1^2 - 2l_1\sqrt{x^2 + y^2} + \\
 &+ l_2^2 - l_3^2] / [2l_2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + l_1^2 - 2l_1\sqrt{x^2 + y^2}}] - \\
 &\quad - \arctg \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_1}{z}, \\
 q_3 &= \arccos(x^2 + y^2 + z^2 + l_1^2 - l_2^2 - l_3^2 - \\
 &\quad - 2l_1\sqrt{x^2 + y^2}) / (2l_2l_3).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Динамика приводов в эксперименте не учитывалась. Приводы были представлены идеальным источником момента.

**Математическая модель стабилизатора.** В работе [3] отмечено, что наиболее радикальным способом борьбы с взаимовлиянием каналов является формирование управляющих моментов в виде суммы собственно управляющих моментов и корректирующих моментных воздействий, но это возможно лишь для моментных приводов.

Систему, параметры которой заданы не «в точке», а в некоторых интервалах, называют интервальной. В настоящее время интенсивно разрабатываются методы интервального анализа, используемые, в том числе, в робототехнике при построении робастных алгоритмов управления.

Рассмотрим объект с возмущенным движением, описываемый квадратичной системой дифференциальных уравнений в форме Коши с линейной частью:

$$\dot{\omega}_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij}(t)\omega_j + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}^{(i)}(t)\omega_k\omega_j + \varphi_i(\omega, \mathbf{p}_i), \tag{5}$$

$$\omega = \text{colon}(\omega_1 \dots \omega_m), \quad i = 1, \dots, m,$$

где  $\omega_i$  — возмущенные переменные;  $\varphi_i(\cdot)$  — некоторые функции этих переменных с векторными параметрами;  $\mathbf{p}_i$  — функции управления (стабилизатор);  $t$  — время;  $\lambda_{ij}(t)$ ,  $\gamma_{kj}^{(i)}(t)$  — коэффициенты. Точные значения этих коэффициентов неизвестны, но известны их постоянные интервалы:

$$\lambda_{\min}^{(ij)} \leq \lambda_{ij}(t) \leq \lambda_{\max}^{(ij)}; \quad \gamma_{\min}^{(ikj)} \leq \gamma_{kj}^{(i)}(t) \leq \gamma_{\max}^{(ikj)},$$

которые представим в следующем виде:

$$\lambda_{ij} = \langle \lambda_{\min}^{(ij)}, \lambda_{\max}^{(ij)} \rangle; \quad \gamma_{kj}^{(i)} = \langle \gamma_{\min}^{(ikj)}, \gamma_{\max}^{(ikj)} \rangle. \tag{6}$$

Задачей управления объектом является ликвидация его возмущенного состояния, под которым понимается любое отклонение от программного движения. Алгоритм поиска стабилизатора с постоянными параметрами для данного объекта из условия асимптотической устойчивости по Ляпунову тривиального решения системы (5) представлен в работе [11]. Программа, реализующая этот алгоритм в пакете MATLAB, автором настоящей статьи названа «Поиск» и подробно рассмотрена в работе [12].

Вариацией системы (2) получим систему уравнений в возмущениях:

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_1 &= x_1; \\
 \dot{y}_2 &= x_2; \\
 \dot{y}_3 &= x_3; \\
 \dot{x}_1 &= (\tilde{w}_2 u_5 + \tilde{w}_3 u_6) x_1 + \tilde{w}_2 u_4 x_2 + \tilde{w}_3 u_4 x_3 + \\
 &+ \tilde{w}_2 x_1 x_2 + \tilde{w}_3 x_1 x_3 + \tilde{w}_1 \Delta \mu_1; \\
 \dot{x}_2 &= 2\tilde{w}_7 u_4 x_1 + (2\tilde{w}_8 u_5 + \tilde{w}_{10} u_6) x_2 + \\
 &+ (2\tilde{w}_9 u_6 + \tilde{w}_{10} u_5) x_3 + \tilde{w}_7 x_1^2 + \tilde{w}_8 x_2^2 + \\
 &+ \tilde{w}_9 x_3^2 + \tilde{w}_{10} x_2 x_3 + \tilde{w}_4 \Delta \mu_2 + \tilde{w}_5 \Delta \mu_3; \\
 \dot{x}_3 &= 2\tilde{w}_{14} u_4 x_1 + (2\tilde{w}_{15} u_5 + \tilde{w}_{17} u_6) x_2 + \\
 &+ (2\tilde{w}_{16} u_6 + \tilde{w}_{17} u_5) x_3 + \tilde{w}_{14} x_1^2 + \tilde{w}_{15} x_2^2 + \\
 &+ \tilde{w}_{16} x_3^2 + \tilde{w}_{17} x_2 x_3 + \tilde{w}_{12} \Delta \mu_2 + \tilde{w}_{11} \Delta \mu_3,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где  $\tilde{w}_i$  — коэффициенты, учитывающие возмущения обобщенных координат.

Поскольку обобщенные координаты входят в состав коэффициентов  $\tilde{w}_i$  как аргументы тригонометрических функций, были найдены абсолютные значения минимума и максимума каждого коэффициента, т. е. была реализована возможность представления их в виде интервала. Для полной численной записи системы были использованы значения скоростей для программного режима движения.

Из анализа системы (7) следует, что в первые три уравнения не входят управляющие воздействия. Система является не полностью замкнутой. Для последних трех уравнений системы с помощью алгоритма «Поиск» можно добиться асимптотической устойчивости в части переменных  $x(t)$ , т. е.  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ . Так как  $y(t)$  являются первообразными для  $x(t)$ , то получим  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \text{const}$ , причем значение константы определяется начальными условиями. В терминах

работы [13] это означает, что в части переменных  $y(t)$  можно добиться  $y$ -устойчивости решения, а в части переменных  $x(t)$  —  $y$ -притяжения. Кроме того, из сравнения системы (7) и (5) следует, что вектору стабилизатора необходимо поставить в соответствие выражения управляющих воздействий:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_1 \Delta \mu_1 &= \phi_1; \\ \tilde{w}_4 \Delta \mu_2 + \tilde{w}_5 \Delta \mu_3 &= \phi_2; \\ \tilde{w}_{12} \Delta \mu_2 + \tilde{w}_{11} \Delta \mu_3 &= \phi_3. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом сказанного выше, для системы (7) получим интервальную систему следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= x_1; \\ \dot{y}_2 &= x_2; \\ \dot{y}_3 &= x_3; \\ \dot{x}_1 &= \langle g_1 \rangle x_1 + \langle g_2 \rangle x_2 + \langle g_3 \rangle x_3 + \langle g_4 \rangle x_1 x_2 + \\ &+ \langle g_5 \rangle x_1 x_3 + \phi_1; \\ \dot{x}_2 &= \langle g_6 \rangle x_1 + \langle g_7 \rangle x_2 + \langle g_8 \rangle x_3 + \langle g_9 \rangle x_1^2 + \\ &+ \langle g_{10} \rangle x_2^2 + \langle g_{11} \rangle x_3^2 + \langle g_{12} \rangle x_2 x_3 + \phi_2; \\ \dot{x}_3 &= \langle g_{13} \rangle x_1 + \langle g_{14} \rangle x_2 + \langle g_{15} \rangle x_3 + \langle g_{16} \rangle x_1^2 + \\ &+ \langle g_{17} \rangle x_2^2 + \langle g_{18} \rangle x_3^2 + \langle g_{19} \rangle x_2 x_3 + \phi_3, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $g_i$  — интервальные коэффициенты, зависящие от массогабаритных показателей робота и предельных значений скоростей на программной траектории.

Рассмотрим численный пример системы (9) с учетом значений, принятых для моделирования параметров,

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= x_1; \\ \dot{y}_2 &= x_2; \\ \dot{y}_3 &= x_3; \\ \dot{x}_1 &= \langle -104, 104 \rangle x_1 + \langle -26, 26 \rangle x_2 + \langle -91, 91 \rangle x_3 + \\ &+ \langle -2, 2 \rangle x_1 x_2 + \langle -0.7, 0.7 \rangle x_1 x_3 + \phi_1; \\ \dot{x}_2 &= \langle -52, 52 \rangle x_1 + \langle -8.5, 8.5 \rangle x_2 + \langle -4.9, 4.9 \rangle x_3 + \\ &+ \langle -2, 2 \rangle x_1^2 + \langle -0.8, 0.8 \rangle x_2^2 + \langle -0.5, 0.5 \rangle x_3^2 + \\ &+ \langle -0.9, 0.9 \rangle x_2 x_3 + \phi_2; \\ \dot{x}_3 &= \langle -117, 117 \rangle x_1 + \langle -25.8, 25.8 \rangle x_2 + \\ &+ \langle -8.8, 8.8 \rangle x_3 + \langle -4.5, 4.5 \rangle x_1^2 + \langle -2.5, 2.5 \rangle x_2^2 + \\ &+ \langle -0.8, 0.8 \rangle x_3^2 + \langle -1.6, 1.6 \rangle x_2 x_3 + \phi_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Применив программу «Поиск» [12], получим вектор стабилизатора:

$$\begin{aligned} -\phi_1 &= 148,4x_1 + 13,6x_2 + 9,6x_3 + 6,1x_1^3 + \\ &+ 2,1x_1x_2^2 + 4,8x_1x_3^2 + 2,8x_2x_3^2; \\ -\phi_2 &= 13,6x_1 + 96,3x_2 + 8,7x_3 + 6,1x_2^3 + \\ &+ 2,12x_1^2x_2 + 5,9x_2x_3^2 + 2,8x_1x_3^2; \\ -\phi_3 &= 9,6x_1 + 8,7x_2 + 109,1x_3 + 6,1x_3^3 + \\ &+ 4,8x_1^2x_3 + 5,9x_2^2x_3 + 2,8x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Поскольку в системе (8) при приращении программных моментов стоят коэффициенты, которые можно представить в виде интервалов, то уравнения для вычисления стабилизирующих моментов имеют вид

$$\begin{aligned} \langle w_1 \rangle \Delta \mu_1 &= \phi_1; \\ \langle w_4 \rangle \Delta \mu_2 + \langle w_5 \rangle \Delta \mu_3 &= \phi_2; \\ \langle w_{12} \rangle \Delta \mu_2 + \langle w_{11} \rangle \Delta \mu_3 &= \phi_3. \end{aligned} \quad (12)$$

Существование и единственность решения линейных интервальных систем рассмотрено в работе [14]. Используем упрощенное решение, найденное для средних точек интервалов коэффициентов:

$$\begin{aligned} \Delta \mu_1 &= 8,74\phi_1; \\ \Delta \mu_2 &= 3,58\phi_2 + 0,88\phi_3; \\ \Delta \mu_3 &= 0,88\phi_2 + 0,87\phi_3. \end{aligned} \quad (13)$$

Применимость такого подхода в данном случае будет доказана в ходе эксперимента, в котором полученный регулятор с постоянными коэффициентами обратных связей по скоростям будет использоваться для стабилизации системы (2) с непрерывно изменяющимися параметрами в соответствии с заданным движением.

**Результаты вычислительного эксперимента.** Во время эксперимента сравнивалось движение эффектора робота по окружности в соответствии с рис. 1 без стабилизатора и с ним. Траектории, полученные графики с помощью инструмента Simulink XY Graph, представлены на рис. 3.

При отработке программного движения на скорость второй степени подвижности манипу-



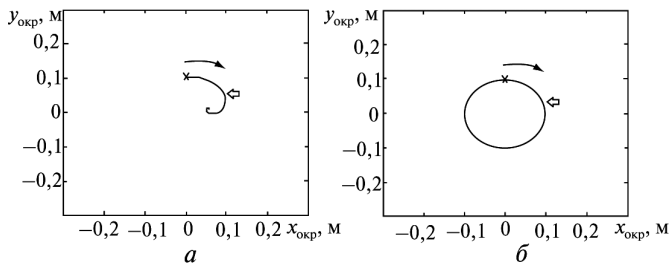


Рис. 3. Обработка траектории:

*a* — без стабилизатора; *b* — со стабилизатором;  
 → — направление движения;  
 ⇐ — время подачи импульса

лятора в момент времени 0,35 с был искусственно подан возмущающий импульс длительностью 0,01 с и величиной 20% максимального значения скорости на данной траектории. Схема без стабилизатора, очевидно, теряет устойчивость из-за отсутствия обратных связей и быстрого накопления ошибок (рис. 3, *a*). При использовании стабилизатора заданная траектория обрабатывается полностью (рис. 3, *b*).

## Выводы

1. Многосвязная исполнительная система на основе безредукторных приводов требует стабилизации движения на основе векторных обратных связей тактического уровня.
2. Для построения стабилизатора можно использовать алгоритм, представленный в работе [11], позволяющий существенно уменьшить динамическую ошибку стабилизированного движения по нескольким координатам взаимовлияния.
3. Описанный стабилизатор может быть использован как часть общей системы управления роботом. При рассмотрении динамики привода он может быть дополнен регуляторами со скоростными и/или позиционными обратными связями, исходя из заданного качества движения.

## Литература

[1] Илюхин Ю.В. *Управление исполнительными системами лазерных технологических комплексов с упругими механическими передачами*. Депон. в ВИНТИ. Москва, МГТУ «СТАНКИН». 1997, № 413-B97. 27 с.

[2] Макаров И.М., Лохин В.М., ред. *Интеллектуальные системы автоматического управления*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2001. 576 с.

[3] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.

[4] Макарова Т.А., Стебулянин М.М. Оценка взаимовлияния движения степеней подвижности трехзвенного робота с безредукторными приводами. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2012, № 3 (22), с. 149—154.

[5] Илюхин Ю.В. Совершенствование систем управления механообрабатывающих технологических роботов на основе концепций мехатроники. *Мехатроника*, 2001, № 2, с. 7—13.

[6] Willems J.C., Takaba K. Dissipativity and stability of interconnections. *Int. J. of Robust & Nonlinear Control*, 2007, vol. 17, issue 5—6, pp. 563—586.

[7] Willems J.C. On interconnections, control and feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, vol. 42, pp. 326—339.

[8] Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. *Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами*. Москва, Мир, 1989. 376 с.

[9] Егоров О.Д. *Механика и конструирование роботов*. Москва, Изд-во Станкин, 1997. 510 с.

[10] Егоров О.Д., Подураев Ю.В. *Конструирование мехатронных модулей*. Москва, МГТУ «СТАНКИН», 2004. 360 с.

[11] Стебулянин М.М. Алгоритм асимптотической стабилизации в целом интервальных квадратичных систем с неограниченным управлением. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2010, № 5, с. 7—13.

[12] Стебулянин М.М., Макарова Т.А. Метод форм при асимптотической стабилизации решений интервальных квадратичных систем. Современное состояние естественных и технических наук. *Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф.* Москва, 2012, с. 9—15.

[13] Румянцев В.В., Озиранер А.С. *Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных*. Москва, Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 256 с.

[14] Лакеев А.В. Существование и единственность алгебраических решений интервальных линейных систем в полной арифметике Каухера. *Вычислительные технологии*, 1999, т. 4, № 4, с. 33—44.

## References

[1] Iliukhin Iu.V. *Upravlenie ispolnitel'nymi sistemami lazernykh tekhnologicheskikh kompleksov s uprugimi mekhanicheskimi peredachami* [Management of executive systems, laser processing systems with elastic mechanical transmissions]. Moscow State University of Technology «STANKIN» publ., Depon. VINITI, 1997, no. 413-V97, 27 p.

[2] *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniia* [Intelligent automatic control system]. Ed. Makarov I.M., Lokhin V.M. Moscow, FIZMATLIT publ., 2001. 576 p.

[3] Zenkevich S.L., Iushchenko A.S. *Osnovy upravleniia manipuliatsionnymi robotami* [Management Basics robotic manipulator]. Moscow, Bauman Press, 2004. 480 p.

[4] Makarova T.A., Stebulianin M.M. Otsenka vzaimovliianiia dvizheniia stepeni podvizhnosti trekhzvennogo robota s bezreduktornymi privodami [Evaluation of interference of movement degrees of mobility three-link robot with gearless drives]. *Vestnik MGTU «Stankin»* [Bulletin of Moscow State University of Technology «STANKIN»]. 2012, no. 3 (22), pp. 149—154.

[5] Iliukhin Iu.V. Sovershenstvovanie sistem upravleniia mekhanooobrabatyvaiushchikh tekhnologicheskikh robotov na osnove kontseptsii mekhatroniki [Improving the management systems of machining technology of robots based on the concepts of mechatronics]. *Mekhatronika* [Mechatronics]. 2001, no. 2, pp. 7—13.

[6] Willems J.C., Takaba K. Dissipativity and stability of interconnections. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2007, vol. 17, issue 5–6, pp. 563–586.

[7] Willems J.C. On interconnections, control and feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, vol. 42, pp. 326–339.

[8] Vukobratovich M., Stokich D., Kirchanski N. *Neadaptivnoe i adaptivnoe upravlenie manipulyatsionnymi robotami* [Non-adaptive and adaptive control of robotic manipulator]. Moscow, Mir publ., 1989. 376 p.

[9] Egorov O.D. *Mekhanika i konstruirovaniye robotov* [Mechanics and design of robots]. Moscow, Moscow State University of Technology «STANKIN» publ., 1997. 510 p.

[10] Egorov O.D., Poduraev Iu.V. *Konstruirovaniye mekhatronnykh modulei* [Designing mechatronic modules]. Moscow, Moscow State University of Technology «STANKIN» publ., 2004. 360 p.

[11] Stebulianin M.M. Algoritm asimptoticheskoi stabilizatsii v tselom interval'nykh kvadratichnykh sistem s neogranichennym upravleniem [Algorithm of Asymptotic General Stabilization of Interval Quadratic Systems with Unlimited Control]. *MAU* [Mechatronics, automation, management]. 2010, no. 5, pp. 7–13.

[12] Stebulianin M.M., Makarova T.A. *Metod form pri asimptoticheskoi stabilizatsii reshenii interval'nykh kvadratichnykh sistem* [Stability and stabilization of motion with respect to the variables]. *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk. Materialy 7 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The current state of the natural and technical sciences. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2012, pp. 9–15.

[13] Rumiantsev V.V., Oziraner A.S. *Ustoichivost' i stabilizatsiya dvizheniya po otosheniyu k chasti peremennykh* [Stability and stabilization of motion with respect to part of the variables]. Moscow, Nauka publ., 1987. 256 p.

[14] Lakeev A.V. Sushchestvovanie i edinstvennost' algebraicheskikh reshenii interval'nykh lineinykh sistem v polnoi arifmetike Kaukhera [Existence and uniqueness of algebraic solutions to interval linear systems in Kaucher complete interval arithmetic]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies]. 1999, vol. 4, no. 4, pp. 33–44.

Статья поступила в редакцию 28.08.2013

## Информация об авторе

**МАКАРОВА Татьяна Александровна** (Москва) — соискатель степени канд. техн. наук кафедры «Робототехника и мехатроника». МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский переулок, д. 3а, e-mail: upnk@stankin.ru).

## Information about the author

**MAKAROVA Tat'yana Aleksandrovna** (Moscow) — Candidate for a Degree, «Robotics and Mechatronics» Department. Moscow State University of Technology «STANKIN» (STANKIN, Vadkovskiy pereulok, 3a, 127055, Moscow, Russian Federation, e-mail: upnk@stankin.ru).