



УДК 684.511

© *Е. Л. Еремин, Д. А. Теличенко, Е. А. Шеленок, 2010*

## **ЦИКЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В СИСТЕМЕ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ БАРРЕТТА<sup>1</sup>**

*Еремин Е. Л.* – д-р техн. наук, проф. проректор по научной работе и информатизации, тел.: (4212) 22-44-19, e-mail: ERemin@mail.khstu.ru (ТОГУ); *Теличенко Д. А.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация производственных процессов и электро-техника», e-mail: telichenko@yandex.ru (АМГУ); *Шеленок Е. А.* – асп. кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: cidorshell@rambler.ru (ТОГУ)

Представлено решения задачи управления циклическим режимом двух-звенного WAM (Whole Arm Manipulator) Барретта, подверженного действию внешних неперiodических возмущений, а также функционирующего в условиях параметрической нелинейности. В качестве методов решения используются: быстрая явно-неявная эталонная модель, стационарный наблюдатель полного порядка, критерий гиперустойчивости.

Solution of the problem of cyclic mode control for double-link Barrett WAM (Whole Arm Manipulator) with no periodical external noise and nonlinear parameters is considered. Solution methods are based on the employment of the fast reference model, apple pie order time invariant observer and hyper stability criterion.

*Ключевые слова:* робот-манипулятор, многосвязный объект, критерий гиперустойчивости, наблюдатель.

### **Введение**

Актуальность проблем, возникающих при решении задач управления режимами работы манипуляционных роботов, обусловлена, прежде всего, их повсеместным применением. Данные устройства имеют техническую реализацию в виде бурильных машин, применяемых в горнодобывающей промышленности, в виде прокатных и ковочных манипуляторов, используемых в ме-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках мероприятия 1 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» по тематическому плану НИР ТОГУ на 2010 г. – проект «Робастное управление в периодических режимах нестационарными объектами»

таллургии, в виде кранов-манипуляторов, нашедших свое применение в строительстве. Роботы-манипуляторы применяются также на производствах, связанных с опасными условиями труда – в химической промышленности при работе с радиоактивными и токсичными материалами. Заметим, что применение промышленных манипуляторов в большинстве случаев связано с серийным производством большого количества одинаковых изделий различного назначения. При этом возникает ряд вопросов, связанных с разработкой периодических систем управления, обеспечивающих возникновение и поддержку некоторых циклических режимов работы роботов [1, 2].

С точки зрения теории управления, манипуляционные роботы представляют собой многомерные (многосвязные) объекты с множеством входных и выходных сигналов. В одной из работ, посвященных разработке принципов управления манипуляторами [3], предложен подход к синтезу законов регулирования, заключающийся в разбиении общей многомерной системы на несколько независимых или слабосвязанных локальных подсистем, и исследовании устойчивости каждой из них.

Процесс управления подобными многосвязными объектами значительно усложняется наличием нелинейных функций, и внешних неконтролируемых возмущений. Нелинейные зависимости могут быть обусловлены, например, наличием зазоров в кинематических парах, подвижной фрикционной связью робота с опорными устройствами, возможными нелинейными характеристиками восстанавливающих сил, диссипацией энергии и другими причинами. Наличие возмущающих воздействий связано с ошибками позиционирования или отсутствия заготовок в нужный момент, износом обрабатывающего инструмента, отклонением стыка свариваемых деталей от заданной траектории движения электрода сварочного автомата, раскачиванием деталей на подвесном конвейере в процессе их захвата роботом.

Учет и компенсация таких нелинейностей и внешних возмущающих воздействий (в частности, за счет синтеза соответствующих законов регулирования) является необходимым условием обеспечения надежной и корректной работы манипуляторов.

В случаях, когда в многосвязных системах управления доступными для измерения являются только входные и выходные сигналы локальных подсистем, возникают дополнительные трудности, связанные с получением оценок недоступных внутренних состояний, необходимых для технической реализации контуров регулирования. В данной ситуации наиболее целесообразным является применение так называемых наблюдателей состояния [4, 5].

В статье рассматривается возможность применения результатов работ [6–9] в случае управления циклическим режимом WAM Барретта с двумя степенями подвижности, функционирующего в условиях нелинейности своих параметров, а также действию внешних неперiodических возмущений.



## Математическая модель робота-манипулятора и постановка задачи

### Исходное математическое описание.

Рассматривается манипулятор Барретта (Barrett WAM) [2], имеющий две степени подвижности (рис. 1). Динамическая структурная схема робота с его рабочей областью  $A$  представлена на рис. 2. Для данного устройства первое звено определяет базовое управляемое перемещение манипулятора, второе звено – сопутствующее управляемое перемещение. В качестве исполнительных механизмов перемещения звеньев используются бесщеточные двигатели с синусоидальной электронной коммутацией.

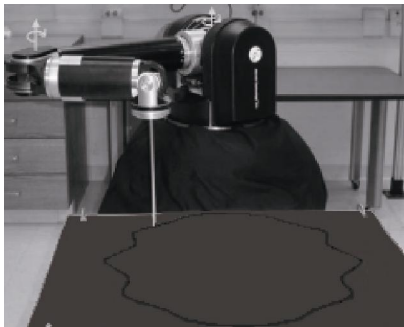


Рис. 1. Barrett WAM

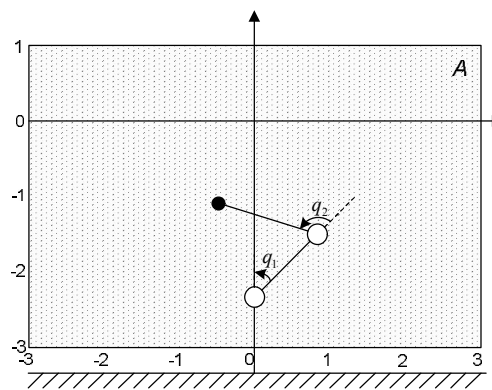


Рис. 2. Динамическая схема WAM

Известно [1, 2], что в этом случае динамические свойства робота могут быть описаны с помощью уравнений

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{m11} & V_{m12} \\ V_{m21} & V_{m22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{d1} & 0 \\ 0 & f_{d2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{s1} & 0 \\ 0 & f_{s2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При этом элементы матриц сил инерции и кориолисовых сил имеют вид

$$\begin{aligned} M_{11} &= p_1 + 2p_2 \cos q_2; & V_{m11} &= -p_2 \dot{q}_2 \sin q_2; \\ M_{12} &= p_3 + p_2 \cos q_2; & V_{m12} &= -p_2 \dot{q}_1 \sin q_2 - p_2 \dot{q}_2 \sin q_2; \\ M_{21} &= p_3 + p_2 \cos q_2; & V_{m21} &= p_2 \dot{q}_1 \sin q_2; \\ M_{22} &= p_3; & V_{m22} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) введены следующие обозначения:  $\tau_1, \tau_2$  – управляющие моменты приводов первого и второго звена соответственно;  $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, i = 1, 2$  – угловое перемещение, скорость и ускорение каждого звена;  $p_1, p_2, p_3$  – коэффициенты инерции,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $f_{d1}, f_{d2}$  – постоянные ко-

эффиценты сил трения движения, Н·м·с;  $f_{s1}, f_{s2}$  – постоянные коэффициенты сил трения покоя, Н·м.

Необходимо отметить, что в приведенных уравнениях динамики манипулятора не учитывается влияния сил тяжести в силу исследования плоскостного перемещения звеньев робота.

Рассмотрим робот-манипулятор как сложный многосвязный динамический объект управления [3, 6]. С учетом обозначений  $\tau_i = u_i$ ,  $q_i = x_i$  выполним ряд очевидных математических преобразований, осуществив, таким образом, переход от модели робота в виде уравнений (1), (2) к стандартной математической записи в векторно-матричной форме. Тогда, в предположении действия на каждое из звеньев манипулятора внешних неконтролируемых возмущений, уравнения динамики манипуляционного робота можно представить в следующем общем виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_i(t)}{dt} = A_i(t, x_i) + b_i u_i(t) + f_i(t) + b_i \sum_{j=1}^k \lambda_{ij}(t, x), \\ y_i(t) = L^T x_i(t), \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_i(t) \in R^{n_i}$  – вектор переменных состояния каждого звена;  $u_i(t) \in R$  – скалярное управляющее воздействие степеней подвижности;  $y_i(t) \in R$  – угловое перемещение каждого звена манипулятора (выход  $i$ -й локальной подсистемы);  $A_i(t, x_i) = A_{1i}(x) x_i(t) + A_{2i}(x_i)$  – некоторый нелинейный вектор;  $A_{1i}(x) = A_{1i} + b_i \alpha_i^T(x)$  – матрица, содержащая нелинейные коэффициенты;  $A_{1i} = A_{0i} + b_i \chi_{0i}^T$  – в общем случае неустойчивая матрица с постоянными коэффициентами;  $A_{0i}$  – гурвицева матрица;  $A_{2i}(x_i) = b_i \beta_i(x_i)$  – нелинейный вектор;  $\alpha_i^T(x) = [\alpha_{1i}(x), \alpha_{2i}(x), \dots, \alpha_{n_i}(x)]$ ;  $\beta_i(x_i)$  – соответственно некоторая векторная и скалярная нелинейные функции;  $b_i^T = [0, \dots, 0, 1]$ ;  $L^T = [1, 0, \dots, 0]$  – стационарные векторы управления и выхода соответственно;  $\chi_{0i}$  – некоторый стационарный вектор;  $\lambda_{ij}(t, x)$  – нелинейные функции, характеризующие взаимосвязь отдельных звеньев манипулятора;  $f_i(t)$  – вектор внешних непериодических возмущений, удовлетворяющий условию

$$f_i^T(t) = b_i^T f_{ni}(t) = [0, \dots, 0, f_{ni}(t)]; \quad f_{ni}(t) = |f_{непер_i}(t)| \leq f_i^2 = const > 0; \quad (4)$$

Нелинейные функции в математической модели (3) в соответствии с выражениями (1) и (2) имеют вид:

– для первой степени подвижности манипулятора

$$\begin{aligned} \alpha_1^T(x) &= [\alpha_{11}(x) \quad \alpha_{21}(x) \quad \alpha_{31}(x)]; \\ \alpha_{11}(x) &= 0; \quad \alpha_{21}(x) = -p_2 \dot{x}_2 \sin x_2; \quad \alpha_{31}(x) = 2p_2 \cos x_2; \\ \beta_1(x_1) &= f_{s1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_1); \end{aligned} \quad (5)$$



– для второй степени подвижности манипулятора

$$\begin{aligned} \alpha_2^T(x) &= [\alpha_{12}(x) \quad \alpha_{22}(x) \quad \alpha_{32}(x)]; \\ \alpha_{12}(x) &= 0; \quad \alpha_{22}(x) = 0; \quad \alpha_{32}(x) = 0; \\ \beta_2(x_2) &= f_{s_2} \operatorname{sgn}(\dot{x}_2); \end{aligned} \quad (6)$$

– функции взаимосвязи звеньев

$$\begin{aligned} \lambda_{12}(t, x) &= -(p_3 + p_2 \cos x_2) \ddot{x}_2 - [\dot{x}_1(p_2 \sin x_2) + \dot{x}_2 p_2 \sin x_2] \dot{x}_2; \\ \lambda_{21}(t, x) &= -(p_3 + p_2 \cos x_2) \ddot{x}_1 - (p_2 \sin x_2) \dot{x}_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Для задания желаемого качества динамики степеней подвижности в каждую  $i$ -ю локальную подсистему введена быстрая явно-неявная эталонная модель [5, 8]

$$\begin{cases} \frac{dx_{0i}(t)}{dt} = A_{0i}x_{0i}(t) + b_i r_i(t+T), \quad v_{0i}(t) = y_{0i}(t) = g_i^T x_{0i}(t), \\ \det(pE - A_{0i}) = (p + a_{0i})^{n_i}, \quad g_i^T (pE - A_{0i})^+ b_i = a_{0i} (p + a_{0i})^{n_i-1}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $x_{0i}(t) \in R^{n_i}$  – переменные состояния эталона;  $r_i(t+T) \in R$  – периодический сигнал;  $v_{0i}(t) \in R$  – обобщенный выход эталона;  $a_{0i} = \text{const}$  – большой коэффициент.

Структура регулирующего органа каждого звена манипулятора задана аналогично [8, 9], в виде суммы робастной  $u_{i\text{роб}}(t)$  и периодической  $u_{i\text{неп}}(t)$  частей с общим коэффициентом усиления  $m = \text{const} > 0$

$$u_i(t) = m [u_{i\text{роб}}(t) + u_{i\text{неп}}(t)]. \quad (9)$$

Поскольку относительный порядок числителя и знаменателя передаточной функции локальных подсистем объекта (3) превышает единицу, для технической реализации локальных контуров регулирования перемещений звеньев робота, в каждой подсистеме введен стационарный наблюдатель полного порядка

$$\frac{d\hat{x}_i(t)}{dt} = \tilde{A}_i \hat{x}_i(t) + b_i u_i(t) + N_i y_i(t), \quad \hat{y}_i(t) = \hat{x}_{1i}(t), \quad \hat{v}_i(t) = \hat{g}_i^T \hat{x}_i(t). \quad (10)$$

Здесь  $\hat{x}_i(t) \in R^{n_i}$ ,  $\hat{v}_i(t) \in R$ ,  $\tilde{A}_i = A_{0i} - N_i L^T$  – вектор переменных состояния, обобщенный выход и матрица состояния наблюдателя соответственно.

Постановка задачи синтеза системы.

Для системы (1)–(7), (9) при использовании малоинерционной эталонной модели (8) и вспомогательного контура наблюдения (10) требуется синтезировать алгоритмы управления регулятора (9), обеспечивающие при любых начальных условиях  $x(0)$ , любых изменениях функций  $\alpha_i(x)$ ,  $\beta_i(x_i)$ ,  $\lambda_{ij}(t, x)$  и действии на объект внешних неперiodических возмущений  $f_i(t)$  выполнение целевых условий функционирования

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{0i}(t) - y_i(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |y_{0i}(t) - \mathfrak{F}_i(t)| \leq \lambda = \text{const} > 0;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_{i \text{ непер}}(t) = u_{i \text{ непер}}^*(t) = u_{i \text{ непер}}(t + T). \quad (11)$$

### Метод решения

Приступая к синтезу алгоритмов управления регулятора (9) отметим одно важное обстоятельство.

Предполагая, что в результате синтеза получена система управления, удовлетворяющая требованиям устойчивости и выполнению целевых условий (11), можно сделать вывод об ограниченности выходных сигналов  $y_i(t)$  каждой  $i$ -й локальной подсистемы объекта регулирования (3)

$$y_i(t) = |y_i(t)| \leq \zeta_{0i}^2 = \text{const} > 0.$$

Следовательно [6], становится очевидным ограниченность пределов изменения всех нелинейных функций, входящих в объект регулирования, т. е.

$$\alpha_i(x) = |\alpha_i(x)| \leq \alpha_{0i}^2 = \text{const} > 0;$$

$$\beta_i(x_i) = |\beta_i(x_i)| \leq \beta_{0i}^2 = \text{const} > 0;$$

$$\lambda_{ij}(t, x) = |\lambda_{ij}(t, x)| \leq \lambda_{0ij}^2 = \text{const} > 0.$$

Тогда, с учетом данных соотношений, уравнения регулятора (9) соотношения (3) можно преобразовать к эквивалентному виду

$$\begin{cases} \frac{dx_i(t)}{dt} = A_{0i}x_i(t) + b_i\tilde{\mu}_i(t, x), & y_i(t) = L^T x_i(t), \\ \tilde{\mu}_i(t, x) = \chi_{0i}^T x_i(t) + \alpha_i^T(x)x_i(t) + \beta_i(x_i) + \delta_i(t, x) + m_i u_{i \text{ непер}}(t) + m_i u_{i \text{ роб}}(t), \end{cases}$$

где  $\delta_i(t, x) = f_{\text{непер}_i}(t) + \sum_{j=1}^k \lambda_{ij}(t, x)$  – нелинейная функция, соответствующая эквивалентному возмущению.

### Робастно-периодические алгоритмы контура управления.

Синтез требуемых законов управления комбинированного регулятора (9) осуществим, в соответствии с [7–9], на основе критерия гиперустойчивости и применения видоизмененного интегрального неравенства Попова.

В рамках *первого этапа* синтеза рассмотрим эквивалентное математическое описание синтезируемой системы

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon_i(t)}{dt} = A_{0i}\varepsilon_i(t) + b_i\mu_i(t, x), & z_i(t) = g_i^T \varepsilon_i(t), \\ \mu_i(t, x) = -\chi_{0i}^T \mathfrak{F}_i(t) - \delta_i(t, x) - m_i u_{i \text{ роб}}(t) - m_i [u_{i \text{ непер}}(t) - \tilde{v}_i(t + T, x)], \end{cases}$$



где  $\tilde{v}_i(t+T, x) = \frac{v_i(t+T, x)}{m_i} = \frac{r_i(t+T) + \alpha_i^T(x)x_i(t) + \beta_i(x_i)}{m_i}$  – некоторый периодический сигнал.

Выполнение требований *второго этапа* синтеза, связанного с обеспечением вещественности и строгой положительности линейной стационарной части (ЛСЧ) исследуемой системы, является очевидным [8], поскольку передаточная функция ЛСЧ системы соответствует аperiodическому звену первого порядка, для которого всегда выполнимо требование

$$\operatorname{Re} W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega) > 0, \quad \forall \omega \in (-\infty; \infty).$$

На *третьем этапе* синтеза, следуя [8, 9], можно показать, что справедливость модифицированного интегрального неравенства Попова

$$\eta^*(0, t) = \sum_k \eta_k^*(0, t) = -\sum_k \int_0^t \mu_{ki}(s) z_i(s) Q_k(s, z_i(s)) ds \geq -\sigma_0^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0,$$

где  $Q_k(s, z_i(s))$  – положительно определенные функции; достигается за счет синтеза алгоритмов регулятора (9) в виде

$$u_{i\text{неп}}(t) = u_{i\text{неп}}(t-T) + \gamma_{0i} z_i(t); \quad u_{i\text{роб}}(t) = \left[ \gamma_{1i} \sum_{l=1}^n |\mathfrak{E}_{il}(t)| + \gamma_{2i} \right] z_i(t), \quad (12)$$

где  $\gamma_{i0}, \gamma_{i1}, \gamma_{i2} = \text{const} > 0$ ;  $z_i(t)$  – сигнал ошибки рассогласования.

В этом случае исходная система (3)–(7), (9) окажется гиперустойчивой и для нее с течением времени будут выполняться предельные целевые условия функционирования (11).

### Вычислительный эксперимент

В качестве примера рассмотрим задачу управления перемещением двухзвенного WA-манипулятора с математическим описанием (3)–(7), (9), (12), структура матриц и векторов каждого звена которого имеет вид

$$A_{11}(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & f_{d1} & p_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{11}(x) & \alpha_{21}(x) & \alpha_{31}(x) \end{pmatrix}; \quad A_{21}(x_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta_1(x_1) \end{pmatrix};$$

$$A_{12}(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & f_{d2} & p_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{12}(x) & \alpha_{22}(x) & \alpha_{32}(x) \end{pmatrix}; \quad A_{22}(x_2) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta_2(x_2) \end{pmatrix}.$$

Нелинейные функции, входящие в состав выражений, а также функции переходных связей звеньев манипулятора, определены в соответствии с выражениями (5)–(7). Постоянные параметры робота имеют значения

$$p_1 = 1,35; \quad p_2 = 0,0529; \quad p_3 = 0,2502;$$

$$f_{d1} = 0,8838; \quad f_{d2} = 0,66285; \quad f_{s1} = 1,50246; \quad f_{s2} = 0,7074.$$

Возмущающие воздействия соответствующих звеньев манипулятора заданы в виде

$$f_{31}(t) = 0,8 \sin[1,5 \sin 2,3t \cdot e^{-0,23t} - 1] 2t;$$

$$f_{32}(t) = 0,8 \sin[1,5 \sin 2,3t \cdot e^{-0,23t} - 1] t.$$

Значения коэффициентов локальных явно-неявных эталонных моделей (8) выбраны со значением  $a_{0i} = 12$ , что позволяет, используя методику, изложенную, например в [5], рассчитать необходимые параметры локальных стационарных наблюдателей (10), которые в данном случае примут вид

$$N_i^T = [870 \quad 243600 \quad 19430000]; \quad g_i^T = [1,1071 \quad 0,2214 \quad 0,0111];$$

$$K_i = 0,011071.$$

Для рассматриваемой системы требуется, чтобы в рабочей области  $A$  (рис. 2) конечная точка второго звена манипулятора описывала траекторию, изображенную на рис. 3, а. В этом случае желаемые изменения углов поворота звеньев (задающие воздействия), а также начальные условия аналитически определяются в виде

$$r_1(t+T) = \sin 0,2t \cdot (1,1 - 0,1 \cos 2t); \quad r_2(t+T) = \cos 0,2t - 1;$$

$$x_1(0) = q_1(0) = 0; \quad x_2(0) = q_2(0) = 0;$$

при этом, графики задающих воздействий будут соответствовать рис. 3, б.

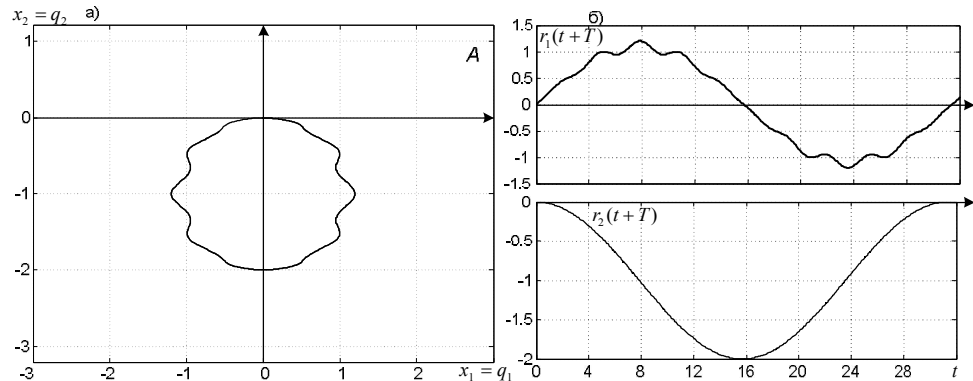


Рис. 3. Желаемая траектория перемещения манипулятора в его рабочей области  $A$  (а) и необходимые задающие воздействия (б)

С целью обеспечения выполнения поставленных требований была проведена серия вычислительных экспериментов, в результате которой необходимые параметры регуляторов (12) локальных систем управления были выбраны со следующими значениями:

$$m_1 = 500, \quad m_2 = 1000;$$

$$\gamma_{01} = 20, \quad \gamma_{11} = 40, \quad \gamma_{21} = 50; \quad \gamma_{02} = 20, \quad \gamma_{12} = 20, \quad \gamma_{22} = 40.$$

Заметим, что вычислительный эксперимент (в связи с малоинерционностью эталона) проводился с использованием неявной эталонной модели [8, 9].





Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 4.

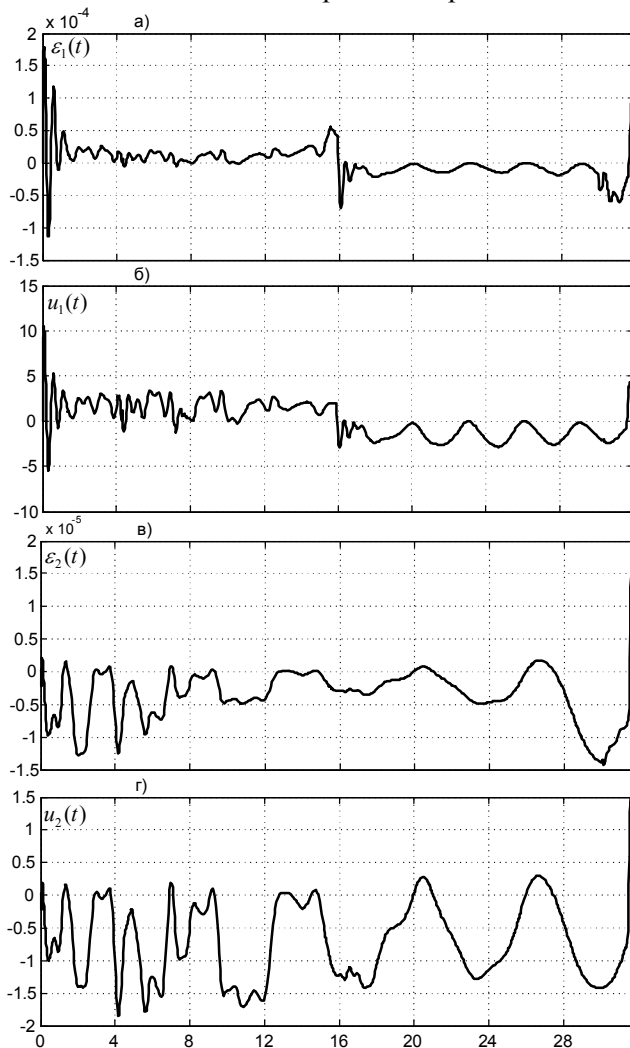


Рис. 4. Динамические характеристики системы управления (а, в – ошибки регулирования локальных подсистем; б, г – локальные сигналы управления)

Представленные результаты моделирования свидетельствуют о том, что применение алгоритмов (12) в локальных регуляторах обеспечивает малую величину ошибки регулирования (рис. 4, а, в), вследствие чего имеет место практически полное совпадение сигналов локальных задающих воздействий, определяющих желаемые угловые перемещения звеньев, и выходных сигналов системы, что соответствует движению концевой точки второго звена робота-манипулятора по заданной траектории (рис. 3, а). Кроме того, как следствие в рассмотренной системе выполняются предельные целевые условия ее функционирования (11).

Необходимо отметить, что в случае определения других траекторий движения с соответствующими задающими воздействиями, а также в случае изменения числовых параметров манипулятора, алгоритмы (12) будут обеспечивать выполнение предельных условий (11) с сохранением высоких качественных показателей функционирования системы.

### Заключение

Рассмотрено решение задачи управления плоскостными перемещениями двухзвенного WAM Барретта как задачи управления сложным динамическим многосвязным нелинейным непериодически возмущенным объектом. Показано, что применение комбинированного робастно-периодического регулятора (9) с синтезированными в рамках критерия гиперустойчивости алгоритмами (12), а также использование дополнительного контура наблюдения (10) позволяют за счет выбора параметров локальных контуров управления добиться достаточно хороших качественных показателей работы системы вместе с обеспечением желаемой траектории перемещения манипулятора в пределах его рабочей области.

### Библиографические ссылки

1. *Spong M. W., Vidyasagar M.* Robot dynamics and control. New York: Wiley, 1989.
2. *McIntyre M. L., Dixon W. E., Dawson D. M., Walker I. D.* Fault Identification for Robot Manipulators // IEEE Transactions on Robotics. 2005. Vol. 21. N 5.
3. *Вукобратович М, Стокич Д., Кирчански Н.* Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. М., 1989.
4. *Краснова С. А.* Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2003.
5. *Еремин Е. Л., Кван Н. В., Семичевская Н. П.* Робастное управление нелинейным объектом со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью // Информатика и системы управления. 2008. № 4(18).
6. *Теличенко Д.А.* Гибридная адаптивная система с эталонным упредителем в схемах децентрализованного управления с запаздыванием // Информатика и системы управления. 2006. № 1(11).
7. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Комбинированные алгоритмы системы робастно-периодического управления нелинейным объектом с запаздыванием // Информатика и системы управления. 2009. № 3(21).
8. *Лебянов Б. Н., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Комбинированная система управления априорно неопределенным нелинейным объектом с запаздыванием по состоянию // Информатика и системы управления. 2010. № 1(23).
9. *Еремин Е. Л., Лебянов Б. Н., Шеленок Е. А.* Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 1(16).