



УДК 684.511

© А. И. Годяев, В. М. Давыдов, Е. А. Шеленок, 2012

СИНТЕЗ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-НЕСТАЦИОНАРНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО СОСТОЯНИЮ

Годяев А. И. – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Автоматика и телемеханика», e-mail: zav_at@festu.khv.ru (ДВГУПС); *Давыдов В. М.* – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы»; *Шеленок Е. А.* – преп. кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: cidshell@mail.ru (ТОГУ)

Рассматривается решение задачи управления многосвязным априорно неопределенным нелинейным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию, функционирующим в периодических режимах. В качестве закона регулирования предлагается комбинированный робастно-периодический алгоритм, синтезированный с помощью критерия гиперустойчивости.

The solution of the problem of an automated control for multiple a priori uncertain nonlinear dynamic plant with statement delay operating in periodic modes is considered. As a control law a combined robust-periodical algorithm synthesized by using the hyper stability criterion is proposed.

Ключевые слова: многосвязный динамический объект, децентрализованное управление, априорная неопределенность, запаздывание, комбинированный алгоритм, критерий гиперустойчивости.

Введение

Подавляющее большинство современных автоматических систем управления различными технологическими процессами – это, как правило, системы управления сложными многосвязными динамическими объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, нестационарности и нелинейности своих параметров, а также при наличии внешних возмущений, имеющих различную природу возникновения. Подобные системы содержат большое количество управляющих сигналов, контролирующих изменение нескольких выходных параметров.

Известно [1], что одним из методов анализа и синтеза таких систем является их декомпозиция – выделение из общей сложной системы отдельных слабосвязанных или вовсе независимых локальных частей (подсистем). Тогда

для решения поставленной задачи управления можно рассматривать некоторый автономный динамический объект (локальную подсистему) с соответствующим ему задающим воздействием, управляющим сигналом и внешним возмущением. Такой способ построения систем носит название децентрализованного управления [2–4].

Обеспечение стабильной работы сложных динамических объектов в некоторых заданных периодических режимах является еще одной актуальной задачей для разработчиков современных систем управления. Примером подобных систем децентрализованного управления являются системы управления манипуляционными роботами, состоящими из нескольких звеньев и предназначенными для выполнения повторяющихся операций [4, 5]. Следует также отметить, что разработка систем управления осложняется не только наличием априорной определенности, нелинейности и нестационарности параметров объекта регулирования, но и наличием временного запаздывания, достаточно широко распространенного на практике. Известно довольно большое множество технических объектов, содержащих запаздывающий элемент, например, в системах автоматического регулирования движения локомотивов присутствуют динамические звенья с запаздыванием по состоянию.

В статье на основании результатов, полученных в работах [3, 4, 7–9], рассматривается решение задачи управления многосвязным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию с помощью комбинированного робастно-периодического контура управления.

Исходное математическое описание и постановка задачи

Исходное математическое описание системы

Рассматривается многосвязный нелинейно-нестационарный априорно неопределенный динамический объект с запаздыванием по состоянию, свойства которого, аналогично [2, 3], запишем в виде уравнений динамики его локальных подсистем:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = A_i(t, x_i) + D_i(t, x_i, \tau_i) + b_i u_i(t) + f_i(t) + \mathcal{G}_i(t), \quad (1)$$

$$x_i(q_i) = \psi_i(q_i), \quad q_i \in [-\tau_i, 0], \quad y_i(t) = L_i^T x_i(t),$$

$$A_i(t, x_i) = [A_{1,i} + A_{2,i}(t+T)]x_i(t) + b_i \delta_i(y_i),$$

$$A_{1,i} = A_{0,i} + \chi_{0,i} b_i L_i^T, \quad A_{2,i}(t+T) = b_i \rho_i^T(t+T), \quad (2)$$

$$D_i(t, x_i, \tau_i) = b_i d_i^T(t+T)x_i(t-\tau_i), \quad b_i = b_{0,i} = [0, \dots, 0, 1]^T,$$

где: $x_i(t) \in R^{n_i}$; $u_i(t) \in R$; $y_i(t) \in R$ – вектор переменных состояния, скалярное задающее воздействие и выход каждой i -й локальной подсистемы объекта; $i = 1, 2, \dots$ – порядковый номер локальных подсистем; τ_i – известные временные запаздывания; $A_i(t, x_i)$ – нелинейный нестационарный вектор,



содержащий в своем составе некоторую неустойчивую стационарную матрицу $A_{1,i}$, нестационарную матрицу $A_{2,i}(t+T)$ с периодически меняющимися в известных пределах коэффициентами, а также нелинейную функцию, определенную в виде:

$$\delta_i(y_i) = |\cos y_i^{\alpha_i}(t)|^{\gamma_i} \cdot y_i(t), \quad (3)$$

где: $D_i(t, x_i, \tau_i)$ – нестационарный вектор с запаздывающим состоянием объекта; $\rho_i(t+T)$, $d_i(t+T)$ – нестационарные вектор-функции с параметрами, являющимися T -периодическими; b_i – стационарный вектор управления; L_i – векторы, формирующие выходы локальных подсистем (1), (2); $f_i(t)$ – векторные сигналы локальных внешних возмущающих воздействий, ограниченных по величине:

$$f_i^T(t) = b_i^T f_{n,i}(t) = [0, \dots, 0, f_{n,i}(t)]^T, \quad (4)$$

$$|f_{n,i}(t)| = |f_{i,непр}(t+T) + f_{i,непр}(t)| < f_{0,i} = const > 0,$$

$\mathcal{G}_i(t) = b_i \sum_{j=1}^m v_{ij}(t)$ – нестационарный вектор, характеризующий перекрестные

связи отдельных подсистем, причем уравнения их динамики имеют вид:

$$\frac{dx_{ij}(t)}{dt} = A_{ij}x_{ij}(t) + b_{ij}y_j(t), \quad v_{ij}(t) = C_{ij}^T x_{ij}(t), \quad (5)$$

где: $x_{ij}(t) \in R^{n_{ij}}$ – переменные состояния перекрестной связи; $v_{ij}(t) \in R$ – выходной скалярный сигнал перекрестной связи; $A_{ij}, C_{ij}, b_{ij} = [0, \dots, 0, 1]^T$ – постоянные матрица и векторы, обеспечивающие устойчивость динамического звена (5).

Априорную неопределенность объекта управления (1)–(5) опишем в соответствии с соотношениями:

$$A_{1,i} = A_{1,\xi_i}, \quad L_i = L_{\xi_i}, \quad \chi_{0,i} = \chi_{\xi_i,0}, \quad \alpha_i = \alpha_{\xi_i}, \quad \gamma_i = \gamma_{\xi_i}, \quad (6)$$

$$\rho_i(t+T) = \rho_{\xi_i}(t+T), \quad d_i(t+T) = d_{\xi_i}(t+T),$$

где: $\xi_i \in \Xi_i$ – параметр, определяющий уровень неопределенности параметров.

С целью задания желаемой динамики работы рассматриваемого много-связного объекта введем в его каждую i -ю подсистему (1), (2) неявно заданный периодический эталон [7], уравнения которого перепишем в виде:

$$\frac{dx_{0,i}(t)}{dt} = A_{0,i}x_{0,i}(t) + b_{0,i}v_{*,i}(t+T), \quad y_{0,i}(t) = L_i^T x_{0,i}(t) = r_i(t+T), \quad (7)$$

где: $r_i(t+T)$ – локальные сигналы периодических задающих воздействий.

$v_{*,i}(t+T)$ – некоторые неявные периодические сигналы.

В качестве устройства управления в каждую локальную подсистему (1)–(5) введем комбинированные робастные динамические контуры [3, 4]:

$$u_i(t) = \zeta_i [u_{i,неп}(t) + u_{i,роб}(t)], \quad (8)$$

где: $u_{i,неп}(t)$, $u_{i,роб}(t)$ – соответственно периодическая и робастная части регулятора; $\zeta_i = const > 0$.

Постановка задачи

Для системы (1)–(5), (8) с помощью неявного периодического эталона (7) требуется определить явный вид алгоритмов локальных комбинированных робастных контуров (8), обеспечивающих при любых начальных условиях $x_i(0)$, любом уровне априорной неопределенности $\xi_i \in \Xi_i$, а также любых нелинейных параметрах (3) и внешних возмущениях объекта (4), выполнение предельных целевых условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{0,i}(t) - y_i(t)| \leq \sigma_{0,i}^2, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} u_{i,неп}(t) = u_{i,неп}^*(t) = u_{i,неп}(t + T_i), \quad (9)$$

где: $\sigma_{0,i} = const > 0$ – некоторые достаточно малые числа.

Синтез комбинированной робастной системы управления

Применим схему критерия гиперустойчивости [2–4, 7–9] для каждой отдельной подсистемы объекта с целью синтеза алгоритмов управления локальных робастно-периодических регуляторов (8). Отметим, что, по аналогии, например, с [2, 3], выходные сигналы переходных связей (5) для каждой локальной подсистемы объекта (1), (2) будут являться ограниченными функциями, т. е.:

$$\left| \sum_{j=1}^m v_{ij}(t) \right| \leq v_{0,ij}^2 = const > 0.$$

Первый этап синтеза. Пользуясь понятием ошибки рассогласования $\varepsilon_i(t) = x_{0,i}(t) - x_i(t)$ и уравнениями эталона (7), получим эквивалентное математическое описание синтезируемой системы управления:

$$\frac{d\varepsilon_i(t)}{dt} = A_{0,i}\varepsilon_i(t) + b_{0,i}\mu(t), \quad z_i(t) = L_i^T \varepsilon_i(t) = r_i(t+T) - y_i(t), \quad (10)$$

$$\mu(t) = -\zeta_i [u_{i,неп}(t) - \beta_i(t+T)] - \zeta_i u_{i,роб}(t) - f_{i,неп}(t) - \chi_{0,i} y_i(t),$$

с периодическим сигналом:

$$\beta_i(t+T) = \zeta_i^{-1} [v_{*,i}(t+T) + \rho_i^T(t+T)x_i(t) + d_i^T(t+T)x_i(t - \tau_i) + \delta_i(y_i) + \tilde{f}_i(t+T)], \quad (10)$$

где: $\tilde{f}_i(t+T) = f_{i,неп}(t+T) + \sum_{j=1}^m v_{ij}(t)$ – эквивалентное возмущение.

Второй этап синтеза. Выполнение условий вещественности и положи-



тельности ЛСЧ эквивалентной системы (10) можно обеспечить за счет выбора элементов каждого из векторов $L_i^T = [l_1, \dots, l_{n_i}]$ локальных подсистем объекта с передаточными функциями вида:

$$W_{i,ЛСЧ}(s) = \frac{L_i^T (sE - A_{0,i})^+ b_{0,i}}{(sE - A_{0,i})}$$

так, чтобы полиномы $l_i(s) = l_{n_i} s^{n_i-1} + l_{n_i-1} s^{n_i-2} + \dots + l_2 s + l_1$ (n_i – порядок локальной подсистемы) были гурвицевыми с положительными коэффициентами [3, 7]. В этом случае требование, предъявляемое к ЛСЧ системы (10):

$$\operatorname{Re}[W_{i,ЛСЧ}(j\omega)] > 0, \forall \omega \in (-\infty; \infty), j^2 = -1.$$

будет выполнено.

Третий этап синтеза. Получим явный вид аналитических выражений, определяющих алгоритмы локальных контуров управления (8) для каждой подсистемы объекта, т. е. обеспечим выполнения модифицированного интегрального неравенства В. М. Попова [9] вида:

$$\bar{\eta}_k(0, t) = -\sum_k \int_0^t \mu_{k,i}(s) z_i(s) Q_{k,i}(z_i(s)) ds \geq \bar{\lambda}_{0,i}^2 = \text{const}, \forall t > 0, \quad (11)$$

где: $Q_{k,i}(z_i(t))$ – некоторые положительно определенные функции.

Пользуясь методикой, изложенной в работах [3, 7–9], и опираясь на соотношения, полученные на первом этапе синтеза системы управления, можно показать, что рассмотрение интегральных слагаемых правой части (11) в силу (10), имеющих вид:

$$\bar{\eta}_1(0, t) = \zeta_i \int_0^t [u_{i,неп}(s) - \beta_i(s+T)] z_i(s) ds;$$

$$\bar{\eta}_2(0, t) = \zeta_i \int_0^t u_{i,поб}(s) z_i(s) ds;$$

$$\bar{\eta}_3(0, t) = \zeta_i \left[\int_0^t f_{i,неп}(s) z_i(s) |z_i(s)| ds + \int_0^t y_i(s) z_i(s) |z_i(s)| ds \right];$$

для которых $Q_{1,i}(z_i(t)) = Q_{2,i}(z_i(t)) = 1$; $Q_{3,i}(z_i(t)) = \zeta_i |z_i(t)|$; $Q_{4,i}(z_i(t)) = \zeta_i \chi_{0,i}^{-1} |z_i(t)|$; и определение явного вида требуемых локальных алгоритмов управления с помощью соотношений:

$$u_{i,неп}(t) = u_{i,неп}(t - T_i) + \beta_{0,i} z_i(t), \quad (12)$$

$$u_{i,поб}(t) = [\beta_{1,i} + \beta_{2,i} |y_i(t)|^{\beta_i}] z_i(t) \quad (13)$$

позволяет обеспечить существование справедливых интегральных оценок:

$$\bar{\eta}_1(0, t) \geq -\bar{\lambda}_{01,i}^2, \bar{\eta}_2(0, t) \geq -\bar{\lambda}_{02,i}^2, \bar{\eta}_3(0, t) \geq -\bar{\lambda}_{03,i}^2, \bar{\lambda}_{0k,i} = \text{const}, \forall t > 0,$$

не противоречащих справедливости интегрального неравенства (11).

Из выполнения требований всех пройденных этапов синтеза следует, что исследуемая система управления (1)–(5), (8) с алгоритмами локальных робастно-периодических регуляторов (12), (13) является гиперустойчивой в заданном классе априорной неопределенности $\xi_i \in \Xi_i$ (6), и для нее будут справедливы предельные целевые условия (9).

Вычислительный эксперимент

Исследуем процесс функционирования синтезированной системы управления нелинейным многосвязным объектом (1)–(5), состоящим из двух локальных подсистем с динамикой, описанной уравнениями:

– первая подсистема

$$\begin{aligned}
 A_1(t, x_1) &= \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \rho_{1,1}(t+T) & \rho_{2,1}(t+T) & \rho_{3,1}(t+T) \end{pmatrix} \right] x_1(t) + \\
 &+ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \left| \cos y_1^{\alpha_1}(t) \right|^{\gamma_1} y_1(t) \end{pmatrix}; \quad \rho_{k,1}(t+T) = p_{k,1} \sin(q_{k,1} \pi t); \\
 D_1(t, x_1, \tau_1) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{1,1}(t+T) & d_{2,1}(t+T) & d_{3,1}(t+T) \end{pmatrix} x_1(t - \tau_1); \\
 f_1(t) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{3,1}(t) \end{pmatrix}; \quad d_{k,1}(t+T) = b_{k,1} \cos(v_{k,1} t); \\
 &f_{3,1nep}(t+T) = \sigma_1 \sin(\pi t); \\
 &f_{3,1nep}(t) = \kappa_1 \sin[\sin(v_1 t) \cdot e^{-\lambda_1 t} - 1]t;
 \end{aligned}$$

– вторая подсистема

$$\begin{aligned}
 A_2(t, x_2) &= \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \rho_{1,2}(t+T) & \rho_{2,2}(t+T) \end{pmatrix} \right] x_2(t) + \\
 &+ \begin{pmatrix} 0 \\ \left| \cos y_2^{\alpha_2}(t) \right|^{\gamma_2} y_2(t) \end{pmatrix}; \quad \rho_{k,2}(t+T) = p_{k,2} \cos(q_{k,2} \pi t); \\
 D_2(t, x_2, \tau_2) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ d_{1,2}(t+T) & d_{2,2}(t+T) \end{pmatrix} x_2(t - \tau_2); \quad d_{k,2}(t+T) = b_{k,2} \sin(v_{k,2} t); \\
 f_2(t) &= \begin{pmatrix} 0 \\ f_{2,2}(t) \end{pmatrix}; \quad f_{2,2nep}(t+T) = -\sigma_2 \cos \pi t; \\
 &f_{2,2nep}(t) = \kappa_2 [\sin(v_2 t) + \cos(\lambda_2 t)].
 \end{aligned}$$



Перекрестные связи в рассматриваемом объекте заданы передаточными функциями устойчивых динамических звеньев:

$$W_{12}(s) = \frac{s+2}{0,5s^2+2s+1}; W_{21}(s) = \frac{s+5}{0,3s^2+3s+1}.$$

Локальные задающие воздействия для подсистем объекта управления были сформированы в виде периодических сигналов:

$$\begin{aligned} r_1(t+T) &= \sin(0,8t) \cos(0,4t), \\ r_2(t+T) &= 0,2[\sin(0,8t) - \cos(0,4t)] + 0,2, \end{aligned} \quad (14)$$

графическая интерпретация которых представлена на рис. 2.13.

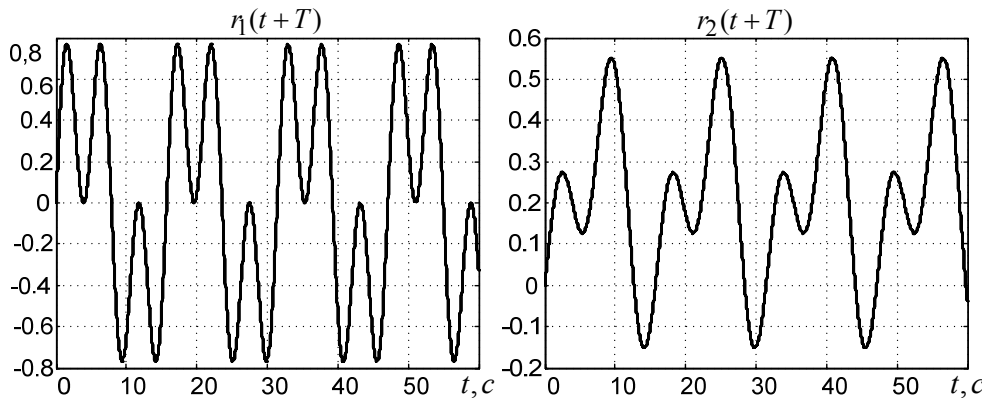


Рис. 1. Сигналы локальных задающих воздействий системы

На рис. 2 представлены динамические процессы системы с набором числовых значений параметров объекта управления:

– для первой локальной подсистемы

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= 15; \quad l_{1,1} = 2; \quad p_{1,1} = 0,2; \quad q_{1,1} = 0,1; \quad b_{1,1} = 0,5; \quad v_{1,1} = 0,6; \quad \alpha_1 = 3; \\ a_{2,1} &= -7; \quad l_{2,1} = 5; \quad p_{2,1} = 0,4; \quad q_{2,1} = 0,15; \quad b_{2,1} = 1; \quad v_{2,1} = 0,3; \quad \gamma_1 = 2; \\ a_{3,1} &= 10; \quad l_{3,1} = 3; \quad p_{3,1} = 1; \quad q_{3,1} = 0,2; \quad b_{3,1} = 0,3; \quad v_{3,1} = 0,3; \quad \sigma_1 = -0,5; \\ \kappa_1 &= 0,2; \quad \nu_1 = 2,3; \quad \lambda_1 = 0,2; \quad \tau_1 = 2; \end{aligned}$$

– для второй локальной подсистемы

$$\begin{aligned} a_{1,2} &= 12; \quad l_{1,2} = 1; \quad p_{1,2} = 0,4; \quad q_{1,2} = 0,1; \quad b_{1,2} = 0,2; \quad v_{1,2} = 0,3; \quad \alpha_2 = 2; \\ a_{2,2} &= -10,3; \quad l_{2,2} = 3; \quad p_{2,2} = 0,1; \quad q_{2,2} = 0,15; \quad b_{2,2} = 0,3; \quad v_{2,2} = 0,2; \quad \gamma_2 = 3; \\ \sigma_2 &= -0,3; \quad \kappa_2 = 0,1; \quad \nu_2 = 0,7; \quad \lambda_2 = 1,5 \end{aligned}$$

и коэффициентами локальных комбинированных робастных регуляторов:

$$\begin{aligned} \zeta_1 = 100; \beta_{0,1} = 30; \beta_{1,1} = 20; \beta_{2,1} = 50; \beta_1 = 3; T_1 = 1,5; \\ \zeta_2 = 100; \beta_{0,2} = 50; \beta_{1,2} = 15; \beta_{2,2} = 30; \beta_2 = 2; T_2 = 5, \end{aligned} \quad (15)$$

выбранных в ходе имитационного моделирования.

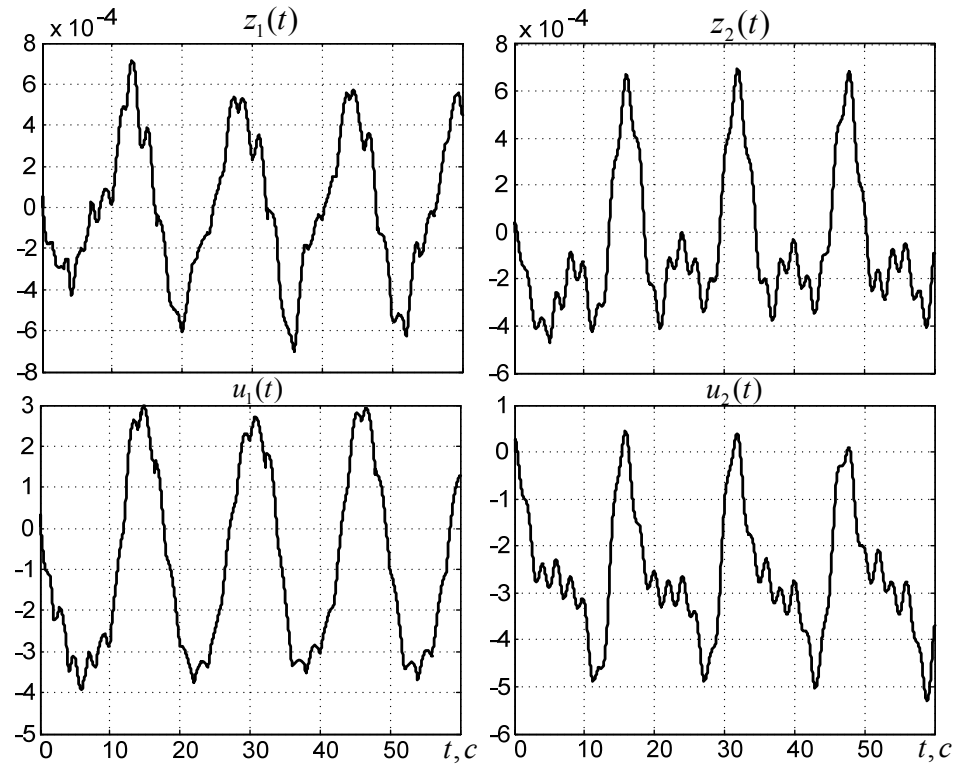


Рис. 2. Ошибки регулирования $z_1(t)$, $z_2(t)$ и сигналы управления $u_1(t)$, $u_2(t)$ для локальных подсистем объекта

Рис. 3 иллюстрирует динамические процессы, полученные в ходе имитационного моделирования системы управления с сигналами задающих воздействий (14), параметрами локальных контуров регулирования (15), а также при параметрах первой подсистемы:

$$\begin{aligned} a_{1,1} = -5; \quad l_{1,1} = 2; \quad p_{1,1} = 0,1; \quad q_{1,1} = 0,2; \quad b_{1,1} = 0,1; \quad v_{1,1} = 0,4; \quad \alpha_1 = 5; \\ a_{2,1} = 12; \quad l_{2,1} = 1; \quad p_{2,1} = 0,2; \quad q_{2,1} = 0,2; \quad b_{2,1} = 0,6; \quad v_{2,1} = 0,4; \quad \gamma_1 = 3; \\ a_{3,1} = -10; \quad l_{3,1} = 3; \quad p_{3,1} = 0,4; \quad q_{3,1} = 0,2; \quad b_{3,1} = 0,1; \quad v_{3,1} = 0,2; \quad \sigma_1 = -0,5; \\ \kappa_1 = 0,2; \quad \nu_1 = 2,3; \quad \lambda_1 = 0,2; \quad \tau_1 = 2; \end{aligned}$$

и параметрах второй подсистемы:



$$a_{1,2} = -12; l_{1,2} = 2; p_{1,2} = 0,4; q_{1,2} = 0,3; b_{1,2} = 0,5; v_{1,2} = 0,2; \alpha_2 = 3;$$

$$a_{2,2} = 9,5; l_{2,2} = 5; p_{2,2} = 0,3; q_{2,2} = 0,1; b_{2,2} = 0,1; v_{2,2} = 0,4; \gamma_2 = 5;$$

$$\sigma_2 = -0,3; \kappa_2 = 0,1; v_2 = 0,7; \lambda_2 = 1,5; \tau_2 = 1,5.$$

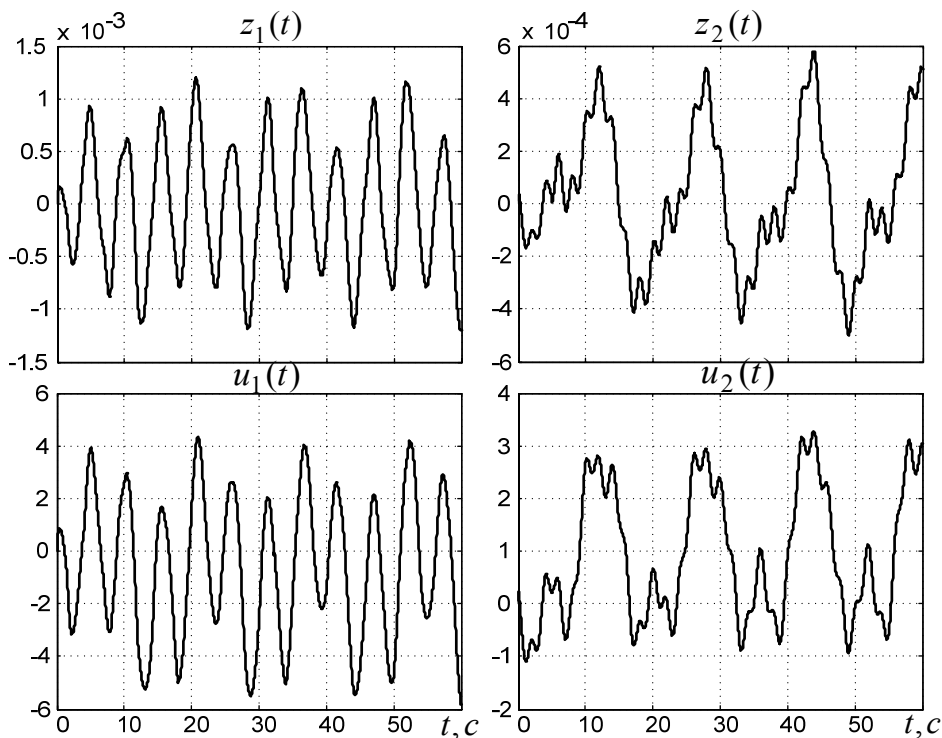


Рис. 3. Ошибки регулирования $z_1(t)$, $z_2(t)$ и сигналы управления $u_1(t)$, $u_2(t)$ локальных подсистем объекта управления с измененными параметрами

Представленные результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод о достаточно хорошем функционировании синтезированной системы управления многосвязными нелинейными динамическими объектами с запаздыванием по состоянию. Данное обстоятельство прежде всего обусловлено малой величиной сигнала ошибки рассогласования $z(t)$ (максимальное значение которой не превышает 0,2 %), а также качественным сигналом управления $u(t)$.

Заключение

Представлено решение задачи децентрализованного управления многосвязным нелинейным априорно неопределенным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию. В качестве закона управления предложен комбинированный регулятор, состоящий из периодической настройки и робастной части, алгоритмы которого синтезированы на основании критерия гипе-

рустойчивости. На основании проведенного имитационного моделирования показано, что с помощью предложенного комбинированного контура управления (8), (12), (13) можно обеспечить высокое качество функционирования построенной системы при различных параметрах управляемого объекта.

Библиографические ссылки

1. *Jane S., Khorrami F.* Decentralized adaptive control of a class of Large-Scale interconnected nonlinear systems // IEEE Trans. Aut. Contr. – 1997. – Vol. 42. – No. 2.
2. *Теличенко Д. А.* Гибридная адаптивная система с эталонным упредителем в схемах децентрализованного управления с запаздыванием // Информатика и системы управления. – 2006. – № 1 (11).
3. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А.* Периодические режимы в схемах децентрализованного адаптивного и робастного управления // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2011. – № 1 (35).
4. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Циклический режим в системе робастного управления манипулятором Барретта // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 3 (18).
5. *McIntyre M. L., Dixon W. E., Dawson D. M., Walker I. D.* Fault Identification for Robot Manipulators // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. – Vol. 21. – № 5.
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. *Галаган Т. А., Еремин Е. Л., Семичевская Н. П.* Нелинейное робастное управление нестационарными объектами. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006.