



ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев Ю.Н.* Управление конечномерными линейными объектами. – М: Наука, 1976.
2. *Boyd S., Ghaoui L. El, Feron E. and Balakrishnan V.* Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. – Philadelphia: SIAM studies in Applied Mathematics, 1994.
3. *Carsten Scherer and Siep Weiland.* Lecture Notes DISC Course on Linear Matrix Inequalities in Control. – Version: May, 1997.
4. *Баландин Д.В., Коган М.М.* Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
1. 5. *Кривдина Л.Н.* Стабилизация дискретных объектов по выходу на основе линейных матричных неравенств // Информатика и системы управления. – 2006. – № 2(12). – С.102-110.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М.М. Коганом.*

УДК 681.513.6

© 2007 г. **Д.А. Теличенко**, канд. тех. наук  
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

**ЭТАЛОННЫЙ УПРЕДИТЕЛЬ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ  
УПРАВЛЕНИЯ SISO И МИМО-ОБЪЕКТАМИ  
С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ<sup>1</sup>**

Для класса априорно неопределенных объектов с запаздыванием по управлению, состоянию и нейтрального типа рассмотрены различные способы построения непрерывных и гибридных систем адаптации на основе применения эталонного упредителя. Децентрализованный подход к синтезу непрерывных и многосвязных МИМО-объектов распространен на случай SISO-объектов.

**Введение**

Наиболее широким классом систем, имеющих значительное распространение на практике, являются многосвязные системы управления с запаздываниями [1]. Среди всего объема публикаций по данной тематике отдельно выделяются работы, использующие децентрализованный подход к синтезу законов управления [2, 3]. В случае, когда измерению доступен не весь вектор состояния объекта, чаще всего используется методика расширения ошибки слежения в совокупности с различными схемами компенса-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-08-00045).

ции запаздываний [4 – 7].

Вполне очевидно, что полученные законы адаптации для случая ММО-объектов, содержащих запаздывания по управлению, состоянию и нейтрального типа, могут быть успешно перенесены на SISO-объекты, а также на случай присутствия только запаздывания по управлению или запаздывания по управлению и состоянию.

В работе рассматривается комплексный подход к построению систем адаптивного управления работоспособных при наличии возмущающих воздействий и различных типов запаздываний. Ключевой идеей работы является использование эталонного упредителя, предназначенного для компенсации запаздываний и для формирования желаемой динамики процессов управления. Статья состоит из нескольких независимых частей, в каждой из которых строятся непрерывные и дискретные контуры управления для различных типов объектов. На каждом этапе коротко характеризуются имеющиеся альтернативные к построению полученных систем адаптации.

### Математическое описание и постановка задачи синтеза системы

*Объект управления.* Рассматривается класс многосвязных ММО-объектов, заданных в составной форме уравнениями [4, 8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) = A \cdot x(t) + \Lambda \cdot x(t-t) + \Lambda^* \cdot x(t-t^*) + \Gamma \cdot \mathbf{x}(t-t^*) + B \cdot u(t-h) + \\ + B \cdot q(t) + f(t), \quad y(t) = L^T \cdot x(t), \quad q^T(t) = \left( \sum_{j=1}^d q_{1j}(t), \dots, \sum_{j=1}^d q_{dj}(t) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $j \neq i, i = \overline{1, d}$ ;  $x \in R^n$ ;  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_d$  – общий порядок системы;  $d$  – количество локальных подсистем, на которые может быть разбит объект управления (1);  $y^T = (y_1, \dots, y_d)$ ;  $u^T = (u_1, \dots, u_d)$ ;  $h^T = (h_1, \dots, h_d)$ ,  $\tau^T = (\tau_1, \dots, \tau_d)$ ,  $\tau^* = (\tau_1^*, \dots, \tau_d^*)^T$ ;  $\theta$  – вектор перекрестных связей;  $A, \Lambda, \Lambda^*, \Gamma, B, L, f$  – блочно-диагональные матрицы соответствующей размерности.

Считается, что динамические процессы в локальных подсистемах объекта управления (1) описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t) = A_i \cdot x_i(t) + \Lambda_i \cdot x_i(t-t_i) + \Lambda_i^* \cdot x_i(t-t_i^*) + \Gamma_i \cdot \mathbf{x}_i(t-t_i^*) + \\ + B_i \cdot u_i(t-h_i) + B_i \cdot \sum_{j=1}^d q_{ij}(t) + f_i(t), \quad y_i(t) = L_i^T \cdot x_i(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$A_i = A_i(x_i), \quad \Lambda_i = \Lambda_i(x_i), \quad \Lambda_i^* = \Lambda_i^*(x_i), \quad L_i = L_i(x_i),$$

$$B_i = B_i(x_i), \quad f_i(t) = f_{x_i}(t), \quad \Gamma_i = (0, \dots, 0; \dots; 0, \dots, g_i)$$

$$u_i(z) = j_i(z), \quad x_i(v) = f_i(v), \quad \mathbf{x}_i(r) = y_i(r), \quad (3)$$

$$z \in [-h_{\max}, 0], \quad v \in [-t_{\max}, 0], \quad r \in [-t_{\max}^*, 0]$$

$$h_{\max} = \max\{h_1, \dots, h_d\}, \quad t_{\max} = \max\{t_1, \dots, t_d\}, \quad t_{\max}^* = \max\{t_1^*, \dots, t_{1d}^*\}$$

где  $x_i \in R^{n_i}$ ;  $y_i \in R$  – выход  $i$ -й локальной подсистемы;  $u_i \in R$  – локальное управляющее воздействие;  $\theta_{ij} \in R$  – динамическая перекрестная связь, действующая на  $i$ -ю подсистему со стороны  $j$ -й;  $h_i, \tau_i, \tau_i^* = const > 0$  – известные постоянные запаздывания – соответственно по управлению, состоянию и нейтрального типа, величина которых соразмерна с постоянными времени объекта;  $|g_i| \leq 1$  – известная величина;  $\zeta_i$  – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству  $\Xi_i$ ;  $j_i(z) \in C_{h_i}$ ,  $f_i(v) \in C_{t_i}$ ,  $y_i(r) \in C_{t_i^*}$  – начальные функции;  $C_{h_i}, C_{t_i}, C_{t_i^*}$  – пространства непрерывных и ограниченных функций;  $A_i, \Lambda_i, \Lambda_i^*, \Gamma_i, L_i, B_i$  – матрицы и векторы соответствующей размерности;  $f_i^T = (0, \dots, 0, \tilde{f}_i) \in R^{n_i}$  – вектор постоянно действующего возмущения с элементом  $\tilde{f}_i(t)$ , величина которого ограничена по модулю  $|\tilde{f}_i(t)| \leq \tilde{f}_{0i} = const > 0$ .

Действие динамических перекрестных связей в объекте управления (1)-(3) описывается уравнениями

$$\mathbf{x}_{ij}(t) = A_{ij} \cdot x_{ij}(t) + B_{ij} \cdot y_j(t), \quad q_{ij}(t) = L_{ij}^T \cdot x_{ij}(t), \quad (4)$$

где  $x_{ij}(t) \in R^{n_{ij}}$ ;  $B_{ij}^T = (0, \dots, 0, 1)$ ;  $A_{ij}, L_{ij}$  – неизвестные числовые матрица и вектор такие, что передаточная функция модели (4) описывает устойчивое динамическое звено.

*Контур компенсации запаздываний и адаптивный регулятор.* Для каждой локальной подсистемы, принимая во внимание особенности формирования дополнительного контура управления «классическим» образом, т.е. с блоком упреждения [6]

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{Ki}(t) = & A_{mi} \cdot x_{Ki}(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_{Ki}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_{Ki}(t - t_i^*) + \\ & + \Gamma_{mi} \cdot \mathbf{x}_{Ki}(t - t_i^*) + B_{mi} \cdot (u_i(t) - u_i(t - h_i)), \quad y_{Ki}(t) = L_{mi}^T \cdot x_{Ki}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

и эталонной моделью

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{mi}(t) = & A_{mi} \cdot x_{mi}(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_{mi}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_{mi}(t - t_i^*) + \\ & + \Gamma_{mi} \cdot \mathbf{x}_{mi}(t - t_i^*) + B_{mi} \cdot (u_i(t) - u_i(t - h_i)), \quad y_{mi}(t) = L_{mi}^T \cdot x_{mi}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

и учитывая использование для синтеза системы ошибки рассогласования  $e_i(t) = x_{эmi}(t) - (x_i(t) + x_{Ki}(t))$ , вместо блоков (5), (6) применяется эталонный упредитель [7 – 9], в котором  $x_{mi}(t) = x_{эmi}(t) - x_{Ki}(t)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{mi}(t) = & A_{mi} \cdot x_{mi}(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_{mi}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_{mi}(t - t_i^*) + \\ & + \Gamma_{mi} \cdot \mathbf{x}_{mi}(t - t_i^*) + B_{mi} \cdot y_i(t), \quad y_{mi}(t) = L_{mi}^T \cdot x_{mi}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $y_i(t) = [u_i(t - h_i) + J_i(t)]$ ;  $J_i(t)$  – настраиваемый параметр адаптивного регулятора

$$u_i(t) = r_i(t) - J_i(t), \quad J_i(t) = c_{1i}^T(t) \cdot \bar{y}_i(t) + c_{2i}(t) \cdot u_i(t - h_i) + c_{3i}^T(t) \cdot \bar{y}_i(t - t_i) + c_{4i}^T(t) \cdot \bar{y}_i(t - t_i^*), \quad (8)$$

где  $\bar{y}_i$  – оценка переменных состояния (каждого локального контура управления), способы получения которой будут уточнены по ходу изложения материала.

В рамках метода непрерывных моделей [5, 9, 10] уравнения (7), (8) в дискретном виде могут быть записаны следующим образом:

$$x_{m,k+1} = F_{m,k}(x_{m,k}, x_{m,k-j_2}, x_{m,k+1-j_3}, \mathbf{Y}_k), \quad y_{m,k} = L_{m,k}(x_{m,k}), \quad (9)$$

$$u_k = u(r_k, \mathbf{X}_k, \bar{y}_k, u_{k-j_1}, \bar{y}_{k-j_2}, \bar{y}_{k-j_3}), \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_k = F_{r,k}(c_{1,k}, c_{2,k}, c_{3,k}, c_{4,k}, \mathbf{X}_{k-1}),$$

где  $F_{m,k}, F_{r,k}$  – некоторые функции;  $t_k = k \cdot I$  – дискретный аналог времени;  $I = \text{const} > 0$  – шаг дискретизации;  $k = 0, 1, 2, \dots$  – номер шага;  $j_{1i}, j_{2i}, j_{3i}$  – числовые значения запаздываний соответственно по управлению, состоянию и нейтрального типа каждой из  $i$  локальных подсистем.

*Постановка задачи синтеза.* Требуется определить явный вид алгоритмов параметрической настройки коэффициентов адаптивного регулятора (8), (10) таким образом, чтобы для каждой  $i$ -й подсистемы при любых начальных условиях  $x_i(0)$  и любом наборе  $x_i \in \Xi_i$  обеспечивалось бы выполнение целевых условий для непрерывной системы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{\varepsilon mi}(t) - y_i(t)| \leq d_{0i}, \quad d_{0i} = \text{const} > 0, \quad (11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_{1iq_i}(t) \leq c_{10iq_i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_{2i}(t) \leq c_{20i}, \quad (12)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_{3iq_i}(t) \leq c_{30iq_i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_{4iq_i}(t) \leq c_{40iq_i}, \quad q_i = \overline{1, n_i}$$

или для гибридной системы:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |y_{\varepsilon mi,k} - y_{i,k}| \leq d_{0i,k}, \quad d_{0i,k} = \text{const} > 0, \quad (13)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} c_{1iq_i,k} \leq c_{10iq_i,k}, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} c_{2i,k} \leq c_{20i,k}, \quad (14)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} c_{3iq_i,k} \leq c_{30iq_i,k}, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} c_{4iq_i,k} \leq c_{40iq_i,k}, \quad q_i = \overline{1, n_i},$$

где  $c_{10iq_i}, c_{10iq_i,k}, c_{20i}, c_{20i,k}, c_{30iq_i}, c_{30iq_i,k}, c_{40iq_i}, c_{40iq_i,k} = \text{const}$ .

При этом явно эталонную модель в системе реализовывать не требуется, а обеспечение (11), (13) с относительно небольшими  $d_{0i}, d_{0i,k}$  гарантируется выполнением  $\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{mi}(t) - y_i(t)| \leq e_{0i}, \lim_{k \rightarrow \infty} |y_{mi,k} - y_{i,k}| \leq e_{0i,k}$ .

### Система с полностью измеряемым вектором состояния

*Эквивалентное представление.* Рассмотрим класс многосвязных ММО-систем с децентрализованной структурой управления [4, 8]. Будем

считать, что сигналы задания  $r_i(t)$  или  $r_{i,k}$  являются ограниченными кусочно-непрерывными функциями. Синтез алгоритмов адаптации проведем таким образом, чтобы обеспечить выполнение (11)-(13). В этом случае, учитывая (4), каждая локальная подсистема (2), (3) представляется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t) = & A_i \cdot x_i(t) + \Lambda_i \cdot x_i(t - t_i) + \Lambda_i^* \cdot x_i(t - t_i^*) + \Gamma_i \cdot \mathbf{x}_i(t - t_i^*) + \\ & + B_i \cdot u_i(t - h_i) + S_i(t), \quad y_i(t) = L_i^T \cdot x_i(t), \quad S_i(t)^T = (0, \dots, 0, \tilde{S}_i(t)), \end{aligned} \quad (15)$$

$$|\tilde{S}_i(t)| \leq \tilde{S}_{i0} = \text{const} > 0, \quad \text{при} \quad \left| \sum_{j=1}^d q_{ij}(t) \right| \leq \tilde{q}_{i0} = \text{const} > 0, \quad (16)$$

что позволяет от исходной системы (1)-(4) перейти к (15), (16), для каждой из которых необходимо обеспечить выполнение (11), (12) или (13), (14). В дальнейшем, считая доступными измерению все переменные состояния объекта, обозначим  $\bar{y}_i = L_i^T \cdot x_i$ , где  $L_i^T$  – единичная  $n_i$ -мерная матрица.

*Непрерывная система.* Рассматривая случай, когда в каждой локальной подсистеме (15), (16) числитель передаточной функции  $b_i(s)$  – устойчивый полином степени  $m_i$ , уравнения эталонного упреждителя можно описать минимально возможным порядком  $l_i = n_i - m_i > 1$ , т.е. задать его в явном виде

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{mi}(t) = & \tilde{A}_{mi} \cdot \tilde{x}_{mi}(t) + \tilde{\Lambda}_{mi} \cdot \tilde{x}_{mi}(t - t_i) + \tilde{\Lambda}_{mi}^* \cdot \tilde{x}_{mi}(t - t_i^*) + \\ & + \tilde{\Gamma}_{mi} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{mi}(t - t_i^*) + \tilde{B}_{mi} \cdot y_i(t), \quad \tilde{y}_{mi}(t) = \tilde{L}_{mi}^T \cdot \tilde{x}_{mi}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

При этом переход к явному представлению (7) порядка  $n_i$  осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{mi}(s) = & \frac{\tilde{y}_{mi}(s)}{y_i(s)} = \frac{k_{mi}}{\tilde{a}_{mi}(s)} = \frac{k_{mi}}{\tilde{a}_{mi}(s)} \cdot \frac{b_i(s)}{b_i(s)} = \frac{k_{mi} \cdot b_i(s)}{a_{mi}(s)}, \\ \mathbf{x}_{mi}(t) = & A_{mi} \cdot x_{mi}(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_{mi}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_{mi}(t - t_i^*) + \\ & + \Gamma_i \cdot \mathbf{x}_{mi}(t - t_i^*) + B_{mi} \cdot y_i(t), \\ y_{mi}(t) = & L_i^T \cdot x_{mi}(t), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\tilde{a}_{mi}(s)$  – устойчивый [11] квазиполином степени  $l_i$ .

Проводя дальнейший синтез системы в рамках критерия гиперустойчивости [12], в рассмотрение вводим сигнал ошибки  $e_i(t) = x_{mi}(t) - x_i(t)$ . Считая, что для системы имеют место условия структурно согласования:

$$\begin{aligned} A_{mi} - A_i = & -B_{mi} \cdot C_{10i}^T \cdot L_i^T, \\ \Lambda_{mi} - \Lambda_i = & -B_{mi} \cdot C_{30i}^T \cdot L_i^T \\ \Lambda_{mi}^* - \Lambda_i^* = & -B_{mi} \cdot C_{40i}^T \cdot L_i^T, \\ B_i = & B_{mi}(1 + C_{20i}), \end{aligned} \quad (19)$$

воспользовавшись концепцией расширенной ошибки, можно записать эквивалентное математическое описание системы [9]

$$\begin{cases}
\tilde{\mathbf{e}}_i(t) = A_{mi} \cdot \tilde{\mathbf{e}}_i(t) + \Lambda_{mi} \cdot \tilde{\mathbf{e}}_i(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot \tilde{\mathbf{e}}_i(t - t_i^*) + \Gamma_i \cdot \tilde{\mathbf{e}}_i(t - t_i^*) + \\
+ B_{mi} \cdot \tilde{\mathbf{m}}_i(t), \quad \tilde{\mathbf{v}}_i(t) = \bar{v}_i(t) + \bar{v}_i(t) = D_i(p) \cdot L_i^T \cdot \tilde{\mathbf{e}}_i(t), \\
\tilde{\mathbf{m}}_i(t) = \left[ (c_{1i}(t) - c_{10i})^T \cdot \mathcal{Y}_i(t) + (c_{2i}(t) - c_{20i}) \cdot \mathcal{U}_i(t - h_i) + \right. \\
\left. + (c_{3i}(t) - c_{30i})^T \cdot \mathcal{Y}_i(t - t_i) + (c_{4i}(t) - c_{40i})^T \cdot \mathcal{Y}_i(t - t_i^*) \right], \\
\bar{v}_i(t) = \tilde{y}_{mi}(t) - y_i(t), \quad \bar{v}_i(t) = k_{mi} \cdot D_i(p) \cdot q_i(p) / \tilde{a}_{mi}(p), \\
q_i(t) = -D_i^{-1}(p) c_{1i}^T(t) \bar{y}_i(t) + c_{1i}^T(t) \mathcal{Y}_i(t) - D_i^{-1}(p) c_{2i}(t) u_i(t - h_i) \\
+ c_{2i}(t) \mathcal{U}_i(t - h_i) - D_i^{-1}(p) c_{3i}^T(t) \bar{y}_i(t - t_i) + c_{3i}^T(t) \mathcal{Y}_i(t - t_i) - \\
- D_i^{-1}(p) c_{4i}^T(t) \bar{y}_i(t - t_i^*) + c_{4i}^T(t) \mathcal{Y}_i(t - t_i^*), \\
\mathcal{Y}_i(t) = D_i^{-1}(p) \cdot \bar{y}_i(t), \quad \mathcal{U}_i(t - h_i) = D_i^{-1}(p) \cdot u_i(t - h_i), \\
\mathcal{Y}_i(t - t_i) = D_i^{-1}(p) \cdot \bar{y}_i(t - t_i), \quad \mathcal{Y}_i(t - t_i^*) = D_i^{-1}(p) \cdot \bar{y}_i(t - t_i^*),
\end{cases} \quad (20)$$

где полином  $D_i(p)$  формируется исходя из выполнения условия вещественности и строгой положительной определенности передаточной функции:

$$\tilde{W}_{лсч,i}(s) = k_{mi} \cdot D_i(s) / \tilde{a}_{mi}(s). \quad (23)$$

Из-за ограниченности объема статьи простые и достаточные требования к виду  $D_i(p)$ , при которых данное утверждение будет иметь место, здесь не приводятся. Отметим лишь, что их нетрудно получить аналогично работе [9], в которой рассмотрен вариант  $t_i = t_i^*$ .

Синтезированные алгоритмы самонастройки адаптивного регулятора (8), обеспечивающие выполнение (11), (12), имеют вид:

$$\begin{aligned}
c_{1iq_i}(t) &= -b_{1iq_i} \cdot \mathcal{Y}_{iq_i}(t) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e} - a_{1iq_i} \int_0^t (\mathcal{Y}_{iq_i}(t) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e}) dt, \\
c_{2i}(t) &= -b_{2i} \cdot \mathcal{U}_i(t - h_i) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e} - a_{2i} \int_0^t (\mathcal{U}_i(t - h_i) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e}) dt, \\
c_{3iq_i}(t) &= -b_{3iq_i} \cdot \mathcal{Y}_{iq_i}(t - t_i) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e} - a_{3iq_i} \int_0^t (\mathcal{Y}_{iq_i}(t - t_i) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e}) dt, \\
c_{4iq_i}(t) &= -b_{4iq_i} \cdot \mathcal{Y}_{iq_i}(t - t_i^*) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e} - a_{4iq_i} \int_0^t (\mathcal{Y}_{iq_i}(t - t_i^*) \cdot \tilde{\pi}_i(t) \cdot \bar{e}) dt, \\
\begin{cases} \bar{e} = 0, \text{ при } |\tilde{\pi}_i(t)| \leq \tilde{p}_i; & \bar{e} = 1, \text{ при } |\tilde{\pi}_i(t)| > \tilde{p}_i; \\ \mathbf{a}_{1iq_i}, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_{3iq_i}, \mathbf{a}_{4iq_i}, \tilde{p}_i, \mathbf{b}_{1iq_i}, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_{3iq_i}, \mathbf{b}_{4iq_i} = \text{const} > 0, \end{cases}
\end{aligned} \quad (24)$$

где  $\tilde{p}_i$  – величина зоны нечувствительности.

*Гибридная система.* От синтезированной непрерывной системы (1)-(4), (21), (22), (24), (25) можно перейти к ее гибридному аналогу (9), (10), обеспечивающему выполнение условий (13), (14):

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{mi,k+1} &= \tilde{A}_{mi,k} \cdot \tilde{x}_{mi,k} + \tilde{\Lambda}_{mi,k} \cdot \tilde{x}_{mi,k-j_{2i}} + \tilde{\Lambda}_{mi,k}^* \cdot \tilde{x}_{mi,k-j_{3i}} + \\ &+ \tilde{\Gamma}_{mi,k} \cdot \tilde{x}_{mi,k+1-j_{3i}} + \tilde{B}_{mi,k} \cdot y_k, \quad \tilde{y}_{mi,k} = \tilde{L}_{mi,k}^T \cdot \tilde{x}_{mi,k}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$u_{i,k} = r_{i,k} - J_{i,k}, \quad y_{i,k} = [u_{i,k-j_{1i}} + J_{i,k}], \quad (27)$$

$$\begin{aligned} J_{i,k} &= c_{1i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k} + c_{2i,k} \cdot u_{i,k-j_{1i}} + c_{3i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k-j_{2i}} + c_{4i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k-j_{3i}}, \\ q_i(z) &= -D_i^{-1}(z) \cdot c_{1i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k} + c_{1i,k}^T \cdot y_{i,k} - D_i^{-1}(z) \cdot c_{2i,k} \cdot u_{i,k-j_{1i}} + \\ &+ c_{2i,k} \cdot u_{i,k-j_{1i}} - D_i^{-1}(z) \cdot c_{3i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k-j_{2i}} + c_{3i,k}^T \cdot y_{i,k-j_{2i}} - \\ &- D_i^{-1}(z) \cdot c_{4i,k}^T \cdot \bar{y}_{i,k-j_{3i}} + c_{4i,k}^T \cdot y_{i,k-j_{3i}}, \quad \tilde{v}_{i,k} = \bar{v}_{i,k} + \bar{v}_{i,k}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{i,k} &= \tilde{y}_{mi,k} - y_{i,k}, \quad \bar{v}_{i,k} = k_{mi,k} \cdot D_i(z) \cdot q_i(z) / \tilde{a}_{mi}(z), \\ y_{i,k} &= D_i^{-1}(z) \cdot \bar{y}_{i,k}, \quad u_{i,k-j_{1i}} = D_i^{-1}(z) \cdot u_{i,k-j_{1i}}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} y_{i,k-j_{2i}} &= D_i^{-1}(z) \cdot \bar{y}_{i,k-j_{2i}}, \quad y_{i,k-j_{3i}} = D_i^{-1}(z) \cdot \bar{y}_{i,k-j_{3i}}, \\ c_{1iq_i,k} &= c_{1iq_i,k-1} - (b_{1iq_i,k} + I \cdot a_{1iq_i,k}) \cdot y_{iq_i,k} \cdot \tilde{n}_{i,k} \cdot \bar{e}_k, \\ c_{2i,k} &= c_{2i,k-1} - (b_{2i,k} + I \cdot a_{2i,k}) \cdot u_{i,k-j_{1i}} \cdot \tilde{n}_{i,k} \cdot \bar{e}_k, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} c_{3iq_i,k} &= c_{3iq_i,k-1} - (b_{3iq_i,k} + I \cdot a_{3iq_i,k}) \cdot y_{iq_i,k-j_{2i}} \cdot \tilde{n}_{i,k} \cdot \bar{e}_k, \\ c_{4iq_i,k} &= c_{4iq_i,k-1} - (b_{4iq_i,k} + I \cdot a_{4iq_i,k}) \cdot y_{iq_i,k-j_{3i}} \cdot \tilde{n}_{i,k} \cdot \bar{e}_k, \\ \begin{cases} \bar{e}_k = 0, & \text{при } |\tilde{n}_{i,k}| \leq \tilde{p}_{i,k}, \\ \bar{e}_k = 1, & \text{при } |\tilde{n}_{i,k}| > \tilde{p}_{i,k}, \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

где  $a_{1iq_i,k}, a_{2,k}, a_{3iq_i,k}, a_{4iq_i,k}, \tilde{p}_{i,k}, b_{1iq_i,k}, b_{2,k}, b_{3iq_i,k}, b_{4iq_i,k} = const > 0$ .

*Замечание 1.* Полученные децентрализованные законы управления для многосвязных ММО-объектов могут быть использованы и для SISO-объектов, для этого достаточно опустить  $i$ -е индексы. Помимо того, не проводя аналогичные процедуры синтеза, можно привести ряд результатов, касающихся обоих видов систем.

В случае, если относительный порядок объекта  $l_i=1$ , систему можно упростить и обойтись без контура расширения [13, 14], приняв  $D_i, q_i \equiv 1$ .

Если априорная информация об объекте более определена, т.е. в условиях структурного согласования (19) допустимо задать  $\Lambda_{mi} \equiv 0$  или  $\Lambda_{mi}^* \equiv 0$ , то структура эталонного упредителя также упрощается.

Полученные алгоритмы самонастройки адаптивного регулятора можно получить и иным способом. Например, используя только интегральную составляющую [9, 12], задав  $\beta_i \equiv 0$ ; или регуляризовав алгоритмы адаптации другим способом [15].

Для объектов, в которых какой-либо из типов запаздываний отсутст-

вует (исключая запаздывание по управлению) или, например  $\tau_i = \tau_i^*$  – соответствующая настройка адаптивного регулятора задается нулевой (также упрощается структура эталонного упредителя).

### Система без измерения переменных вектора состояния объекта

*Оценка переменных состояний с помощью фильтров.* В случае если в системе отсутствует возможность измерения переменных состояния объекта (т.е.  $L_i^T$  не единичная матрица), можно воспользоваться специальным образом сконструированными фильтрами. Данный подход (для одномерных объектов с  $\tau_i = \tau_i^*$  и интегральными алгоритмами самонастройки регулятора) изложен в работе [9]. Не останавливаясь подробно на процедуре синтеза для нашего случая, сформулируем окончательный результат, согласно которому получают отличные от [9] контуры управления. Проводя синтез системы в рамках критерия гиперустойчивости и используя вместо (15), (16) – расширенное с помощью фильтров представление

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t) = & \bar{A}_i \cdot \bar{x}_i(t) + \bar{\Lambda}_i \cdot \bar{x}_i(t - t_i) + \bar{\Lambda}_i^* \cdot \bar{x}_i(t - t_i^*) + \bar{\Gamma}_i \cdot \mathbf{x}_i(t - t_i^*) + \\ & + \bar{B}_i \cdot u_i(t - h_i) + \bar{S}_i(t), \quad \bar{y}_i(t) = \bar{L}_i^T \cdot \bar{x}_i(t), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\phi i}(t) = & A_{\phi i} \cdot x_{\phi i}(t) + B_{\phi i} \cdot y_i(t), \quad \bar{y}_i(t) = L_{\phi i}^T \cdot x_{\phi i}(t) + D_{\phi i} \cdot y_i(t), \\ v_i(t) = & y_i(t) = g_i^T \cdot \bar{y}_i(t), \quad W_{\phi i}(s) = v_i(s) / y_i(s) = g_i(s) / c_i(s) = 1, \end{aligned} \quad (33)$$

а вместо (18), (26) применяя уравнения

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{mi}(t) = & \bar{A}_{mi} \cdot \bar{x}_{mi}(t) + \bar{\Lambda}_{mi} \cdot \bar{x}_{mi}(t - t_i) + \bar{\Lambda}_{mi}^* \cdot \bar{x}_{mi}(t - t_i^*) + \\ & + \bar{\Gamma}_i \cdot \mathbf{x}_{mi}(t - t_i^*) + \bar{B}_{mi} \cdot u_i(t - h_i), \quad \bar{y}_{mi}(t) = \bar{L}_{mi}^T \cdot \bar{x}_{mi}(t), \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\phi i}(t) = & A_{\phi i} \cdot x_{\phi i}(t) + B_{\phi i} \cdot y_{mi}(t), \quad \bar{y}_{mi}(t) = L_{\phi i}^T \cdot x_{\phi i}(t) + \\ & + D_{\phi i} \cdot y_{mi}(t), \quad v_{mi}(t) = y_{mi}(t) = g_{mi}^T \cdot \bar{y}_{mi}(t), \end{aligned} \quad (35)$$

можно получить контуры управления: для непрерывной системы – вида (8), (17), (24), (25), а для гибридной системы – вида (26) – (31) и фильтром

$$\begin{aligned} x_{\phi i, k+1} = & A_{\phi i, k} \cdot x_{\phi i, k} + B_{\phi i, k} \cdot y_{i, k}, \\ \bar{y}_{i, k} = & L_{\phi i, k}^T \cdot x_{\phi i, k} + D_{\phi i, k} \cdot y_{i, k}, \quad v_{i, k} = y_{i, k} = g_{i, k}^T \cdot \bar{y}_{i, k}. \end{aligned} \quad (36)$$

Заметим также, что для полученной системы будут иметь место все особенности, отмеченные в замечании 1.

*Оценка переменных состояний с помощью стационарного наблюдателя.* Альтернативой вышеуказанному подходу является использование в системе управления стационарного наблюдателя [15, 16]. Рассмотрим объект (1) – (4), а именно его эквивалентное представление (15), (16). Для удобства дальнейшего синтеза системы будем считать, что каждая локальная подсистема (15), (16) записана в наблюдаемой канонической форме. Способы перехода к данной форме подробно изложены в [15], здесь



же отметим, что для  $m_i = 0$  данный переход не требует пересчета коэффициентов  $L_i = (1; 0; \dots; 0)$  и  $B_i = (0; \dots; 0; k_{0i})$ , а матрицы  $A_i, \Lambda_i, \Gamma_i$ , по-прежнему имеют форму Фробениуса ( $k_{0i} > 0$ ).

*Непрерывная система.* Для задания желаемой динамики процессов управления в каждую локальную подсистему вводится эталонный упредитель (17), (18) с минимально возможной формой записи, т.е.  $l_i = 1$ . При этом переход к расширенному представлению (18) осуществляется, как и раньше, с той лишь разницей, что в данном случае используется произвольно формируемый полином  $G_{ig}(s)$ :

$$W_{mi}(s) = \frac{\tilde{y}_{mi}(s)}{y_i(s)} = \frac{k_{mi}}{\tilde{a}_{mi}(s)} = \frac{k_{mi}}{\tilde{a}_{mi}(s)} \cdot \frac{G_i(s)}{G_i(s)} = \frac{k_{mi} \cdot G_i(s)}{a_{mi}(s)};$$

$$\mathbf{x}_{mi}(t) = A_{mi} \cdot x_{mi}(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_{mi}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_{mi}(t - t_i^*) + \Gamma_i \cdot \mathbf{x}_{mi}(t - t_i^*) + B_{mi} \cdot y_i(t), \quad y_{mi}(t) = G_i^T \cdot x_{mi}(t) = \tilde{y}_{mi}(t).$$

Запишем эквивалентное представление объекта (15), (16) с учетом условий (19), первоначально полагая  $\sigma_i(t) \equiv 0$ :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(t) = A_{mi} \cdot x_i(t) + \Lambda_{mi} \cdot x_i(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot x_i(t - t_i^*) + \Gamma \cdot \mathbf{x}_i(t - t_{*i}) + \\ + B_{mi} \cdot \mathbf{m}_i(t), \quad \mathbf{m}_i(t) = c_{10i}^T \cdot x_i(t) + c_{20i} \cdot u_i(t - h_i) + u_i(t - h_i) + \\ + c_{30i}^T \cdot x_i(t - t_i) + c_{40i}^T \cdot x_i(t - t_i^*), \quad y_i(t) = L_i^T \cdot x_i(t). \end{cases} \quad (38)$$

Для эквивалентного представления (38) существуют уравнения так называемого стационарного наблюдателя [15, 16], имеющие вид:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(t) = A_{mi} \cdot \bar{x}(t) + \Lambda_{mi} \cdot \bar{x}(t - t_i) + \Lambda_{mi}^* \cdot \bar{x}(t - t_i^*) + \Gamma \cdot \mathbf{x}_i(t - t_{*i}) + \\ + B_{mi} \cdot \mathbf{m}_i(t) + N_i \cdot (y(t) - \hat{y}(t)), \quad \hat{y}_i(t) = L_i^T \cdot \bar{x}_i(t), \quad v_i(t) = G_i^T \cdot \bar{x}_i(t), \end{cases} \quad (39)$$

где  $v_i(t)$  – обобщенный выход;  $N$  – вектор, обеспечивающий желаемый темп устранения невязки выходов ( $y_i(t) - \hat{y}_i(t)$ ), который может быть выбран так [17], чтобы полюса наблюдателя (39) располагались на больше чем трехкратном расстоянии от полюсов модели (38), обеспечивая тем самым  $\bar{x}_i(t) \rightarrow x_i(t)$ , что позволяет для дальнейшего синтеза использовать доступные измерению переменные состояния наблюдателя (которые, аналогично разделу II, в дальнейшем обозначаются  $\bar{y}_i = \bar{x}_i \cong x_i$ ).

Заметим, что, синтез алгоритмов самонастройки (для случая  $\sigma_i(t) \equiv 0$ ) обеспечивает выполнение предельных соотношений:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_{1i}(t) = c_{10i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_{2i}(t) = c_{20i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_{3i}(t) = c_{30i}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_{4i}(t) = c_{40i},$$

с учетом (8) и всех сделанных ранее замечаний, это позволяет заменить в уравнении наблюдателя (39) сигнал  $\mu_i(t)$  на физически реализуемое воздействие  $\mu_i(t) = u_i(t - h_i) + v_i(t) = \psi_i(t)$ .

Сам синтез системы управления проводится аналогично методике изложенной выше, путем введения в рассмотрение ошибки рассогласова-

ния  $\tilde{e}_i(t) = x_{mi}(t) - \bar{x}_i(t)$ . Полученное в итоге эквивалентное математическое описание идентично (20), в котором:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_i(t) &= y_{mi}(t) - v_i(t); \quad \dot{y}_i(t) \leftrightarrow \bar{y}_i(t); \quad \dot{u}_i(t) \leftrightarrow u_i(t - h_i); \\ \dot{y}_i(t - t_i) &\leftrightarrow \bar{y}_i(t - t_i); \quad \dot{y}_i(t - t_i^*) \leftrightarrow \bar{y}_i(t - t_i^*). \end{aligned}$$

В этом случае строгая положительная вещественность передаточной функции эквивалентной системы является очевидным свойством явно-неявного представления (37), а алгоритмы адаптации в окончательном варианте (с учетом  $\sigma_i(t) \neq 0$ ) синтезируются в виде (24), (25).

*Гибридная система.* Дискретные контуры управления включают адаптивный регулятор (27) с алгоритмами самонастройки (30), (31), при  $\tilde{v}_{i,k} = y_{mi,k} - v_{i,k}$ , и содержат эталонный упредитель и наблюдатель:

$$\begin{aligned} W_{mi}(z) &= \tilde{y}_{mi}(z) / Y_i(z) = k_{mi,k} / \tilde{a}_{mi}(z) \\ \bar{x}_{i,k+1} &= A_{mi,k} \cdot \bar{x}_{i,k} + \Lambda_{mi,k} \cdot x_{i,k-j_{2i}} + \Lambda_{mi,k}^* \cdot \bar{x}_{i,k-j_{3i}} + \Gamma \cdot \tilde{x}_{i,k+1-j_{3i}} + \\ &+ B_{mi,k} \cdot [r_k + J_k] + N_k [y_k - \dot{y}_k], \quad \dot{y}_k = L_{i,k}^T \cdot \bar{x}_{i,k}, \quad v_{i,k} = G_k^T \cdot \bar{x}_{i,k}. \end{aligned} \quad (40)$$

### Пример имитационного моделирования

Рассматривается многосвязный МИМО-объект, состоящий из двух локальных подсистем (2), (3) с перекрестными связями (4), возмущениями  $\tilde{f}_i(t) = \tilde{f}_{i0} \cdot \sin(0.08 \cdot t)$ , при задающих воздействиях  $r(t_k) = 1 \cdot \sin(0.08 \cdot t_k)$  и шаге дискретизации  $\lambda = 0.2$  вида:

$$\begin{aligned} A_1 &= (0,1,0; 0,0,1; 4,-8,-9.2), \quad \Lambda_1 = (0,0,0; 0,0,0; 1,-2.6,-1.5), \\ \Lambda_1^* &= (0,0,0; 0,0,0; 1,-3,-2), \quad g_1 = -0.4, \quad B_1^T = (0, 0, 1), \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} L_1^T &= (8, 4.9, 5.5), \quad \tilde{f}_{10} = 1.5, \quad h_1 = 0.25, \quad t_1 = 1.3, \quad t_1^* = 0.17, \\ A_2 &= (0,1; 1.2,-9.1), \quad \Lambda_2 = (0, 0; 0.4,-5.5), \quad \Lambda_2^* = (0, 0; 0.045,-0.1), \\ g_2 &= -0.22, \quad B_2^T = (0,1), \quad L_2^T = (3.8, 0), \quad \tilde{f}_{20} = 0.3, \quad h_2 = 1.0, \end{aligned} \quad (42)$$

$$t_2 = 0.6, \quad t_2^* = 0.1.$$

$$W_{12}(s) = 2/(s+7.3), \quad W_{12}(s) = (3.5s+1)/(s^2+0.3 \cdot s+21). \quad (43)$$

*Гибридная МИМО система с фильтрами переменных состояния.* Исследовался объект (41) – (43), в котором локальные эталонные упредители задавались дискретными и имели следующее непрерывное представление:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{m1} &= (0, 1; -15,-8), \quad \tilde{\Lambda}_{m1} = (0, 0; -0.4,-0.1), \quad \tilde{\Lambda}_{m1}^* = (0, 0; -0.1,-0.2), \\ \tilde{B}_{m1} &= (0; 1), \quad \tilde{L}_{m1}^T = (30, 0), \\ \tilde{A}_{m2} &= (0, 1; -12,-7), \quad \tilde{\Lambda}_{m2} = (0, 0; -0.2,-0.3), \quad \tilde{\Lambda}_{m2}^* = (0, 0; -0.1,-0.2), \\ \tilde{B}_{m2} &= (0; 1), \quad \tilde{L}_{m2}^T = (12, 0). \end{aligned}$$

Дискретные контуры управления имели следующее математическое

описание:

$$\begin{aligned}
 A_{\phi 1,k} &= (0.9, 0.2; -0.2, 0.7), \quad L_{\phi 1,k}^T = (1, 0; 0, 1; -1, -2), \quad B_{\phi 1,k} = (0.02; 0.16), \\
 D_{\phi 1,k} &= (0; 0; 1), \quad g_1^T = (1; 2; 1), \quad D_1^{-1}(z) = (0.01z + 0.01)/(z^2 - 0.91z + 0.20), \\
 a_{11,k} &= (28; 15; 10), \quad a_{31,k} = (10; 3.4; 5), \quad a_{41,k} = (5.8; 2.8; 5), \\
 a_{21,k} &= 0.4, \quad \tilde{p}_{1,k} = 0.0002. \\
 A_{\phi 2,k} &= (0.82), \quad L_{\phi 2,k}^T = (1; -1), \quad B_{\phi 2,k} = (0.18), \quad D_{\phi 2,k} = (0; 1), \\
 g_2^T &= (1; 1), \quad D_2^{-1}(z) = (0.01z + 0.01)/(z^2 - 0.9z + 0.25), \quad a_{12,k} = (0.11; 5.1), \\
 a_{32,k} &= (1.2; 2.9), \quad a_{42,k} = (0.9; 3.1), \quad a_{22,k} = 0.1, \quad \tilde{p}_{2,k} = 0.0002.
 \end{aligned}$$

*Гибридная SISO система с наблюдателем состояния.* Исследовался одномерный объект (42) с эталонным упредителем, пропорционально-интегральными алгоритмами самонастройки и наблюдателем, имеющим непрерывное описание вида:

$$\tilde{A}_m = (-1), \quad \tilde{\Lambda}_m = (-0.1), \quad \tilde{\Lambda}_m^* = (-0.3), \quad \tilde{B}_m = (1), \quad \tilde{L}_m^T = (1), \quad G = (1; 50), \quad N = (9; 2475).$$

Полученные графики переходных процессов для обеих систем представлены на рис. 1 (для MIMO-объекта) и рис. 2 (для SISO-объекта). На обоих рисунках пунктир – выход эталона, прямая линия – выход соответствующей системы.

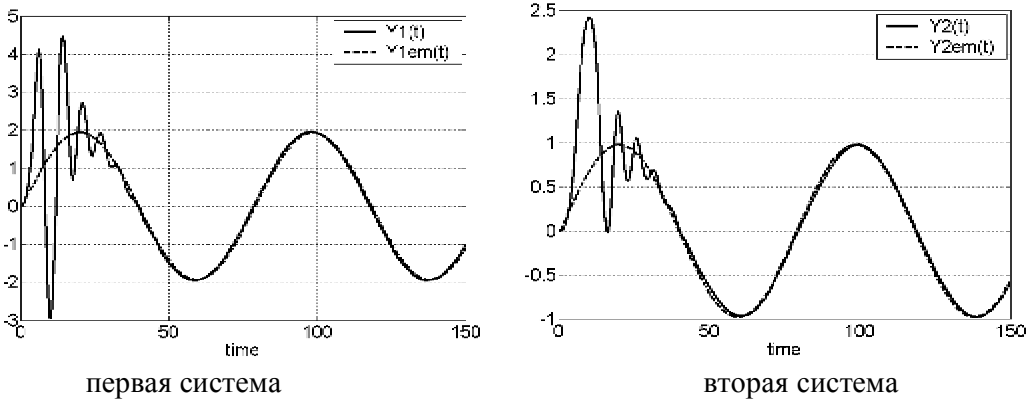


Рис. 1. Система с фильтрами переменных состояния.

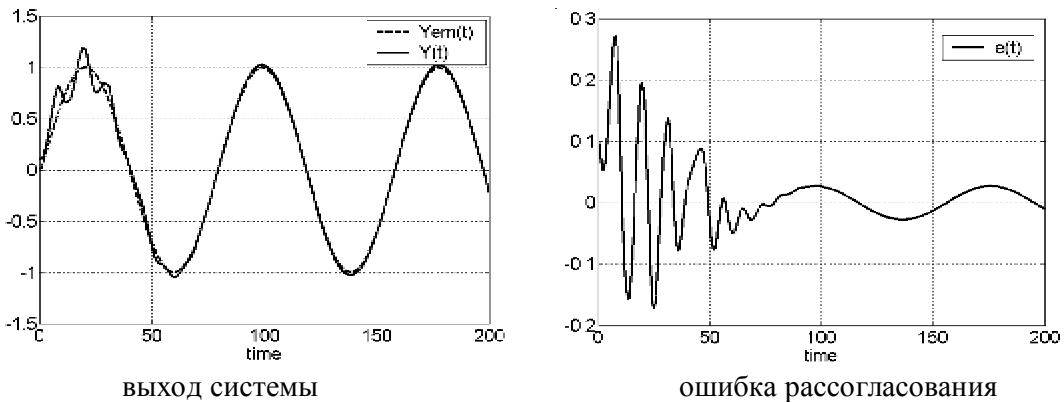


Рис. 2. Система со стационарным наблюдателем.

## Заключение

Предложенные адаптивные системы управления с эталонным упредителем могут быть использованы для обширного класса SISO- и MIMO-объектов с различными запаздываниями. Полученные контуры управления являются наиболее общим вариантом и допускают различные модификации, которые были представлены в работе. В целом для синтезированных систем управления характерны некоторые общие свойства – такие как парирование априорной неопределенности, подавление негативного влияния запаздываний, работоспособность при наличии возмущений. Окончательный выбор того или иного алгоритма управления зависит от вида решаемой задачи и определяется в зависимости от больших требования к качеству или простоте практической реализации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронов А.А.* Основы теории автоматического управления. Ч. 3. Оптимальные, многосвязные и адаптивные системы. – М.: Энергия, 1970.
2. *Ortega R., Herrera A.* A solution to the decentralized adaptive stabilization problem // *Syst. Contr. Letters.* – 1993. – №. 2. – P. 299-306.
3. *Jain S. Khorrami F.* Decentralized adaptive control of a class of Large-Scale interconnected nonlinear systems // *IEEE Trans. Aut. Contr.* – 1997. – Vol. 42, №. 2. – P. 1618-1624.
4. *Паршева Е.А., Цыкунов А.М.* Адаптивное децентрализованное управление многосвязными объектами // *АиТ.* – 2001. – №2. – С. 135-148.
5. *Цыкунов А.М.* Адаптивное управление объектами с последействием. – М.: Наука, 1984.
6. *Еремин Е.Л., Чепак Л.В.* Алгоритмы адаптации дискретно-непрерывных систем для объектов с запаздыванием по управлению // *Вычислительные технологии.* – 2006. – Т. 11, №3. – С. 61-72.
7. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А.* Алгоритмы адаптивной системы с запаздыванием по управлению в схеме с расширенной ошибкой и эталонным упредителем // *Мехатроника, автоматизация и управление.* – 2006. – №6. – С. 9-16.
8. *Теличенко Д. А.* Гибридная адаптивная система с эталонным упредителем в схемах децентрализованного управления с запаздыванием // *Информатика и системы управления.* – 2006. – №1(11). – С. 212-224.
9. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В.* Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006.
10. *Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л.* Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. – М.: Наука, 1981.
11. *Эльсгольц Л.Э., Норкин С.Б.* Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. – М.: Наука, 1971.
12. *Landau I.D., Lozano R., M'Saad M.* Adaptive Control. – London: Springer-Verlag, 1998.
13. *Пат. 2294005 РФ.* Адаптивная система слежения для объектов с запаздыванием по управлению /Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко // *Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели».* – 2007. – №5.
14. *Пат. 2294004 РФ.* Адаптивная система слежения для объектов с запаздыванием по управлению и состоянию /Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко // *Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели».* – 2007. – №5.

15. Андреевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления. – СПб.: Наука, 1999.
16. Еремин Е.Л., Теличенко Д. А. Адаптивная система управления с эталонным упредителем и стационарным наблюдателем для SISO-объектов с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. – 2007. – №1(13). – С. 140-149.
17. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Л. Ереминым.*