



чество управления в синтезированной системе.

Возможно применение данной методики для синтеза робастных алгоритмов для случаев векторного управления, а также для динамических объектов с запаздыванием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Цыкунов А.М.* Робастное управление нестационарными объектами // *АиТ.* №2. 1996. С.117-123
2. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.
3. *Галаган Т.А., Еремин Е.Л.* Нелинейный алгоритм робастного управления динамическим объектом // VIII Всероссийский семинар «Нейроинформатика и ее приложения». Красноярск: КГТУ, 2000. С.39.
4. *Галаган Т.А., Еремин Е.Л.* Семейство робастно гиперустойчивых законов управления для систем с неявной эталонной моделью. // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-2000: Сб. трудов международ. науч. конф. Т.2. Секции 2,8. СПб., 2000. С.62.
5. *Фрадков А.Л.* Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990.

УДК 62-506.12

© 2001 г. **С.Г. Самохвалова**

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

## **АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С НАСТРОЙКОЙ КОМПЕНСАТОРА**

Рассматривается задача синтеза устойчивых систем управления с непрерывным управляющим устройством и дискретным алгоритмом адаптации для многосвязных объектов и объектов с запаздыванием по состоянию.

### **Введение**

В настоящее время при построении адаптивных систем управления широко применяются средства вычислительной техники. Существует целый ряд объективных факторов, обуславливающих это. С одной стороны, автоматизации подвергаются все более сложные объекты управления, что

$$\alpha(t) = 0.5 - 0.1\sin(t), \quad \beta^T(t) = (8\cos 4t \quad 4 + \sin 6t \quad 3 - 0.5\sin t).$$

Кроме того, пусть элементы вектора  $g$  удовлетворяют условиям гурвицевости полинома числителя передаточной функции вида (16), в частности –  $g^T = (3 \quad 3.5 \quad 1)$ , а значения констант в алгоритме робастного управления (15) заданы следующим образом:

$$\gamma_1 = 0.6, \gamma_2 = 10, \gamma_3 = 15, \gamma_5 = 1.2, \gamma_4 = 320, q = 0.3.$$

На рис.1 представлены результаты имитационного моделирования, где изображены временные характеристики переходного процесса:  $z_m(t)$  – выход эталонной модели;  $z(t)$  – обобщенный выход объекта управления;  $u(t)$  – управляющее воздействие.

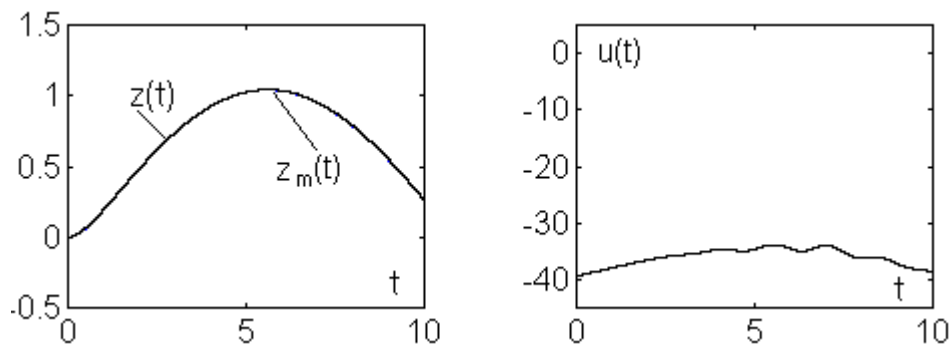


Рис.1. Временные характеристики системы (1) - (3), (5), (15) – выхода эталона, обобщенного выхода объекта управления, управляющего воздействия.

Следует отметить, что сигналы  $z_m(t)$  и  $z(t)$  на рис.1. визуально не различимы, так как величина рассогласования между объектом управления и эталоном  $e(t)$  мала и не превышает 0.002. График  $e(t)$  представлен на рис.2.

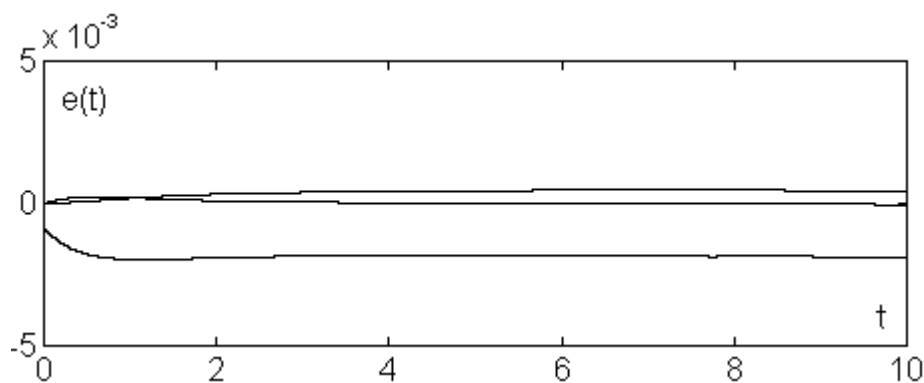


Рис.2. Величина рассогласования объекта управления и эталона.

### Заключение

Применение аппарата критерия гиперустойчивости позволяет синтезировать достаточно эффективный алгоритм робастного управления нелинейным динамическим объектом, функционирующим в условиях априорной определенности и при постоянно действующих ограниченных возмущениях. Результаты имитационного моделирования демонстрируют ка-

приводит к резкому возрастанию объема вычислительной работы, требуемой для определения управляющих воздействий, формируемых системой управления, т. е. растет время сбора, обработки и выдачи информации. С другой стороны, происходит постоянное совершенствование и удешевление средств микроэлектроники и вычислительной техники, улучшаются качественные показатели цифровых вычислительных машин, такие как вес, габариты, надежность и т. д. Это позволяет использовать их в качестве встроенных элементов в системах управления. Кроме того, повышение требования к качественным показателям функционирования систем управления приводит к тому, что многие практические задачи не могут быть решены средствами «непрерывной» автоматики [1].

Применение вычислительной техники делает системы управления дискретными или дискретно-непрерывными.

Существуют различные методы и подходы к решению задач синтеза дискретно-непрерывных систем, прикладное значение которых для управления непрерывными объектами с помощью дискретных управляющих устройств играет важную роль в силу широкого применения микропроцессорной техники.

Из этого вытекает актуальность разработки методов построения и анализа дискретно-непрерывных и дискретных систем управления. Один из таких подходов связан с дискретизацией уравнений непрерывной части системы управления и непосредственным синтезом дискретных алгоритмов – в частности, на основе критерия гиперустойчивости, методика использования которого была разработана И.Д. Ландау [2].

Метод, позволяющий использовать для синтеза и анализа дискретных адаптивных систем хорошо разработанные способы анализа и синтеза непрерывных адаптивных систем управления – метод непрерывных моделей (метод усреднения), который для систем без запаздывания рассмотрен в работе [3] и развит для систем с последействием в работе [1]. Этот метод заключается в том, что дискретная система заменяется ее непрерывной моделью, представляющей собой упрощенную модель, но сохраняющей основные свойства исходной системы. Метод усреднения был разработан М.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским и применен в [3] для решения задач анализа и синтеза дискретных адаптивных систем управления.

### **Задачи синтеза дискретно-непрерывных систем прямого адаптивного управления**

Рассматривается задача по применению метода непрерывных моделей для синтеза дискретных алгоритмов настройки параметров регулятора адаптивных систем управления для объекта с запаздыванием по состоянию, процессы в которой описываются уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + \Gamma x(t - \tau) + bu(t) + f(t), \quad (1)$$

$$x(s) = \varphi(s), \quad s \in [-\tau, 0], \quad (2)$$

$$y(t) = L^T x(t), \quad v(t) = g_1^T(t)y(t), \quad (3)$$

где  $x(t) \in R^N$  – вектор состояния;  $y(t) \in R^M$  – вектор выхода;  $u(t) \in R^l$  – управляющее воздействие;  $A, \Gamma, b, L$  – неизвестные матрицы соответствующих порядков;  $f(t) \in R^n$  – вектор возмущения, который удовлетворяет одному из условий:

$$\int_0^{\infty} \|f(t)\|^2 dt < \infty, \quad (4)$$

$$\|f_{\xi}(t)\| \leq f_0 = \text{const}, \quad \xi \in \Xi. \quad (5)$$

Структуру регулятора зададим следующим образом:

$$u(t) = \chi_1(t)r(t) + \chi_2(t)[r(t) - v(t)] + \chi_3(t)g_2^T y(t - \tau), \quad (6)$$

где  $r(t)$  – задающее воздействие;  $\chi_1(t), \chi_2(t)$  – настраиваемые скалярные коэффициенты регулятора;  $g_1^T(t)$  – настраиваемый коэффициент компенсатора;  $g_2^T$  – числовой вектор.

Требуется определить дискретные алгоритмы адаптации  $\chi_1(t), \chi_2(t), g_1^T(t)$  так, чтобы система (1), (2), (3), (6) была адаптивной или  $D$ -адаптивной в заданном классе  $\Xi$ .

Замена дискретной системы на ее непрерывную модель связана не только с упрощением процесса исследования, но и позволяет применить методы синтеза непрерывных систем адаптации, поэтому для получения непрерывных алгоритмов настройки используем теоретические результаты, полученные в работе [4], согласно которой можно синтезировать контур адаптации с использованием алгоритмов вида

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} = \alpha_1 r(t)[r(t) - g_1^T(t)y(t)], \quad (7)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \alpha_2 [r(t) - g_1^T(t)y(t)]^2, \quad (8)$$

$$\frac{d\chi_3(t)}{dt} = \alpha_3 g_2^T y(t - \tau)[r(t) - g_1^T(t)y(t)], \quad (9)$$

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i |y_i(t)[r(t) - g_1^T(t)y(t)]|, \quad \alpha_i, \beta = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, M}. \quad (10)$$

Осуществим переход от непрерывных алгоритмов к цифровым, аналогично [1], получим следующее математическое описание:

$$\chi_1(t_{k+1}) = \chi_1(t_k) + \gamma (\alpha_1 r(t_k)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)]), \quad (11)$$

$$\chi_2(t_{k+1}) = \chi_2(t_k) + \gamma (\alpha_2 [r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)]^2), \quad (12)$$

$$\chi_3(t_{k+1}) = \chi_3(t_k) + \gamma(\alpha_3 g_2^T y(t_k - \tau)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)]), \quad (13)$$

$$g_i(t_{k+1}) = g_i(t_k) + \gamma(\beta_i |y_i(t_k)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)]), \quad (14)$$

где  $\alpha_i, \beta = const > 0, i = \overline{1, M}$ ;  $\gamma$  – шаг алгоритма настройки;  $k$  – номер шага;  $t_k$  – дискретный аналог времени.

Вид алгоритма настройки не изменится и в случае, когда ограничение на вектор возмущения имеет вид (4). Когда ограничение на вектор возмущений имеет вид (5), тогда при переходе в алгоритме настройки к дискретному времени система теряет устойчивость. Поэтому для обеспечения корректности дискретизации алгоритма адаптации необходимо потребовать, чтобы непрерывная детерминированная модель исходной системы была экспоненциально диссипативной. Это требование будет выполнено, если осуществить огрубление алгоритма настройки, введя в него обратные связи, т.е. непрерывный алгоритм адаптации будет иметь вид:

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} = \alpha_1 r(t)[r(t) - g_1^T(t)y(t)] - \delta_1 \chi_1(t), \quad (15)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \alpha_2 [r(t) - g_1^T(t)y(t)]^2 - \delta_2 \chi_2(t), \quad (16)$$

$$\frac{d\chi_3(t)}{dt} = \alpha_3 g_2^T y(t - \tau)[r(t) - g_1^T(t)y(t)] - \delta_3 \chi_3(t), \quad (17)$$

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i |y_i(t)[r(t) - g_1^T(t)y(t)]| - \lambda_i g_i^T(t), \quad \alpha_i, \lambda_i, \delta_j, \beta_i = const > 0, \quad (18)$$

$i = \overline{1, M}, j = \overline{1, 3}.$

Переходя к дискретному времени, получим

$$\chi_1(t_{k+1}) = \chi_1(t_k) + \gamma(\alpha_1 r(t_k)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)] - \zeta \delta_1 \chi_1(t_k)), \quad (19)$$

$$\chi_2(t_{k+1}) = \chi_2(t_k) + \gamma(\alpha_2 [r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)]^2 - \zeta \delta_2 \chi_2(t_k)), \quad (20)$$

$$\chi_3(t_{k+1}) = \chi_3(t_k) + \gamma(\alpha_3 g_2^T y(t_k - \tau)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)] - \zeta \delta_3 \chi_3(t_k)), \quad (21)$$

$$g_i(t_{k+1}) = g_i(t_k) + \gamma(\beta_i |y_i(t_k)[r(t_k) - g_1^T(t_k)y(t_k)] - \sigma \lambda_i g_i(t_k)). \quad (22)$$

Применяя алгоритмы настройки (11) – (14), в случае выполнения ограничения (4), система (1), (2), (3), (6), (11) – (14) будет адаптивной в заданном классе, а при наличии возмущений со свойствами (5) и использовании алгоритмов настройки (19) – (22), будет построена  $D$ -адаптивная система в виде (1), (2), (3), (6), (19) – (22).

### Построение цифровых алгоритмов многосвязных дискретно-непрерывных систем управления

Аналогично предыдущему построим гибридные адаптивные системы управления для объектов без запаздывания с векторным управлением. В

качестве непрерывной модели таких систем могут служить системы адаптивного управления, описываемые уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad (23)$$

$$y(t) = L^T x(t), \quad v(t) = G(t)y(t), \quad (24)$$

$$u(t) = \chi_1(t)D(p)r(t) + \chi_2(t)[D(p)r(t) - v(t)], \quad (25)$$

где все переменные определены аналогично математическому описанию вида (1), (3), (6), за исключением:  $D(p) = \text{diag}(d_j(p))$  – матрица, элементами которой являются заданные линейные полиномы от оператора дифференцирования  $p = d/dt$ ;  $G(t)$  – матрица настраиваемых параметров компенсатора;  $G(t) = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ ,  $g_i$  – вектор-столбец ( $i = 1, m$ ). Используя результаты синтеза непрерывных алгоритмов, полученные в работе [5] и применяя метод непрерывных моделей, можно показать, что гибридная система управления с объектом (23), (24) и регулятором (25) может иметь цифровой контур настройки, описываемый следующим образом

$$\chi_{1j}(t_{k+1}) = \chi_{1j}(t_k) + \gamma (\alpha_{1j} d_j(p) r_j(t_k) [d_j(p) r_j(t_k) - g_{ij}(t_k) y_i(t_k)]), \quad (26)$$

$$\chi_{2j}(t_{k+1}) = \chi_{2j}(t_k) + \gamma (\alpha_{2j} [d_j(p) r_j(t_k) - g_{ij}(t_k) y_i(t_k)]^2), \quad (27)$$

$$g_{ij}(t_{k+1}) = g_{ij}(t_k) + \gamma (\beta_i |y_i(t_k) [d_j(p) r_j(t_k) - g_{ij}(t_k) y_i(t_k)]|), \quad (28)$$

$$\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \beta_i = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, m}.$$

### Результаты имитационного моделирования

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим динамику процессов стабилизации динамических объектов с запаздыванием по состоянию, описываемых уравнениями (1), (2), (6), (11) – (14). Динамические процессы, показанные на рис. 1, были получены при следующих исходных данных:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.12 & -0.2 & -0.5 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.6 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.12 & -0.2 & -0.5 \end{pmatrix},$$

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.9 & 0 \\ 0 & 0.95 \end{pmatrix}, \quad f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.4 \sin(2.8t) e^{-t} \end{pmatrix}, \quad x(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$g_1(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad g_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$\chi_1(0) = 0, \quad \chi_2(0) = 0, \quad \chi_3(0) = 0, \quad r_* = 1,$$

$$\gamma = 0.19, \quad \tau = 3, \quad \alpha_1 = 300, \quad \alpha_2 = 30, \quad \beta_1 = 10, \quad \beta_2 = 2, \quad \beta_3 = 10.$$

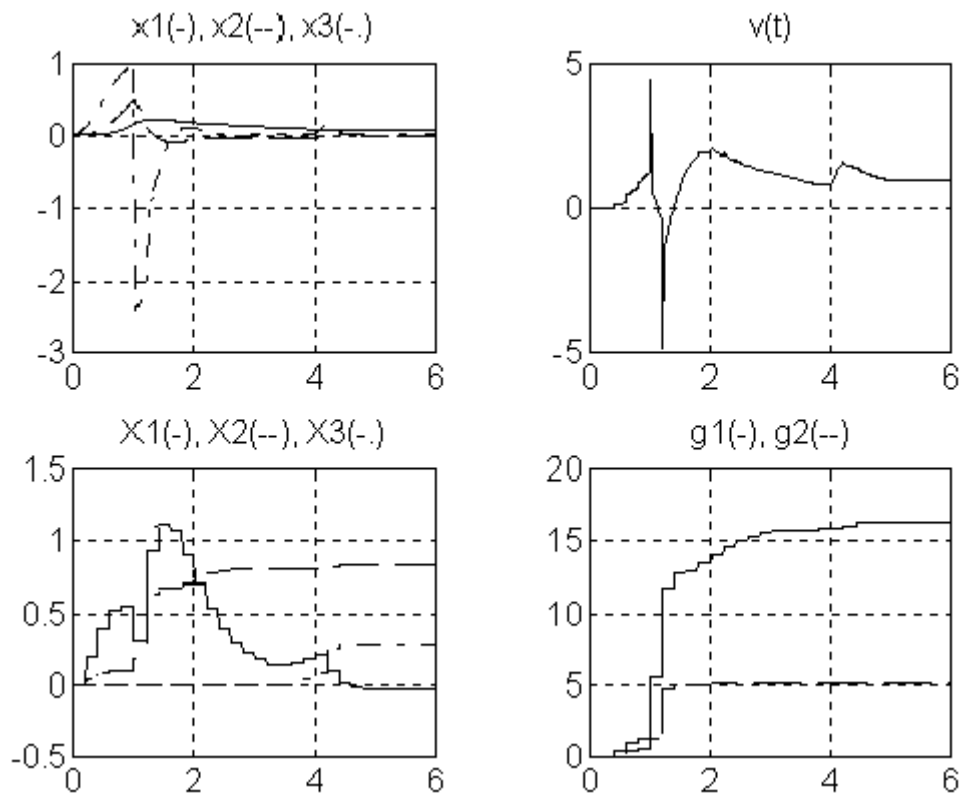


Рис.1.

В свою очередь, динамические процессы в системе управления (23), (24), (25), (26) – (28), показаны на рис.2.

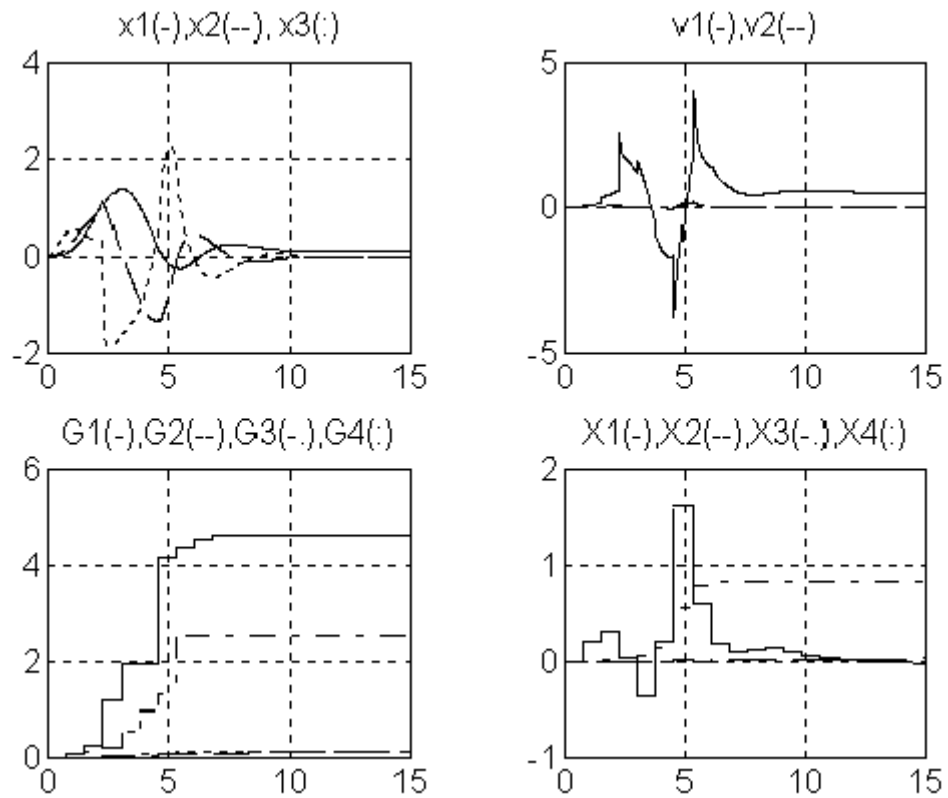


Рис.2.

Имитационное моделирование системы управления (23), (24), (25), (26) – (28) проводилось при следующих исходных данных:

$$A = \begin{pmatrix} 0.1 & 1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 1 \\ 0.12 & -0.2 & -0.5 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0.1 & -0.1 \\ -0.1 & 0.1 \\ 1.6 & 1.6 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 1 & 0.1 \\ 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.95 \end{pmatrix},$$

$$f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.4 \sin(2.8t)e^{-t} \end{pmatrix}, x(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, r = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.1 \end{pmatrix}, G(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\chi_1(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \chi_2(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \gamma = 0.75, \alpha_{11} = 45, \alpha_{12} = 10,$$

$$\alpha_{21} = 2.1, \alpha_{22} = 1.3, \beta_{11} = 35, \beta_{12} = 10, \beta_{21} = 15, \beta_{22} = 10.$$

### Заключение

Показано, что дискретные алгоритмы адаптивного управления применимы для систем с различными функциональными неопределенностями. Это расширяет класс объектов, для которых могут быть успешно решены задачи автоматического управления (стабилизации, слежения и т.п.) в условиях неопределенностей. Результаты имитационного моделирования показали, что синтезированные системы обладают достаточно высоким качеством управления при изменении параметров объекта управления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с последействием. М.: Наука, 1984.
2. Landau I.D. Adaptive Control Systems. The Model Reference Approach. N.Y.: Dekker, 1979.
3. Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М.: Наука, 1981.
4. Еремин Е.Л., Самохвалова С.Г. Синтез адаптивного компенсатора для систем управления динамическими объектами с запаздыванием по состоянию // Вестник АмГУ. 1999. № 4. С.12 - 15.
5. Еремин Е.Л., Самохвалова С.Г. Синтез многосвязных адаптивных систем слежения для объектов с настройкой компенсатора // Вестник АмГУ. 2000. № 9. С.5 – 7.

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