



так и нелинейности характеристик объекта управления. Этого нельзя сказать про систему с типовым ПИД-регулятором, в которой с ростом значения \bar{T}_Φ значительно ухудшается качество управления, приводящее в итоге к потере работоспособности системе управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: Корона принт, 2001.
2. *Потапенко Е.М., Корельский Д.В., Васильева Е.В.* Робастное управление электроприводом с вентильным двигателем. // Радиоэлектроника, информатика, управления. 2000. №1. С.161–166.
3. *Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Плутенко А.Д.* Алгоритмы систем робастной стабилизации нестационарного объекта с неявной эталонной моделью. // Вестник АмГУ. Благовещенск. 2001. Вып. 15. С.18–20.
4. *Галаган Т.А., Еремин Е.Л., Плутенко А.Д.* Робастный алгоритм управления нестационарным нелинейным объектом для систем с явной эталонной моделью. // Информатика и системы управления. Благовещенск. 2001. №2. С. 100–105.

УДК 62-506.12

© 2002 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,
С.Г. Самохвалова, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ПРЯМОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С НАСТРОЙКОЙ КОМПЕНСАТОРОВ. II

Рассмотрены модели и алгоритмы беспоисковых гибридных систем прямого адаптивного управления с настройкой динамических компенсаторов.

Введение

В настоящее время при построении алгоритмов управления в адаптивных системах, как правило, применяются средства цифровой вычислительной техники. При этом, с одной стороны, поскольку автоматизации подвер-

гаются все более сложные объекты, происходит рост объема вычислений при определении управляющих воздействий и увеличение времени на сбор, обработку и выдачу информации в системах управления; с другой стороны, происходит постоянное совершенствование, удешевление и улучшение технических характеристик микропроцессорных устройств, позволяющее использовать их в качестве встроенных элементов систем управления. Кроме того, при повышении требований к качеству функционирования систем управления многие практические задачи не могут быть решены средствами аналоговой автоматики [1].

Применение вычислительной техники приводит к тому, что системы управления становятся дискретными, или гибридными (дискретно-непрерывными). В отличие от результатов работы [2] в настоящей статье рассматриваются вопросы построения гибридных адаптивных систем с неявной эталонной моделью (ГАСНЭМ).

Метод непрерывных моделей в задаче синтеза гибридных систем адаптации с запаздыванием по состоянию

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

Один из методов 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 [3]. Другой метод, позволяющий использовать для синтеза и анализа дискретных адаптивных систем хорошо разработанные методы анализа и синтеза непрерывных адаптивных систем управления, – это метод непрерывных моделей (метод усреднения). Суть его заключается в том, что дискретная система заменяется ее непрерывной моделью – упрощенной, но сохраняющей основные свойства исходной системы.

Метод усреднения был разработан М.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским и применен в работе [4] для систем без запаздывания, а также рассмотрен для систем с последействием в работе [5].

Процедуру замены дискретной системы с последействием ее непрерывной детерминированной моделью, для удобства изложения рассмотрим на примере дискретной системы, описываемой уравнениями с отклоняющимся аргументом

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + \gamma_{k+1} \phi[x_k(m), f_k], \quad k = 0, 1, \dots, \\x_k(m) &= x_{k+m}, \quad x_0(m) = \varphi(m), \quad m \in [-l, 0],\end{aligned} \tag{1}$$

где $x_k \in R^n$ – вектор состояния системы на k -м шаге дискретизации; γ_k – последовательность неотрицательных чисел, определяющая величину шага системы; $f_k \in R^n$ – стационарная последовательность независимых случайных векторных возмущений, которые могут включать как контролируемые, так и неконтролируемые составляющие; $\phi[x_k(m), f_k]$ – некоторая векторная функция, удовлетворяющая существованию и единственности решения уравнения (1) на промежутке времени $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), где $t_k = \sum_{i=1}^k \gamma_i$ – эквивалентное (фиктивное) время, посредством которого устанавливается связь между решениями системы (1) и ее непрерывной детерминированной моделью; $\phi(m)$ – начальная ограниченная векторная функция; m – число, определяющее количество тактов запаздывания; $l > 0$ – максимальное число тактов запаздывания.

Формируя детерминированную непрерывную модель системы (1), усредним правую часть по f_k , вычисляя при этом векторную функцию

$$A(x_t(s)) = M\{\phi[x_k(m), f_k] / x_k(m) = x_t(s)\},$$

и рассмотрим вместо (1) дифференциальное уравнение

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(x_t(s)), \quad x_t(s) = x(t+s), \quad x(s) = \phi(s), \quad s \in [-\tau, 0], \quad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния непрерывной детерминированной модели; $\phi(s_k) = \phi(m)$; $\tau > 0$ – максимальное время запаздывания; M – символ математического ожидания. Уравнение (2) будет описывать непрерывную детерминированную модель системы (1). Решению системы (1) будет соответствовать решение $x(t)$ системы (2), взятое в моменты времени $t = t_k$.

В работе [5] показано, что при выполнении условий, близость процессов, протекающих в системах (1) и (2), можно оценить среднестатистически, а именно: на конечном временном интервале $0 \leq t_k \leq t_N$ в виде

$$M\left\{\max_{0 \leq k \leq N} \|x_k - x(t_k)\|^2\right\} \leq \gamma K_1 \exp(K_2 t_N), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad N = \text{const} > 0,$$

или на бесконечном промежутке времени $0 \leq t_k < \infty$, следующим образом:

$$M\left\{\|x_k - x(t_k)\|^2\right\} \leq \gamma^\alpha K_3,$$

где $\gamma > 0$, $\alpha > 0$, $K_1, K_2, K_3 > 0$ некоторые числа.

При изучении оценки близости процессов, протекающих в дискретной системе с запаздыванием по состоянию, и ее детерминированной непрерывной модели [5] рассматриваются два случая: во-первых, когда правая часть детерминированной модели удовлетворяет глобальным условиям Липшица, и, во-вторых, когда для замкнутой области пространства выполняются лишь локальные условия Липшица.

Выполнение глобального условия Липшица для правой части непрерывной детерминированной модели $A(x_t(s))$, т.е.

$$\|A(x'_t(s) - A(x''_t(s))\| \leq L \|x'_t(s) - x''_t(s)\|_\tau,$$

означает непрерывность и ограниченность скорости роста $A(x_t(s))$. Для обеспечения корректности перехода к непрерывной модели даже на конечном промежутке времени выполнения локального условия Липшица может оказаться недостаточно, поэтому необходимо вводить дополнительные условия. Такими условиями могут быть требования устойчивости или диссипативности модели (2). Кроме того, должно быть наложено условие ограниченности возмущений $f(t)$, поскольку большие возмущения могут выводить решение исходной системы из зоны устойчивости или диссипативности.

Построение адаптивных систем управления является пошаговым. Вначале формируется математическое описание процессов, протекающих в объекте, определяется уровень априорной неопределенности и выбирается структура управляющего устройства для дискретного и непрерывного адаптивного регулятора. Затем на основе метода усреднения осуществляется построение непрерывной модели объекта управления, адаптивного регулятора и контура настройки параметров управляющего устройства.

На втором шаге осуществляется синтез непрерывных алгоритмов настройки параметров регулятора. Определяются качественные и асимптотические свойства непрерывной модели системы. На третьем шаге выполняется переход к дискретным алгоритмам настройки параметров управляющего устройства, в результате которого осуществляется построение дискретно-непрерывной адаптивной системы. Затем для уточнения значений параметров алгоритмов, которые подлежат выбору при требуемых показателях качества системы управления в заданном классе адаптивности, выполняется имитационное моделирование.

Постановка задачи синтеза гибридных систем адаптивного управления

Рассмотрим в обобщенном виде постановку задачи синтеза алгоритмов настройки ГАСНЭМ для объекта управления с запаздыванием, динамику которого опишем уравнениями

$$dx(t) = A(x_t(s), c(t_{k+m}))dt + B(x_t(s), c(t_{k+m}))d\xi_1(t), \quad (3)$$

$$x_t(s) = x(t+s), \quad x(s) = \varphi(s), \quad s \in [-\tau, 0], \quad (4)$$

$$c(t_m) = \phi(t_m), \quad m \in [-l, 0], \quad (5)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния объекта; $c(t) \in R^r$ – вектор настраиваемых параметров; $\xi_1(t) \in R^r$ – векторный процесс с независимыми компонентами, имеющий нулевое среднее и дисперсию равную $\sigma^2 t$; $\varphi(s) \in C_\tau$ – начальная

вектор-функция; $\tau > 0$ – максимальная величина запаздывания; $\phi(t_m)$ – начальная вектор-функция; $l > 0$ – максимальное число тактов запаздывания.

Вектор-функция $A(x_t(s), c(t_{k+m}))$ и матрица-функция $B(x_t(s), c(t_{k+m}))$ размера $n \times r$ при любом $c(t_{k+m})$ удовлетворяют условиям, гарантирующим существование и единственность решения (3) на любом промежутке времени $t_k \leq t \leq t_{k+1}$. В качестве шагов дискретности γ_{k+1} в данном случае выступают величины промежутков времени $\Delta t_{k+1} = t_{k+1} - t_k$ между моментами, в которые производятся измерения и корректировка вектора настраиваемых параметров. При переходе к непрерывной модели необходимо соотнести величину шагов в дискретном алгоритме адаптации с величиной Δt_{k+1} . Учитывая, что на алгоритм адаптации также действуют случайные помехи, запишем алгоритм адаптации в виде

$$c(t_{k+1}) = \begin{cases} c(t_k), & t_k \leq t < t_{k+1}, \\ c(t_k) + \Delta t_{k+1} \Psi_2(x(t_{k+m}), c(t_{k+m}), \xi_2(t_{k+1})), & \end{cases} \quad (6)$$

где $\Psi_2(x(t_{k+m}), c(t_{k+m}), \xi_2(t_{k+1}))$ – функция, подлежащая определению; $\xi_2(t_k)$ – дискретный векторный случайный процесс, компоненты которого независимы при $t_k \neq t_l$.

Поскольку замена дискретной системы на ее непрерывную модель связана не только с упрощением процесса исследования, но и с синтезом непрерывных систем адаптации, при построении алгоритмов ГАСНЭМ могут быть использованы теоретические результаты работы [2].

Разработка цифровых алгоритмов гибридных систем управления

Вначале выполним синтез дискретных алгоритмов настройки параметров адаптивного регулятора в системе управления непрерывным объектом с запаздыванием по состоянию с применением метода непрерывных моделей.

Пусть объект описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_1 x(t) + A_2 x(t - \theta) + bu(t) + f(t), \quad (7)$$

$$x(\theta) = \varphi(\theta), \quad \theta \in [-\tau_{\max}, 0], \quad (8)$$

$$y(t) = L^T x(t), \quad v(t) = g_1^T(t) y(t), \quad (9)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; $y(t) \in R^m$ – вектор выхода; $u(t) \in R^l$ – управляющее воздействие; $f(t) \in R^n$ – затухающее или ограниченное по норме возмущение; A_1, A_2, b, L – неизвестные матрицы.

Структуру регулятора зададим следующим образом

$$u(t) = \chi_1(t)r(t) + \chi_2(t)[r(t) - v(t)] + \chi_3(t)g_2^T y(t - \theta), \quad (10)$$

где $r(t)$ – задающее воздействие; $\chi_1(t)$, $\chi_2(t)$, $\chi_3(t)$ – настраиваемые скалярные коэффициенты регулятора; $g_1^T(t)$ – настраиваемый коэффициент компенсатора; g_2^T – числовой вектор. Требуется определить дискретные алгоритмы адаптации $\chi_1(t)$, $\chi_2(t)$, $\chi_3(t)$, $g_1(t)$ так, чтобы система (7), (8), (9), (10) была адаптивной или D -адаптивной в заданном классе Ξ .

Для получения непрерывных алгоритмов настройки воспользуемся результатами [2], согласно которым можно синтезировать контур адаптации с использованием алгоритмов вида

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} = \alpha_1 r(t) [r(t) - g_1^T(t) y(t)], \quad (11)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \alpha_2 [r(t) - g_1^T(t) y(t)]^2, \quad (12)$$

$$\frac{d\chi_3(t)}{dt} = \alpha_3 g_2^T y(t - \theta) [r(t) - g_1^T(t) y(t)], \quad (13)$$

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i |y_i(t) [r(t) - g_1^T(t) y(t)]|, \alpha_i, \beta = \text{const} > 0, i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

Осуществляя переход от непрерывных алгоритмов к цифровым алгоритмам, получим следующее их описание:

$$\chi_1(t_{k+1}) = \chi_1(t_k) + \gamma (\alpha_1 r(t_k) [r(t_k) - g_1^T(t_k) y(t_k)]), \quad (15)$$

$$\chi_2(t_{k+1}) = \chi_2(t_k) + \gamma (\alpha_2 [r(t_k) - g_1^T(t_k) y(t_k)]^2), \quad (16)$$

$$\chi_3(t_{k+1}) = \chi_3(t_k) + \gamma (\alpha_3 g_2^T y(t_k - \theta) [r(t_k) - g_1^T(t_k) y(t_k)]), \quad (17)$$

$$g_i(t_{k+1}) = g_i(t_k) + \gamma (\beta_i |y_i(t_k) [r(t_k) - g_1^T(t_k) y(t_k)]|), \quad (18)$$

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

Вид алгоритмов настройки (15) – (18) не изменится и в случае, когда элементы вектора возмущения будут затухающими во времени. В тех же случаях, когда возмущение не будет затухающим, то непрерывная и соответствующая ей дискретная системы управления потеряют устойчивость. В связи с этим для обеспечения корректности дискретизации алгоритма адаптации необходимо потребовать, чтобы непрерывная детерминированная модель исходной системы была экспоненциально диссипативной. Это требование будет выполнено [4], если осуществить регуляризацию алгоритмов (11) – (14) – например, введя в них местные обратные связи вида

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} = \alpha_1 r(t) [r(t) - g_1^T(t) y(t)] - \delta_1 \chi_1(t), \quad (19)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \alpha_2 [r(t) - g_1^T(t) y(t)]^2 - \delta_2 \chi_2(t), \quad (20)$$

$$\frac{d\chi_3(t)}{dt} = \alpha_3 g_2^T y(t - \theta) [r(t) - g_1^T(t) y(t)] - \delta_3 \chi_3(t), \quad (21)$$

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i \left| y_i(t) [r(t) - g_1^T(t) y(t)] \right| - \lambda_i g_i^T(t), \quad (22)$$

где $\alpha_i, \lambda_i, \delta_j, \beta_i = \text{const} > 0; i = \overline{1, m}, j = \overline{1, 3}$.

Переход к дискретному времени приводит к алгоритмам:

$$\chi_1(t_{k+1}) = \chi_1(t_k) + \gamma (\alpha_1 r(t_k) [r(t_k) - g_1^T(t_k) y(t_k)]) - \zeta \delta_1 \chi_1(t_k), \quad (23)$$

$$\chi_2(t_{k+1}) = \chi_2(t_k) + \gamma (\alpha_2 [r^* - g_1^T(t_k) y(t_k)]^2) - \zeta \delta_2 \chi_2(t_k), \quad (24)$$

$$\chi_3(t_{k+1}) = \chi_3(t_k) + \gamma (\alpha_3 g_2^T y(t_k - \theta) [r^* - g_1^T(t_k) y(t_k)]) - \zeta \delta_3 \chi_3(t_k), \quad (25)$$

$$g_i(t_{k+1}) = g_i(t_k) + \gamma (\beta_i \left| y_i(t_k) [r^* - g_1^T(t_k) y(t_k)] \right|) - \sigma_i \lambda_i g_i(t_k). \quad (26)$$

Применяя эти алгоритмы настройки, получаем гибридную систему управления (7) – (10), (23) – (26), обладающую свойствами D -адаптивной системы в соответствующем классе адаптации.

Теперь синтезируем дискретные алгоритмы настройки для системы управления объектом без запаздывания, описываемого уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad (27)$$

$$y(t) = L^T x(t), \quad v(t) = G^T(t) y(t), \quad (28)$$

где матрицы A, L, B и вектор $f(t)$ зависят от вектора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$; Ξ – известное множество возможных параметров вектора ξ , а все другие переменные определены аналогично математическому описанию вида (7), (9).

Присоединим к объекту регулятор заданной структуры

$$u(t) = \chi_1(t) D(p) r(t) + \chi_2(t) [D(p) r(t) - v(t)]. \quad (29)$$

Используя результаты синтеза непрерывных алгоритмов [2], аналогично предыдущему можно показать, во-первых, что гибридная система управления (27) – (29) имеет цифровой контур настройки, описываемый уравнениями

$$\chi_{1j}(t_{k+1}) = \chi_{1j}(t_k) + \gamma (\alpha_{1j} d_j(p) r_j(t_k) [d_j(p) r_j(t_k) - z_j(t_k)]), \quad (30)$$

$$\chi_{2j}(t_{k+1}) = \chi_{2j}(t_k) + \gamma (\alpha_{2j} [d_j(p) r_j(t_k) - z_j(t_k)]^2), \quad (31)$$

$$g_{ij}(t_{k+1}) = g_{ij}(t_k) + \gamma (\beta_i \left| y_i(t_k) [d_j(p) r_j(t_k) - z_j(t_k)] \right|), \quad (32)$$

а во-вторых, что при затухающих возмущениях ГАСНЭМ (27) – (32) будет адаптивной в заданном классе.

Имитационное моделирование ГАСНЭМ

В качестве примера рассматривается ГАСНЭМ для объекта с запаздыванием по состоянию, описываемая уравнениями (7) – (10), с алгоритмами

настройки параметров регулятора и компенсатора (15) – (18), где задающее воздействие $r(t)=1.0$, запаздывание $\theta=3$. В исследуемой системе матрицы, векторы и скалярные величины определены в виде

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 \\ l_{12} & l_{22} \\ 0 & l_{23} \end{bmatrix},$$

а уровень априорной неопределенности задан соотношениями :

$$\begin{aligned} & -0.05 \leq a_{11} \leq 0.2; \quad 0.1 \leq a_{12} \leq 0.4; \quad -0.15 \leq a_{13} \leq -0.1; \quad 6 \leq b_1 \leq 11; \\ & 0.02 \leq a_{21} \leq 0.3; \quad -0.3 \leq a_{22} \leq -0.06; \quad 0.01 \leq a_{23} \leq 0.4; \quad 3.3 \leq l_{11} \leq 3.8; \\ & 1.3 \leq l_{12} \leq 1.8; \quad -1.8 \leq l_{22} \leq 2; \quad 1 \leq l_{23} \leq 1.3; \end{aligned}$$

при возмущающем воздействии $f(t) = 1.4 \sin(2.8 * t) * \exp(-t)$.

Временные характеристики гибридной системы (7) – (10), (15) – (18) при $\gamma = 0.2$ и следующих исходных данных:

$$\begin{aligned} & a_{11} = 0.12; \quad a_{12} = -0.2; \quad a_{13} = -0.5; \quad b_1 = 1.6; \quad a_{21} = 1.3; \quad a_{22} = -0.86; \\ & a_{23} = 0.4; \quad l_{11} = 1; \quad l_{12} = 0.9; \quad l_{22} = -0.1; \quad l_{23} = 0.95; \quad \alpha_1 = 300; \quad \alpha_2 = 30; \\ & \beta_1 = 10; \quad \beta_2 = 2; \quad \beta_3 = 10, \end{aligned}$$

отражающие динамику переменных $x(t)$ и $v(t)$, представлены на рис. 1.

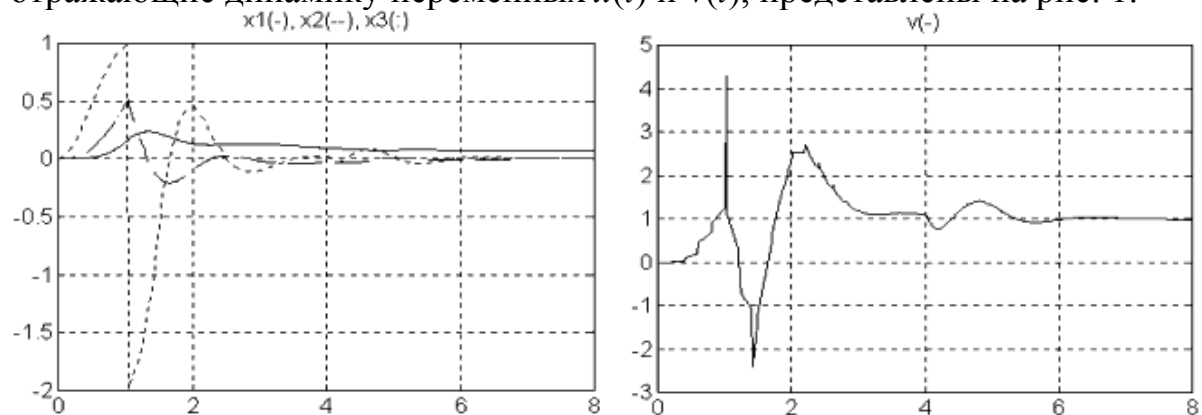


Рис. 1. Временные характеристики $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ и $v(t)$.

Динамика процесса цифровой самонастройки параметров регулятора и адаптивного компенсатора, показаны на рис. 2.

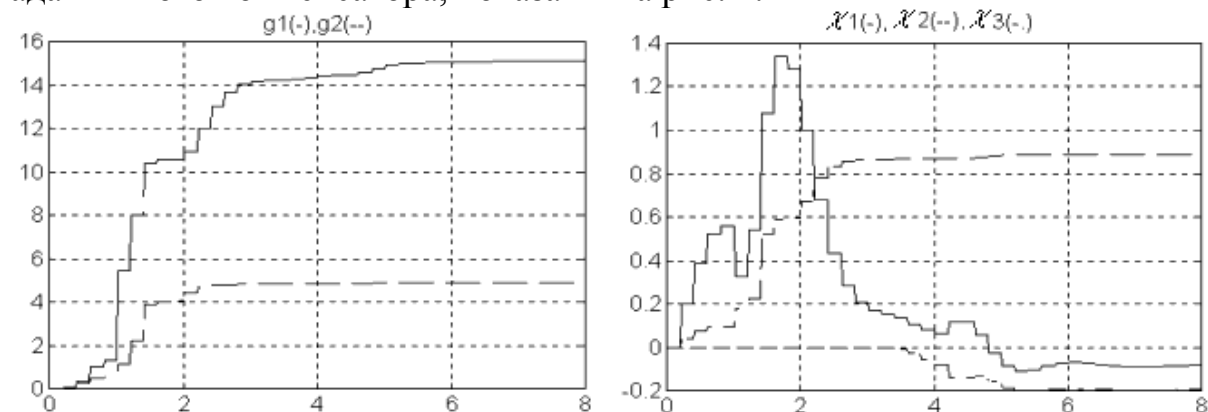


Рис. 2. Временные характеристики $g_1(t)$, $g_2(t)$ и $\chi_1(t)$, $\chi_2(t)$, $\chi_3(t)$.



Результаты имитационного моделирования показывают достаточно высокую эффективность цифровых алгоритмов настройки ГАСНЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986.
2. Еремин Е.Л., Самохвалова С.Г. Прямое адаптивное управление с настройкой компенсаторов. I. // Информатика и системы управления. Благовещенск. 2002. № 1(3). С. 103-111.
3. Landau I.D. Adaptive Control Systems: the Model Reference Approach. N.Y.: Dekker, 1979.
4. Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М.: Наука, 1981.
5. Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с последствием. М.: Наука, 1984.

УДК 681.51

© 2002 г. В.М. Скворцов

(Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет)

ДИСКРЕТНЫЙ H_2 -ОПТИМАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР

Рассматривается задача H_2 -оптимальной оценки состояния линейного дискретного объекта. H_2 -оптимальный фильтр получен как решение вспомогательной задачи оптимального управления. На основе вычислительных экспериментов проводится сравнительный анализ H_2 -оптимального фильтра и фильтра Калмана.

Введение

Задача идентификации состояния линейного объекта хорошо известна в теории управления. Наиболее значимым результатом в этой области является фильтр Калмана [1, 2, 3], который дает линейную по измерениям оценку состояния объекта с минимальной среднеквадратичной ошибкой, если помеха, действующая на объект, – белый шум с известной ковариационной матрицей. Однако характеристики помехи часто бывают неизвестны. В этом случае фильтр Калмана строят по приближенной ковариационной