УДК 004.65

© 2005 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОГО УПРЕДИТЕЛЯ[1]

В работе обсуждаются процедуры синтеза алгоритмов адаптивных систем для динамических объектов с запаздыванием по управлению с использованием дополнительного динамического контура минимального порядка – эталонного упредителя, обеспечивающего совместное выполнение компенсации запаздывания по управлению и формирование желаемой динамики с помощью явно-неявной эталонной модели.

Введение

При разработке автоматических систем для объектов с запаздыванием по управлению, функционирующих в условиях априорной неопределенности, достаточно распространено использование в основном контуре управления так называемых шунт-компенсаторов, позволяющих обеспечить некоторое желаемое качество работы системы за счет управления параллельным соединением *объект + шунт* [1 – 6]. При этом в беспоисковых адаптивных системах управления, в частности в схемах с явной эталонной моделью (включенной параллельно объекту), формируется соединение типа *объект + шунт + эталон*, в котором структуры эталона и шунта могут иметь минимальную структурную сложность, поскольку допускается реализация принципа явно-неявной эталонной модели [4, 7].

В данной работе построение систем с явно-неявной эталонной моделью и шунтом для неустойчивого объекта со скалярным входом-выходом и запаздывающим управлением рассматривается для случая, когда параллельное соединение трех элементов основного контура системы управления вида *объект + шунт + эталон* заменяется более простым – *объект + эталонный упредитель*. Разработка адаптивных систем для объектов с запаздыванием по управлению, подверженных действию неисчезающих возмущений, опирается на критерий гиперустойчивости [8 – 9].

[1] Работа выполнена в рамках плана НИР по заданию Федерального агентства по образованию в 2005 г. «Модели и алгоритмы непрерывных и гибридных систем управления априорно неопределенными нелинейно-нестационарными объектами».

Постановка задачи

Рассматривается объект, описываемый уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = A\,x(t) + b\,u(t-h) + f(t),\ \ y(t) = L^T x(t),$$
$$u(\theta) = \varphi(\theta),\ \theta \in [-h, 0] \tag{1}$$

и функционирующий в условиях априорной неопределенности вида

$$A = A(\xi),\ b = b(\xi),\ L = L(\xi),\ f(t) = f_{\xi}(t),\ \xi \in \Xi, \tag{2}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; $y(t)$ – скалярный выход; $h = const > 0$ – известное запаздывание; $\varphi(\theta)$ – ограниченная непрерывная начальная функция; $u(t)$ – скалярное управление; A и b, L – квазистационарные соответственно матрица состояния и векторы управления и выхода, с элементами, значения которых зависят от набора неизвестных параметров ξ, принадлежащих известному множеству Ξ; $f^T(t)=(0, \ldots, 0, f_n(t)) \in R^n$ – возмущение, обладающее свойством

$$\left| f_n(t) \right| \le f_0 = const > 0\,. \tag{3}$$

К объекту (1) присоединяется адаптивный регулятор

$$u(t) = r(t) + v(t),\quad v(t) = c(t)\,y(t) + k(t)u(t-h), \tag{4}$$

где $r(t)$ и $v(t)$ – соответственно скалярные задающее воздействие и сигнал адаптации; $c(t)$, $k(t)$ – настраиваемые коэффициенты регулятора, алгоритмы настройки которых должны быть определены в ходе синтеза. При этом структура эталонного упредителя, предназначенного для компенсации запаздывания и задания в системе желаемого качества управления, формируется в явно-неявном виде, т.е. согласно уравнению

$$\frac{dz_M(t)}{dt} = -a_0 z_M(t) + a_0\big(u(t-h) - v(t)\big),\ a_0 = const > 0, \tag{5}$$

где $z_M(t)$ – скалярная переменная состояния; a_0 – некоторая произвольно выбираемая скалярная величина, определяющая длительность переходных процессов в системе управления по завершению процессов адаптации.

Предполагается, что в системе (1), (4) – (5) полином $L^T(sE - A)^{+}b$ гурвицев степени $(n - 1)$ с положительными коэффициентами, здесь $(sE - A)^{+}$ – соответствующая присоединенная матрица.

Требуется для системы адаптивного управления (1), (4) – (5) определить алгоритмы настройки коэффициентов регулятора $c(t)$ и $k(t)$ таким образом, чтобы в условиях априорной неопределенности (2), (3) и при любых начальных условиях и функциях обеспечивалось выполнение целевых условий

$$\lim_{t\to\infty}\left\| x_M(t) - x(t) \right\| \le \tilde{x}_0,\quad \tilde{x}_0 = const > 0,$$
$$\lim_{t\to\infty} c(t) \le \tilde{c}_0, \tag{6}$$
$$\lim_{t\to\infty} k(t) \le \tilde{k}_0,\ \tilde{c}_0, \tilde{k}_0 = const.$$

Метод решения

Синтез контура адаптации системы управления осуществляется в соответствии с общепринятой методикой на основе критерия гиперустойчивости. Предварительно заметим, что уравнение эталонного упредителя (5), аналогично [7], можно записать следующим образом:

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M x_M(t) + b_M a_0\big(\nu(t) + u(t-h)\big),\qquad y_M(t) = L^T x_M(t), \tag{7}$$

где $x_M(t)\in R^n$ – вектор состояния эквивалентного эталонного упредителя; $y_M(t)$ – скалярный выход. При этом если элементы матрицы A_M и вектора b_M заданы так, что некоторая передаточная функция $W(s)$ удовлетворяет соотношениям вида

$$W(s) = \frac{a_0 L^T (sE - A_M)^+ b_M}{\det(sE - A_M)} = \frac{a_0 L^T (sE - A_M)^+ b_M}{(s + a_0) L^T (sE - A_M)^+ b_M} = \frac{a_0}{s + a_0}, \tag{8}$$

то, учитывая гурвицевость полинома $L^T(sE - A_M)^+ b$, всегда можно выполнить следующие условия структурного согласования объекта управления (1) и эталонного упредителя (7):

$$A - A_M = a_0 c_0 b_M L^T,\ \ b = a_0(1 + k_0) b_M. \tag{9}$$

Первый этап. Полагая $\varepsilon(t) = x_M(t) - x(t)$, получим математическое описание систем (1), (4), (5) и (1), (4), (7) в эквивалентной форме записи

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = A_M\varepsilon(t) + b_M a_0 \mu(t) + f(t),\quad \nu(t) \overset{\Delta}{=} y_M(t) - y(t),\qquad \mu(t) \overset{\Delta}{=} -[(c(t) - c_0)y(t) + (k(t) - k_0)u(t-h)]. \tag{10}$$

Второй этап. Обеспечим выполнение неравенства Попова

$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(s)\nu(s)ds \ge -\gamma_0^2 = const,\ \forall t > 0, \tag{11}$$

определив условия, сформулировав их относительно нелинейной части системы (10). Для этого, с учетом (10), запишем левую часть (11) в виде

$$\eta(0,t) = 0.5\int_0^t [(c(s) - c_0)y(s) + (k(s) - k_0)u(s - \tau_2)][\nu(s) + \delta]ds +$$

$$+0.5\int_0^t [(c(s) - c_0)y(s) + (k(s) - k_0)u(s - \tau_2)][\nu(s) - \delta]ds.$$

Если алгоритмы настройки коэффициентов адаптивного регулятора (4) синтезировать следующим образом:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \begin{cases} 0,\ \textit{при}\ \ |\nu(t)| \le \delta, \\ \alpha_1 y(t)\big(\nu(t) - \delta\big),\ \textit{при}\ \ \nu(t) > \delta, \\ \alpha_1 y(t)\big(\nu(t) + \delta\big),\ \textit{при}\ \ \nu(t) < -\delta, \end{cases} \tag{12}$$

$$\frac{dk(t)}{dt}=\begin{cases}0, \ при \ \ |\nu(t)|\le\delta,\\ \alpha_2 u(t-h)\big(\nu(t)-\delta\big), \ при \ \nu(t)>\delta,\\ \alpha_2 u(t-h)\big(\nu(t)+\delta\big), \ при \ \nu(t)<-\delta,\end{cases} \tag{13}$$

$$\delta,\alpha_1,\alpha_2=const>0,$$

то, аналогично [9], можно показать, что для η $(0,t)$ будет справедлива искомая оценка

$$\eta(0,t)>-\gamma_0^2=const, \forall t>0.$$

Третий этап. Синтез на этом этапе заключается в выполнении, при $f(t)$ = 0, аналогично [3], частотного условия положительности линейной части системы (10), имеющего следующий вид:

$$\mathrm{Re}W(j\omega)=\mathrm{Re}[a_0L^T(j\omega E-A_M)^{-1}b_M]>0, \forall\omega\ge 0. \tag{14}$$

Справедливость неравенства (14) в силу соотношений (8) не вызывает сомнений.

Четвертый этап. Поскольку при любых $\xi\in\Xi$ выполнены неравенство (11) и условия положительности (14), система (10), (12), (13) является гиперустойчивой и в ней имеет место первое из целевых условий вида (6). Кроме того, учитывая ограниченность реакций системы (10) на ограниченные изменения входного сигнала, а также принимая во внимание явный вид алгоритмов (12), (13), становится вполне очевидным, что за счет выбора в них величины зоны нечувствительности δ можно обеспечить выполнение двух последних предельных целевых условий из (6).

Таким образом, эквивалентные системы управления (10), (12), (13) и (1), (4), (5), (12), (13) – гиперустойчивы и адаптивны в заданном классе Ξ.

Здесь уместно заметить, что из выполнения требования

$$\| x_M(t)-x(t)\| \le \tilde{x}_0$$

следует существование оценки

$$\| x_m(t)-x(t)\| \le \tilde{x}_1, \tag{15}$$

для некоторого $\tilde{x}_1$ = *const* > 0, где $x_m(t)$ – переменная состояния явно-неявной эталонной модели. Условие (15) важно с практической точки зрения, т.к. величина $\tilde{x}_1$ влияет на величину ошибки ($y_m(t)$ – $y(t)$), где $y_m(t)$ – выход явно-неявной эталонной модели, формирующий желаемое поведение объекта управления.

Пример

С целью анализа качества функционирования системы адаптации (1), (4), (5), (12), (13) в условиях априорной неопределенности при действии на объект с запаздыванием по управлению ограниченных по модулю помех случайной природы рассмотрим конкретный пример и проведем имитационное моделирование системы, *S*-модель которой представлена на рис. 1.

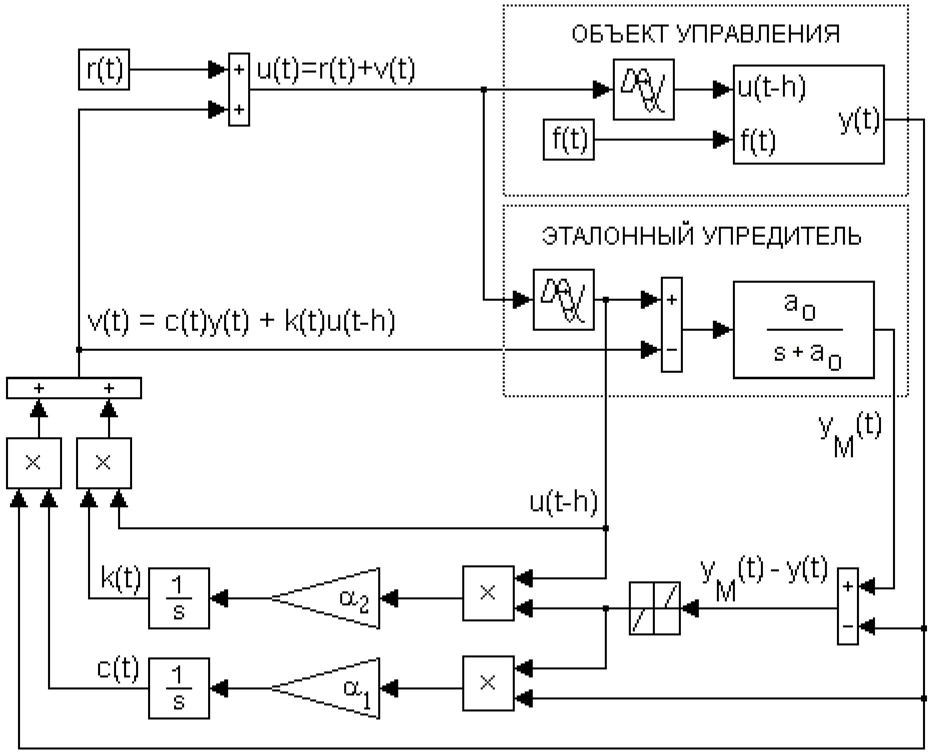

Рис. 1. S-модель адаптивной системы управления (1), (4), (5), (12), (13).

Вычислительный эксперимент проводился для неустойчивого объекта (1) с известным запаздыванием по управлению h = 0.7 (с) при нулевой начальной функции $u(\theta) = 0$, $\theta \in [-h, 0]$. Случайная помеха $f(t)$ была ограничена по модулю величиной f_0 =0.15. Значения элементов матрицы состояния объекта и векторов управления и выхода были определены следующим произвольным образом:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.1 & -10 & -4 \end{pmatrix}, \; b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.25 \end{pmatrix}, \; L^T = \begin{pmatrix} 6 & 5 & 1 \end{pmatrix}. \qquad (16)$$

Параметры эталонного упредителя (5) и контура адаптации (12), (13) были выбраны со значениями:

$$a_0 = 1.1, \; \alpha_1 = 1.8 \; \alpha_2 = 1.5, \; \delta = 0.02. \qquad (17)$$

Динамика процесса на выходе объекта управления $y(t)$, поведение желаемой траектории $y_m(t)$ и запаздывающего управления $u(t–h)$, протекающие в системе управления (1), (4), (5), (12), (13), изображены на рис. 2. Характер процесса самонастройки коэффициентов $c(t)$ и k(t) адаптивного регулятора (4), а также действующего возмущения $f(t)$ и динамика выхода эталонного упредителя, приведены на рис. 3.

По завершению основного этапа самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора, приблизительно через 25 (с), процесс адаптации фактически становится квазистационарным. При этом ошибка $(y_m(t) - y(t))$ оказывается относительно малой и не превышает 6%, а максимальная величина рассогласования $(y_M(t) - y(t))$ оказывается ≈ 3%.

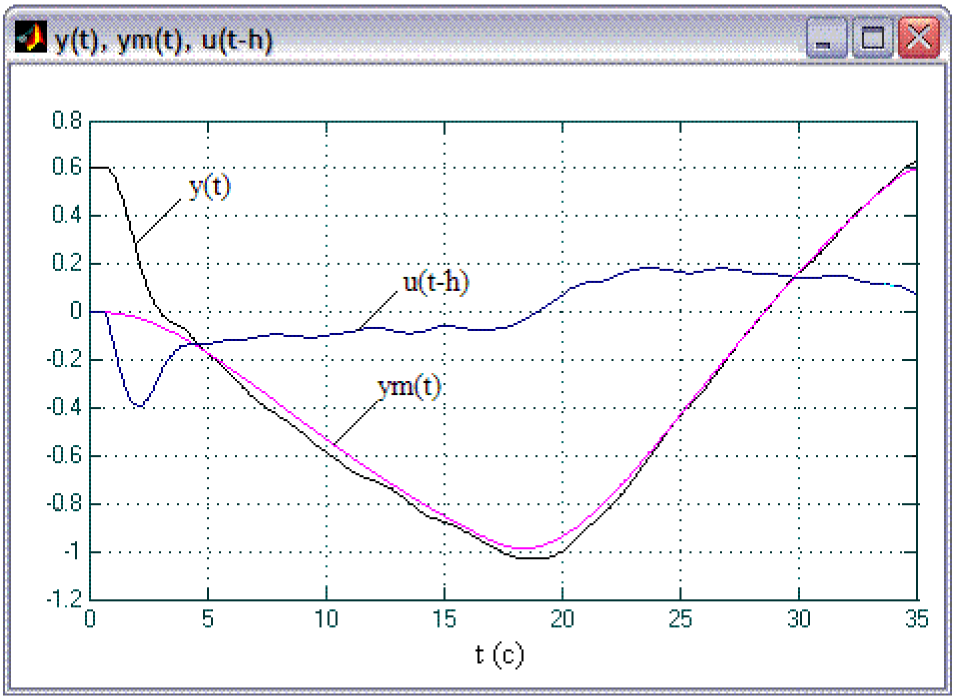

Рис. 2. Динамика процессов $y(t)$, $y_m(t)$, $u(t–h)$ в системе (1), (4), (5), (12), (13).

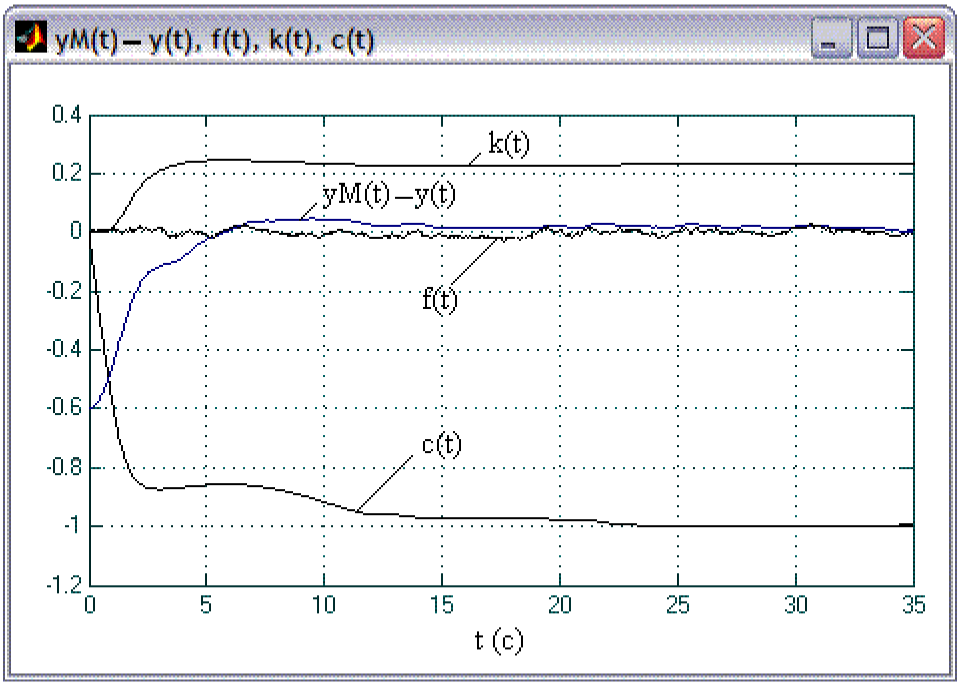

Рис. 3. Динамика процессов $c(t)$, $k(t)$, $f(t)$, $(y_M(t) – y(t))$ в системе (1), (4), (5), (12), (13).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин Е.Л.* Гиперустойчивость систем управления нелинейным объектом с запаздыванием // Автоматизация технологических процессов. Фрунзе: Фрунз. политехн. ин-т, 1987.
2. *Еремин Е.Л., Горбина Н.Н.* Локальные адаптивные системы управления уровнем воды в магистральных каналах // Совершенствование методов и средств автоматизации гидромелиоративных систем. Бишкек: Кыргыз. сельхоз. ин-т, 1994.

3. *Фрадков А.Л.* Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных выхода // Докл. РАН. 1994. Т. 337. №5.
4. *Andrievsky B.R., Fradkov A.L., Stotsky A.A.* Shunt compensation for indirect sliding-mode adaptive control // Proc. of 13th Triennial World Congress IFAC. San Francisco USA, 1996.
5. *Паршева Е.А., Цыкунов А.М.* Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом // АиТ. 2001. №1. С.142-149.
6. *Еремин Е.Л., Ильина Л.В.* Адаптивные системы с динамическим упредитель-компенсатором для объектов с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. 2002. №1(3). С. 97-103.
7. *Еремин Е.Л.* Робастные алгоритмы нестационарных систем управления с явно-неявной эталонной моделью. // Дифференциальные уравнения и процессы управления. Электронный журнал, http://www.neva.ru/journal. 2001. № 3. С.61-74.
8. *Попов В.М.* Гиперустойчивость автоматических систем. М.: Наука, 1970.
9. *Landau I.D.* Adaptive Control Systems. The Model Reference Approach. N.Y.; Dekker, 1979.

УДК 517.977.5

© 2005 г. **Е.Л. Еремин,** д-р техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

СИСТЕМА ПРЯМОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ СО СКАЧКООБРАЗНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ МАТРИЦЫ ВЫХОДА[1]

Для линейного объекта, функционирующего в условиях априорной неопределенности с нестационарной матрицей выхода (значения элементов кусочно-постоянные), рассматривается задача синтеза адаптивных алгоритмов настройки регулятора и компенсатора с использованием неявной эталонной модели.

Введение

Методы построения адаптивных систем управления динамическими объектами в схемах с неявной эталонной моделью при квазистационарном или нестационарном изменении параметров математических моделей хорошо известны [1, 2]. В ходе синтеза таких систем управления приходится

[1] Работа выполнена в рамках плана НИР по заданию Федерального агентства по образованию в 2005 г. «Модели и алгоритмы непрерывных и гибридных систем управления априорно неопределенными нелинейно-нестационарными объектами».