ционарным нелинейным объектом для систем с явной эталонной моделью // Информатика и системы управления. Благовещенск, 2001. №2. С.100-105.
5. *Еремин Е.Л.* Робастное управление нестационарными объектами с эталоном минимальной структурной сложности // Вестник АмГУ. Вып. 15. Благовещенск, 2001. С.18-20.
6. *Цыкунов А.М.* Робастное управление нестационарными объектами // АиТ. 1996. №2. С. 117-123.

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

УДК 681.51

Е.Л. Еремин, д-р техн. наук,
Л.В. Ильина
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРЕДИТЕЛЬ-КОМПЕНСАТОРОМ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ

Рассматривается задача синтеза беспоисковой адаптивной системы с эталонной моделью и упредителем для объектов, содержащих запаздывание по управляющему воздействию и функционирующих в условиях априорной неопределенности.

Введение

Известно [1 – 8], что ряд способов управления в условиях априорной неопределенности опирается на использование шунт-компенсаторов, с помощью которых обеспечиваются некоторые желаемые свойства у параллельного соединения – объект+шунт. На этой же основе разрабатываются и различные методы компенсации и прогнозирования в системах с запаздыванием по управлению.

Далее рассматривается решение задачи синтеза алгоритмов адаптивного управления в системах с явно-неявной эталонной моделью для неустойчивого объекта со скалярным входом – выходом и запаздыванием по управлению.

Постановка задачи

Пусть динамический объект описывается уравнением

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

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния; $y(t) \in R^{n-1}$ – вектор выхода; $h = const > 0$ – известное запаздывание; $\varphi(\theta)$ – ограниченная непрерывная начальная функция; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $z(t) \in R$ – обобщенный выход; $g \in R^{n-1}$ – некоторый вектор.

Функционирование объекта (1) рассматривается в условиях априорной неопределенности

$$A = A(\xi),\ B = B(\xi),\ L = L(\xi),\ \xi \in \Xi. \tag{2}$$

Требуемое качество переходных процессов объекта управления задается с помощью явно-неявной эталонной модели, обладающей минимальной структурной сложностью

$$\frac{dz_m(t)}{dt} = -a_0(z_m(t) - r(t)),\ a_0 = const > 0, \tag{3}$$

где $z_m(t) \in R$ – переменная состояния эталонной модели; $r(t) \in R$ – задающее воздействие.

Зададим структуру закона управления в следующем виде:

$$u(t) = r(t) - c(t) g^T y(t) - k(t) u(t-h), \tag{4}$$

где $c(t)$, $k(t)$ – настраиваемые коэффициенты регулятора, алгоритмы которых подлежат определению.

С целью компенсации запаздывания в объекте управления введем в систему (1) – (4) дополнительный контур – динамический упредитель-компенсатор (ДУК):

$$\frac{dz_k(t)}{dt} = -a_0 z_k(t) + a_0(u(t) - u(t-h)),\ a_0 = const > 0, \tag{5}$$

где $z_k(t) \in R$ – выход ДУК.

Таким образом, для системы адаптивного управления (1), (3), (5) требуется синтезировать алгоритмы настройки параметров регулятора (4) таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение целевых условий

$$\lim_{t\to\infty}\left(x(t) + x_k(t) - x_m(t)\right) = 0,$$
$$\lim_{t\to\infty} c(t) = c_0,\ \lim_{t\to\infty} k(t) = k_0. \tag{6}$$

Метод решения

Поскольку уравнение эталонной модели (3), согласно [9], имеет эквивалентную форму записи вида

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + B_m a_0 r(t),$$
$$y_m(t) = L^T x_m(t),\ z_m(t) = g^T y_m(t), \tag{7}$$
где $x_m(t) \in R^n$ – вектор состояния эквивалентной эталонной модели, $y_m(t) \in R^m$ – вектор выхода, $z_m(t) \in R$ – обобщенный выход, то будем полагать, что для объекта (3) и эталонной модели (7) выполнены условия структурного согласования
$$A - A_m = a_0 c_0 B_m g^T L^T,\ B = a_0(1 + k_0)B_m, \tag{8}$$
причем элементы матрицы A_m и вектора B_m выбраны таким образом, что многочлен $g^T L^T (sE\text{-}A_m)^+ B_m$ гурвицев, а также справедливо соотношение
$$W_{ЭМ}(s) = \frac{a_0 g^T L^T (sE - A_m)^+ B_m}{(a_0 + s) g^T L^T (sE - A_m)^+ B_m}. \tag{9}$$
Уравнение ДУК (5) также имеет эквивалентную форму записи
$$\frac{dx_k(t)}{dt} = A_m x_k(t) + B_m a_0 (u(t) - u(t-h)),$$
$$y_k(t) = L^T x_k(t),\ z_k(t) = g^T y_k(t), \tag{10}$$
где $x_k(t) \in R^n$ – вектор состояния эквивалентного ДУК; $z_k(t) \in R$ – обобщенный выход, причем матрица A_m и вектор B_m те же, что и в уравнении (9)
$$W_{ДУК}(s) = \frac{a_0 g^T L^T (sE - A_m)^+ B_m (1 - e^{hs})}{(a_0 + s) g^T L^T (sE - A_m)^+ B_m}. \tag{11}$$
Синтез системы адаптации проведем в соответствии с методикой, основанной на использовании критерия гиперустойчивости [10].

Первый этап. Полагая $\varepsilon(t)=x(t)+x_k(t)\text{-}x_m(t)$, получим эквивалентное математическое описание системы (43), (46), (51) в виде
$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = A_m \varepsilon(t) + B_m a_0 \mu(t),$$
$$\nu(t) = z(t) + z_k(t) - z_m(t), \tag{12}$$
$$\mu(t) = -[(c(t) - c_0)z(t) + (k(t) - k_0)u(t-h)].$$
Второй этап. Для нелинейной части системы (12) можно записать
$$\eta(0,t) = -\int_0^t \mu(s)\nu(s)ds, \tag{13}$$
и, учитывая вид уравнений (12), получить выражение следующего вида:
$$\eta(0,t) = \int_0^t [(c(s) - c_0)z(s) + (k(s) - k_0)u(s - \tau_2)]\nu(s)ds.$$
Если алгоритмы настройки коэффициентов адаптивного регулятора (4) синтезировать в виде

$$c(t) = \alpha_1 \int_0^t z(\upsilon)\nu(\upsilon) d\upsilon + \alpha_2 z(t)\nu(t) - c(0),$$

$$k(t) = \alpha_3 \int_0^t u(\upsilon - h)\nu(\upsilon) d\upsilon + \alpha_4 u(t-h)\nu(t) - k(0), \qquad (14)$$

$$\alpha_i = const > 0,\ i = \overline{1,4},$$

то для $\eta(0,t)$ будет справедлива оценка

$$\eta(0,t) \geq -\frac{1}{2\alpha_1}(c(0) - c_0)^2 - \frac{1}{2\alpha_2}(k(0) - k_0)^2 = -\gamma_0^2 = const < 0,\ \forall t > 0,$$

т.е. ИНП будет иметь место, что и требовалось показать.

Третий этап. Проведение синтеза на этом этапе заключается в выполнении условия положительности линейной части системы управления (14)

$$\mathrm{Re} W(j\omega) = \mathrm{Re}[g^T L^T (j\omega E_n - A_m)^{-1} B_m] > 0,\ \forall \omega \geq 0. \qquad (15)$$

Будем предполагать, что для любой матрицы вида $L(\xi)$ однозначно выбраны значения элементов вектора g так, что при заданных значениях элементов матрицы A_m и вектора B_m, будет выполнено неравенство (15).

Четвертый этап. Из выполнения ИНП (13) и условия положительности линейной части системы (15) следует асимптотическая гиперустойчивость системы (12), при этом, учитывая явный вид алгоритмов самонастройки коэффициентов регулятора (14), очевидно, что выполнены предельные соотношения

$$\lim_{t\to\infty} \frac{dc(t)}{dt} = 0,\ \lim_{t\to\infty} \frac{dk(t)}{dt} = 0,$$

приводящие к выполнению требований условий (6) непосредственно.

Кроме того, на заключительном этапе синтеза следует отметить, что в общем случае из выполнения требования $(x(t)+x_{\mathrm{k}}(t)-x_m(t))\to 0$ не следует справедливость условия $(x(t)-x_m(t))\to 0$. Однако при постоянном задающем воздействии, с учетом уравнения (5) или (10), при $t\to\infty$ и $u(t)=u(t-h)$ будет иметь место соотношение $z_k(t)\to 0$, а также $x_k(t)\to 0$ и, как следствие, существование условия $(x(t)-x_m(t))\to 0$. В тех же случаях, когда $r(t)$ – кусочно-постоянная функция, очевидно, что в конце каждого конечного интервала времени будет иметь место ненулевая ошибка, но, как показывают результаты имитационного моделирования, ее величина оказывается весьма малой.

Иллюстративный пример

Для анализа качества функционирования системы адаптивного управления (1), (3) – (5), (14) проводилось ее имитационное моделирование.

Исходные данные для объекта с запаздыванием по управлению при h=0.15с были следующими:

$$A=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ -3 & -2 & a\end{pmatrix},\ B=\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix},\ L^T=\begin{pmatrix}3 & 1 & 0\\ 0 & 2 & 1\end{pmatrix},\ -2\le a\le 0.1, \tag{17}$$

а параметры ЭМ, ДУК и контура адаптации были выбраны со значениями:

$$g^T=(1\ \ 2),\ a_0=1.5,\ \alpha_1=20,$$
$$\alpha_2=40,\ \alpha_3=2,\ \alpha_1=20. \tag{18}$$

Временные характеристики изменения скалярных выходов объекта управления $z(t)$ и эталонной модели $z_m(t)$ для неустойчивого объекта представлены на рис. 1.

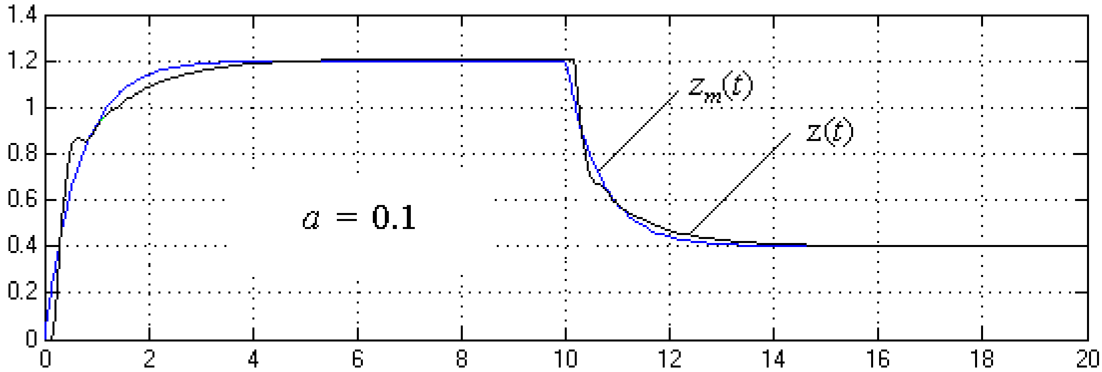

Рис. 1. Динамика изменений обобщенного выхода ОУ и выхода эталонной модели.

Те же временные характеристики в той же системе, но для случая устойчивого объекта показаны на рис. 2.

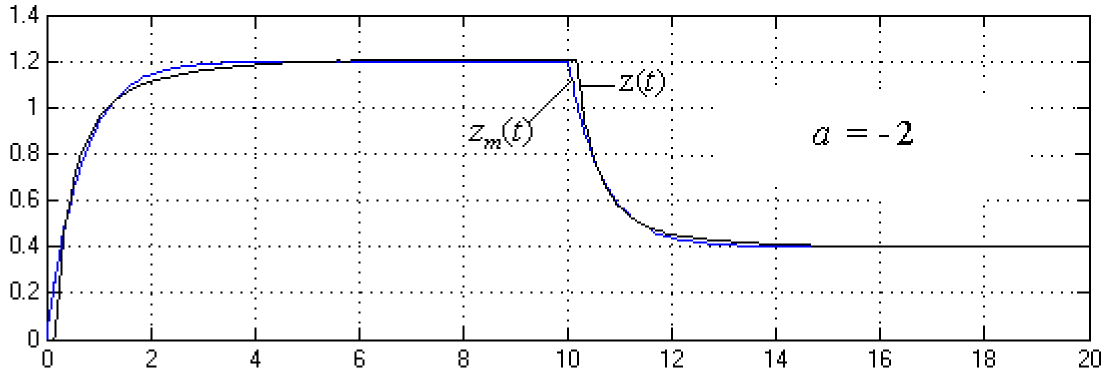

Рис. 2. Динамика изменений выхода эталонной модели и обобщенного выхода ОУ.

Заключение

Принципиальным преимуществом предлагаемой системы беспоисковой адаптации для объектов с запаздыванием по управлению, по сравнению с существующими аналогами, является обеспечение желаемых показателей качества в системах прямого адаптивного управления, причем как для устойчивых, так и неустойчивых объектов, функционирование которых происходит в условиях априорной неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин Е.Л.* Гиперустойчивость систем управления нелинейным объектом с запаздыванием // Автоматизация технологических процессов. Фрунзе: Фрунз. политехн. ин-т, 1987.
2. А.с. 1534428 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием / *Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина, А.М. Цыкунов*. Б.И. 1990. №1.
3. А.с. 1619229 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием / *Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина*. Б.И. 1991. №1.
4. А.с. 1631515 (СССР). Система автоматического управления для астатических объектов с запаздыванием / *Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина, И.И. Кравченко*. Б.И. 1991. №8.
5. А.с. 1667001 (СССР). Система автоматического управления для объектов с запаздыванием / *Е.Л. Еремин, Н.Н. Горбина*. Б.И. 1991. №28.
6. *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.
7. *Фрадков А.Л.* Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных выхода // Докл. РАН. 1994. Т. 337. №5.
8. *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.
9. *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.
10. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.