



УДК 684.511

© 2007 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,
Д.А. Теличенко, канд. тех. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ УПРЕДИТЕЛЕМ И СТАЦИОНАРНЫМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ ДЛЯ SISO-ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ¹

Для класса скалярных объектов с запаздыванием по управлению синтезированы алгоритмы адаптивных систем управления с эталонным упредителем. Восстановление недоступных измерению переменных пространства состояния осуществляется с использованием стационарного наблюдателя полного порядка.

Введение

Проблема построения систем управления работоспособных в условиях изменения параметров объекта и наличия неконтролируемых возмущений является одной из актуальных в современной теории управления [1 – 6]. Несмотря на достаточно большое число публикаций в этой области, имеется еще ряд задач, наилучшее решение которых не найдено до сих пор. В первую очередь это касается построения относительно простых законов управления SISO-объектами (single input – single output) с априорно неопределенными параметрами и запаздываниями различных типов.

В рамках применения адаптивного подхода для скалярных объектов с известным запаздыванием большое применение находит методика расширения ошибки слежения [2, 7]. При этом дополнительный контур управления может быть реализованным при помощи явной эталонной модели и прогнозирующего устройства [8], а также с использованием явно-неявной эталонной модели и блока упреждения [9] или на основе эталонного упредителя [10]. Необходимо отметить, в связи с использованием громоздких схем расширения, что практическая реализация алгоритмов управления систем адаптации в таких случаях достаточно сложна [3]. В данной работе

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

развивается подход, основанный на применении эталонного упредителя и простых схем восстановления недоступных переменных состояния, в частности с использованием стационарного наблюдателя полного порядка [11].

Математическое описание и постановка задачи синтеза системы

Математическое описание. Рассмотрим SISO-объект с запаздыванием по управлению вида

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t-h) + f(t), \quad y(t) = L^T \cdot x(t), \quad (1)$$

$$u(z) = j(z), \quad z \in [-h, 0], \quad x(0) = x_0,$$

$$W_{oy}(s) = \frac{b(s)}{a(s)} e^{-h \cdot s}, \quad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ – переменные состояния; $y(t) \in R$ – выход объекта; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $h = const > 0$ – известное и постоянное запаздывание, величина которого соразмерна значениям постоянных времени объекта; $j(z) \in C_h$ – начальная функция; C_h – пространство непрерывных ограниченных функций; A и $L^T = (1, 0, \dots, 0)$, B – матрица и векторы соответствующей размерности; $b(s)$ – гурвицев полином с положительными коэффициентами порядка $\deg b(s) = m$; $a(s)$ – произвольный полином порядка $\deg a(s) = n$; $l = (n - m) > 1$ – относительный порядок передаточной функции объекта; $f^T(t) = (0, \dots, 0, f_n(t))$ – неизвестное и неконтролируемое возмущающее воздействие, элемент которого $f_n(t)$ ограничен по модулю

$$|f_n(t)| \leq f_0^2 = const. \quad (3)$$

Объект (1), (2) функционирует в условиях априорной неопределенности

$$A = A(x), \quad B = B(x), \quad f(t) = f_x(t), \quad (4)$$

где x – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству Ξ .

Для формирования желаемой динамики процессов управления и компенсации запаздывания в систему вводится эталонный упредитель [3, 10], уравнения которого могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M \cdot x_M(t) + B_M \cdot y(t), \quad y_M(t) = G^T \cdot x_M(t), \quad (5)$$

$$y(t) = [u(t-h) + J(t)],$$

где $x_M(t) \in R^n$ – вектор переменных состояния; $y_M(t) \in R$ – скалярный выход эталонного упредителя, формируемый с помощью выбора компонент вектора G ; $y(t) \in R$ – обобщенный вход эталонного упредителя, формирующийся через настраиваемые параметры вводимого в систему адаптивного регулятора; $B_M^T = (0, \dots, 0, 1)$ – вектор соответствующей размерности; A_M – гурвицева матрица, собственные значения которой удовлетворяют соот-

ношению

$$\det(s \cdot E - A_M) = (s - a_{M0}) \cdot G^T \cdot (s \cdot E - A_M)^+ \cdot (B_M / b_{M0}), \quad (6)$$

где $s = j\omega$ – комплексная переменная; E – единичная n -мерная матрица; $a_{M0} = \text{const} > 0$, $b_{M0} = \text{const} > 0$.

Передаточная функция эталонного упредителя (5), с учетом (6), может быть записана в виде

$$\begin{aligned} W_M(s) &= \frac{y_M(s)}{Y(s)} = G^T (s \cdot E - A_M)^{-1} B_M = \\ &= \frac{G^T (s \cdot E - A_M)^+ B_M}{\det(s \cdot E - A_M)} = \frac{b_{M0}}{s - a_{M0}}, \end{aligned} \quad (7)$$

что позволяет вместо (5), (6) на этапе практической реализации использовать явно-неявное представление эталонного упредителя вида (7), при этом выбор компонент вектора G осуществляется из условий гурвицевости некоторого полинома. Выражениям (7) соответствует уравнение

$$\frac{dy_M(t)}{dt} = a_{M0} \cdot y_M(t) + b_{M0} \cdot Y(t). \quad (8)$$

Адаптивный регулятор в системе сформируем в виде

$$u(t) = r(t) - J(t), \quad (9)$$

$$J(t) = c_1^T(t) \cdot x(t) + c_2(t) \cdot u(t-h),$$

где $r(t) \in R$ – кусочно-постоянное задающее воздействие; $\chi_1(t) \in R^n$; $\chi_2(t) \in R$ – параметры адаптивного регулятора, алгоритмы настройки которого подлежат определению.

Для восстановления недоступных измерению переменных состояния объекта (1), (2) введем в систему стационарный наблюдатель [11], который может быть задан в виде

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A_M \cdot \bar{x}(t) + B_M \cdot u(t) + N(\bar{y}(t) - y(t)), \quad \bar{y}(t) = G^T \cdot \bar{x}(t), \quad (10)$$

где N – вектор, обеспечивающий желаемое распределение корней характеристического многочлена $\det(sE - A_M + N \cdot L^T)$ и при устранении рассогласования выходов $(y(t) - \bar{y}(t))$ выполнение предельного соотношения

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{x}(t) \cong x(t), \quad (11)$$

позволяющего использовать при синтезе системы управления вместо недоступных измерению переменных состояния $x(t)$ их оценки $\bar{x}(t)$.

На практике [15] обычно собственные значения матрицы $(A_M - N \cdot L^T)$ задают так, чтобы желаемые корни ее характеристического полинома $j(s) = \det(s \cdot E - A_M + N \cdot L^T)$ выбирались из условия

$$\min_j \text{Re}(-p_j) \geq \Theta \cdot \max_i \text{Re}(-p_i), \quad \Theta \geq 3, \quad (12)$$

где p_j, p_i – соответственно характеристические числа устойчивых матриц A_m и $(A_m - N \cdot L^T)$.

Постановка задачи. Для объекта управления (1) – (3), функционирующего в условиях априорной неопределенности (4), совместно с эталонным упредителем (5) – (8), адаптивным регулятором (9) и наблюдателем (10) требуется определить явный вид алгоритмов параметрической настройки коэффициентов $\chi_1(t), \chi_2(t)$ таким образом, чтобы при любых начальных условиях $x(0)$ и любом наборе $x \in \Xi$ в условиях ограниченности траекторий системы обеспечивалось бы выполнение предельных соотношений

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_{1q}(t) \leq c_{10q} = const, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_2(t) \leq c_{20} = const, \quad q = \overline{1, n}, \quad (13)$$

и цели управления, заданной в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{эм}(t) - y(t)| \leq d_0, \quad d_0 = const > 0, \quad (14)$$

где $y_{эм}(t) \in R$ – скалярный выход эталонной модели, к динамике которой должен стремиться объект управления

$$\begin{aligned} \frac{dx_{эм}(t)}{dt} &= A_m \cdot x_{эм}(t) + B_m \cdot r(t), \quad y_{эм}(t) = G^T \cdot x_{эм}(t), \\ W_{эм}(s) &= \frac{y_{эм}(s)}{r(s)} = \frac{b_{m0}}{s - a_{m0}}, \end{aligned} \quad (15)$$

Заметим, что целевые условия (13), (14) формулируются относительно уравнений эталонной модели, но при этом: во-первых, как показано в работах [3, 10], явной реализации эталона в системе не требуется, а достижение (13), (14) с относительно небольшой величиной δ_0 обеспечивается вследствие стремления динамики объекта к динамике эталонного упредителя; во-вторых, исходя из (10) – (12), за счет того, что уравнения наблюдателя и эталонного упредителя являются формируемыми на этапе проектирования, обеспечиваются выполнение (11) и, как следствие, выполнение

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - \bar{x}(t)\| &= e_{01}, \quad e_{01} = const > 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{y}(t) - y(t)| &= e_{02}, \quad e_{02} = const > 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где величины $\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ относительно малы.

Синтез системы управления

Для решения сформулированной задачи, заключающейся в построении адаптивной системы (1) – (16), воспользуемся критерием гиперустойчивости В.М. Попова [12]. При этом будем следовать методике и последовательности, изложенных в [13], выделив соответствующие этапы синтеза. Полагая, что в силу условия (11) оценка $\bar{x}(t)$ с высокой степенью точности соответствует вектору $x(t)$ и, учитывая особенности задания объекта

управления и формирования эталонного упредителя, вместо исходного описания объекта (1), (2) будем использовать уравнения вида

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A \cdot \bar{x}(t) + B \cdot u(t) + f(t), \quad (17)$$

$$y(t) \cong \bar{y}(t) = G^T \cdot \bar{x}(t),$$

Синтез системы управления проведем в рамках известного способа [14], согласно которому первоначально рассмотрим случай отсутствия возмущения $f(t)$, а затем проведем огрубление полученных алгоритмов самонастройки для построения системы адаптивного управления, работоспособной в условиях постоянного действия возмущающего воздействия $f(t)$, ограниченного условием (3).

Первый этап. Получим эквивалентное математическое описание системы относительно ошибки рассогласования

$$e(t) = x_m(t) - \bar{x}(t). \quad (18)$$

Предполагая, что для объекта управления (1), (2), имеющего эквивалентное представление (17) будут иметь место условия структурного согласования

$$A = A_m + B_m \cdot c_{10}^T, \quad (19)$$

$$B = B_m (1 + c_{20}), \quad (20)$$

выделим линейную стационарную часть (ЛСЧ) и нелинейную нестационарную часть (ННЧ) и запишем уравнения (1), (2), (5) – (7), (17) – (20) в виде

$$\begin{cases} \frac{de(t)}{dt} = A_m \cdot e(t) + B_m \cdot m(t), \\ v(t) = y_m(t) - y(t) = G^T \cdot e(t), \\ m(t) = [(c_1(t) - c_{10})^T \cdot \bar{x}(t) + (c_2(t) - c_{20}) \cdot u(t - h)]. \end{cases} \quad (21)$$

Второй этап. Разрешим проблему «положительности» линейной стационарной части эквивалентной системы (21), которая в нашем случае может быть записана в виде

$$W_{лсч}(s) = G^T \cdot (s \cdot E - A_m)^{-1} \cdot B_m. \quad (22)$$

Очевидно, что за счет выбора компонентов вектора G в виде (6) передаточную функцию (22) можно преобразовать к виду (7), из которого следует выполнение неравенства вида

$$\operatorname{Re} W_{лсч}(jw) > 0, \quad \forall w \geq 0. \quad (23)$$

Третий этап. Обеспечим выполнение интегрального неравенства В.М. Попова, составленного относительно ННЧ эквивалентно преобразованной системы (21):

$$h(0,t) = -\int_0^t \mathbf{m}(s) \cdot \mathbf{n}(s) ds \geq -g_0^2 = \text{const}, \quad \forall t \geq 0. \quad (24)$$

Запишем левую часть (24), с учетом явного вида ННЧ, в виде

$$h(0,t) = -\sum_{q=1}^n \int_0^t (c_{1q}(V) - c_{10q}) \cdot \mathbf{n}(V) \cdot \bar{x}_q(V) dV - \int_0^t (c_2(V) - c_{20}) \cdot \mathbf{n}(V) \cdot u(V-h) dV, \quad (25)$$

где $c_{1q}(V)$, $\bar{x}_q(V)$ – соответствующие компоненты векторов $\mathbf{c}_1(V)$, $\bar{\mathbf{x}}(V)$.

Если алгоритмы настройки коэффициентов адаптивного регулятора (9) синтезировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dc_{1i}(t)}{dt} &= -\mathbf{a}_{1i} \cdot \mathbf{n}(t) \cdot \bar{x}_i(t), \quad \mathbf{a}_{1i} = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \\ \frac{dc_2(t)}{dt} &= -\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{n}(t) \cdot u(t-h), \quad \mathbf{a}_2 = \text{const} > 0, \end{aligned} \quad (26)$$

то можно показать (аналогично [2, 13]), что для $h(0,t)$ вида (25) будет иметь место оценка вида

$$h(0,t) \geq -\frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \mathbf{a}_{1q}^{-1} (c_{1q}(0) - c_{10q})^2 - \frac{1}{2} \mathbf{a}_2^{-1} (c_2(0) - c_{20})^2, \quad (27)$$

эквивалентная условию (24).

Четвертый этап синтеза. Обсудим условия достижимости в синтезированной системе управления (1) – (10), (26) целевых требований (13) – (15).

Обратим внимание на тот факт, что приведенный выше синтез для эквивалентной системы (4) – (10), (17), (26) осуществляется при условии $f(t) \equiv 0$. Следовательно, в рамках критерия гиперустойчивости [13] пока можно говорить только о справедливости предельных соотношений вида

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) &= x_M(t) - \bar{x}(t) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} c_{1q}(t) &= c_{10q}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} c_2(t) = c_{20}. \end{aligned}$$

Для сохранения работоспособности полученной системы (4) – (10), (17), при наличии возмущения (3) алгоритмы адаптации (26) можно подвергнуть процедуре регуляризации, – например, за счет введения зоны нечувствительности [14]:

$$\frac{dc_{1q}(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |\mathbf{n}(t)| \leq \Delta, \\ -\mathbf{a}_{1q} \cdot \bar{x}_q(t) \cdot (\mathbf{n}(t) + \Delta), & \forall t \geq 0, \mathbf{n}(t) < -\Delta, \\ -\mathbf{a}_{1q} \cdot \bar{x}_q(t) \cdot (\mathbf{n}(t) - \Delta), & \forall t \geq 0, \mathbf{n}(t) > \Delta, \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{dc_2(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |n(t)| \leq \Delta, \\ -a_2 \cdot u(t-h) \cdot (n(t) + \Delta), & \forall t \geq 0, n(t) < -\Delta, \\ -a_2 \cdot u(t-h) \cdot (n(t) - \Delta), & \forall t \geq 0, n(t) > \Delta, \end{cases} \quad (29)$$

$$\Delta = \text{const} > 0, \quad q = \overline{1, n}.$$

В этом случае для полученной системы (4) – (10), (17), (28), (29) будут иметь место предельные соотношения вида (13), а относительно ошибки рассогласования можно записать неравенства вида

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_M(t) - \bar{x}(t)\| \leq \bar{d}_{01}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - \bar{y}(t)| \leq \bar{d}_{02}, \quad (30)$$

$$\bar{d}_{01}, \bar{d}_{02} = \text{const} > 0,$$

где величины $\bar{d}_{01}, \bar{d}_{02}$ достаточно малы.

Принимая во внимание условия формирования стационарного наблюдателя (12), обеспечивающие выполнение (11) и, как следствие, достижение (16), для системы (1) – (10), (28), (29) будут иметь место предельные соотношения (13), а неравенства (30) могут быть представлены в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_M(t) - x(t)\| \leq \bar{\bar{d}}_{01}, \quad \bar{\bar{d}}_{01} = \text{const} > 0, \quad (31)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - y(t)| \leq \bar{\bar{d}}_{02}, \quad \bar{\bar{d}}_{02} = \text{const} > 0,$$

где величины $\bar{\bar{d}}_{01}, \bar{\bar{d}}_{02}$ так же достаточно малы.

Поскольку при кусочно-постоянном задающем воздействии $r(t)$ у рассмотренных систем управления имеет место стремление $u(t-h) \rightarrow u(t)$, то рассматривая вопрос о приближении динамики синтезированной системы (1) – (10), (31) к динамике эталонной модели вида (15), можно утверждать, что существует предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_M(t) - y_{эм}(t)| \leq d_1, \quad d_1 = \text{const} > 0, \quad (32)$$

где величина d_1 относительно мала, а следовательно, в синтезированной системе (1) – (10), (29) будут иметь место целевые условия (13), (14).

Имитационное моделирование

Для анализа качества работы предлагаемых алгоритмов рассмотрим пример имитационного моделирования. Будем считать, что априорно неопределенный, неустойчивый объект (1), (2) имеет следующие числовые значения соответствующих матриц и векторов

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & -9 & 0.2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 7.5 \end{pmatrix}, \quad L^T = (1 \ 0 \ 0), \quad h = 0.6,$$

а возмущение (3) задано в виде

$$f(t)^T = (0 \quad 0 \quad f_n(t)), \quad |f_n(t)| \leq f_0^2, \quad f_0^2 = 0.25,$$

Параметры эталонного упретителя (5), с учетом (6), (7) зададим в виде

$$W_M(s) = \frac{1}{s+1}, \quad G^T = (2500 \quad 100 \quad 1),$$

$$A_M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -125000 & -7500 & -150 \end{pmatrix}, \quad B_M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Стационарный наблюдатель (10) сформируем с учетом параметров эталонного упретителя, а вектор N рассчитаем исходя из (12) и зададим в виде

$$N^T = (1350 \quad 540000 \quad 33750000).$$

Параметры адаптивного регулятора (9) с алгоритмами самонастройки (29) выберем следующим образом:

$$\begin{cases} a_{11} = 2.7435, & a_{12} = 0.1097, & a_{13} = 0.0011, \\ a_2 = 1.5, & \Delta = 0.03. \end{cases}$$

Полученная в результате динамика переходных процессов показана на рис. 1, 2, 3, 4, где для наглядности в систему искусственно введен блок эталонной (15). На рис. 1 показан выход объекта $Y(t)$ и эталона модели $Yem(t)$. На рис. 2 представлен характер задающего $r(t)$ и возмущающего $f(t)$ воздействий. Характер самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора χ_{11} , χ_{12} , χ_{13} и χ_2 приведен на рис. 3. Ошибка рассогласования между выходом объекта и наблюдателя $e(t) = y(t) - \bar{y}(t)$ представлена на рис. 4.

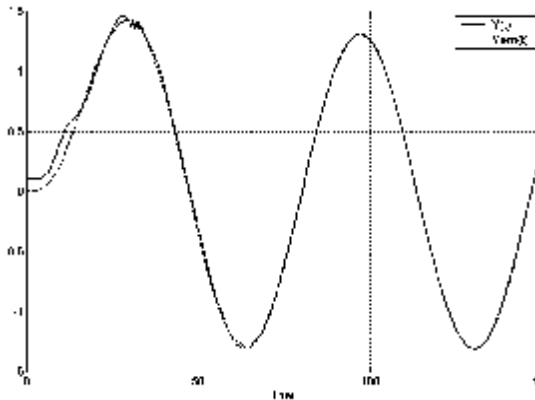


Рис. 1.

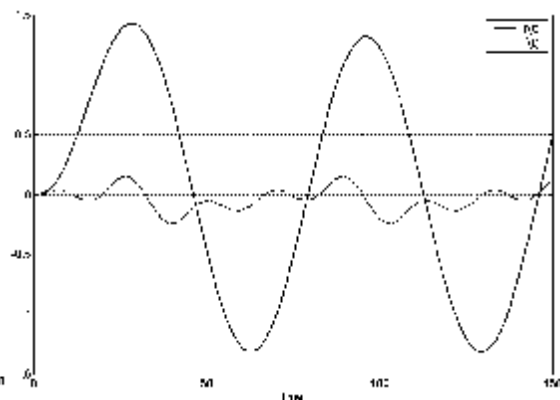


Рис. 2.

Из представленных рисунков видно, что исследуемая система обладает хорошим качеством работы и в случае неустойчивого объекта успешно справляется как с наличием запаздывания по управлению, так и с исчезающим, неизмеряемым возмущением. Полученная в итоге величина δ_0 , присутствующая в цели (14), достаточно мала, а стационарный наблюдатель успешно справляется со своей задачей.

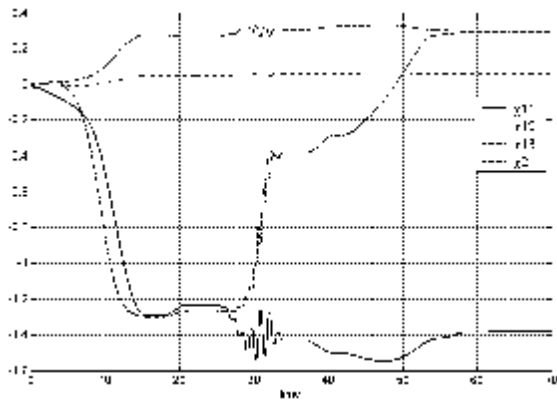


Рис. 3.

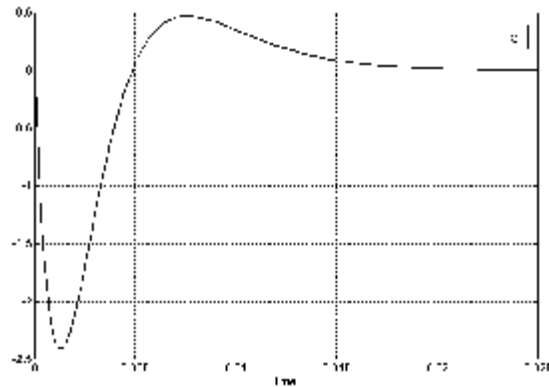


Рис. 4.

Заключение

Полученные в работе адаптивные алгоритмы для класса априорно неопределенных скалярных объектов с запаздыванием по управлению, функционирующих в условиях действия постоянного, неизвестного и неизмеряемого возмущения, обладают достаточно простой структурой и обеспечивают хорошее качество работы системы управления в целом. Простота реализации системы достигается за счет использования для компенсации запаздывания и задания желаемой динамики процессов управления – явно-неявного эталонного упредителя, а для восстановления недоступных измерению переменных пространства состояния – стационарного наблюдателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т.* – Т.3: Методы современной теории автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
2. *Мирошник И.В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000.
3. *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.
4. *Сметана А.З.* Методика расчета двухконтурных систем автоматического регулирования теплоэнергетических процессов // Известия академии наук. Энергетика. – 2002. – № 6. – С.114-121.
5. *Мееров М.В.* Адаптивные компенсирующие регуляторы с предиктором Смита // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 10. – С.125-135.
6. *Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю., Антонов В.Н.* Нейросетевые системы управления. Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 8. / под общ ред. А.И. Галушкина. – М.: ИМПРЖР, 2002.
7. *Monopoli R. V.* Model reference adaptive control with an augmented error signal // IEEE Trans. On Automat. Control. – 1974. V. 19, №5. – P.474-484.
8. *Паршева Е.А., Цыкунов А.М.* Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №1. – С.142-149.



9. 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.
10. 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.
11. Краснова С.А. Каскадный синтез наблюдателя состояния для нелинейных систем при наличии внешних возмущений //Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С.31-54.
12. Попов В.М. Гиперустойчивость автоматических систем. – М.: Наука, 1970.
13. Landau I.D. Adaptive control systems: the model reference approach. – N.Y.: Marsel Dekker, 1979.
14. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
15. Борцов Ю.А., Поляхов Д.П., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984.

УДК 684.511

© 2007 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук,
Л.В. Чепак, канд. техн. наук

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АЛГОРИТМЫ РОБАСТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ СКАЛЯРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ¹

Предложена процедура синтеза нелинейных робастных законов управления в системах с неявной и явно-неявной эталонной моделью для нестационарных объектов без измерения их переменных состояния и при наличии постоянно действующих возмущений.

Введение

Пусть математическое описание строго минимально-фазового объекта управления имеет вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t) + f(t), \quad y(t) = L^T x(t), \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – переменные состояния; $u(t) \in R$ – управление; $y(t) \in R$ – выход объекта; $A(t)$ и $B(t)$ – нестационарные матрица Фробениуса размера

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект №7362).