



ЛИТЕРАТУРА

1. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М: Мир, 1969.
2. Фомин В.Н. Методы управления линейными дискретными объектами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1985.
3. Söderström T., Stoica P. System identification. © 1989 Prentice Hall International (UK) Ltd, University Press, Cambridge.
4. Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A. State Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems // IEEE Trans. Auto. Contr. AC-34. 1989. P.831-847.
5. Барабанов А.Е., Первозванский А.А. Оптимизация по равномерно-частотным показателям // АиТ. 1992. №9. С.3-32.
6. Colaneri P., Geromel J.C., Locatelli A. Control theory and design: RH_2 and RH_∞ viewpoint // Academic Press, 1997.
7. Власова Е.А. Ряды. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000.
8. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М: Мир, 1977.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.М. Коганом.

УДК 681.51

© 2002 г. **Л.В. Чепак**

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

АДАПТИВНОЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ В СИСТЕМАХ С ЯВНЫМ ЭТАЛОНОМ

Рассматривается задача синтеза адаптивной системы управления для объектов с запаздыванием по управлению с использованием явной эталонной модели и дополнительного контура, так называемого прогнозирующего устройства, обладающих простой структурой.

Введение

В последнее время в задачах построения систем управления для объектов с запаздыванием особое внимание уделяется тем подходам, которые основаны на использовании компенсации запаздывания в объекте [1-4]. В ча-

стности, для решения проблем, связанных с влиянием запаздывания на качество процессов регулирования, обычно применяют специальные или дополнительные контуры.

В данной работе исследуется проблема компенсации в системе запаздывания по управлению с использованием адаптивного прогнозирующего устройства. Помимо основного регулятора, в систему вводится вспомогательный контур, выполняющий функцию прогноза.

Решение задачи синтеза в настоящей работе достигается в рамках критерия гиперустойчивости [1, 6].

Постановка задачи

Пусть динамика минимально-фазового объекта управления описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t - \tau) + f(t), \quad y(t) = g^T L^T x(t), \quad (1)$$

$$A = A(\xi), \quad B = B(\xi), \quad L = L(\xi), \quad \xi \in \Xi,$$

где $x(t) \in R^n$; $u(t) \in R$; $y(t) \in R$; τ – известное постоянное запаздывание; $f(t)$ – возмущающее воздействие, удовлетворяющее условию:

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

Зададим желаемое поведение объекта управления с помощью эталонной модели, имеющей минимальную структурную сложность [5]

$$\frac{d\zeta_m(t)}{dt} = -a_0 (\zeta_m(t) - r(t)), \quad a_0 = \text{const} > 0, \quad (3)$$

где $\zeta(t) \in R$; $r(t)$ – скалярное задающее воздействие. Очевидно, что уравнение (3) допускает эквивалентную форму записи вида

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = A_m x_m(t) + B_m a_0 r(t), \quad y_m(t) = g^T L^T x_m(t), \quad (4)$$

$$A_m - A = c_0 B_m g^T L^T, \quad B = (a_0 + k_0) B_m,$$

где $x_m(t) \in R^n$, $y_m(t) \in R$, если матрица A_m и вектор B_m выбраны таким образом, что многочлен $g^T L^T (\lambda E - A_m)^+ B_m$ гурвицев и справедливо соотношение

$$W_1(\lambda) = \frac{y_m(\lambda)}{r(\lambda)} = \frac{a_0 g^T L^T (\lambda E - A_m)^+ B_m}{(\lambda + a_0) g^T L^T (\lambda E - A_m)^+ B_m}. \quad (5)$$

Прежде чем сформулировать постановку задачи, в объекте управления осуществим компенсацию запаздывания. Для этого введем в рассмотрение дополнительное устройство

$$\frac{dz(t)}{dt} = -a_0 z(t) + a_0 (u(t) - u(t - \tau)) + a_0 v(t + \tau), \quad a_0 = \text{const} > 0, \quad (6)$$

где $z(t) \in R$, $v(t) \in R$ – дополнительное управляющее воздействие.

Если входное воздействие представить в виде

$$\varphi(t) = u(t) - u(t - \tau) + v(t + \tau),$$

то уравнение (6) запишется следующим образом

$$\frac{dz(t)}{dt} = -a_0 z(t) + a_0 \varphi(t). \quad (7)$$

Уравнение (7) имеет, подобно соотношениям (4), (5), эквивалентную форму записи вида

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = A_m \psi(t) + B_m a_0 \varphi(t), \quad y_k(t) = g^T L^T \psi(t), \quad (8)$$

где $\psi(t) \in R^n$ – новые переменные состояния, причем матрица A_m и вектор B_m выбраны так же как и в уравнении (5)

$$W_2(\lambda) = \frac{y_k(\lambda)}{\varphi(\lambda)} = \frac{a_0 g^T L^T (\lambda E - A_m)^+ B_m}{(\lambda + a_0) g^T L^T (\lambda E - A_m)^+ B_m}. \quad (9)$$

Введем вспомогательный сигнал $v = y + y_k$ и следующие обозначения

$$w_1^T(t) = [v, y_k, u(t - \tau), r(t)], \quad w_2^T(t) = [u(t) - u(t - \tau), y_k]$$

Присоединим к системе управления (1), (2), (3), (7) два адаптивных регулятора, структуру которых сформируем следующим образом:

$$u(t) = \alpha^T(t) w_1(t), \quad v(t) = \beta^T(t) w_2(t), \quad (10)$$

где $\alpha(t)$, $\beta(t)$ – векторы настраиваемых коэффициентов регуляторов (10), алгоритмы настройки которых подлежат определению.

Требуется для системы управления, состоящей из объекта (1), включенного параллельно с дополнительным устройством (6), эталонной модели (4), адаптивных регуляторов (10), определить алгоритмы контуров адаптации таким образом, чтобы для любых начальных условий и любом наборе $\xi \in \Xi$, обеспечивалось бы достижение целевых условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_m(t)] = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = \alpha_0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t) = \beta_0. \quad (11)$$

Разработка системы адаптации опирается на использование критерия гиперустойчивости [1, 6].

Синтез адаптивной системы

Во-первых, полагая $e(t) = x(t) + \psi(t) - x_m(t)$, $\varepsilon(t) = x(t - \tau) + \psi(t - \tau) - x(t)$, а также введя следующие обозначения:

$$\alpha_0^T = \left[-\frac{c_0}{\chi}, \frac{(1 - \chi_0)c_0}{\chi}, -\frac{k_0(1 - \chi_0)}{\chi}, \frac{a_0}{\varphi} \right], \quad \beta_0^T = \left[\frac{k_0}{a_0}, \frac{c_0}{a_0} \right],$$

$$\chi = a_0 + \chi_0 k_0, \quad \chi_0 = \text{const} > 0,$$

запишем эквивалентное математическое описание системы (1), (4), (6), (8)

в виде

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= A_m e(t) + B_m a_0 \mu_1, \quad \mu_1 = -\mu_2, \\ \mu_2 &= -\{\chi(\alpha(t) - \alpha_0)^T w_1(t) + (\beta^T(t) - \\ &\quad - g^T L^T e(t) P_1 w_2(t) - \chi_0 \beta_0^T) w_2(t)\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = A\varepsilon(t) + B_m a_0 \mu_3 + f(t - \tau) - f(t), \quad \mu_3 = -\mu_4,$$

$$\mu_4 = -(\beta^T(t) - \beta_0^T) w_2(t - \tau).$$

Во-вторых, для линейных частей системы (12) всегда имеют место частотные неравенства

$$\operatorname{Re}[g^T L^T (j\omega E - A_m)^{-1} B_m] > 0, \quad (13)$$

$$\operatorname{Re}[g^T L^T (j\omega E - A)^{-1} B_m] > 0, \quad \forall \omega \geq 0,$$

поскольку матрица A_m и векторы B_m выбираются проектировщиком с соблюдением условий (5), (9), матрицы A и A_m – гурвицевы.

В-третьих, для нелинейных частей системы (12) проверим выполнение интегрального неравенства В.М. Попова

$$\eta(0, t) = \int_0^t g^T L^T e(s) \mu_2 ds + \int_0^t g^T L^T \varepsilon(s) \mu_4 ds > -\gamma^2, \quad \forall t \geq 0. \quad (14)$$

Представим ИНП (14) в виде суммы двух интегралов

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t) &= -\int_0^t \chi g^T L^T e(s) \{\alpha(s) - \alpha_0\}^T w_1(s) ds - \\ &\quad - \int_0^t \{\beta(s) - \beta_0\}^T [\chi g^T L^T e(s) w_2(s) + g^T L^T \varepsilon(s) w_2(s - h)] ds, \\ \eta_2(0, t) &= -\chi \int_0^t \{(\chi_0 - 1) g^T L^T e(s) \beta_0^T w_2(s) + (g^T L^T e(s))^2 w_2^T(s) P_1 w_2(s)\} ds. \end{aligned}$$

Если коэффициенты самонастройки основного и вспомогательного законов управления синтезировать в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha_i(t)}{dt} &= -g^T L^T e(t) P_{2i} w_{1i}(t), \quad i = \overline{1, 4}, \\ \frac{d\beta_j(t)}{dt} &= -P_{3j} [\chi g^T L^T e(t) w_{2j}(t) + g^T L^T \varepsilon(t) w_{2j}(t - \tau)], \quad j = 1, 2, \end{aligned} \quad (15)$$

где $P_2 = \operatorname{diag}\{P_{2i}\}$, $P_3 = \operatorname{diag}\{P_{3j}\}$, $i = \overline{1, \dots, 4}$, $j = \overline{1, 2}$ – положительно-определенные диагональные матрицы, то для интегралов $\eta_1(0, t)$ и $\eta_2(0, t)$ будет справедлива следующая оценка

$$\begin{aligned}
\eta_1(0,t) &= -0.5 \sum_{i=1}^4 P_{2i}^{-1} (\alpha_i(0) - \alpha_{0i})^2 - \\
&\quad - 0.5 \sum_{j=1}^2 P_{3j}^{-1} (\beta_j(0) - \beta_{0j})^2 \geq -\gamma_1^2 = const, \\
\eta_2(0,t) &= \chi \sum_{j=10}^2 \int_0^t (g^T L^T e(s))^2 (w_{2j}(s) P_{1j})^2 ds + \\
&\quad + \chi \sum_{j=10}^2 \int_0^t (\chi_0 - 1) g^T L^T e(s) w_{2j}(s) \beta_{0j} ds \geq \\
&\geq -0.25 \chi \sum_{j=10}^2 \int_0^t (\chi_0 - 1)^2 (\beta_{0j} P_{1j}^{-1})^2 ds = -\gamma_2^2 = const.
\end{aligned} \tag{16}$$

Таким образом, с учетом выполнения неравенств (16) для $\eta(0, t)$ будет справедлива искомая оценка

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

Из выполнения интегрального неравенства В.М. Попова (14) и частотных неравенств (13) следует, что система (12) является асимптотически гиперустойчивой и имеют место предельные соотношения

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\alpha_i(t)}{dt} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\beta_j(t)}{dt} = 0, \quad i = \overline{1,4}, \quad j = \overline{1,2},$$

из существования которых вытекает выполнение второго, третьего пределов из (11), а значит и адаптивность исследуемой системы (12), (14).

При затухающих возмущениях система сохраняет свою работоспособность, что можно показать, например, аналогично [6].

Пример

Одним из этапов синтеза является имитационное моделирование. Simulink-модель исследуемой системы (1), (3), (6), (9) показана на рис. 1.

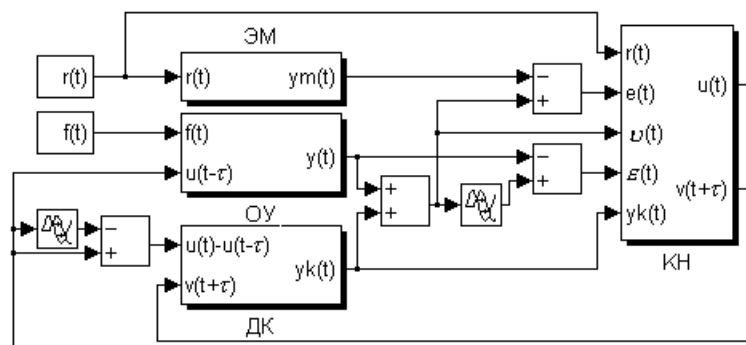


Рис. 1. Simulink-диаграмма исследуемой системы управления.

В данной работе рассматривалось функционирование объекта, уровень априорной неопределенности которого задан в виде

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{pmatrix}, \quad L^T = \begin{pmatrix} 4 & 3 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad x(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$2.6 \leq a_i \leq 28, \quad i = 1, 2, 3, \quad 1 \leq b_1 \leq 30.$$

На объект управления (1) с известным постоянным запаздыванием $\tau = 0.5$ действует возмущение $f(t) = 2.4 \exp(-t)$. Вектор g выбирается из условий положительности (13), $g^T = (1, 1)$. Эталонная модель (3) и дополнительный контур (6) обладают минимальной структурной сложностью и $a_0 = 2$. По виду переходных процессов объекта управления (1) и эталонной модели (3), изображенных на рис.2, можно судить о качестве функционирования исследуемой системы. Уравнение эталонной модели не содержит запаздывания, поэтому будем считать, что оно присутствует в уравнении выхода.

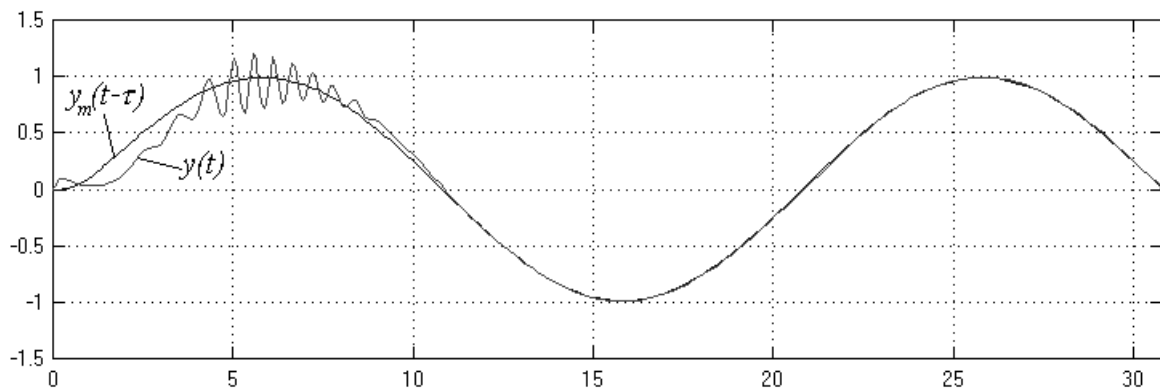


Рис.2. Выходы объекта управления $y(t)$ и эталонной модели $y_m(t-\tau)$.

Сигнал рассогласования между выходами объекта управления (1) и эталонной модели (3) представлены на рис.3.

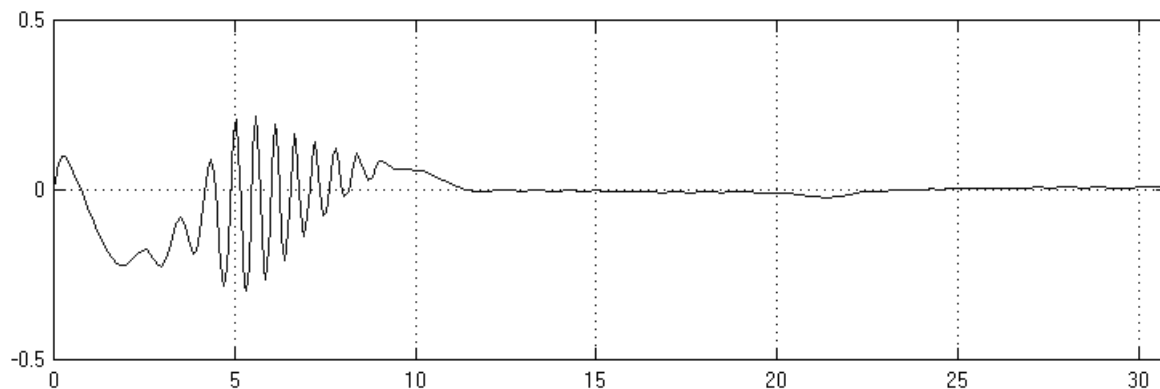


Рис.3. Сигнал рассогласования $y(t) - y_m(t-\tau)$.

Необходимо отметить, что в работе в качестве обобщенного выхода эквивалентной системы управления (12) используется сигнал $g^T L^T e(t)$ вместо предложенного в работе [4] сигнала $B_m^T H e(t)$, где матрица H определяется из уравнения Ляпунова $HA_m + A_m^T H = -Q$, Q – произвольная положительно-определенная симметричная матрица.

Заключение

Основным результатом данной работы является использование прогнозирующего устройства в качестве дополнительного контура, с помощью которого осуществляется компенсация влияния запаздывания по управлению на качество и устойчивость исследуемой системы в условиях априорной неопределенности параметров объекта управления. Полученные алгоритмы адаптации не являются единственно возможными, существует возможность их расширения и модификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин Е.Л.* Гиперустойчивость системы управления нелинейным объектом с запаздыванием // Автоматизация технологических процессов. Фрунзе: Фрунзенск. политех. ин-т, 1987.
2. *Мееров М.В.* Адаптивные компенсирующие регуляторы с предиктором Смита. // Автоматика и телемеханика. 2000. № 1. С.125-135.
3. Паршева Е.А., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом // Автоматика и телемеханика. 2001. № 1. С.142-149.
4. *Цыкунов А.М.* Адаптивное управление с компенсацией влияния запаздывания в управляющем воздействии // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. № 4. С.78-81.
5. *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.
6. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.

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