УДК 621.398

И.М. Акилова, В.В. Федоров

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО КОНТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ С НЕЯВНОЙ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

В статье рассматривается моделирование адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью с использованием нейронной сети Элмана.

The article deals with modeling of adaptive control system with implicit reference model using Elman neural network.

Введение

Одна из характерных черт современного уровня автоматизации – управление тем или иным объектом в условиях априорной неопределенности, когда отсутствует точное математическое описание управляемого объекта либо неизвестен закон изменения его характеристик в процессе работы. Создание систем управления в этом случае чаще всего основано на методах адаптации и заключается в разработке самонастраивающихся регуляторов. Система управления приобретает способность подстраиваться в условиях априорной неопределенности к изменению внешних воздействий, обеспечивая выполнение заданной цели управления.

Среди систем прямого адаптивного управления, функционирующих в условиях априорной неопределенности, наибольшее распространение получили системы с неявными эталонными моделями [1].

При моделировании адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью применялась нейронная сеть Элмана. Нейросетевой контур использовался при построении компенсатора. Искусственные нейронные сети представляют собой устройства параллельных вычислений, состоящие из множества взаимодействующих процессоров. Такие процессоры обычно исключительно просты, особенно в сравнении с процессорами в персональных компьютерах. Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые периодически посылает другим процессорам и, тем не менее, будучи соединенными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

Полученная система моделирования представляет собой программный продукт, дающий возможность, используя нейросетевой контур, моделировать адаптивные беспоисковые системы для объекта управления с запаздыванием по состоянию при векторном управлении.

Постановка задачи

Объектом автоматизации является объект, относящийся к классу динамических линейных непрерывных стационарных объектов с запаздыванием по состоянию, динамические процессы в котором описываются уравнениями:

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

$$x(\theta) = \varphi(\theta), \quad \theta \in [-\tau_{\max}, 0], \; v(t) = G^T(t)y(t) = G^T(t)L^T x(t), \tag{2}$$

где $x(t)\in R^n$ – вектор состояния; $y(t)\in R^m$ – вектор выхода; $u(t)\in R^m$ – управляющее воздействие; $\varphi(\theta)\in C_{\tau_{\max}}$ – начальная функция; $C_{\tau_{\max}}$ – пространство ограниченных непрерывных функций; $\tau_i = const > 0,\ i=\overline{1,k}$ – запаздывание; $v(t)\in R^m$ – обобщенный выход основного контура управления; $G(t)$ – матрица настраиваемых параметров адаптивного последовательного компенсатора; $G(t)=(g_1, g_2,..., g_M)$, g_i – вектор-столбец; A_i $(i=1,2,\ldots,k)$, B, L, D – матрицы соответствующего размера, числовые значения которых зависят от вектора неизвестных параметров $\xi\in\Xi$, Ξ – известное множество возможных значений вектора ξ.

При адаптивном подходе необходимо осуществить настройку коэффициентов адаптивного последовательного компенсатора и адаптивного регулятора по некоторым алгоритмам (4), явный вид которых подлежит определению, исходя из цели управления и цели адаптации, заданных в виде соответствующих целей условий.

Структура адаптивного регулятора задана в виде:

$$u(t)=\chi_1(t)r+\chi_2(t)[r-v(t)]+\chi_3(t)q_1^T y(t-\tau), \tag{3}$$

где q_1 – числовой вектор; $\chi_1(t)=diag[\chi_{1j}(t)]$, $\chi_2(t)=diag[\chi_{2j}(t)]$, $\chi_3(t)=diag[\chi_{3j}(t)]$, $\chi_4(t)= =diag[\chi_{4j}(t)]$; $j=\overline{1,m}$ – матрицы настраиваемых коэффициентов регулятора.

Целевые условия в системе (1) – (3) заданы с помощью следующих предельных соотношений:

$$\lim_{t\to\infty}(x_* - x(t)) = \lim_{t\to\infty} e(t) = 0,\ x_* = const, \tag{4}$$

$$\lim_{t\to\infty}\chi_i(t) = \chi_{0i} = const,\ i=\overrightarrow{1,3}, \tag{5}$$

$$\lim_{t\to\infty} g_{ij}(t) = g_{0ij} = const. \tag{6}$$

Возмущающее воздействие удовлетворяет соотношению (7):

$$\int_0^\infty \|f(t)\|^2 dt < \infty. \tag{7}$$

При любых начальных условиях $x(0), \chi(0), g(0)$ функций $\varphi(0), \phi(0)$ необходимо синтезировать систему (1) – (3), обеспечивающую выполнение целевых условий (4) – (6).

Синтез адаптивной системы по критерию гиперустойчивости

Решение задач синтеза адаптивной системы управления будем осуществлять, выделяя соответствующие этапы синтеза адаптивных систем управления [3], а затем покажем, что синтезированная система адаптивного управления будет работоспособна по отношению к заданным целям.

<u>Первый этап.</u> Поскольку вектор внешних воздействий удовлетворяет условию $\int_0^\infty \|f(t)\|^2 dt < \infty$, то в установившемся режиме математическое описание неявной эталонной модели можно определить уравнениями:

$$A_0 x_*(t) + D_0 x_*(t-\tau) + B(\chi_{01}+\chi_{02})r(t) = 0,\ v_* = G_0^T L^T x_*. \tag{8}$$

Будут выполняться равенства:

$$A_0 = A - \chi_{02} B G_0^T L^T;\quad D_0 = D + \chi_{03} B q_1^T L^T. \tag{9}$$

Используя обозначения, характеризующие отклонения движений объекта и квазистатической модели в виде переменных $z(t) = v_* - v(t)$, $e(t) = x_* - x(t)$, получим запись уравнения системы (1) – (3) в эквивалентной форме:

$$\begin{aligned}
&\frac{de}{dt} = \frac{dx_*}{dt} - \frac{dx}{dt} = A_0 x_*(t) + D_0 x_*(t-\theta) + b(\chi_{01} + \chi_{02}) r(t) - Ax(t) - \\
&- Dx(t-\theta) - bu(t) = A_0 e(t) + D_0 e(t-\theta) + b(\chi_{01} + \chi_{02}) r(t) - bu(t) - \\
&- bx_{02} G_0 y(t) + bx_{03} g^T y(t-\theta) = A_0 e(t) + D_0 e(t-\theta) + B\mu(t); \\
&\mu(t) = -u(t) - x_{02} G_0 y(t) + x_{03} g^T y(t-\theta) + (\chi_{01} + \chi_{02}) r(t) = \\
&= -(\chi_1(t) - \chi_{01}) r(t) - (\chi_2(t) - \chi_{02}) e(t) + \chi_{02} (G(t) - G_0)^T y(t) - \\
&- (\chi_3(t) - \chi_{03}) q_1^T y(t-\tau).
\end{aligned} \tag{10}$$

Таким образом, систему (1) – (3) можно представить в виде:

$$\frac{de(t)}{dt} = A_0 e(t) + D_0 e(t-\tau) + B\mu(t), \;\; z(t) = r(t) - G^T(t) y(t), \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
&\mu(t) = -(\chi_1(t) - \chi_{01}) r(t) - (\chi_2(t) - \chi_{02}) e(t) + \chi_{02} (G(t) - G_0)^T y(t) - \\
&- (\chi_3(t) - \chi_{03}) q_1^T y(t-\tau).
\end{aligned} \tag{12}$$

<u>Второй этап.</u> Получим следующие алгоритмы настройки коэффициентов компенсатора и регулятора:

$$\frac{d\chi_{1i}(t)}{dt} = \alpha_{1j} r_j(t) [r_j(t) - g_{ij}(t) y(t)], \tag{13}$$

$$\frac{d\chi_{2i}}{dt} = \alpha_2 [r_j(t) - g_{ij}(t) y(t)]^2, \tag{14}$$

$$\frac{d\chi_{3i}}{dt} = \alpha_3 q_1^T y(t-\tau_1) [r_j(t) - g_{ij}(t) y(t)], \tag{15}$$

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = -\beta_{ij} y_i(t) [r_j(t) - g_{ij}(t) y(t)]. \tag{16}$$

<u>Третий этап.</u> Третий этап синтеза адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью рассматривается относительно линейной части исследуемой системы управления, когда выбор вектора g априорно неосуществим, связан с требованием выполнения неравенства

$$J(0,t) = \int_0^t \mu(s) z(s) ds \geq -\theta_0^2 = const, \forall t \geq 0. \tag{17}$$

Покажем, что если в системе адаптивные алгоритмы будут иметь вид (13) – (16), то это обеспечит выполнение интегрального неравенства (17).

Используем соотношения:

$$J(0,t) = J_1(0,t) + J_2(0,t) + J_3(0,t) + J_4(0,t), \tag{18}$$

$$J_1(0,t) = -\sum_{j=1}^{m} \int_0^t (\chi_{1j}(s) - \chi_{01j}) rz(s) ds, \tag{19}$$

$$J_2(0,t) = -\sum_{j=1}^{m} \int_0^t (\chi_{2j}(s) - \chi_{02j}) z^2(s) ds, \tag{20}$$

$$J_3(0,t) = -\sum_{j=1}^{m} \int_0^t (\chi_{3j}(s) - \chi_{03j}) q_1^T y(s-\tau_1) z(s) ds, \tag{21}$$

$$J_4(0,t)=\chi_{02}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{l}\int_0^t(g_{ij}(s)-g_{0ij})y_i(s)z(s)ds. \tag{22}$$

Учитывая явный вид алгоритмов (21) – (22) и неравенство $sign\left[y_i(t)g^T(t)y(t)\right]- \ -1\le 0$, преобразуем интегральное уравнение (22) и получим оценку для $J4(0,t)$:

$$\begin{aligned}J_4(0,t)&=\chi_{02}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{l}\int_0^t(g_{ij}(s)-g_{0ij})y_i(s)z(s)ds\ge\\ &\ge-\frac{1}{2}\chi_{02}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{l}\beta_i(g_{ij}(0)-g_{0ij})^2=-\theta_{04}^2=const.\end{aligned} \tag{23}$$

Учитывая, что между значениями коэффициента $\chi_2(t)$ адаптивного контура в установившемся режиме и его значениями в процессе настройки, всегда имеет место соотношение $\chi_{02}\ge\chi_2(t)\ge 0$, для интегрального уравнения (20) запишем двухстороннюю оценку

$$\gamma_2^2\ge -h_2(0,t)=J_2(0,t)=\sum_{j=1}^{M}\int_0^t(\chi_{02j}-\chi_{2j}(s))z_j^2(s)ds\ge 0,\forall t\ge 0\,. \tag{24}$$

Из выражения (24), с учетом алгоритма (13) – (16), следует выполнимость соотношения

$$\gamma_2^2\ge\sum_{j=1}^{M}\ (\frac{1}{2}\alpha_{2j}^{-1}[(\chi_{02j}-\chi_{2j}(t))^2-(\chi_{02j}-\chi_{2j}(0))^2]\ge 0,\ \forall t\ge 0\,, \tag{25}$$

поэтому можно утверждать, что в любой момент времени функция $\chi_2(t)$ является ограниченной. Поэтому для некоторых $\sigma_{01},\sigma_{02}=const$ будут справедливы оценки:

$$\sigma_{01}^2\ge\left|\chi_2(t)\right|=\alpha_2\left|\int_0^t z^2(s)ds\right|\ge\alpha_2\left|\int_0^t z(s)ds\right|^2\ \ge 0,\ \forall t\ge 0\,, \tag{26}$$

$$\left|\int_0^t z(s)ds\right|=\left|\int_0^t(r-G^T(s)y(s))ds\right|\le\sigma_{02}^2,\ \forall t\ge 0\,. \tag{27}$$

С учетом явного вида алгоритмов (13), (15) для интегралов $J_1(0,t)$, $J_3(0,t)$ можно записать следующие неравенства:

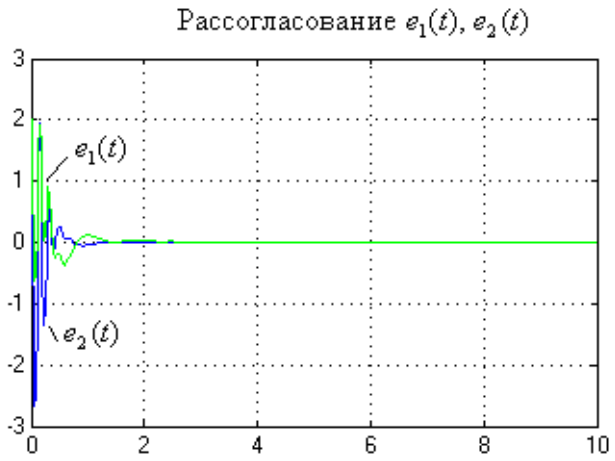
$$J_1(0,t)=-\sum_{j=1}^{M}\int_0^t(\chi_{1j}(s)-\chi_{01j})r\cdot z_j(s)ds\ge-\theta_1^2=const<0, \tag{28}$$

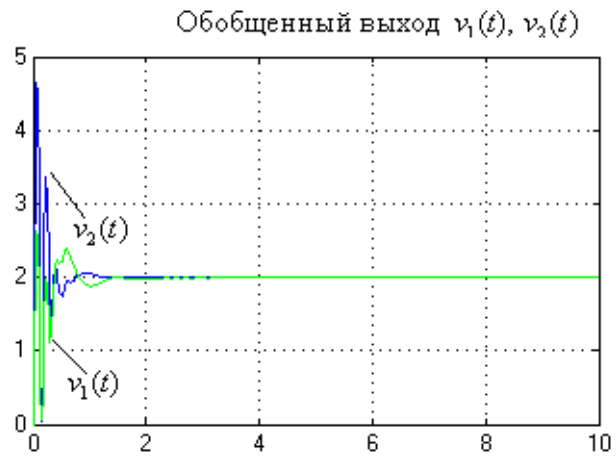
$$J_3(0,t)=-\sum_{j=1}^{m}\int_0^t(\chi_{3j}(s)-\chi_{03j})q_1^T y(s-\tau_1)z(s)ds\ge-\theta_3^2=const<0. \tag{29}$$

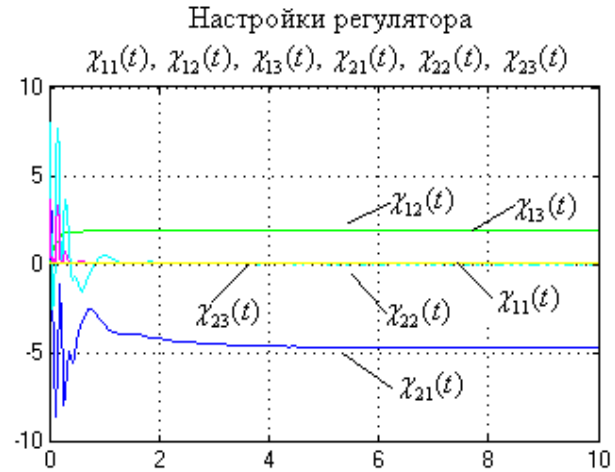
Объединение соотношений (23), (24), (28), (29) приводит к выполнению неравенства (17), что и требовалось показать.

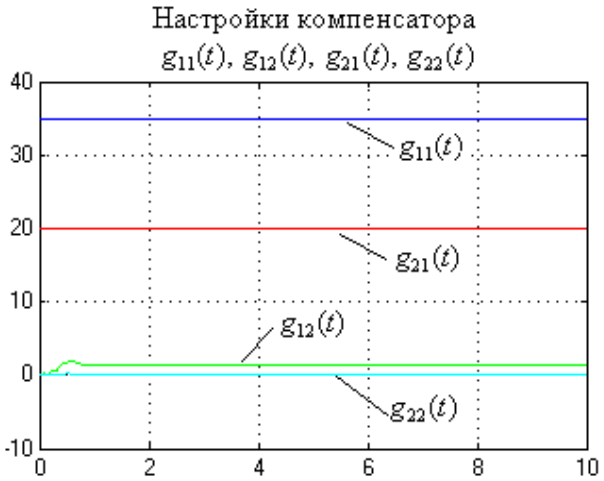
<u>Четвертый этап.</u> В силу выполнения модификации интегрального неравенства Попова и условий положительности линейной части системы (11), (12) на четвертом этапе следует ее асимптотическая устойчивость $\lim\limits_{t\to\infty}e(t)=\lim\limits_{t\to\infty}[x_*-x(t)]=0$, что учитывая, явный вид алгоритмов (13) – (16), ведет к существованию предельных соотношений $\lim\limits_{t\to\infty}\chi_j(t)=const,\ j=1,3,\quad \lim\limits_{t\to\infty}g_{ij}(t)=const,$ подтверждающих выполнение целевых условий (14), (15), (16).

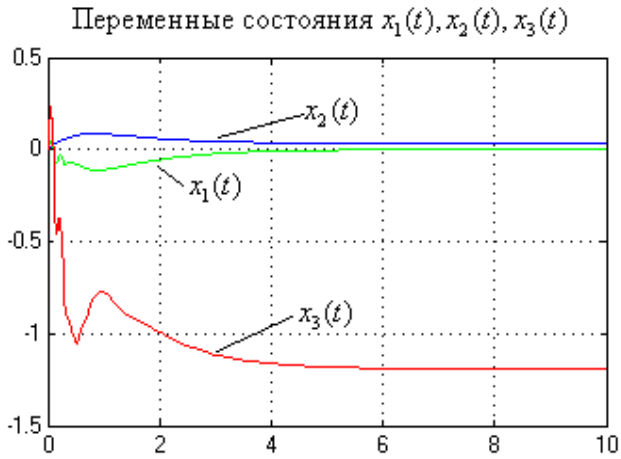
Пример и результаты имитационного моделирования











Основная цель, которая ставится при моделировании систем адаптивного управления с нейросетевым контуром, заключается в проверке работоспособности этих систем в условиях априорной неопределенности, уровень которой установлен для каждого конкретного случая.

Исследование адаптивной системы с неявной моделью для объекта с запаздыванием по состоянию.

Задающее воздействие $r(t)$=2.0, запаздывание τ=15.0; другие матрицы, векторы и скалярные величины определены следующим образом:

$$A=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ a_1 & a_2 & a_3\end{bmatrix},\quad b=\begin{bmatrix}0 & 0\\ b_{21} & b_{22}\\ b_{31} & b_{32}\end{bmatrix},\quad D=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ d_1 & d_2 & d_3\end{bmatrix},\quad L=\begin{bmatrix}l_{11} & 0\\ l_{12} & l_{22}\\ 0 & l_{23}\end{bmatrix},$$

а уровень априорной неопределенности в объекте (12) – (17):

$1.9 \le a_1 \le 3.3$; $-1 \le a_2 \le -0.1$; $-2.5 \le a_3 \le -1.3$;

$0.7 \le b_1 \le 5$;

$0.2 \le d_1 \le 2$; $-0.6 \le d_2 \le -0.1$; $0.1 \le d_3 \le 0.9$;

$3.2 \le l_{11} \le 3.6$; $0.3 \le l_{12} \le 3$; $3.5 \le l_{22} \le 4.2$; $1 \le l_{23} \le 1.6$.

В результате моделирования получены временные характеристики системы управления (1) – (6), (13) – (16) для следующих исходных данных при возмущающем воздействии $f(t)$, представленном выражением:

$$f(t)=\begin{pmatrix}0.25\exp(-t)\\ -0.4\exp(-t)\\ 0\end{pmatrix};$$

$a_1 = 3;\ a_2 = -0.8;\ a_3 = -2.2;$

$b_{21} = 0.11;\ b_{22} = 1.23;\ b_{31} = 0.69;\ b_{32} = 2.2;$

$d_1 = -0.8;\ d_2 = -0.4;\ d_3 = 0.2;$

$l_{11} = 3.4;\ l_{12} = 1.6;\ l_{22} = 4.1;\ l_{23} = 1.2;$

$\alpha_{11} = 45;\ \alpha_{12} = 3;\ \alpha_{13} = 14;$

$\alpha_{21} = 0.9;\ \alpha_{22} = 2;\ \alpha_{23} = 2.$

Из результатов имитационного моделирования следует: моделирование систем адаптивного управления с нейросетевым контуром для линейных динамических объектов с запаздыванием по состоянию при любом наборе $\xi \in \Xi$ полностью подтвердило работоспособность этих систем в заданном классе адаптивности.

Заключение

В результате выполненной работы исследованы алгоритмы управления для систем адаптивного управления с неявной эталонной моделью.

Проведено имитационное моделирование систем прямого адаптивного управления.

Синтезированы адаптивные нейросевые контуры при векторном управлении с запаздыванием по состоянию.

---

1. Фрадков, А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. – М.: Наука, 1990

2. Попов, В.М. Гиперустойчивость автоматических систем. – М.: Наука, 1970.

3 Акилова, С.Г., Еремин, Е.Л. Алгоритмы самонастройки линейных компенсаторов адаптивных систем стабилизации с неявной эталонной моделью // Вестник Иркутского государственного технического университета. Сер. «Кибернетика». – 1998. – Вып. 1. – С. 4-14.

4 Акилова С.Г., Еремин Е.Л. Адаптивная стабилизация динамического объекта с несколькими запаздываниями // Вестник АмГУ. – 1999.– № 5. – С. 3-5.