

## Информатика и системы управления

С.Г. Самохвалова, И.А. Сычева

### ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КОМПЕНСАТОРА

*The main propose of the article is the synthesis of the discrete algorithms for controller parameters in the analog-discrete systems with the static parameters for compensator. In order to solve this task it is used the method of the analog models.*

*We consider that the controlled object is dynamical and present vector and scalar cases of control.*

В статье рассматриваются задачи синтеза дискретных алгоритмов настройки параметров регулятора гибридных систем управления. Гибридные системы предполагают наличие непрерывного объекта и дискретного сигнала управления. В частности, такое управление может осуществляться промышленными контроллерами, которые представляют возможности для программной и аппаратной реализации дискретных регуляторов и компенсаторов. Промышленные контроллеры, как правило, оснащены аналоговыми входами, что позволяет управлять различными непрерывными объектами: электродвигателями, гидроприводами, являющимися основой большинства промышленных агрегатов и машин [1].

Гибридные системы управления с настройкой компенсаторов появились в конце 90-х гг. [2], основные их недостатки – сложность и высокая цена реализации, что естественным образом привело к появлению непрерывных адаптивных систем управления с упрощенной настройкой (фиксированными параметрами) компенсаторов [3].

В статье особое внимание уделяется разработке гибридных систем управления с фиксированными параметрами компенсаторов для векторного и скалярного управления динамическим объектом.

Для получения дискретных алгоритмов настройки параметров регулятора применим метод непрерывных моделей (метод усреднения), позволяющий синтезировать дискретные адаптивные системы, используя хорошо разработанные методы анализа и синтеза непрерывных адаптивных систем управления.

Пусть система управления содержит неявную эталонную модель и использует фиксированные параметры компенсатора, тогда процессы в системе описываются уравнениями:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad (1)$$

$$y(t) = L^T x(t), \quad v(t) = G^T(t)y(t) = G^T(t)L^T x(t), \quad (2)$$

$$u(t) = \chi_1(t)D(p)r(t) + \chi_2(t)[D(p)r(t) - v(t)], \quad (3)$$

где  $x(t) \in R^n$  – вектор состояния;  $y(t) \in R^m$  – вектор выхода;  $u(t) \in R^l$  – управляющее воздействие;  $f(t) \in R^n$  – вектор воз-

мущений, причем  $\int_0^{\infty} \|f(t)\|^2 dt < \infty$ ;  $r(t)$  – задающее воздей-

ствие, причем  $\int_0^{\infty} \|r^{(i)}(t)\|^2 dt < \infty$ ;  $\chi_1(t) = \text{diag}[\chi_{1j}(t)]$ ,

$\chi_2(t) = \text{diag}[\chi_{2j}(t)]$ ;  $j = \overline{1, m}$  – матрицы настраиваемых коэффициентов регулятора;  $G(t)$  – матрица настраиваемых параметров АПК, причем  $g_{2j}(t) = \text{const}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $q_j$  – числовой вектор.

Требуется определить дискретные алгоритмы адаптации  $\chi_1(t)$ ,  $\chi_2(t)$ ,  $g(t)$  так, чтобы система (1)-(3) была адаптивной или D-адаптивной в заданном классе  $\Xi$ .

Для получения непрерывных алгоритмов настройки, удовлетворяющим целевым условиям

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_* - x(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad x_* = \text{const}, \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_i(t) = \chi_{0i} = \text{const}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g_{ij}(t) = g_{0ij} = \text{const} \quad (6)$$

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

Таким образом, система (1)-(3) может быть представлена в виде:

$$\frac{de(t)}{dt} = A_0 e(t) + B \mu(t), \quad z(t) = D(p)r(t) - G^T(t)y(t),$$

$$\mu(t) = -(\chi_1(t) - \chi_{01})D(p)r(t) - (\chi_2(t) - \chi_{02})z(t) + \chi_{02}(G(t) - G_0)^T y(t).$$

Используя данное математическое описание, синтезируем алгоритмы настройки регулятора и компенсатора в соответствии с условием положительности линейной части системы и интегральным неравенством Попова [4]:

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

$$\frac{d\chi_{2j}(t)}{dt} = \alpha_{2j} [d_j(p)r_j(t) - g_{ij}(t)y(t)]^2,$$

где  $\alpha_{ij} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, 2}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = \beta_{ij} |y_i(t)[d_j(p)r_j(t) - g_{ij}(t)y(t)]|,$$

где  $\beta_{ij} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, l} - 1$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

Осуществим переход от непрерывных алгоритмов к цифровым согласно методу непрерывных моделей [5]. Получим следующее математическое описание:

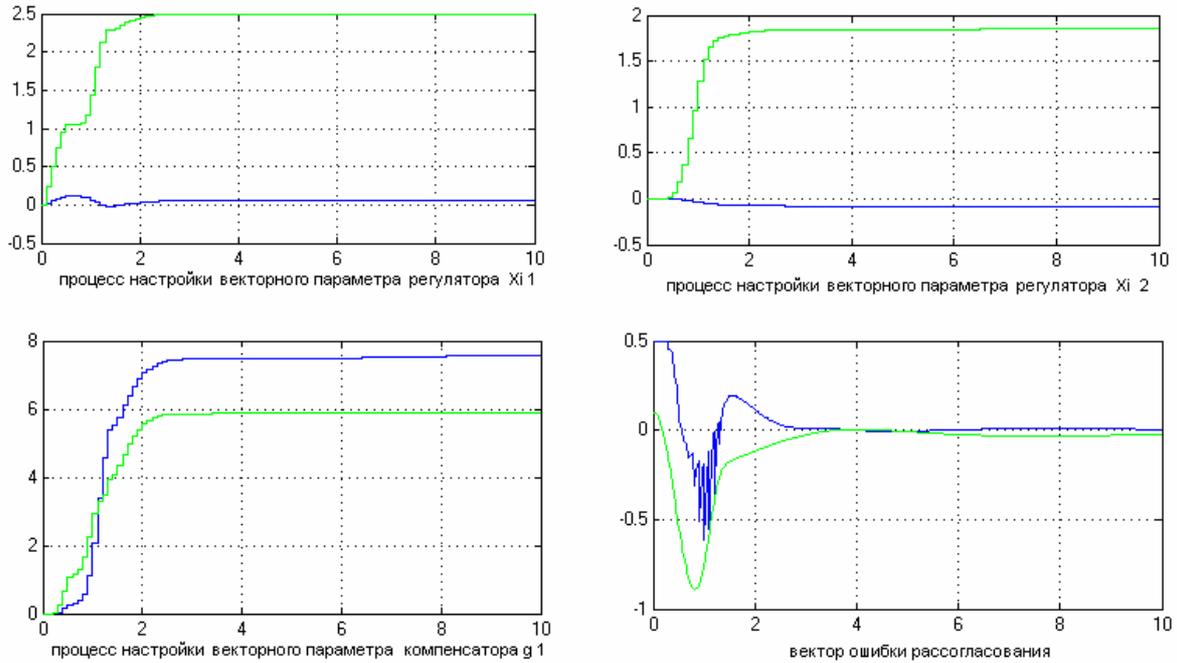
$$\chi_{1j}(t_{k+1}) = \chi_{1j}(t_k) + \gamma(\alpha_{1j} d_j(p)r_j(t_k)[d_j(p)r_j(t_k) - g_{ij}(t_k)y(t_k)]),$$

$$\chi_{2j}(t_{k+1}) = \chi_{2j}(t_k) + \gamma(\alpha_{2j} [d_j(p)r_j(t_k) - g_{ij}(t_k)y(t_k)]^2),$$

где  $\alpha_{ij} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;

$$g_{ij}(t_{k+1}) = g_{ij}(t_k) + \gamma(\beta_{ij} |y_i(t_k)[d_j(p)r_j(t_k) - g_{ij}(t_k)y(t_k)]|),$$

где  $\beta_{ij} = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, l} - 1$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $\gamma$  – шаг алгоритма настройки;  $k$  – номер шага;  $t_k$  – дискретный аналог времени.



Результаты имитационного моделирования.

В случае скалярного управления процессы в системе описываются уравнениями:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad (7)$$

$$v(t) = g^T(t)y(t) = g^T(t)L^T x(t), \quad (8)$$

$$u(t) = \chi_1(t)r(t) + \chi_2(t)[r(t) - v(t)], \quad (9)$$

где  $x(t) \in R^n$  – вектор состояния системы;  $y(t) \in R^m$  – вектор выхода системы;  $v(t) \in R^m$  – обобщенный выход систем;  $f(t) \in R^n$  – вектор возмущений, удовлетворяющий условию  $\int_0^\infty \|f(t)\|^2 dt < \infty$ ;  $g(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_{m-1}(t))$ ,  $g_m(t) = g_{0m} = \text{const}$  – вектор-столбец.

Требуется определить дискретные алгоритмы адаптации  $\chi_1(t)$ ,  $\chi_2(t)$ ,  $g(t)$  так, чтобы система (7)-(9) была адаптивной в заданном классе  $\Xi$ .

Для получения непрерывных алгоритмов настройки регулятора и компенсатора в соответствии с целевыми условиями (4)-(6) получим сначала эквивалентное математическое описание системы:

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= A_0 e(t) + B \mu(t), \quad z(t) = r(t) - g^T(t)y(t), \\ \mu(t) &= -(\chi_1(t) - \chi_{01})r(t) - (\chi_2(t) - \chi_{02})z(t) + \chi_{02} \times \\ &\times (g(t) - g_0)^T y(t). \end{aligned}$$

Тогда алгоритмы настройки в соответствии с условиями положительности линейной части системы и интегральным неравенством Попова примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\chi_1(t)}{dt} &= \alpha_1 r(t)[r(t) - g(t)y(t)] \exp([r(t) - g(t)y(t)]), \\ \frac{d\chi_2(t)}{dt} &= \alpha_2 [r(t) - g(t)y(t)]^2 \exp([r(t) - g(t)y(t)]), \end{aligned}$$

где  $\alpha_j = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1,2}$ .

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i |y_i(t)[r(t) - g_i(t)y(t)] \exp([r(t) - g(t)y(t)]),$$

где  $\beta_i = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, m-1}$ .

Осуществим переход от непрерывных алгоритмов к цифровым, аналогично тому, как это было сделано в предыдущем случае. Получим математическое описание алгоритмов адаптации в следующем виде:

$$\begin{aligned} \chi_1(t_{k+1}) &= \chi_1(t_k) + \gamma(\alpha_1 r(t_k)[r(t_k) - g(t_k)y(t_k)] \times \\ &\times \exp([r(t_k) - g(t_k)y(t_k)])), \\ \chi_2(t_{k+1}) &= \chi_2(t_k) + \gamma(\alpha_2 [r(t_k) - g(t_k)y(t_k)]^2 \times \\ &\times \exp([r(t_k) - g(t_k)y(t_k)])), \end{aligned}$$

где  $\alpha_j = \text{const} > 0$ ,  $j = \overline{1,2}$ ;

$$\begin{aligned} g_i(t_{k+1}) &= g_i(t_k) + \gamma(\beta_i |y_i(t_k)[r(t_k) - g_i(t_k)y(t_k)] \times \\ &\times \exp([r(t_k) - g_i(t_k)y(t_k)])), \end{aligned}$$

где  $\beta_i = \text{const} > 0$ ,  $i = \overline{1, m-1}$ ;  $\gamma$  – шаг алгоритма настройки;  $k$  – номер шага;  $t_k$  – дискретный аналог времени.

Для проверки работоспособности синтезированных алгоритмов было проведено имитационное моделирование в среде Matlab/Simulink. Результаты его представлены на рисунке, где видно, что параметры регулятора и компенсатора становятся равными константе уже на 3-й секунде работы системы; в это же время ошибка рассогласования системы принимает нулевое значение. Параметр  $g_2$  не представлен, так как его значения фиксировались на всем протяжении работы системы.

Таким образом, результаты имитационного моделирования подтверждают полученные математические алгоритмы дискретного управления непрерывным объектом в системе с упрощенной настройкой компенсатора.

1. Парр Э. Программируемые контроллеры: Руководство для инженера. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
2. Еремин Е.Л., Самохвалова С.Г. Алгоритмы самонастройки линейных компенсаторов адаптивных систем стабилизации с невязной эталонной моделью // Вестник ИрГТУ. – 1998. – Вып. 1. – С. 4-44.
3. Самохвалова С.Г., Степанов А.Е. Система адаптивного управления динамическим объектом с фиксированными параметрами регулятора // Вестник АМГУ. – 2007. – Вып. 39. – С. 24-27.
4. Еремин Е.Л., Циркунов А.М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992.
5. Деревицкий Д.П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления / Д.П. Деревицкий, А.Л. Фрадков. – М.: Наука, 1981.