

# ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ФАЗЗИ-КОНТРОЛЛЕРА Takagi-Sugeno

Панкратов А.И., Побочий В.Г.

Донбасская Государственная Машиностроительная Академия

**Введение.** Растущие требования к качеству технологических процессов обработки деталей на механообрабатывающих станках ставят задачи разработки новых, усовершенствованных систем управления электроприводов. Повышение качества и производительности технологических процессов возможно на основе разработки интеллектуальных адаптивных системы управления [1].

## Цель исследования.

Целью работы является оптимизация нелинейной системы управления позиционного электропривода на основе фаззи-контроллера Takagi-Sugeno.

**Решение поставленной задачи.** Структурная схема позиционной электромеханической системы (ЭМС) в которой учтено вязкое трение, жесткость упругой передачи, приведена на рис. 1. ЭМС описывается системой дифференциальных уравнений (1) в пространстве состояния, соответствующего приведенной структуре.

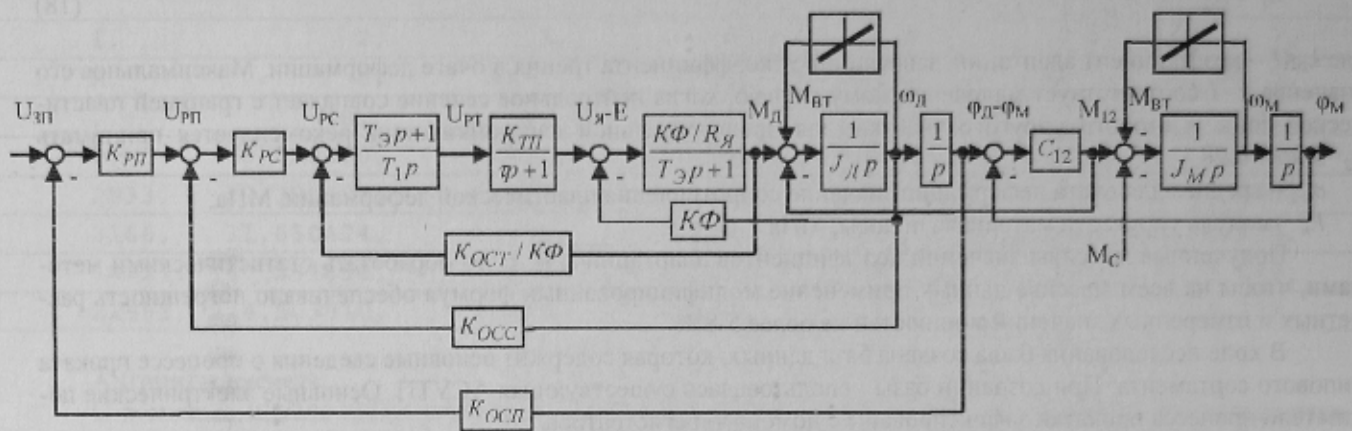


Рисунок 1 – Структурная схема позиционной ЭМС

$$\begin{cases}
 \frac{dx_1(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} x_1(t) - K_1 x_2(t) - K_2 x_3(t) - K_3 x_4(t) + K_4 u_3(t), \\
 \frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{1}{L_я} x_1(t) - \frac{R_я}{L_я} x_2(t) - \frac{K\Phi}{L_я} x_3(t), \\
 \frac{dx_3(t)}{dt} = \frac{K\Phi}{J_д} x_2(t) - K_{вт} x_3(t) x_3(t) - \frac{C_{12}}{J_д} x_4(t) + \frac{C_{12}}{J_д} x_6(t), \\
 \frac{dx_4(t)}{dt} = x_3(t), \\
 \frac{dx_5(t)}{dt} = \frac{C_{12}}{J_м} x_4(t) - K_{вт} x_5(t) x_5(t) - \frac{C_{12}}{J_м} x_6(t) - M_c(t), \\
 \frac{dx_6(t)}{dt} = x_5(t)
 \end{cases} \quad (1)$$

$$x_1(t) = U_я(t), x_2(t) = I_я(t), x_3(t) = \omega_д(t), x_4(t) = \varphi_д(t), x_5(t) = \omega_м(t), x_6(t) = \varphi_м(t)$$

$$K_1 = \frac{K_{тп} K_{оср} \left( K_{рп} + \frac{1}{T_1} \right)}{\tau}, K_2 = \frac{K_{тп} K_{осс} K_{рс} \left( K_{рп} + \frac{1}{T_1} \right)}{\tau}, K_3 = \frac{K_{тп} K_{осп} K_{рп} K_{рс} \left( K_{рп} + \frac{1}{T_1} \right)}{\tau},$$

$$K_4 = \frac{K_{тп} K_{рп} K_{рс} \left( K_{рп} + \frac{1}{T_1} \right)}{\tau}.$$

Процедура разработки фаззи-регулятора (контроллера) начинается с представления данной нелинейной системы в виде Takagi-Sugeno фаззи-модели [2]. Эта модель описывается ЕСЛИ-ТОГДА правилами которые представляют локальные линейные подсистемы, описывающие «вход-выход» связи нелинейной системы.

Полная фаззи-модель системы получается совмещением всех подсистем линейной системы на основе И-правил. Если дана пара входных векторов  $(x(t), u(t))$ , то полный выход фаззи-системы определится как:

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \cdot (A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \cdot (A_i x(t) + B_i u(t)), y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \cdot C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \cdot C_i x(t). \quad (2)$$

где -  $z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)]$ ,  $w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$  - вес  $i$ -го правила,  $h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$  - норми-

рованный вес  $i$ -го правила, для всех значений  $t$ ,  $M_j(z_j(t))$  - степень принадлежности  $z_j(t)$  во множестве  $M_j$ .

Произведем замену переменных  $x_i(t) = z_p(t)$ . Для каждого  $z_p(t)$  определяем  $\max$  и  $\min$  значения, т.е. диапазон изменения.

$$\begin{aligned} z_1(t) &= M_{11}(z_1(t))a_1 + M_{12}(z_1(t))a_2; \\ z_2(t) &= M_{21}(z_2(t))b_1 + M_{22}(z_2(t))b_2; \\ M_{p1}(z_p(t)) + M_{p2}(z_p(t)) &= 1; \\ z_1(t) &= x_3(t), z_2(t) = x_5(t). \end{aligned} \quad (3)$$

На основе (1), (2), полученных функций принадлежности и фаззи-правил составляется Takagi-Sugeno фаззи-модель для нелинейной ЭМС:

$$\dot{X}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \cdot (A_r x(t) + B u(t)) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M_{1i}(z_1(t)) M_{2j}(z_2(t)) \begin{pmatrix} -\frac{1}{\tau} & -K_1 & -K_2 & -K_3 & 0 & 0 \\ 1 & R_\gamma & K\Phi & 0 & 0 & 0 \\ L_\gamma & -L_\gamma & L_\gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K\Phi}{J_d} & -K_{вт}|a_i| & -\frac{C_{12}}{J_d} & \frac{C_{12}}{J_d} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{12}}{J_m} & -K_{вт}|b_j| & -\frac{C_{12}}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} X(t) + \begin{pmatrix} K_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) \quad (4)$$

Полученная фаззи-модель ЭМС позиционного ЭП с применением подхода локального сектора нелинейности с точностью до 0,01% описывает исходную нелинейную ЭМС. Полученные правила фаззи-модели системы использованы для разработки фаззи-контроллера с применением процедуры параллельно распределенной компенсации.

Для фаззи-модели (4) конструируется фаззи-регулятор.

$i$ -е правило фаззи-регулятора имеет следующую форму:

Правило регулирования  $i$ : ЕСЛИ  $z_1(t)$  принадлежит  $M_{1i}$  И ... И  $z_p(t)$  принадлежит  $M_{pi}$ ,

ТОГДА  $\Delta u_i(t) = -F_i x(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ .

где  $F_i = [f_{i1} \dots f_{in}]$  - компенсирующее воздействие.

Полный фаззи-регулятор представляется как:

$$\Delta u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \quad (5)$$

Из (4) и (5) получаем фаззи-модель ЭМС с компенсирующим воздействием:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_r x(t) + B(u(t) + \Delta u(t))) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \left( A_r x(t) + B \left( u(t) - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \right) \right) = \\ &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (A_{ij} x(t) - B F_j x(t) + B u(t)) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (A_{ij} - B(F_j - u(t)x(t)^{-1})) x(t) = \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \begin{pmatrix} -\frac{1}{\tau} & -K_1 & -K_2 & -K_3 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{\text{я}}} & \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} & \frac{K\Phi}{L_{\text{я}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K\Phi}{J_{\text{л}}} & -K_{\text{врт}}|a_i| & -\frac{C_{12}}{J_{\text{л}}} & \frac{C_{12}}{J_{\text{л}}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{12}}{J_{\text{м}}} & -K_{\text{врт}}|b_j| & -\frac{C_{12}}{J_{\text{м}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} K_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \left( [f_{j1} f_{j2} f_{j3} f_{j4} f_{j5} f_{j6}] - u(t)x(t)^{-1} \right) x(t) \quad (6)$$

Процедура обучения фаззи-регулятора связана с задачей определения  $f_{ij}$ , удовлетворяющих требованиям оптимального переходного процесса. Перебором значений характеристических чисел ( $\lambda_i$ ) матриц состояния ( $A_{ij} - BF_j$ ) для правил  $\Gamma_{ij}$ , которые представляют собой определитель Гурвица, получаем некие значения  $f_{ij}$ , удовлетворяющих условию  $\Delta_{Gij} = 0$ . Фаззи-регулятор считается обученным по достижении требуемого вида переходного процесса.

В ходе процедуры обучения были взяты некие значения  $\lambda_i$ , с условием, что  $\lambda_i$  равны между собой и получены соответствующие значения  $f_{ij}$ , приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения характеристических чисел матрицы состояния и соответствующих компенсаций

Правило	характеристические числа						компенсация					
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$	$f_{15}$	$f_{16}$
$\Gamma_{11}$	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5261	0	0	0	0	0
$\Gamma_{12}$							-0.5261	0	0	0	0	0
$\Gamma_{21}$							-0.5261	0	0	0	0	0
$\Gamma_{22}$							-0.5261	0	0	0	0	0
$\Gamma_{11}$							-0.2531	0	0	0	0	0
$\Gamma_{12}$	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-0.2531	0	0	0	0	0
$\Gamma_{21}$							-0.2531	0	0	0	0	0
$\Gamma_{22}$							-0.2531	0	0	0	0	0
$\Gamma_{11}$							-0.2233	0	0	0	0	0
$\Gamma_{12}$	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-0.2233	0	0	0	0	0
$\Gamma_{21}$							-0.2233	0	0	0	0	0
$\Gamma_{22}$							-0.2233	0	0	0	0	0
$\Gamma_{11}$							-0.2233	0	0	0	0	0

Структурная схема позиционной электромеханической системы (ЭМС) с фаззи-контроллером приведена на рис. 2.

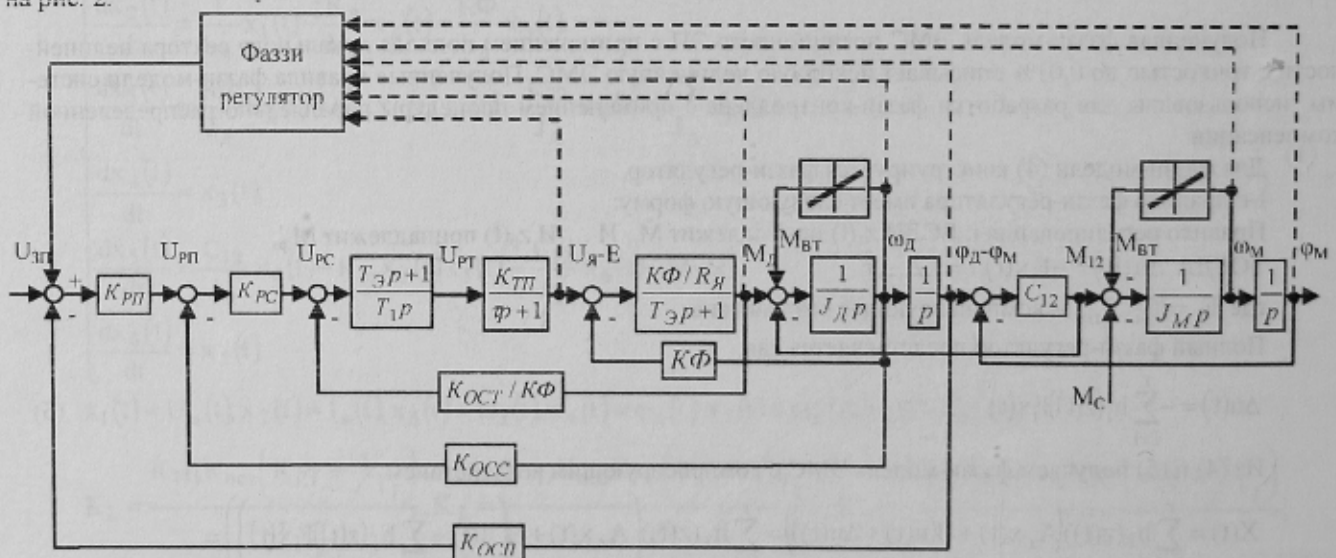


Рисунок 2 – Структурная схема позиционной ЭМС с фаззи-контроллером

Результаты моделирования в Matlab процесса обучения фаззи-контроллера Takagi-Sugeno оптимальному закону управления позиционной ЭМС с движением  $U_{y1} \rightarrow U_{y2} \rightarrow U_{y3} \rightarrow U_{y4}$ ,  $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3 \rightarrow I_4$ ,  $M_{y1} \rightarrow M_{y2} \rightarrow M_{y3} \rightarrow M_{y4}$  и  $\varphi_{m1} \rightarrow \varphi_{m2} \rightarrow \varphi_{m3} \rightarrow \varphi_{m4}$  представлены на рис. 3 (а, б, в, г).

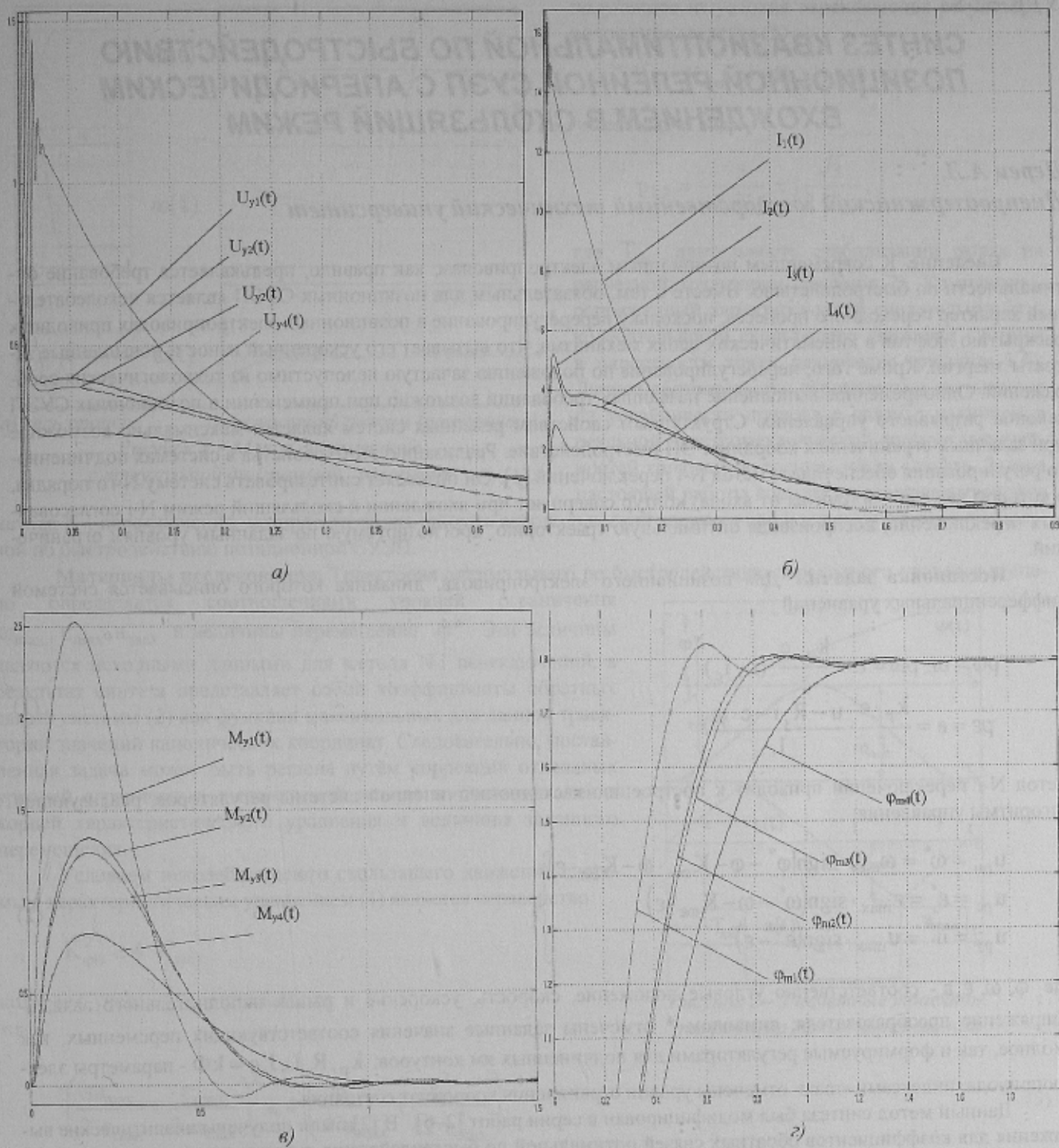


Рисунок 3— Графики, иллюстрирующие обучение контроллера Takagi-Sugeno оптимальному закону управления  
 а) – сигнал управления на входе ТП, б) – ток двигателя при пуске, в) – момент упругий,  
 г) – угол поворота механизма

**Выводы.** Представление нелинейной электромеханической системы в виде линейной Takagi-Sugeno фаззи-модели позволяет построить фаззи-контроллер Takagi-Sugeno, применение которого позволяет оптимизировать и адаптировать нелинейную электромеханическую систему позиционного электропривода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах. – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2001. – 244 с.
2. К. Tanaka, Hua O. Wang, Fuzzy Control Systems: A LMI Approach, Wiley-Interscience Publication, 2001.