

С. М. Джафаров, д-р техн. наук, проф., jafarovsm@gmail.com,

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку,

П. С. Джафаров, канд. техн. наук, науч. сотр., jafarovsm@gmail.com,

А. М. Мустафаева, аспирант, aida.mustafayeva.1981@mail.ru,

Национальная академия наук Азербайджана, Институт систем управления, г. Баку

Синтез оптимального нечеткого Т-S-регулятора для системы управления мобильным роботом с применением теории хаоса

С использованием теории хаоса предложена методика синтеза оптимальных Т-S-регуляторов для управления нелинейным многосвязным динамическим объектом — мобильным роботом. На основе хаотического процесса разработана система автоматической настройки параметров нечетких регуляторов, обеспечивающих оптимальность вектора показателей качества процесса управления движущимся объектом.

Ключевые слова: мобильный робот, генератор хаотических чисел, нечеткий Т-S-регулятор, интегрально-квадратичная ошибка, перерегулирование, степень затухания колебаний

Существует ряд нелинейных динамических систем, детерминированные движения в которых являются нерегулярными — хаотичными [1–3]. Такие явления в научной литературе называют "детерминированным хаосом", "внутренней стохастичностью" или просто "хаосом".

В динамических системах хаотические процессы (нерегулярные движения) могут быть характеризованы и как "желательные" (положительные), и как "нежелательные" (отрицательные) [1, 3].

При наличии в системе управления (СУ) "нежелательных" хаотических переходных процессов с ними стараются бороться. В этом случае, изменяя структуру или параметры регулятора СУ, добиваются ликвидации нежелательных хаотических движений [2, 3]. При необходимости использования "положительного" характера хаотического процесса для решения задач управления в СУ искусственно создают нерегулярные — хаотические — движения путем введения специального нелинейного элемента. В качестве примеров применения теории хаоса для решения задач нечеткой оптимизации, математического программирования, регрессионного анализа и синтеза параметров нечетких терм-множеств управления можно указать работы [1–4]. В частности, в работе [4] поставлена и решена задача разработки метода синтеза регулятора для нелинейного объекта управления с применением элементов теории хаоса.

Следует отметить, что в известных работах синтез параметров регулятора СУ, как правило, осуществляется по скалярному оптимальному критерию качества процесса управления — интегральной квадратичной ошибке регулирования. Однако существует ряд объектов управления с нерегулярными свободными движениями, в частности манипуляционные и мобильные роботы [1, 4–6, 11], СУ которых должны удовлетворять условию оптималь-

ности по векторному критерию качества процессов управления, например, минимальности перерегулирования, максимальной степени устойчивости, быстродействия, минимальности интегральной квадратичной ошибки.

В настоящей работе предложена методика решения задачи синтеза СУ мобильным роботом с использованием нечеткого Т-S-регулятора (Takagi — Sugeno) и элементов теории хаоса.

Постановка задачи синтеза нечеткого Т-S-регулятора

Пусть объектом управления является мобильный робот, математическая модель которого описывается нелинейным дифференциальным уравнением вида [6]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(x)x(t) + B(x)u(t); \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x(t) = [\dot{x}_w, \dot{y}_w(t), \dot{\phi}(t)]^T$ — вектор состояний, компонентами которого являются скорости движения по координатным осям OX_w, OY_w и скорость угла поворота направления платформы мобильного робота; $y(t)$ — выходные координаты мобильного робота по координатным осям и углу поворота; $u(t)$ — управляющие переменные, вырабатываемые приводами соответствующего колеса. Осуществив ряд простых преобразований, математическую модель мобильного робота (1) можно представить следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_w(t) &= a_1 \dot{x}_w(t) - a_2 \dot{\phi}(t) \dot{y}_w(t) + u_1(t); \\ \ddot{y}_w(t) &= a_2 \dot{\phi}(t) \dot{x}_w(t) + a_1 \dot{y}_w(t) + u_2(t); \\ \ddot{\phi}_w(t) &= a_3 \dot{\phi}_w(t) + u_3(t).\end{aligned}\quad (2)$$

Обозначим ЛП — лингвистическое правило и M — нечеткое терм-множество. Тогда объект управления вида (2) с достаточной точностью можно представить следующей нечеткой моделью [3, 6]:

ЛП^{*i*}: если $x_3(t)$ около M^i , тогда

$$\dot{x} = A_i x(t) + u(t); \quad (3)$$

$$y(t) = x(t), i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где

$$A_1 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix}, A_2 = \begin{vmatrix} a_1 & -a_2 d & 0 \\ a_2 d & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix},$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 d & 0 \\ a_2 d & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix};$$

$x_3(t) = \dot{\phi}_w(t)$ — скорость угла поворота направления платформы мобильного робота.

Коэффициенты уравнений (3), (4) определяются через соответствующие параметры

$$m = 16,6 \text{ кг}, L = 0,193 \text{ м}, r = 0,04 \text{ м},$$

$$I_V = 0,2518 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, c = 8,1633 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с},$$

$$I_w = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

реального мобильного робота по следующим выражениям [4]:

$$a_1 = -2c/(mr^2 + 2I_w) = -0,0599,$$

$$a_2 = 2I_w/(mr^2 + 2I_V) = 0,0081,$$

$$a_3 = 4cL^2/(4I_wL^2 + I_Vr^2) = -0,2901,$$

$$d = \dot{\phi}(t) = 1,5 \text{ рад/с}.$$

Для мобильного робота, описываемого математической моделью (2)—(4), закон управления выберем в классе "интеллектуальных регуляторов" с двумя регулирующими обратными связями — по ошибке выходных переменных и по переменным состояния. Полагаем, что закон управления роботом осуществляется по следующей нечеткой модели Такажи и Суджено (или Т-S-модели), состоящей из совокупности продукционных правил:

ЛПУ^{*i*}: если $x_3(t)$ около M_i , тогда

$$u(t) = K_i x(t) + G_i e(t), \quad (5)$$

где K_i, G_i — матрицы коэффициентов регуляторов по состоянию $x(t)$ и по ошибке управления $e(t)$; $e(t) = [e_1(t), e_2(t), e_3(t)]^T$ — ошибка управления по

выходным переменным $y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t)]^T$, которые определяются следующими выражениями:

$$\dot{e}(t) = y_T(t) - y(t) = y_T(t) - Cx(t), \quad (6)$$

где $y_T(t) = [y_{1T}(t), y_{2T}(t), y_{3T}(t)]^T$ — задания СУ мобильного робота, которые отвечают планируемым желаемым траекториям его движения.

Для удобства сравнения эффективности предложенной методики синтеза оптимальных настроечных параметров регулятора СУ с известными работами [5, 6] функции принадлежности нечетких терм-множеств M_i ($i = 1, 2, 3$) лингвистических правил (3) и (5) выбраны треугольного вида:

$$\mu_{M_1}(x_3) = \begin{cases} 1 - |d - |x_3||/D_{11}, & \text{если } d > |x_3| \geq -d; \\ 1, & \text{если } x_3 \leq -d; \\ 0, & \text{если } |x_3| > D_{11}; \end{cases}$$

$$\mu_{M_2}(x_3) = \begin{cases} 1 - |x_3|/D_{21}, & \text{если } 0 > x_3 > -d; \\ 1, & \text{если } x_3 = 0; \\ 1 - |x_3|/D_{22}, & \text{если } d \geq x_3 > 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{M_3}(x_3) = \begin{cases} 1 - |x_3 - d|/D_{31}, & \text{если } d > x_3 > D_{31} > 0; \\ 1, & \text{если } x_3 \geq d; \\ 0, & \text{если } x_3 < -d, \end{cases}$$

где D_{ij} — постоянные, соответствующие нечетким терм-множествам треугольного вида.

Учитывая выбранную структуру нечеткой СУ мобильным роботом (2)—(4), задачу ее параметрического синтеза можно сформулировать следующим образом: требуется найти такие матрицы $K_i^{\text{opt}}, G_i^{\text{opt}}$ нечетких Т-S-регуляторов по ошибке и по переменным состояния (5), а также параметры M_i^{opt} нечетких терм-множеств M_i лингвистических правил, которые при переводе объекта управления из начального состояния x_0, y_0 в конечное состояние x_f, y_f обеспечивают СУ оптимальность по векторному критерию качества процессов управления — минимум интегральной квадратичной ошибки J_1 , максимум степени затухания колебаний J_2 и минимум перерегулирования переходного процесса J_3 :

$$J_1[K_i, G_i, M_i] = \int_0^\infty e^2(t)dt \rightarrow \min_{K, G, M}; \quad (8)$$

$$J_2[K_i, G_i, M_i] = \frac{e^{2\min}(t)}{e^{1\min}(t)} \rightarrow \max_{K, G, M}; \quad (9)$$

$$J_3[K_i, G_i, M_i] = \frac{y_3(t) - y(t)}{y_3(t)} \rightarrow \min_{K, G, M}, \quad (10)$$

$$K_i \in K, G_i \in G, M_i \in M,$$

где $e^{1\min}(t)$ и $e^{2\min}(t)$ — значения первого и второго минимума колебательного переходного процесса по ошибке, $y_3(t)$ — установившееся значения переходного процесса СУ.

Так как реальный мобильный робот должен быть управляемым, то можно предполагать, что существуют такие множества настроечных матриц регуляторов по ошибке G и переменным состояниям K , а также множества настроечных параметров нечетких терм-множеств M , которые решают поставленную задачу.

Решение задачи синтеза настроечных параметров нечетких Т-S-регуляторов

Поскольку поставленную задачу синтеза параметров нечетких регуляторов СУ по векторным критериям решить на основе известных аналитических методов [1–12] практически невозможно, обратимся к методам теории хаоса. Синтез параметров регуляторов K_j , G_j и нечетких терм-множеств M_j будем осуществлять по итеративной процедуре в соответствии с обобщенной функциональной схемой, представленной на рисунке.

На первом этапе составляется математическая модель замкнутой СУ мобильным роботом в соответствии с системой (2) (или (3), (4)) и выражениями (5)–(7), затем на ее основе формируется дискретная рекуррентная модель для компьютерной симуляции замкнутой СУ. Для оценки вектора показателей качества переходных процессов в системе выбирается шаг дискретизации и формируются дискретные выражения критериев (8)–(11).

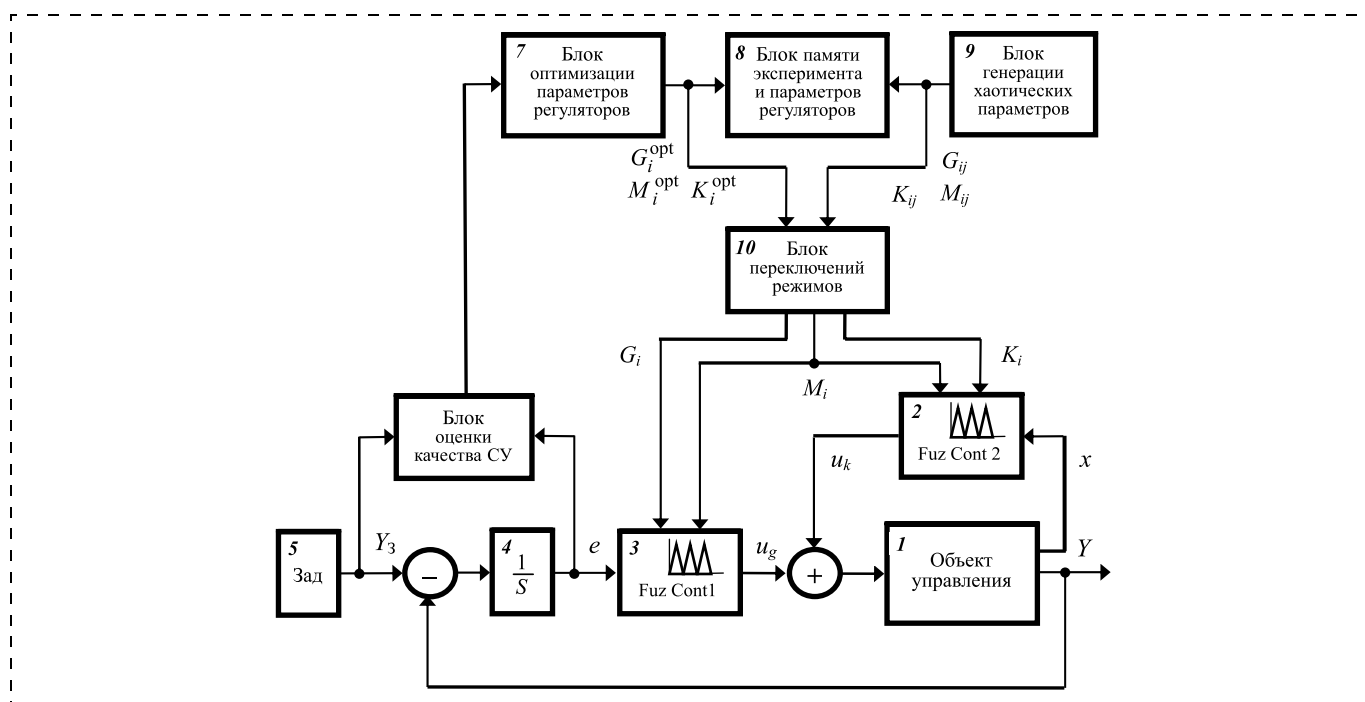
На втором этапе подбираются начальные и конечные состояния, время наблюдения каждого эксперимента T_H (которое в 2...5 раз превышает время переходных процессов в системе), число экспериментов, начальные оценки критерия качества.

На третьем этапе разрабатываются генераторы хаотических чисел — матрицы размера 3×3 для регуляторов по ошибке G_j , фазовых переменных K_j и параметров нечетких терм-множеств M_j . Затем в генераторах хаотических чисел случайным образом $J_{\text{раз}}$ изменяются настроечные параметры указанных матриц, и в результате получаем семейства матриц G_{ij} ($j = 1, 2, \dots, J$) ошибок, K_{ij} ($j = 1, 2, \dots, J$) регулятора переменных состояний и параметров M_{ij} ($j = 1, 2, \dots, J$) нечетких терм-множеств (7). Начальные значения G_{ij} , K_{ij} , M_{ij} задаются из допустимых областей: $G_{ij} \in [0, G_i]$, $K_{ij} \in [0, K_i]$, $M_{ij} \in [0, M_i]$.

Фиксируются номера генерации $j = 1, 2, \dots, J$ и соответствующие два последних значения параметров-матриц настройки регуляторов $G_{ij} = \{G_{ij\text{эксп}}\}$, $K_{ij} = \{K_{ij\text{эксп}}\}$, $M_{ij} = \{M_{ij\text{эксп}}\}$. Эти значения присваиваются соответствующим настроечным параметрам нечетких регуляторов по ошибке и переменным состояниям.

После присвоения начальных значений параметров нечетких Т-S-регуляторов и соответствующих генераторов хаотических чисел осуществляется моделирование замкнутой СУ.

Далее после каждого проведенного j -го эксперимента, т. е. моделирования СУ на интервале наблюдения T_H , оцениваются (вычисляются) значения вектора показателей качества процесса управления: интегральной квадратичной ошибки J_{1nj} ,



Функциональная схема автоматической настройки параметров оптимального нечеткого Т-S-регулятора

степени затухания J_{2nj} и перерегулирования переходных процессов J_{3nj} по каждой переменной ($j = 1, 2, \dots$), $n = 1, 2, 3$ — номер переменной СУ.

Следующим этапом синтеза является определение оптимальных значений критериев качества $J_{1n}^{\text{opt}}, J_{2n}^{\text{opt}}, J_{3n}^{\text{opt}}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), которые находятся простым сравнением их значений в $(j - 1)$ -м эксперименте:

$$\min\{J_{1nj}, J_{1nj-1}\} = J_{1n}^{\text{opt}}, \max\{J_{2nj}, J_{2nj-1}\} = J_{2n}^{\text{opt}};$$

$$\min\{J_{3nj}, J_{3nj-1}\} = J_{3n}^{\text{opt}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Затем функционалам $J_{1nj-1}, J_{2nj-1}, J_{3nj-1}$ присваиваются значения

$$J_{1nj-1} = J_{1n}^{\text{opt}}, J_{2nj-1} = J_{2n}^{\text{opt}}, J_{3nj-1} = J_{3n}^{\text{opt}}$$

$$(n = 1, 2, 3), (j = 1, 2, \dots)$$

и запоминаются номера экспериментов (генерации), т. е. оптимальные (наилучшие значения настроечных параметров) матрицы нечетких Т-S-регуляторов по ошибке $G_{ij} = G_i^{\text{opt}}$ и по переменным состояния $K_{ij} = K_{ij}^{\text{opt}}, M_{3j} = M_3^{\text{opt}}, \forall j \in [\overline{1, m}]$.

Таким образом, приведенная многоэтапная методика автоматизированного синтеза параметров нечетких Т-S-регуляторов СУ позволяет решить поставленную задачу, причем она дает возможность осуществить практически очень большое число имитационных экспериментов, так как при оптимизации критериев качества процессов управления (8)–(10) необходимо запоминать результаты только лишь последних шести экспериментов.

Поясним ключевые этапы предложенной методики синтеза параметров нечетких Т-S-регуляторов по ошибке выходов, по переменным состояния и нечетких терм-множеств с использованием элементов теории хаоса на элементах функциональной блок-схемы (см. рисунок).

Блок 1 представляет собой объект управления, т. е. его математическую модель вида (1). В блоках 2 и 3 реализуются нечеткие Т-S-регуляторы по переменным состояния и ошибке в соответствии с выражениями (5), (6). Значения настроечных параметров нечетких Т-S-регуляторов, т. е. матриц G_{ij} и K_{ij} , а также параметры нечетких терм-множеств M_{ij} задаются из блока переключателей 10, входы которых соединены с блоком 9. В блоке 9 генерируются хаотические числовые значения матриц G_{ij}, K_{ij} и M_{ij} , причем генерация последовательных хаотических чисел осуществляется по нижеследующим ло-

гистическим функциям с различными начальными условиями:

$$z_{ijm+1} = (1 + b_{ij})z_{ijm}(1 - \sqrt{z_{ijm}}), i, j = \overline{1, 9}; \quad (11)$$

$$k_{ijm} = K_{ij}z_{ijm}, g_{ijm} = G_{ij}z_{ijm}, \forall b_{ij} \in [5,72, 5,75].$$

В экспериментах вектор показателей качества переходных процессов СУ J_1, J_2, J_3 оценивается в блоке 6 в соответствии с формулами (8)–(10) и оценки передаются в блок оптимизации 7. Здесь определяется номер эксперимента с наилучшей, оптимальной оценкой вектора качества переходного процесса и запоминается сам номер эксперимента и значения настроечных параметров (матрицы) регуляторов по переменным состояния и по ошибке выхода.

Отметим, что генерация хаотических треугольного вида нечетких чисел осуществляется в соответствии с логистической функцией (аналогично (11)). Согласно формуле (7) параметры нечетких терм-множеств определяются соответствующими генераторами хаотических чисел: $D_{11}, S_{21}, D_{22}, D_{31}, M_2$ (мода второго нечеткого множества):

$$D_{ijm+1} = \lambda_{ij}D_{ijm}(D_{ijN} - D_{ijNm})/D_{ijN},$$

$$i = 1, 2, 3; j = 1, 2,$$

$$M_{2m} = \lambda_M M_{2Zm}, \lambda_M, \lambda_{ij} \in [3,75, 3,785].$$

Оптимальные значения оценок вектора качества $J_1^{\text{opt}}, J_2^{\text{opt}}, J_3^{\text{opt}}$, номер эксперимента m^* , изменения параметров нечетких регуляторов $K^{\text{opt}}, G^{\text{opt}}$ и M^{opt} запоминаются в блоке памяти 8.

Использование достаточно большого числа имитационных экспериментов позволяет уйти от локальных оптимальных решений, т. е. определить почти глобальный оптимум оценки вектора показателей качества качества $J_1^{\text{opt}}, J_2^{\text{opt}}, J_3^{\text{opt}}$ и, тем самым, синтезировать наилучшие значения матриц — параметров настройки нечетких Т-S-регуляторов переменных состояния и выхода ($K_i^{\text{opt}}, G_i^{\text{opt}}$). Заметим, что шаг дискретизации в генераторах хаотических чисел значим для определения глобального оптимума.

Блок переключателей 10 предназначен для переключения системы из экспериментального режима настройки в режим реальной работы системы управления мобильным роботом с переобученными (синтезированными) параметрами нечетких Т-S-регуляторов (блоки 2 и 3). Задающие воздействия по выходным переменным y_{1T}, y_{2T}, y_{3T} формируются в блоке 5.

Экспериментальные результаты

Техническая реализация предложенной методики синтеза параметров нечетких регуляторов осуществлена с использованием М-языка в среде MATLAB с использованием пакетов Simulink и Fuzzy Logic Toolbox.

В качестве начальных условий для переменных состояния и выходных переменных приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} y_{10} &= 2, y_{20} = 2,1, y_3 = 0,40, \\ x_{10} &= 1,5, x_{20} = 2, x_{30} = 0,2. \end{aligned}$$

При компьютерном моделировании в качестве безразмерного времени проведения экспериментов выбрано значение 20, с шагом дискретизации (Fixed Step) 0,01.

В результате проведенных имитационных экспериментов найдены следующие оптимальные значения параметров настройки нечетких регуляторов:

$$K_1^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} -17,61 & 2,61 & 0 \\ 3,71 & -15,21 & 3,91 \\ 1,82 & -1,33 & -29,9 \end{vmatrix};$$

$$K_2^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} -21,61 & -1,92 & 1,15 \\ 1,11 & 26,98 & -3,71 \\ 2,91 & 3,87 & -26,81 \end{vmatrix};$$

$$K_3^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} -14,58 & 0,29 & 1,67 \\ -1,26 & -19,9 & 0,78 \\ -0,97 & -0,96 & -20,9 \end{vmatrix};$$

$$G_1^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} 199,2 & -0,58 & -0,12 \\ 0,98 & 202,1 & 1,18 \\ 1,88 & 0,062 & 221,2 \end{vmatrix};$$

$$G_2^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} 201,3 & 0,812 & 1,67 \\ -1,28 & 196,1 & 0,68 \\ 2,33 & 1,17 & 211,7 \end{vmatrix};$$

$$G_3^{\text{opt}} = \begin{vmatrix} 198,1 & 0,68 & 1,71 \\ -2,08 & 189,9 & -1,41 \\ -2,61 & 2,04 & 209,2 \end{vmatrix};$$

$$M_1^{\text{opt}} = (-1,5, -1,5, 0,3);$$

$$M_2^{\text{opt}} = (-1,5, -0,5, 1,5);$$

$$M_3^{\text{opt}} = (0,2, 1,5, 1,5).$$

Для сравнительной оценки качества переходных процессов синтезированных СУ по предложенной выше и по известной методике [6] при

одинаковых начальных условиях проведена серия компьютерных экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований показали, что синтезированная СУ мобильным роботом более эффективна, чем синтезированная по известной методике [6]: суммарная интегральная квадратичная ошибка управления системы, синтезированной по известной методике, составила 0,2605, а по вышеизложенной методике — 0,2113, т. е. качество процесса управления улучшилось примерно на 18,8 %.

Список литературы

1. Нусратов О. К., Джафаров П. С., Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров С. М. Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой Т-S моделью для управления нелинейным динамическим объектом-манипулятором робота с гибким соединением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 8. С. 54—61.
2. Jafarov P. S., Zeynalov E. R., Jafarov S. M., Mustafayeva A. M. The Analytical Method of Synthesis of a Controller with a Fuzzy T-S model for Control of a Flexible Joint Robot Arm // Proc. of Sixth International Conference on Soft Computing with Words and Perceptions in Sistem Analysis, Decision and Control, Turkey, Antliya, 1—2 September. 2011. P. 107—113.
3. Zhong Li. Fuzzy Chaotic Systems. Springer, 2006. 299 p.
4. Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров П. С., Джафаров С. М. Проектирование системы автоматизированного синтеза регулятора в САУ на основе теории хаоса // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems. 2013. Vol. XXXIII, N. 6. P. 139—146.
5. Chung-Hsun Suu, Yien-Tien Wang, Cheng-Chung Chang. Switching T-S Fuzzy model-based guaranteed Cost control for two-wheeled Mobile robots // International Journal of innovative Computing, information and Control. Vol. 8, N. 5 (A), May 2012. P. 3015—3028.
6. Chong-Cheng Shing, Yee-Chang Lin, and Pau-Lo Hsu. The T-S Fuzzy Design and Implementation for Nonlinear Motion Systems with Control Redundancy // Proc. of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6—11, 2008. P. 6867—6872.
7. Цой Дунъюэ. Разработка нечеткой модели для управления колесными мобильными роботами // X научная конференция МГТУ "СТАНКИН" — ИММ РАН: Сб. докл. 2007. С. 247—249.
8. Hsiao M. Y., Wang C. T. A Finite-Time Convergent Interval Type-2 Fuzzy Sliding-Mode Controller Design for Omnidirectional Mobile Robots // International Conference on Advanced Robotics and Intelligent systems (ARIS). 2013.
9. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11, № 8. С. 29—80.
10. Сиек Ю. Л., Сакович С. Ю. Робастный подход к синтезу нечетких законов управления движением подводного робота // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 3844—3852.
11. Зейналов Э. Р. Разработка методов синтеза регуляторов для динамических объектов, описываемые различными типами нечетких дифференциальных уравнений // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, 2013. Vol. XXXIII, N. 6. P. 78—89.
12. Кудинов Ю. И., Дорохов И. Н., Пашенко Ф. Ф. Нечеткие регуляторы и системы управления // Проблемы управления. 2004. Вып. 3. С. 2—14.

Synthesis of the Optimal Fuzzy T-S Controller for the Mobile Robot System Using the Chaos Theory

S. M. Jafarov, jafarovsm@gmail.com✉,

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, AZ1010, Azerbaijan

P. S. Jafarov, jafarovsm@gmail.com, A. M. Mustafayeva, aida.mustafayeva.1981@mail.ru,
Azerbaijan National Academy of Sciences. Institute of Control Systems, Baku, AZ1141, Azerbaijan

Corresponding author: Jafarov Saetdin M., D. Sc., Professor,
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, AZ1010, Azerbaijan,
e-mail: jafarovsm@gmail.com

Received on February 21, 2017

Accepted on February 28, 2017

There are a series of non-linear dynamic objects (or systems), which is chaotic-nonregular [1–3]. In such systems dynamic chaotic processes (irregular movement), that is the phenomenon can be characterized as "desirable" (positive) or "undesirable" (negative) [1, 3]. In the present work, it has been proposed the method of designing automatic synthesis problem of intellectual control system (CS) with using of the elements of chaos theory, i. e. tuning parameters of knowledge base T-S controller, which provides the optimal quality of the vector criterion. The control object is a mobile robot that moves in all directions (omni-directional-OD), a mathematical model, of which is described by nonlinear differential equation [6]. For nonlinear object — OD mobile robot the control law is chosen in the intelligent controllers class with two elastic feedback: If $x_j(t)$ is about M_i . Then $u(t) = K_i x(t) + G_i e(t)$, where $e(t)$ — is three-dimensional vector error, $x(t)$ — is three-dimensional vector state of OD mobile robot. According to the phase variables and error, as well as the parameters M_i^{opt} of the term fuzzy sets of linguistic rules, it is required to determine such optimal matrices K_i^{opt} , G_i^{opt} of fuzzy T-S regulators which, while transferring of the systems from the initial state x_0, y_0 to the final state x_f, y_f would assure optimality of the vector quality criterion, i. e. the minimum of integral square error — $J_1[K, G, M]$, high damping degree of the oscillations — $J_2[K, G, M]$ and minimum overshoot transient — $J_3[K, G, M]$ in the CS. In order to solve the above-mentioned problem, synthesis of the parameters of fuzzy controllers K_i, G_i can be implemented on the basis of chaos theory according to the vector criterion. The synthesis of controller parameters K_i, G_i and fuzzy term sets M_i are carried out by iterative procedure in accordance with system of automatic synthesis parameters (ASP) of fuzzy T-S regulators. Then, according to systems of simulation experiments it is determined G_i^{opt} , K_i^{opt} and M_i^{opt} , that provides the optimal values on CS vector of the quality criterion. The experimental results showed that the synthesized CS mobile robot is relatively efficient than synthesized system by well-known paper [1, 4, 6]. Since the total integral quadratic error of the control system synthesized by a known method [1, 6] was 0,2605 and above at 0,2113 the proposed method, i.e., quality is improved by about 18,8 %.

Keywords: omnidirectional mobile robot, chaos theory, fuzzy T-S controller, overshoot, integral square error, damping degree

For citation:

Jafarov S. M., Jafarov P. S., Mustafayeva A. M. Synthesis of the Optimal Fuzzy T-S Controller for the Mobile Robot System Using the Chaos Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 617–622.

DOI: 10.17587/mau.18.617-622

References

1. Nusratov O. K., Jafarov P. S., Zeynalov E. R., Mustafayeva A. M., Jafarov S. M. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 8, p. 54–61 (in Russian).
2. Jafarov P. S., Zeynalov E. R., Jafarov S. M., Mustafayeva A. M. The Analytical Method of Synthesis of a Controller with a Fuzzy T-S model for Control of a Flexible Joint Robot Arm, *Proc. of Sixth International Conference on Soft Computing with Words and Perceptions in Sistem Analysis, Decision and Control*, Turkey, Antalya, 1–2 September, 2011, pp. 107–113.
3. Zhong Li. *Fuzzy Chaotic Systems*, Springer, 2006, 299 p.
4. Zeynalov E. R., Mustafayeva A. M., Jafarov P. S., Jafarov S. M. Design of the system of automatic synthesis of regulator in CS based on chaos theory, *Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems*, vol. XXXIII, no. 6, 2013, pp. 139–146.
5. Chung-Hsun Suu, Yien-Tien Wang, Cheng-Chung Chang. Switching T-S Fuzzy model-based guaranteed Cost control for two-wheeled Mobile robots, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, May 2012, vol. 8, no. 5 (A), pp. 3015–3028.
6. Chong-Cheng Shing, Yee-Chang Lin, and Pau-Lo Hsu. The T-S Fuzzy Design and Implementation for Nonlinear Motion Systems with Control Redundancy, *Proc. of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6–11, 2008, pp. 6867–6872.
7. Chu Dunyue. Development of fuzzy model for controlling wheeled mobile robot, *Proc. of X scientific conference of MSTU "Stankin" and educational and scientific centre of mathematical modeling of MSTU "Stankin"*, IMM RAS, 2007, p. 247–249 (in Russian).
8. Hsiao M. Y., Wang C. T. A finite —time convergent interval type-2 fuzzy sliding-mode controller design for omnidirectional mobile robots, *International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, 2013.
9. Martinenco U. G. Control motion of wheeled mobile robot, *Fundamental and Applied Mathematics*, 2005, vol. 11, no. 8, pp. 29–80.
10. Siec U. L., Sakhovic S. U. Robust approach to the synthesis fuzzy motion underwater robot control laws, *Proc. of XII All Russia meeting for control problem RMCP — 2014*, Moscow 16–19 June, 2014, pp. 3844–3852 (in Russian).
11. Zeynalov E. R. Development of methods to synthesize the controllers for dynamic objects described by different types of the fuzzy differential, *Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems*, 2013, vol. XXXIII, no. 6, pp. 78–89.
12. Kudinov Yu. I., Dorochov I. N., Paschenko F. F. Fuzzy regulators and control systems, *Problemy Upravleniya*, 2004, vol. 3, pp. 2–14 (in Russian).