

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ирина Валерьевна КУЛИКОВА¹

УДК 004.896

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ТИПА ТАКАГИ — СУГЕНО — КАНГА В НЕКОТОРЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

¹ старший преподаватель
кафедры естественнонаучных дисциплин,
Уральский государственный университет путей сообщения (г. Екатеринбург)
ivkulikova@inbox.ru

Аннотация

Современные вызовы в постиндустриальном обществе требуют дальнейшего развития систем управления сложными техническими и технологическими явлениями и процессами. Эффективное управление объектом возможно, если регулятор или нечеткий регулятор корректно вырабатывает требуемое управляющее воздействие. Последнее время большой популярностью пользуются именно нечеткие регуляторы. Нечеткие логические высказывания в этом случае позволяют учитывать различные нелинейные взаимосвязи. Синтез параметров нечеткого регулятора позволяет обеспечить более

Цитирование: Куликова И. В. Моделирование синтеза нечетких регуляторов типа Такаги — Сугено — Канга в некоторых системах управления / И. В. Куликова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 2 (26). С. 147-169.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169

эффективную работу системы управления. Возможным вариантом получения наилучшего набора параметров нечеткого регулятора выступает применение генетических алгоритмов при его синтезе. Использование генетических алгоритмов для синтеза нечетких регуляторов может привести к тому, что элементы массива набора его параметров изменятся таким образом, что возникнет некорректное значение одного или нескольких элементов. Такая ситуация приводит к невозможности составления функций принадлежности для термов переменных нечеткого регулятора. Некорректное формирование значения исключается путем построения ограниченной функциональной зависимости. В настоящей работе предложена математическая модель параметров терм-множества переменных нечеткого регулятора типа Такаги — Сугено — Канга нулевого и первого порядков. Раскрыто содержание условий и заключений базы правил для нечеткого регулятора отмеченного выше типа. В результате имитационного моделирования с помощью генератора случайных чисел реализуются некоторые операции генетического алгоритма. Графические модели функций принадлежности входных переменных нечеткого регулятора рассматриваемого типа наглядно иллюстрируют попадание всех параметров в диапазон их возможных значений. Представлено описание работы системы управления с двумя параметрами управления и одним управляющим воздействием при заданных значениях параметров управления.

Ключевые слова

Нечеткий регулятор, система автоматического управления, управляющее воздействие, математическая модель, терм-множество, параметры функций принадлежности, генератор случайных чисел.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169

Введение

Современные технологические процессы и технические устройства характеризуются сложными взаимосвязями управляемых величин и управляющих воздействий. Использование классических методов управления не всегда обеспечивает требуемые характеристики работы системы управления. В этом случае целесообразно использовать нечеткие регуляторы. Связь между входными и выходными переменными осуществляется с помощью базы правил, которая содержит набор нечетких импликаций. Наиболее часто применяются нечеткие регуляторы, содержащие две входные переменные и одну выходную.

Профессор А. Б. Шабаров предлагает использовать теорию нечетких множеств для вычисления комплексного критерия нефтенасыщенности скважин, описывающего набор геологических и эксплуатационно-технологических факторов [1]. Интересным в предложенном подходе представляется учет каждого фактора в качестве нечеткого высказывания. Профессор Д. Н. Нурбосынов считает целесообразным дополнить нечетким регулятором детерминированную математическую модель транспортировки вязкой нефти, что позволяет подбирать параметры дифференциальных уравнений в ситуации неопределенности [7].

Применение нечеткого регулятора с двумя входными переменными и одним управляющим воздействием рассмотрено профессором Б. Н. Парсункиным в системе управления газодинамическими режимами промышленной печи для улучшения качества регулирования и улучшения технико-экономических показателей [8].

Подбор параметров нечетких регуляторов в работах [1, 7, 8] осуществляется с помощью экспертно-аналитических методик и эмпирических правил. Интересным представляется использование генетических алгоритмов [9] для подбора параметров нечетких регуляторов. Они позволяют найти оптимальные значения искомых параметров с помощью математических моделей процессов эволюции живой природы. Использование генетического алгоритма для синтеза нечеткого регулятора в системе автоматического управления изотермическим прессованием алюминиевых сплавов было предложено профессором Б. М. Готлибом [3]. В его работе рассмотрен нечеткий регулятор типа Мамдани. Актуальным является разработка процедуры синтеза нечетких регуляторов других типов, например, Такаги — Сугено — Канга.

Методы исследования

Описание работы системы управления с нечетким регулятором типа Такаги — Сугено — Канга

Нечеткий регулятор типа Такаги — Сугено — Канга (ТСК) представляет собой систему нечеткого вывода, база правил которой содержит некоторые аналитические функции от значений входных переменных в заключениях каждого правила [13]. Тип нечеткого регулятора ТСК отличается от других типов видом заключения правил. Если в качестве аналитической функции выбрана константа, то это будет нечеткий регулятор типа ТСК нулевого порядка (ТСК 0). Если в качестве аналитической функции выбрана линейная зависимость от входных переменных, то это будет нечеткий регулятор типа ТСК первого порядка (ТСК 1).

Рассмотрим систему управления, которая содержит нечеткий регулятор, объект управления и обратную связь. На вход нечеткого регулятора подается ошибка управления Δ и скорость ее изменения $d\Delta$. На выходе нечеткого регулятора формируется управляющее воздействие U , которое подается на объект управления. Параметры Δ и $d\Delta$ могут иметь различное количество состояний. Рассмотрим наиболее простой случай, когда параметры определяются тремя состояниями: S_1 — большое отрицательное NB ; S_2 — нейтральное Z ; S_3 — большое положительное PB .

Нечеткий регулятор, входящий в представленную систему управления, имеет две входные переменные — величину ошибки управления Δ и скорость ее изменения $d\Delta$ и одну выходную переменную — управляющее воздействие U . Входные переменные нечеткого регулятора необходимо представить в виде терм-множества [6]. Величина ошибки управления Δ описывается термами $T_1(S_1)$, $T_1(S_2)$ и $T_1(S_3)$. Скорость изменения ошибки $d\Delta$ описывается термами $T_2(S_1)$, $T_2(S_2)$ и $T_2(S_3)$.

Параметры управления Δ и $d\Delta$ и управляющее воздействие U связываются базой правил. Если текущее значение величины ошибки определяется термом $T_1(S_i)$ и скорость изменения ошибки $d\Delta$ определяется термом $T_2(S_j)$, то необходимо обработать управляющее воздействие $U = f_k(\Delta, d\Delta)$ с весом ω_k . Данное логическое высказывание можно представить в виде:

$$(\Delta = T_1(S_i)) \wedge (d\Delta = T_2(S_j)) \Rightarrow (U = f_k(\Delta, d\Delta)), \omega_k, \quad (1)$$

где $(\Delta = T_1(S_i)) \wedge (d\Delta = T_2(S_j))$ — условие правила ($i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3}$); $U = f_k(\Delta, d\Delta)$ — заключение правила ($k = \overline{1,9}$); ω_k — вес правила.

Получение управляющего воздействия U на основе данных о величинах ошибки Δ и скорости ее изменения $d\Delta$ может производиться по девяти правилам (таблица 1).

Заключения правила нечеткого регулятора типа ТСК 0 будут иметь вид:

$$U = \alpha_{0k}, \quad (2)$$

где α_{0k} — значение выходной переменной U для каждого правила, $k = \overline{1,9}$.

Заключения правила нечеткого регулятора типа ТСК 1 будут иметь вид:

$$U = \alpha_{0k} + \alpha_{\Delta k} \Delta + \alpha_{d\Delta k} d\Delta, \quad (3)$$

где $\alpha_{0k}, \alpha_{\Delta k}, \alpha_{d\Delta k}$ — коэффициенты линейной зависимости для каждого правила, $k = \overline{1,9}$.

Каждый терм описывается своей функцией принадлежности μ , которая отражает степень отношения текущих значений параметров управления к соответствующим термам $T_i(S_j)$. Функции принадлежности для переменной Δ обозначаются как $\mu_i(\Delta)$, $i = \overline{1,3}$. Функции принадлежности для переменной $d\Delta$ обозначаются $\mu_i(d\Delta)$, $i = \overline{1,3}$ (для трех термов). Условия постановки задачи для системы управления определяет вид функций принадлежности, поэтому они могут иметь различный вид [6]. Например, в рассматриваемом нечетком регуляторе термы $T_1(S_1)$ и $T_2(S_1)$ могут описываться гладкими z -функциями, термы $T_1(S_2)$ и $T_2(S_2)$ — функцией Гаусса, термы $T_1(S_3)$ и $T_2(S_3)$ — гладкими s -функциями.

Гладкая z -функция, описывающая терм $T_1(S_1)$ для переменной Δ , определяется выражением вида:

$$\mu_1(\Delta) = \begin{cases} 1, \Delta < a_{\Delta 1}, \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{\Delta - a_{\Delta 1}}{b_{\Delta 1} - a_{\Delta 1}} \right)^2, a_{\Delta 1} \leq \Delta < \frac{a_{\Delta 1} + b_{\Delta 1}}{2}, \\ 2 \cdot \left(\frac{\Delta - b_{\Delta 1}}{b_{\Delta 1} - a_{\Delta 1}} \right)^2, \frac{a_{\Delta 1} + b_{\Delta 1}}{2} \leq \Delta < b_{\Delta 1}, \\ 0, \Delta \geq b_{\Delta 1}, \end{cases} \quad (4)$$

где $a_{\Delta 1}, b_{\Delta 1}$ — параметры функции принадлежности.

Функция Гаусса, описывающая терм $T_1(S_2)$ для переменной Δ , определяется выражением вида:

$$\mu_2(\Delta) = e^{-\frac{(\Delta - c_{\Delta 2})^2}{2\sigma_{\Delta 2}^2}}, \quad (5)$$

где $c_{\Delta 2}$, $\sigma_{\Delta 2}$ — параметры функции принадлежности.

Гладкая s -функция, описывающая терм $T_1(S_3)$ для переменной Δ , определяется выражением вида:

$$\mu_3(\Delta) = \begin{cases} 0, \Delta < a_{\Delta 3}, \\ 2 \cdot \left(\frac{\Delta - a_{\Delta 3}}{b_{\Delta 3} - a_{\Delta 3}}\right)^2, a_{\Delta 3} \leq \Delta < \frac{a_{\Delta 3} + b_{\Delta 3}}{2}, \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{\Delta - b_{\Delta 3}}{b_{\Delta 3} - a_{\Delta 3}}\right)^2, \frac{a_{\Delta 3} + b_{\Delta 3}}{2} \leq \Delta < b_{\Delta 3}, \\ 1, \Delta \geq b_{\Delta 3}, \end{cases} \quad (6)$$

где $a_{\Delta 3}$, $b_{\Delta 3}$ — параметры функции принадлежности.

Терм-множество переменной Δ , которое определяется тремя термами с функциями принадлежности (4-6), содержит 6 параметров: $a_{\Delta 1}$, $b_{\Delta 1}$, $c_{\Delta 2}$, $\sigma_{\Delta 2}$, $a_{\Delta 3}$, $b_{\Delta 3}$.

Гладкая z -функция, описывающая терм $T_2(S_1)$ для переменной $d\Delta$, определяется выражением вида:

$$\mu_1(d\Delta) = \begin{cases} 1, d\Delta < a_{d\Delta 1}, \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{d\Delta - a_{d\Delta 1}}{b_{d\Delta 1} - a_{d\Delta 1}}\right)^2, a_{d\Delta 1} \leq d\Delta < \frac{a_{d\Delta 1} + b_{d\Delta 1}}{2}, \\ 2 \cdot \left(\frac{d\Delta - b_{d\Delta 1}}{b_{d\Delta 1} - a_{d\Delta 1}}\right)^2, \frac{a_{d\Delta 1} + b_{d\Delta 1}}{2} \leq d\Delta < b_{d\Delta 1}, \\ 0, d\Delta \geq b_{d\Delta 1}, \end{cases} \quad (7)$$

где $a_{d\Delta 1}$, $b_{d\Delta 1}$ — параметры функции принадлежности.

Функция Гаусса, описывающая терм $T_2(S_2)$ для переменной $d\Delta$, определяется выражением вида:

$$\mu_2(d\Delta) = e^{-\frac{(d\Delta - c_{d\Delta 2})^2}{2\sigma_{d\Delta 2}^2}}, \quad (8)$$

где $c_{d\Delta 2}$, $\sigma_{d\Delta 2}$ — параметры функции принадлежности.

Гладкая s -функция, описывающая терм $T_2(S_3)$ для переменной $d\Delta$, определяется выражением вида:

$$\mu_3(d\Delta) = \begin{cases} 0, d\Delta < a_{d\Delta 3}, \\ 2 \cdot \left(\frac{d\Delta - a_{d\Delta 3}}{b_{d\Delta 3} - a_{d\Delta 3}}\right)^2, a_{d\Delta 3} \leq d\Delta < \frac{a_{d\Delta 3} + b_{d\Delta 3}}{2}, \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{d\Delta - b_{d\Delta 3}}{b_{d\Delta 3} - a_{d\Delta 3}}\right)^2, \frac{a_{d\Delta 3} + b_{d\Delta 3}}{2} \leq d\Delta < b_{d\Delta 3}, \\ 1, d\Delta \geq b_{d\Delta 3}, \end{cases} \quad (9)$$

где $a_{d\Delta 3}$, $b_{d\Delta 3}$ — параметры функции принадлежности.

Таблица 1

База правил нечеткого регулятора типа Такаги — Сугено — Канга

Table 1

Rule base of fuzzy controller Takagi — Sugeno — Kang type

№	Условие	Заключение	Вес
1	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = f_1(\Delta, d\Delta)$	ω_1
2	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = f_2(\Delta, d\Delta)$	ω_2
3	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = f_3(\Delta, d\Delta)$	ω_3
4	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = f_4(\Delta, d\Delta)$	ω_4
5	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = f_5(\Delta, d\Delta)$	ω_5
6	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = f_6(\Delta, d\Delta)$	ω_6
7	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = f_7(\Delta, d\Delta)$	ω_7
8	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = f_8(\Delta, d\Delta)$	ω_8
9	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = f_9(\Delta, d\Delta)$	ω_9

Терм-множество переменной $d\Delta$, которое также определяется тремя термами с функциями принадлежности (7-9), тоже будет содержать 6 параметров: $a_{d\Delta 1}$, $b_{d\Delta 1}$, $c_{d\Delta 2}$, $\sigma_{d\Delta 2}$, $a_{d\Delta 3}$, $b_{d\Delta 3}$.

Процесс получения значения управляющего воздействия U включает три этапа: 1) фаззификация входных переменных Δ и $d\Delta$; 2) определение степени истинности условий правил; 3) дефаззификация выходной переменной U . Рассмотрим работу нечеткого регулятора типа ТСК, терм-множества входных переменных которого содержат по три терма.

Первый этап. Фаззификация входных переменных нечеткого регулятора. Процесс фаззификации заключается в определении значений функций принадлежности для каждого терма входных переменных $\mu_1(\Delta)$, $\mu_2(\Delta)$, $\mu_3(\Delta)$, $\mu_1(d\Delta)$, $\mu_2(d\Delta)$, $\mu_3(d\Delta)$ для соответствующих значений Δ и $d\Delta$.

Второй этап. Определение степени истинности условий правил. Степень истинности условий i -го правила $d(R_i)$ вычисляется по формуле:

$$d(R_i) = \min(\mu_k(\Delta), \mu_l(d\Delta)), \quad i = \overline{1, 9}, \quad (10)$$

где $\mu_k(\Delta)$ — значение функции принадлежности k -го терма входной переменной Δ i -го правила; $\mu_l(d\Delta)$ — значение функции принадлежности l -го терма входной переменной $d\Delta$ i -го правила.

Третий этап. Дефаззификация выходной переменной. Процесс дефаззификации заключается в определении конкретных числовых значений выходной переменной U . Дефаззификация выходной переменной U в нечетких регуляторах типа ТСК происходит на основе модифицированного метода центра тяжести. Значение U вычисляется по формуле:

$$U = \left(\sum_{i=1}^9 d(R_i) \cdot f_i(\Delta, d\Delta) \cdot \omega_i \right) / \left(\sum_{i=1}^9 d(R_i) \right). \quad (11)$$

Параметры функций принадлежности термов входных переменных и заключений каждого правила представляют собой параметры нечеткого регулятора, их структура представлена на рис. 1.

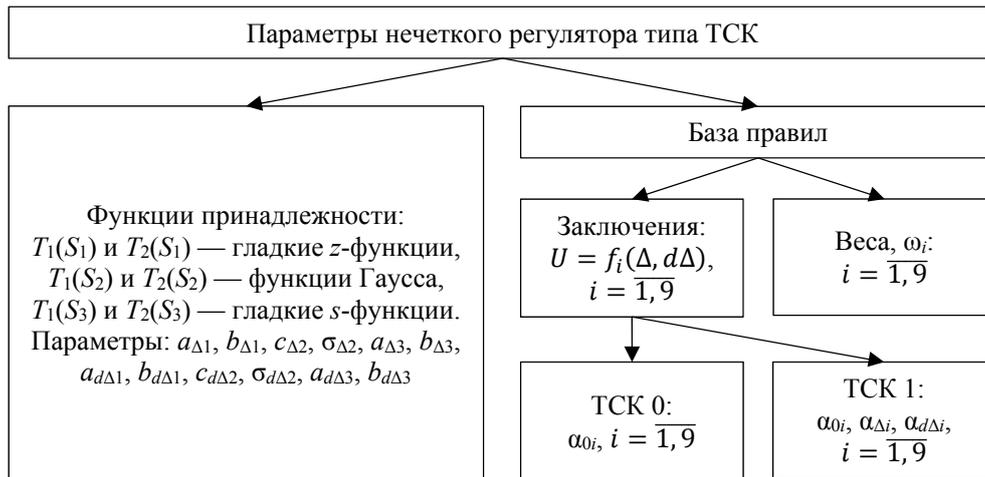


Рис. 1. Структура параметров нечеткого регулятора

Fig. 1. Fuzzy controller parameters structure

Синтез нечеткого регулятора типа ТСК заключается в подборе параметров, позволяющих обеспечить требуемую точность работы системы автоматического управления. При использовании генетических алгоритмов необходимо представить все параметры в виде одномерных массивов данных.

Имитационное моделирование процесса подбора параметров нечеткого регулятора типа ТСК

Различные параметры нечеткого регулятора имеют свои ограничения. Параметры функций принадлежности выбираются согласно диапазону значений входных переменных нечеткого регулятора. Параметры заключений правил определяются из возможных значений выходной переменной. Веса правил имеют значения от 0 до 1. Поэтому синтез нечеткого регулятора можно рассматривать как задачу оптимизации с различными ограничениями для параметров [4, 11].

Генетические алгоритмы позволяют имитировать процессы эволюции живых организмов [2, 12]. Работа генетического алгоритма содержит несколько циклов. На первом цикле генерируются одномерные массивы случайным образом. Каждому массиву ставится в соответствие значение целевой функции. Массивы,

обладающие экстремальным и близким к нему значением целевой функции, можно назвать элитными. На втором цикле одномерные массивы формируются случайным образом и с помощью генетических операторов. После вычисления значений целевой функции для каждого массива определяются два элитных массива. Работа последующих циклов аналогична второму циклу.

Самыми распространенными генетическими операторами являются оператор кроссинговера и оператор мутации [2]. Работа оператора кроссинговера формирует новые одномерные массивы путем обмена элементов двух элитных массивов. Оператор мутации преобразует один из элитных массивов с помощью перестановки элементов внутри него.

Области допустимых значений входных переменных нечеткого регулятора могут отличаться, поэтому при использовании оператора мутации могут возникнуть некорректные наборы параметров нечеткого регулятора. Решить данную проблему можно путем представления параметров функций принадлежности в виде функциональных зависимостей от аргументов $q_{\Delta 1}, q_{\Delta 2}, q_{\Delta 3}, v_{\Delta}$ для переменной Δ и $q_{d\Delta 1}, q_{d\Delta 2}, q_{d\Delta 3}, v_{d\Delta}$ для переменной $d\Delta$. Аргументы $q_{\Delta 1}, q_{\Delta 2}, q_{\Delta 3}, q_{d\Delta 1}, q_{d\Delta 2}, q_{d\Delta 3}$ определяют точки максимума функций принадлежности. Аргументы v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ определяют взаимосвязь параметров функции Гаусса и ординату точки гладких s - и z -функций, абсцисса которой равна среднему значению между ближайшими значениями аргументов $q_{\Delta 1}, q_{\Delta 2}, q_{\Delta 3}, q_{d\Delta 1}, q_{d\Delta 2}, q_{d\Delta 3}$.

Одномерный массив набора параметров нечеткого регулятора типа ТСК 0 в этом случае будет содержать 26 элементов (3 значения $q_{\Delta j}$, 3 значения $q_{d\Delta j}, v_{\Delta}$ и $v_{d\Delta}$, 9 коэффициентов α_{0j} , 9 весов ω_j). Для синтеза нечеткого регулятора типа ТСК 1 необходимо составить одномерный массив с 44 элементами (3 значения $q_{\Delta j}$, 3 значения $q_{d\Delta j}, v_{\Delta}$ и $v_{d\Delta}$, 27 коэффициентов α_{ij} , 9 весов ω_j).

Блок-схема процесса построения нечеткого регулятора на основе случайных величин представлена на рис. 2.

Генерация случайных величин для аргументов $q_{\Delta j}, q_{d\Delta j}, v_{\Delta}$ и $v_{d\Delta}$ при определении параметров функций принадлежности. Аргументы $q_{\Delta j}, q_{d\Delta j}$ определяются на основе случайных величин. Закон распределения определяется условиями задачи. Значения аргументов $q_{\Delta j}$ можно вычислить по формуле:

$$q_{\Delta j} = \Delta_{\min} + F_{\Delta}(q_{\Delta j})(\Delta_{\max} - \Delta_{\min}), \quad (12)$$

где Δ_{\min} — минимальное значение входной переменной Δ ; Δ_{\max} — максимальное значение входной переменной Δ ; $F_{\Delta}(q_{\Delta j})$ — значение функции распределения непрерывной случайной величины.

Значения аргументов $q_{d\Delta j}$ можно вычислить по формуле:

$$q_{d\Delta j} = d\Delta_{\min} + F_{d\Delta}(q_{d\Delta j})(d\Delta_{\max} - d\Delta_{\min}), \quad (13)$$

где $d\Delta_{\min}$ — минимальное значение входной переменной $d\Delta$; $d\Delta_{\max}$ — максимальное значение входной переменной $d\Delta$; $F_{d\Delta}(q_{d\Delta j})$ — значение функции распределения непрерывной случайной величины.



Рис. 2. Блок-схема процесса построения нечеткого регулятора на основе случайных величин

Fig. 2. The block diagram of the fuzzy controller constructing process based on random variables

Аргументы v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ также определяются с помощью непрерывных случайных величин, они могут принимать значения от 0 до 1. Значение v_{Δ} можно вычислить по формуле:

$$v_{\Delta} = F_v(v_{\Delta}), \quad (14)$$

где $F_v(v_{\Delta})$ — значение функции распределения непрерывной случайной величины.

Значение $v_{d\Delta}$ можно вычислить по формуле:

$$v_{d\Delta} = F_{dv}(v_{d\Delta}), \quad (15)$$

где $F_{dv}(v_{d\Delta})$ — значение функции распределения непрерывной случайной величины.

Генерация случайных величин для коэффициентов линейных зависимостей в заключениях правил. Коэффициенты линейной зависимости выступают параметрами заключений правил. Их значения также являются случайными величинами, закон распределения которых определяется условиями задачи. Количество коэффициентов совпадает с размером базы правил. Если выбран нечеткий регулятор типа ТСК 0, то значения коэффициентов α_{0i} можно вычислить по формуле:

$$\alpha_{0i} = U_{\min} + F_{\alpha}(\alpha_{0i})(U_{\max} - U_{\min}), \quad (16)$$

где U_{\min} — минимальное значение выходной переменной U ; U_{\max} — максимальное значение выходной переменной U ; $F_{\alpha}(\alpha_{0i})$ — значение функции распределения непрерывной случайной величины.

Если выбран нечеткий регулятор типа ТСК 1, то коэффициенты α_{0i} , $\alpha_{\Delta i}$, $\alpha_{d\Delta i}$ могут вычисляться по формуле:

$$\begin{cases} \alpha_{0i} = \alpha_{0\min} + F_0(\alpha_{0i})(\alpha_{0\max} - \alpha_{0\min}), \\ \alpha_{\Delta i} = \alpha_{\Delta\min} + F_1(\alpha_{\Delta i})(\alpha_{\Delta\max} - \alpha_{\Delta\min}), \\ \alpha_{d\Delta i} = \alpha_{d\Delta\min} + F_2(\alpha_{d\Delta i})(\alpha_{d\Delta\max} - \alpha_{d\Delta\min}), \end{cases} \quad (17)$$

где $\alpha_{0\min}$, $\alpha_{\Delta\min}$, $\alpha_{d\Delta\min}$ — минимальное значение соответствующего коэффициента полинома; $\alpha_{0\max}$, $\alpha_{\Delta\max}$, $\alpha_{d\Delta\max}$ — максимальное значение соответствующего коэффициента полинома; $F_0(\alpha_{0i})$, $F_1(\alpha_{\Delta i})$, $F_2(\alpha_{d\Delta i})$ — значение функции распределения непрерывных случайных величин, $i = 1, 9$.

Генерация случайных величин для весов правил. Веса правил принимают значения от 0 до 1. Их можно определить с помощью случайных величин, закон распределения которых определяется условиями задачи. Значения весов правил можно найти по формуле:

$$\omega_j = F_{\omega}(\omega_j), \quad (18)$$

где $F_{\omega}(\omega_j)$ — значение функции распределения непрерывных случайных величин.

Вычисление параметров функций принадлежности. Значения параметров функций принадлежности выражаются через функциональные зависимости от аргументов $q_{\Delta 1}$, $q_{\Delta 2}$, $q_{\Delta 3}$, v_{Δ} для переменной Δ и $q_{d\Delta 1}$, $q_{d\Delta 2}$, $q_{d\Delta 3}$, $v_{d\Delta}$ для переменной $d\Delta$. Параметры функций принадлежности для переменной Δ вычисляются по формуле:

$$\begin{cases} a_{\Delta 1} = q_{\Delta 1}, \\ b_{\Delta 1} = \frac{q_{\Delta 1}(1 - 2v_{\Delta}) + q_{\Delta 2}}{2(1 - v_{\Delta})}, \\ c_{\Delta 2} = q_{\Delta 2}, \\ \sigma_{\Delta 2} = q_{\Delta 2}v_{\Delta}, \\ a_{\Delta 3} = \frac{q_{\Delta 2} + q_{\Delta 3}(1 - 2v_{\Delta})}{2(1 - v_{\Delta})}, \\ b_{\Delta 3} = q_{\Delta 3}, \end{cases} \quad (19)$$

где $a_{\Delta 1}$, $b_{\Delta 1}$, $c_{\Delta 2}$, $\sigma_{\Delta 2}$, $a_{\Delta 3}$, $b_{\Delta 3}$ — параметры функций принадлежности для входной переменной Δ ; $q_{\Delta 1}$, $q_{\Delta 2}$, $q_{\Delta 3}$, v_{Δ} — независимые аргументы функциональных зависимостей.

Параметры функций принадлежности для переменной $d\Delta$ вычисляются по формуле:

$$\begin{cases} a_{d\Delta 1} = q_{d\Delta 1}, \\ b_{d\Delta 1} = \frac{q_{d\Delta 1}(1 - 2v_{d\Delta}) + q_{d\Delta 2}}{2(1 - v_{d\Delta})}, \\ c_{d\Delta 2} = q_{d\Delta 2}, \\ \sigma_{d\Delta 2} = q_{d\Delta 2}v_{d\Delta}, \\ a_{d\Delta 3} = \frac{q_{d\Delta 2} + q_{d\Delta 3}(1 - 2v_{d\Delta})}{2(1 - v_{d\Delta})}, \\ b_{d\Delta 3} = q_{d\Delta 3}, \end{cases} \quad (20)$$

где $a_{d\Delta 1}, b_{d\Delta 1}, c_{d\Delta 2}, \sigma_{d\Delta 2}, a_{d\Delta 3}, b_{d\Delta 3}$ — параметры функций принадлежности для входной переменной $d\Delta$; $q_{d\Delta 1}, q_{d\Delta 2}, q_{d\Delta 3}, v_{d\Delta}$ — независимые аргументы функциональных зависимостей.

Вычисленные значения параметров функций принадлежности по формуле (19) для переменной Δ подставляются в формулы (4-6). Значения параметров функций принадлежности из формулы (20) для переменной $d\Delta$ подставляются в формулы (7-9).

Составление базы правил. Определение каждого правила требует формулировки условия, заключения и величины веса, который вычисляется по формуле (18). Представление условий правил для нечеткого регулятора типа ТСК с двумя входными переменными, которые описываются тремя терминами, осуществляется с помощью логических высказываний (таблица 1). Установление функциональной зависимости выходной переменной проводится через подстановку коэффициентов α_{oi} , которые вычисляются по формуле (16), для нечеткого регулятора типа ТСК 0 или коэффициентов $\alpha_{oi}, \alpha_{\Delta i}, \alpha_{d\Delta i}$, которые вычисляются по формуле (17), для нечеткого регулятора типа ТСК 1.

Результаты и обсуждение

Синтез нечеткого регулятора типа ТСК 0 на основе случайных величин

Рассмотрим систему автоматического управления с нечетким регулятором типа ТСК 0, которая содержит два параметра управления, которые представлены входными переменными Δ и $d\Delta$, и одно управляющее воздействие как выходная переменная U . Пусть $\Delta \in [-0,5; 0,5], d\Delta \in [-0,1; 0,1], U \in [-1; 1]$.

Крайний левый терм $T_1(S_1)$ входной переменной Δ описывается функцией принадлежности по формуле (4), средний терм $T_1(S_2)$ — по формуле (5), а крайний правый терм $T_1(S_3)$ — по формуле (6). Крайний левый терм $T_2(S_1)$ входной переменной $d\Delta$ описывается функцией принадлежности по формуле (7), средний терм $T_2(S_2)$ — по формуле (8), а крайний правый терм $T_2(S_3)$ — по формуле (9). База правил будет содержать девять правил. Рассмотрим построение нечеткого регулятора типа ТСК 0 на основе алгоритма, блок-схема которого изображена на рис. 2.

Генерация случайных величин для аргументов $q_{\Delta j}, q_{d\Delta j}, v_{\Delta}$ и $v_{d\Delta}$ при определении параметров функций принадлежности. Для получения значений аргументов $q_{\Delta j}, q_{d\Delta j}, j = \overline{1, 3}$ использовались случайные величины с равномерным законом

распределения, параметры которого соответствуют минимальным и максимальным значениям входных переменных нечеткого регулятора. Случайные величины для генерации значений аргументов v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ также имеют равномерное распределение с параметрами 0 и 1. Значения аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, $j = \overline{1, 3}$, v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ для нечеткого регулятора типа ТСК 0 представлены в таблице 2.

Полученные значения аргументов $q_{\Delta 1}$, $q_{\Delta 2}$ и $q_{\Delta 3}$ лежат в диапазоне возможных значений переменной Δ . Значения аргументов $q_{d\Delta 1}$, $q_{d\Delta 2}$ и $q_{d\Delta 3}$ находятся внутри диапазона возможных значений для переменной $d\Delta$. Аргументы v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ принадлежат отрезку $[0; 1]$.

Генерация случайных величин для констант в заключениях правил. Для генерации констант в заключениях правил использовались случайные величины с равномерным законом распределения с параметрами, соответствующими минимальному и максимальному значению управляющего воздействия. Значения этих констант представлены в таблице 3.

Сгенерированные значения констант лежат внутри диапазона возможных значений выходной переменной, который представляет собой отрезок $[-1; 1]$.

Генерация случайных величин для весов правил. Для генерации весов правил использовались случайные величины с равномерным законом распределения с параметрами 0 и 1. Значения весов правил представлены в таблице 4.

Полученные значения весов правил лежат в отрезке $[0; 1]$.

Таблица 2

Значения аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ для нечеткого регулятора типа ТСК 0

Аргументы	$q_{\Delta 1}$	$q_{\Delta 2}$	$q_{\Delta 3}$	v_{Δ}	$q_{d\Delta 1}$	$q_{d\Delta 2}$	$q_{d\Delta 3}$	$v_{d\Delta}$
Значение	-0,37	-0,03	0,43	0,20	-0,09	0,06	0,09	0,50

Table 2

The values of the arguments $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, v_{Δ} , and $v_{d\Delta}$ for the TSK 0 type fuzzy controller

Таблица 3

Значения коэффициентов α_{0i} для нечеткого регулятора типа ТСК 0

Константа	α_{01}	α_{02}	α_{03}	α_{04}	α_{05}	α_{06}	α_{07}	α_{08}	α_{09}
Значение	0,87	0,27	0,97	0,26	-0,14	-0,45	0,66	0,86	0,91

Table 3

The values of the coefficient α_{0i} for the TSK 0 type fuzzy controller

Таблица 4

Значения весов правил для нечеткого регулятора типа ТСК 0

Вес	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9
Значение	0,167	0,180	0,948	0,632	0,546	0,647	0,990	0,813	0,913

Table 4

The values rule weight for the TSK 0 type fuzzy controller

Вычисление параметров функций принадлежности. Значения параметров функций принадлежности для переменной Δ вычисляются по формуле (19), а для переменной $d\Delta$ — по формуле (20) и представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения параметров функций принадлежности

Table 5

The membership functions parameters values

$\mu(\Delta)$	Параметр	Значение	$\mu(d\Delta)$	Параметр	Значение
$\mu_1(\Delta)$	$a_{\Delta 1}$	-0,367	$\mu_1(d\Delta)$	$a_{d\Delta 1}$	-0,091
	$b_{\Delta 1}$	-0,159		$b_{d\Delta 1}$	0,061
$\mu_2(\Delta)$	$c_{\Delta 2}$	-0,034	$\mu_2(d\Delta)$	$c_{d\Delta 2}$	0,061
	$\sigma_{\Delta 2}$	0,007		$\sigma_{d\Delta 2}$	0,030
$\mu_3(\Delta)$	$a_{\Delta 3}$	0,139	$\mu_3(d\Delta)$	$a_{d\Delta 3}$	0,061
	$b_{\Delta 3}$	0,427		$b_{d\Delta 3}$	0,094

Полученные значения параметров функций принадлежности лежат в диапазонах возможных значений соответствующих входных переменных ($\Delta \in [-0,5; 0,5]$, $d\Delta \in [-0,1; 0,1]$). Графическое представление терм-множества входной переменной Δ представлено на рис. 3.

Графическое представление терм-множества входной переменной $d\Delta$ представлено на рис. 4.

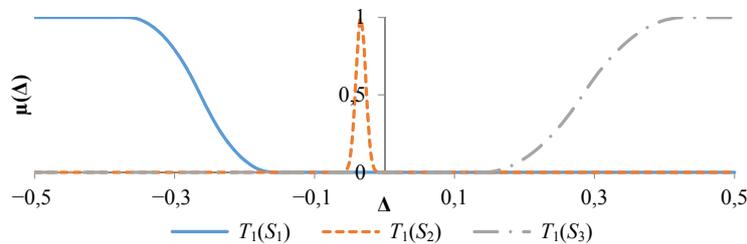


Рис. 3. Терм-множество переменной Δ

Fig. 3. The variable Δ term set

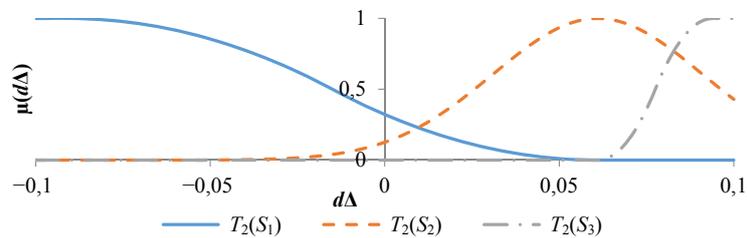


Рис. 4. Терм-множество переменной $d\Delta$

Fig. 4. the variable $d\Delta$ term set

Составление базы правил. Заключение каждого правила нечеткого регулятора типа ТСК 0 содержит константы, значения которых равны α_{0i} , $i = \overline{1, 9}$ (таблица 3). Каждому правилу ставится в соответствие вес ω_i , $i = \overline{1, 9}$ (таблица 4). Полученная база правил представлена в таблице 6.

Представленный синтез нечеткого регулятора типа ТСК 0 опирается на использование 26 генераторов случайных чисел. Вычисление значений параметров функций принадлежности осуществлялось с помощью 8 генераторов случайных чисел. При формировании заключений правил были задействованы 9 генераторов случайных чисел. Расчет значений весов правил производился на основе работы 9 генераторов случайных чисел.

Рассмотрим работу системы управления с двумя параметрами управления Δ и $d\Delta$, одним управляющим воздействием U и нечетким регулятором типа ТСК 0. Значения управляющего воздействия U представлены в таблице 7.

Таблица 6

База правил нечеткого регулятора типа ТСК 0

Table 6

The rule base of fuzzy controller TSK 0 type

№	Условие	Заключение	Вес
1	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = 0,87$	0,167
2	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = 0,27$	0,180
3	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = 0,97$	0,948
4	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = 0,26$	0,632
5	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = -0,14$	0,546
6	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = -0,45$	0,647
7	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = 0,66$	0,990
8	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = 0,86$	0,813
9	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = 0,91$	0,913

Таблица 7

Результат работы нечеткого регулятора типа ТСК 0

Table 7

The result of the TSK 0 type fuzzy controller's operation

Переменная $d\Delta$	Переменная Δ		
	-0,5	0	0,5
-0,1	0,865	0,259	0,659
0	0,689	0,157	0,708
0,1	0,920	-0,365	0,895

Математическая модель синтеза, представленная в формулах (12-20), позволяет составить нечеткий регулятор типа ТСК 0 для работы системы управления с двумя параметрами управления Δ и $d\Delta$, одним управляющим воздействием U . Все полученные значения управляющего воздействия (таблица 7) лежат в установленном диапазоне $U \in [-1; 1]$ при заданных значениях параметров управления ($\Delta \in [-0,5; 0,5]$, $d\Delta \in [-0,1; 0,1]$).

Синтез нечеткого регулятора типа ТСК 1 на основе случайных величин

Рассмотрим систему автоматического управления с нечетким регулятором типа ТСК 1, которая содержит два параметра управления Δ и $d\Delta$ и одно управляющее воздействие U . Пусть $\Delta \in [-0,5; 0,5]$, $d\Delta \in [-0,1; 0,1]$, $U \in [-1; 1]$.

Крайний левый терм входной переменной Δ $T_1(S_1)$ описывается функцией принадлежности по формуле (4), средний терм $T_1(S_2)$ — по формуле (5), а крайний правый терм $T_1(S_3)$ — по формуле (6). Крайний левый терм входной переменной $d\Delta$ $T_2(S_1)$ описывается функцией принадлежности по формуле (7), средний терм $T_2(S_2)$ — по формуле (8), а крайний правый терм $T_2(S_3)$ — по формуле (9). База правил будет содержать девять правил. Рассмотрим построение нечеткого регулятора типа ТСК 1 на основе алгоритма, блок-схема которого изображена на рис. 2.

Генерация случайных величин для аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ при определении параметров функций принадлежности. Для получения значений аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, $j = \overline{1, 3}$ использовались случайные величины с равномерным законом распределения, параметры которого соответствуют минимальным и максимальным значениям входных переменных нечеткого регулятора. Случайные величины для генерации значений аргументов v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ также имеют равномерное распределение с параметрами 0 и 1. Значения аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, $j = \overline{1, 3}$, v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ для нечеткого регулятора типа ТСК 1 представлены в таблице 8.

Полученные значения аргументов $q_{\Delta 1}$, $q_{\Delta 2}$ и $q_{\Delta 3}$ лежат в диапазоне возможных значений переменной Δ . Значения аргументов $q_{d\Delta 1}$, $q_{d\Delta 2}$ и $q_{d\Delta 3}$ находятся внутри диапазона возможных значений для переменной $d\Delta$. Аргументы v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ принадлежат отрезку $[0; 1]$.

Генерация случайных величин для коэффициентов линейных зависимостей в заключениях правил. Для генерации коэффициентов линейных зависимостей в заключениях правил использовались случайные величины с равномерным законом распределения. Пусть $\alpha_{0i} \in [-0,5; 0,5]$, $\alpha_{\Delta i} \in [-0,5; 0,5]$, $\alpha_{d0i} \in [-0,5; 0,5]$. Значения этих коэффициентов представлены в таблице 9.

Сгенерированные значения коэффициентов линейных зависимостей лежат внутри диапазона их возможных значений.

Генерация случайных величин для весов правил. Для генерации весов правил использовались случайные величины с равномерным законом распределения с параметрами 0 и 1. Значения весов правил представлены в таблице 10.

Полученные значения весов правил лежат в отрезке $[0; 1]$.

Таблица 8

Значения аргументов $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, v_{Δ} и $v_{d\Delta}$ для нечеткого регулятора типа ТСК 1

Аргументы	$q_{\Delta 1}$	$q_{\Delta 2}$	$q_{\Delta 3}$	v_{Δ}	$q_{d\Delta 1}$	$q_{d\Delta 2}$	$q_{d\Delta 3}$	$v_{d\Delta}$
Значение	-0,465	0,039	0,382	0,700	-0,044	0,027	0,068	0,300

Table 8

The values of arguments $q_{\Delta j}$, $q_{d\Delta j}$, v_{Δ} , and $v_{d\Delta}$ for the TSK 1 type fuzzy controller

Таблица 9

Значения коэффициентов α_{0i} , $\alpha_{\Delta i}$, $\alpha_{d\Delta i}$ для нечеткого регулятора типа ТСК 1

Коэф-т	α_{01}	α_{02}	α_{03}	α_{04}	α_{05}	α_{06}	α_{07}	α_{08}	α_{09}
Значение	0,26	0,25	-0,18	-0,27	-0,30	0,48	-0,06	0,29	-0,10
Коэф-т	$\alpha_{\Delta 1}$	$\alpha_{\Delta 2}$	$\alpha_{\Delta 3}$	$\alpha_{\Delta 4}$	$\alpha_{\Delta 5}$	$\alpha_{\Delta 6}$	$\alpha_{\Delta 7}$	$\alpha_{\Delta 8}$	$\alpha_{\Delta 9}$
Значение	0,05	0,04	0,01	0,05	-0,04	0,09	-0,05	0,09	0,11
Коэф-т	$\alpha_{d\Delta 1}$	$\alpha_{d\Delta 2}$	$\alpha_{d\Delta 3}$	$\alpha_{d\Delta 4}$	$\alpha_{d\Delta 5}$	$\alpha_{d\Delta 6}$	$\alpha_{d\Delta 7}$	$\alpha_{d\Delta 8}$	$\alpha_{d\Delta 9}$
Значение	-0,02	0,23	-0,11	-0,28	0,33	-0,15	0,08	0,28	-0,16

Table 9

The values of coefficient α_{0i} , $\alpha_{\Delta i}$, and $\alpha_{d\Delta i}$ for the TSK 1 type fuzzy controller

Таблица 10

Значения весов правил для нечеткого регулятора типа ТСК 1

Вес	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9
Значение	0,451	0,769	0,521	0,354	0,357	0,070	0,077	0,197	0,640

Table 10

The rules' weight values for the TSK 1 type fuzzy controller

Вычисление параметров функций принадлежности. Значения параметров функций принадлежности для переменной Δ вычисляются по формуле (19), а для переменной $d\Delta$ — по формуле (20) и представлены в таблице 11.

Полученные значения параметров функций принадлежности лежат в диапазонах возможных значений соответствующих входных переменных ($\Delta \in [-0,5; 0,5]$, $d\Delta \in [-0,1; 0,1]$). Графическое представление терм-множества входной переменной Δ представлено на рис. 5.

Графическое представление терм-множества входной переменной $d\Delta$ представлено на рис. 6.

Составление базы правил. Заключение каждого правила нечеткого регулятора типа ТСК 1 содержит линейные зависимости от входных переменных. Коэффициенты этих зависимостей равны значениям α_{0i} , $\alpha_{\Delta i}$, $\alpha_{d\Delta i}$, $i = \overline{1, 9}$ из таблицы 9. Каждому правилу ставится в соответствие вес ω_i , $i = \overline{1, 9}$ из таблицы 10. База правил в этом случае будет определяться следующими правилами, представленными в таблице 12.

Таблица 11

Значения параметров функций принадлежности

Table 11

The membership functions parameters values

$\mu(\Delta)$	Параметр	Значение	$\mu(d\Delta)$	Параметр	Значение
$\mu_1(\Delta)$	$a_{\Delta 1}$	-0,465	$\mu_1(d\Delta)$	$a_{d\Delta 1}$	-0,044
	$b_{\Delta 1}$	0,375		$b_{d\Delta 1}$	0,007
$\mu_2(\Delta)$	$c_{\Delta 2}$	0,039	$\mu_2(d\Delta)$	$c_{d\Delta 2}$	0,027
	$\sigma_{\Delta 2}$	0,027		$\sigma_{d\Delta 2}$	0,008
$\mu_3(\Delta)$	$a_{\Delta 3}$	-0,190	$\mu_3(d\Delta)$	$a_{d\Delta 3}$	0,039
	$b_{\Delta 3}$	0,382		$b_{d\Delta 3}$	0,068

Представленный синтез нечеткого регулятора типа ТСК 1 опирается на использование 44 генераторов случайных чисел. Вычисление значений параметров функций принадлежности осуществлялось с помощью 8 генераторов случайных чисел. При формировании заключений правил были задействованы 27 генераторов случайных чисел. Расчет значений весов правил производился на основе работы 9 генераторов случайных чисел.

Рассмотрим работу системы управления с двумя параметрами управления Δ и $d\Delta$, одним управляющим воздействием U и нечетким регулятором типа ТСК 1. Значения управляющего воздействия U представлены в таблице 13.

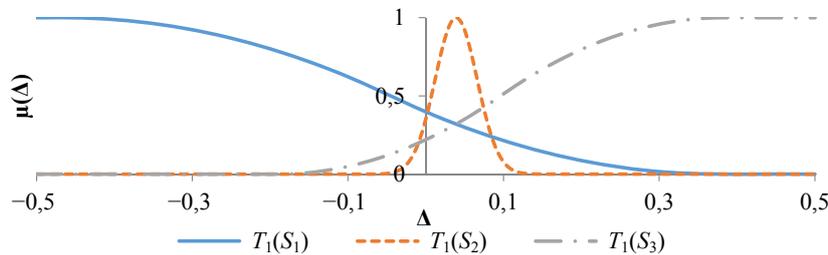


Рис. 5. Терм-множество переменной Δ

Fig. 5. The variable Δ term set

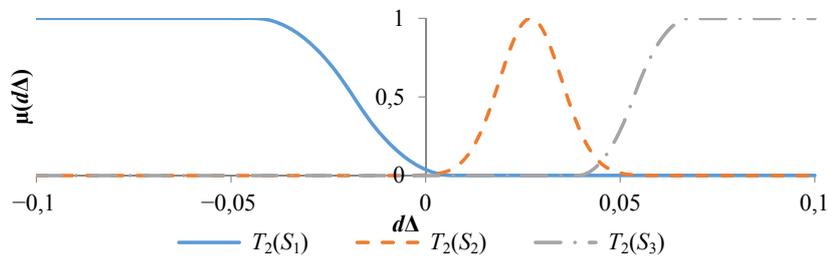


Рис. 6. Терм-множество переменной $d\Delta$

Fig. 6. The variable $d\Delta$ term set

Таблица 12

База правил нечеткого регулятора типа ТСК 1

№	Условие	Заключение	Вес
1	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = 0,26 + 0,05\Delta - 0,02d\Delta$	0,451
2	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = 0,25 + 0,04\Delta + 0,23d\Delta$	0,769
3	$(\Delta = T_1(S_1)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = -0,18 + 0,09\Delta - 0,11d\Delta$	0,521
4	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = -0,27 + 0,05\Delta - 0,28d\Delta$	0,354
5	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = -0,30 - 0,04\Delta + 0,33d\Delta$	0,357
6	$(\Delta = T_1(S_2)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = 0,48 + 0,09\Delta - 0,15d\Delta$	0,070
7	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_1))$	$U = -0,06 - 0,05\Delta + 0,08d\Delta$	0,077
8	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_2))$	$U = 0,29 + 0,09\Delta + 0,28d\Delta$	0,197
9	$(\Delta = T_1(S_3)) \wedge (d\Delta = T_2(S_3))$	$U = -0,10 + 0,11\Delta - 0,16d\Delta$	0,640

Table 12

The rule base of the TSK 1 type fuzzy controller

Таблица 13

Результат работы нечеткого регулятора типа ТСК 1

Переменная $d\Delta$	Переменная Δ		
	-0,5	0	0,5
-0,1	0,237	0,049	-0,093
0	0,234	0,046	-0,007
0,1	-0,236	-0,119	-0,061

Table 13

The result of the TSK 1 type fuzzy controller's operation

Математическая модель синтеза, представленная в формулах (12-20), позволяет составить нечеткий регулятор типа ТСК 1 для работы системы управления с двумя параметрами управления Δ и $d\Delta$, одним управляющим воздействием U . Все полученные значения управляющего воздействия (таблица 13) лежат в установленном диапазоне $U \in [-1; 1]$ при заданных значениях параметров управления ($\Delta \in [-0,5; 0,5]$, $d\Delta \in [-0,1; 0,1]$).

Заключение

Представление в данной работе параметров функций принадлежности в виде функциональных зависимостей от случайно сгенерированных аргументов позволяет исключить возможность формирования некорректных наборов параметров для нечеткого регулятора типа ТСК при его синтезе с помощью генетических алгоритмов. Применение математических моделей терм-множеств позволяют

сократить одномерный массив с параметрами нечеткого регулятора, что приводит к уменьшению используемой оперативной памяти. Полученные значения управляющего воздействия и параметров управления в этом случае лежат внутри диапазонов их возможных значений. Синтез нечеткого регулятора типа ТСК на основе генетического алгоритма реализован в авторской компьютерной программе [5]. Предложенную модель синтеза нечетких регуляторов типа ТСК можно использовать для подбора параметров в системе автоматического управления температурой потока нефти при ее транспортировке [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиуллин М. М. Применение теории нечетких множеств для подбора скважин с целью геолого-технологических мероприятий на нефтяных месторождениях / М. М. Галиуллин, А. Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2011. № 7. С. 30-37.
2. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; под ред. В. М. Курейчика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
3. Готлиб Б. М. Нечеткое управление процессом изотермического прессования / Б. М. Готлиб, В. С. Тарасян, И. Д. Козьянко, В. Ю. Колодкина // Современные проблемы автоматизации и управления в энергетике и машиностроении. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Цикл «Автоматизация и управления» кафедры «Технологии машиностроения» (ТМС) Пензенского государственного технологического университета. 2015. С. 89-98.
4. Куликова И. В. Построение генетического алгоритма для решения задач оптимизации с различными ограничениями для параметров / И. В. Куликова // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 40-44.
5. Куликова И. В. Процедура автоматического синтеза нечетких регуляторов типа Такаги — Сугено — Канга: свидетельство о государственной регистрации № 2020613003. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 27 февраля 2020 г. / И. В. Куликова.
6. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 744 с.
7. Нурбосынов Д. Н. Системный подход и анализ иерархических структур при формализации процесса подготовки и транспортировки потоков нефти как объекта управления / Д. Н. Нурбосынов, Т. В. Табачникова, К. Л. Горшкова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 7. С. 18-25.
8. Парсункин Б. Н. Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечеткой логики / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Т. Г. Сухонослова, Т. У. Ахметов, М. И. Васильев // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1 (7). С. 29-34.
9. Растрингин Л. А. Случайный поиск — специфика, этапы истории и предрассудки / Л. А. Растрингин // Вопросы кибернетики. 1978. № 33. С. 3-16.

10. Тарасян В. С. Автоматическое обучение нечетких регуляторов MISO-типа: свидетельство о государственной регистрации № 2014614584. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 6 марта 2014 г. / В. С. Тарасян, И. В. Куликова.
11. Тарасян В. С. Построение системы нечеткого управления в мехатронных системах при помощи генетических алгоритмов / В. С. Тарасян, И. В. Куликова, И. С. Мезенцев // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. С. 223.
12. Cordon O. Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases / O. Cordon, F. Herrera, F. Hoffman, L. Magdalena. World Scientific, 2001. Vol. 19. 488 pp. (Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory). DOI: 10.1142/4177
13. Takagi T. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. 15. No. 1. Pp. 116-132.

Irina V. KULIKOVA¹

UDC 004.896

**MODELING THE SYNTHESIS
OF TAKAGI — SUGENO — KANG
FUZZY CONTROLLERS
IN SOME CONTROL SYSTEMS**

¹ Senior Lecturer, Department of Natural Science,
Ural State University of Railway Transport (Ekaterinburg)
ivkulikova@inbox.ru

Abstract

Modern challenges in a post-industrial society require further development of management systems for complex technical and technological phenomena and processes. Effective control of an object is possible if a controller, or a fuzzy controller, correctly generates the required control action. Recently, fuzzy controllers have been very popular. Fuzzy logical statements in this case help considering various nonlinear relationships. The synthesis of the fuzzy controller parameters allows for more efficient operation of the control system. A possible option for obtaining the best set of parameters for a fuzzy controller is the use of genetic algorithms for its synthesis. The use of genetic algorithms for the fuzzy controllers synthesis can lead to the fact that the elements of its parameters array will change in such a way that an incorrect value of one or more elements will occur. This situation leads to impossibility of composing membership functions for the terms of the variables of the fuzzy controller. Incorrect value formation is excluded by constructing a limited functional dependency.

This paper proposes a mathematical model of the parameters of the term-set of variables of a fuzzy controller of the Takagi — Sugeno — Kang type of the zero and first orders. The authors disclose the content of the conditions and conclusions of the rule base for the fuzzy controller of the above type.

Citation: Kulikova I. V. 2021. “Modeling the synthesis of Takagi — Sugeno — Kang fuzzy controllers in some control systems”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 2 (26), pp. 147-169.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169

As a result of the simulation, some operations of the genetic algorithm are implemented using a random number generator. Graphical models of the membership functions of the input variables of the fuzzy controller of the type under consideration clearly illustrate the occurrence of all parameters in their range of possible values. A description of the control system operation with two control parameters and one control action at the specified values of the control parameters is presented.

Keywords

Fuzzy controller, automatic control system, control action, mathematical model, term set, parameters of membership functions, random number generator.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169

REFERENCES

1. Galiullin M. M., Shabarov A. B. 2011. "Application of fuzzy sets theory for well selection for the purpose of geological and technological measures in oil fields". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no. 7, pp. 30-37. [In Russian]
2. Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. 2006. Genetic Algorithms. Edited by V. M. Kurejchik. Moscow: FIZMATLIT. 320 pp. [In Russian]
3. Gotlib B. M., Tarasyan V. S., Kozyanko I. D., Kolodkina V. Yu. 2015. "Fuzzy control of the isothermal pressing process". Proceedings of the International Research Conference "Modern Problems of Automation and Control in Power and Engineering", pp. 89-98. Penza State Technological University. [In Russian]
4. Kulikova I. V. 2020. "Construction of genetic algorithm for solving optimization problems with different parameter constraints". *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, no. 2, pp. 40-44. [In Russian]
5. Kulikova I. V. 2020. RF State Registration Certificate No. 2020613003 "Procedure for automatic synthesis of fuzzy Takagi — Sugeno — Kanga type regulators". Registered in the Registry of Computer Programs 27 February. [In Russian]
6. Egupov N. D. (ed.). 2001. Methods of Robust, Neuro-fuzzy, and Adaptive Control. Moscow: BMSTU Publishing. 744 pp. [In Russian]
7. Nurbosynov D. N., Tabachnikova T. V., Gorshkova K. L. 2015. "System approach and analysis of hierarchical structures in formalizing the process of preparation and transportation of oil streams as an object of control". *Avtomatizaciya, telemexanizaciya i svyaz v neftyanoj promyshlennosti*, no. 7, pp. 18-25. [In Russian]
8. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Suxonosova T. G., Axmetov T. U., Vasilyev M. I. 2015. "Pressure control in the working space of industrial furnaces using the principle of fuzzy logic". *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*, no. 1 (7), pp. 29-34. [In Russian]
9. Rastrigin L. A. 1978. "Random search — specifics, stages of history, and prejudices". *Voprosy kibernetiki*, vol. 33, pp. 3-16. [In Russian]
10. Tarasyan V. S., Kulikova I. V. 2014. RF State Registration Certificate No. 2014614584 "Automatic training of fuzzy MISO type regulators". Registered in the Registry of Computer Programs 6 March. [In Russian]

11. Tarasyan V. S., Kulikova I. V., Mezencev I. S. 2014. “Construction of fuzzy control system in mechatronic systems using genetic algorithms”. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, no 6, p. 223. [In Russian]
12. Cordon O., Herrera F., Hoffman F., Magdalena L. 2001. Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases. Vol. 19 in *Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory*. World Scientific. 488 pp. DOI: 10.1142/4177
13. Takagi T., Sugeno M. 1985. “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132.