Для цитирования: И.В. Куликова. Применение оператора вариации в генетическом алгоритме для синтеза нечетких регуляторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 92-100. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

For citation: I.V. Kulikova. Application of the variation operator in a genetic algorithm for the synthesis of fuzzy controllers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 92-100. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.896

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРА ВАРИАЦИИ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

И.В. Куликова

Уральский государственный университет путей сообщения,
620034, Россия, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Резюме. Цель. В данной статье рассмотрена проблема повышения эффективности синтеза нечеткого регулятора в системе управления с помощью генетического алгоритма. Подбор наилучших параметров нечеткого регулятора осуществляется с помощью операторов кроссинговера и мутации в генетическом алгоритме. Работа оператора мутации может привести к формированию некорректного набора параметров, что усложняет процедуру синтеза нечеткого регулятора. **Метод.** Методом математического моделирования составляются массивы наборов параметров функций принадлежности, заключений и весов правил, которые входят в нечеткий регулятор. Методом имитационного моделирования описывается механизм работы операторов одноточечной и двухточечной вариации в генетическом алгоритме. **Результат.** Предложены математические модели одноточечного и двухточечного оператора вариации для генетического алгоритма. Представлен механизм изменения значений элементов в массиве набора параметров нечеткого регулятора с одной входной и выходной переменной. **Вывод.** Замена оператора мутации на оператор вариации исключает формирование некорректных наборов параметров нечеткого регулятора в системе управления.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, оператор вариации, генетический алгоритм, функции принадлежности, база правил

APPLICATION OF THE VARIATION OPERATOR IN A GENETIC ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF FUZZY CONTROLLERS

I.V. Kulikova

Ural State Transport University,
66 Kolmogorova St., Yekaterinburg 620034, Russia

Abstract. Objective. This article studies the problem of increasing the efficiency of fuzzy controller synthesis in a control system using a genetic algorithm. The best parameters of the fuzzy controller are selected using the crossing-over and mutation operators in the genetic algorithm. The operation of the mutation operator can lead to the formation of an incorrect set of parameters, which complicates the procedure for synthesizing a fuzzy controller. **Methods.** Arrays of parameter sets of membership functions, conclusions, and rule weights that are included in the fuzzy controller are compiled using mathematical simulation. The mechanism of operation of single-point and two-point variation operators in the genetic algorithm is described by the simulation modeling. **Results.** Mathematical models of single-point and two-point variation operators for the genetic algorithm are proposed. The mechanism for changing the values of elements in the array of a set of parameters of a fuzzy controller with one input and output variable is presented. **Conclusion.** Replacing the mutation

operator with the variation operator eliminates the formation of incorrect sets of parameters of the fuzzy controller in the control system.

Key words: *fuzzy controller, variation operator, genetic algorithm, membership functions, rule base*

Введение. Современные системы управления характеризуются наличием большого числа управляемых величин и управляющих воздействий, которые связаны между собой сложными взаимосвязями. Для успешной работы таких систем управления целесообразно использовать нечеткие регуляторы. Нечеткий регулятор представляет собой систему нечеткого вывода, которая преобразует значения выходных переменных на основе входных переменных с помощью законов нечеткой логики [1,13,15].

Нечеткие регуляторы успешно применяются в системах адаптивного управления автоматической настройкой различных режимов работы синхронных генераторов [2,4,5]. Они используются в системах адаптивного нечеткого управления насосными станциями в нефтегазовой промышленности [3,9,12,16]. Нечеткие регуляторы входят в систему управления частотой вращения газотурбинных установок на тепловых электростанциях [2,6]. В сельском хозяйстве для управления линейным электроприводом зерноочистительной машины и комбайнов применяются нечеткие регуляторы [4, 1, 14].

При проектировании систем управления для достижения заданного критерия оптимизации необходимо определить метод синтеза параметров нечеткого регулятора для функций принадлежности и базы правил. Если требуется подобрать только значения параметров функций принадлежности, то можно применить аналитические методы [3]. При одновременном подборе параметров переменных нечеткого регулятора и базы правил можно использовать генетические алгоритмы. Примерами выступают нечеткие регуляторы систем управления движением на перекрестке [8,20] и перевернутым маятником [17, 19]. Искомый набор параметров нечеткого регулятора в этом случае будет являться решением задачи оптимизации.

Постановка задачи. Генетические алгоритмы представляют собой метод поиска решения задачи оптимизации на основе моделирования эволюционных процессов живой природы [7]. Идея их использования заключается в рассмотрении множества возможных решений задачи оптимизации как популяцию особей в естественной среде обитания. Экстремальное значение целевой функции возможного решения соответствует наилучшей приспособленности особи в популяции. Работа генетического алгоритма состоит из нескольких циклов, которому соответствует множество возможных решений задачи оптимизации, определяющих одно поколение особей.

Описание генетического алгоритма определяется операторами селекции, скрещивания и мутации. Оператор селекции позволяет выбрать наилучшие решения задачи оптимизации на основе значений целевой функции. Операторы скрещивания и мутации используют полученные с помощью оператора селекции наилучшие решения задачи оптимизации. Работа оператора скрещивания заключается в обмене параметрами двух наилучших решений задачи оптимизации. Оператор мутации позволяет получить новое решение путем замены значений параметров в одном из наилучших решений.

Использование оператора мутации предполагает перестановку элементов внутри набора параметров, что может привести к формированию некорректных значений. Устранение недопустимых значений параметров становится возможным при замене оператора мутации оператором вариации, работа которого не предполагает перестановку элементов внутри массива. [10, 15].

Методы исследования. Математическое и имитационное моделирование позволяют проанализировать работу оператора вариации генетического алгоритма. Он позволяет получить новый набор параметров путем изменения случайно выбранного одного или нескольких элементов на определенную величину [10]. Если изменению подвергается только один элемент, то это будет одноточечный оператор вариации. Если изменению подвергаются два элемента, то

это будет двухточечный оператор вариации. Если изменению подвергаются несколько элементов, то это будет многоточечный оператор вариации.

Представим параметры нечеткого регулятора в виде одномерного массива W с элементами w_i . Длина массива W определяется количеством входных переменных нечеткого регулятора и размером базы правил. На первом цикле генетического алгоритма формируется определенное количество массивов наборов параметров W с помощью генераторов случайных чисел. Из полученных массивов выбираются те, которые обладают экстремальным значением целевой функции и близким к нему.

Обозначим эти массивы W^* и W^{**} . На втором цикле к выбранным массивам W^* и W^{**} применяются генетические операторы: оператор кроссинговера и мутации или вариации. Работа этих операторов направлена на изменение значений некоторых параметров для проверки экстремального значения целевой функции. Если экстремальное значение целевой функции улучшается, то работа генетического алгоритма продолжается. Если экстремальное значение целевой функции не улучшается, то работа генетического алгоритма заканчивается.

Элементы массива набора параметров нечеткого регулятора, полученного с помощью одноточечного оператора вариации, определяются по формуле:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_v^* \pm \Delta, w_{v+1}^*, \dots, w_n^*\}, \quad (1)$$

где $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$ – элементы исходного массива набора параметров; v – точка вариации; n – длина массива набора параметров; Δ – величина изменения v -ого элемента массива набора параметров.

Точка вариации вычисляется по формуле:

$$v = F(\gamma) \cdot n, \quad (2)$$

где $F(\gamma)$ – функция распределения дискретной случайной величины γ .

Элементы массива набора параметров нечеткого регулятора, полученного с помощью двухточечного оператора вариации, определяются по формуле:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_{v_1}^* \pm \Delta_1, w_{v_1+1}^*, \dots, w_{v_2}^* \pm \Delta_2, \dots, w_n^*\}, \quad (3)$$

где v_1 и v_2 – точки оператора вариации; Δ_1 и Δ_2 – величины изменений v_1 -ого и v_2 -ого элементов массива набора параметров.

Точки оператора вариации в этом случае будут вычисляться по формуле (2).

Построение одноточечного и двухточечного операторов вариации генетического алгоритма опирается на использование функции распределения дискретной случайной величины (2). Обобщение представленного подхода к построению работы оператора вариации генетического алгоритма позволяет конструировать математические модели многоточечного оператора вариации с заданным количеством изменяемых элементов.

Обсуждение результатов. Рассмотрим нечеткий регулятор, который преобразует значения переменной x в значения переменной y . Переменная x в этом случае будет являться входной переменной нечеткого регулятора, а переменная y – выходной. Каждая переменная нечеткого регулятора описывается терм-множеством, содержащим, например, по пять термов. Названия термов следующие: NB – большое отрицательное, NS – маленькое отрицательное, Z – нейтральное, PS – маленькое положительное и PB – большое положительное [13]. Каждый терм описывается своей функцией принадлежности. Они могут иметь разный вид [15]. Пусть терм NB описывается линейной z -функцией (2 параметра), термы NS , Z и PS – треугольной функцией (3 параметра в каждой функции), терм PB – линейной s -функцией (2 параметра). Переменные x и y нечеткого регулятора определяются терм-множествами, содержащими одинаковые виды

функций принадлежности. Поэтому целесообразно рассмотреть графическую модель терм-множества переменной x (рис. 1).

Рис. 1. Терм-множество переменной x
Fig. 1. Term-set of variable x

Представленное терм-множество содержит 13 параметров функций принадлежности: $a_{1x}, b_{1x}, a_{2x}, b_{2x}, c_{2x}, a_{3x}, b_{3x}, c_{3x}, a_{4x}, b_{4x}, c_{4x}, a_{5x}$. Терм-множество переменной y выглядит аналогично рис.1. Параметры функций принадлежности в этом случае будут следующие: $a_{1y}, b_{1y}, a_{2y}, b_{2y}, c_{2y}, a_{3y}, b_{3y}, c_{3y}, a_{4y}, b_{4y}, c_{4y}, a_{5y}, b_{5y}$.

Для корректной работы нечеткого регулятора необходимо, чтобы значения параметров одной функции принадлежности строго возрастали и лежали внутри диапазона возможных значений (рис. 1). Значения параметров определяются в процессе имитационного моделирования конкретного нечеткого регулятора. Для моделирования взаимосвязи переменных x и y можно рассмотреть значения x на отрезке $[0;5]$, а y на отрезке $[0;8]$, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров функций принадлежности
Table 1. Values of membership functions parameters

Переменная Variable x				Переменная Variable y			
Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value
a_{1x}	1	c_{3x}	3	a_{1y}	1,5	c_{3y}	4
b_{1x}	2	a_{4x}	2,25	b_{1y}	2,5	a_{4y}	3
a_{2x}	1	b_{4x}	3	a_{2y}	1,2	b_{4y}	4
b_{2x}	1,75	c_{4x}	4	b_{2y}	2,5	c_{4y}	6
c_{2x}	2,75	a_{5x}	2,5	c_{2y}	3,5	a_{5y}	3,5
a_{3x}	1,5	b_{5x}	3,5	a_{3y}	2	b_{5y}	5
b_{3x}	2,5			b_{3y}	3		

Переменные нечеткого регулятора связываются базой правил, размер которой определяется количеством термов. Рассмотренное терм-множество содержит пять термов, следовательно, размер базы правил равен пяти. Каждое правило представляет собой логическое выражение вида [15]:

$$\text{если } x = X_i \text{ ТО } y = Y_j, (\omega), \quad (5)$$

где $x = X_i$ – условие правила; $y = Y_j$ – заключение правила; X_i – один из термов переменной x ($i = 1, 2, \dots, 5$); Y_j – один из термов переменной y ($j = 1, 2, \dots, 5$); ω – вес правила.

Переменные x и y связываются базой правил, представленной в табл. 2. Параметры предложенного нечеткого регулятора можно представить в виде массива W^* , содержащего 36 элементов. Элементы с номерами 1 – 13 отражают значения параметров функций принадлежности переменной x ; элементы с номерами 14 – 26 – значения параметров функций принадлежности переменной y ; элементы с номерами 27 – 31 – параметры заключений правил; элементы с номерами 32 – 36 – веса правил. Параметры заключений правил представлены в виде номеров термов выходной переменной y и весов. Терму NB в этом случае будет соответствовать номер 1, терму NS – 2, терму Z – 3, терму PS – 4, терму PB – 5.

Таблица 2. База правил нечеткого регулятора
Table 2. Fuzzy regulator rule base

Номер правила Rule number	1	2	3	4	5
Condition Условие (x)	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
Conclusion Заключение (y)	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>
Weight Вес (ω)	0,3	0,8	0,7	0,5	0,9

Значения параметров, описывающих заключения правил, должны быть положительными целыми не больше 5, а значения весов – лежать в интервале от 0 до 1. В массив W^* входят значения параметров функций принадлежности (табл.1) и базы правил (табл.2). Значения элементов массива W^* представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения элементов массива W^*
Table 3. Values of massive W^* elements

i	w_i^*	i	w_i^*	i	w_i^*	i	w_i^*	i	w_i^*	i	w_i^*
1	1	7	2,5	13	3,5	19	2	25	3,5	31	4
2	2	8	3	14	1,5	20	3	26	5	32	0,3
3	1	9	2,25	15	2,5	21	4	27	2	33	0,8
4	1,75	10	3	16	1,2	22	3	28	1	34	0,7
5	2,75	11	4	17	2,5	23	4	29	3	35	0,5
6	1,5	12	2,5	18	3,5	24	6	30	5	36	0,9

Изменение случайных элементов выбранного массива W^* осуществляется с помощью оператора вариации генетического алгоритма на величину Δ (1). Пусть значение Δ для параметров функций принадлежности равно 0,1; для заключений правил – 1; для весов правил – 0,1. Значения Δ подбираются таким образом, чтобы элементы массива набора параметров W^* оставались в их диапазоне возможных значений после применения оператора вариации.

Рассмотрим работу одноточечного оператора вариации генетического алгоритма на примере предложенного нечеткого регулятора. Его параметры можно распределить на три группы: параметры функций принадлежности (26 параметров), параметры заключений правил (5 параметров) и веса правил (5 параметров). В процессе исследования работы нечеткого регулятора генератором случайных чисел были выбраны номера элементов в каждой группе параметров. Выбранные параметры были изменены на величину Δ остались в своих диапазонах возможных значений. Номера элементов, которые использовались в работе оператора вариации, представлены в табл.4.

Таблица 4. Применение одноточечного оператора вариации
Table 4. Using a single-point variation operator

Группа параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter group	i	w_i^*	Δ	w_i	Границы Borders
Функции принадлежности Membership functions	20	3	0,1	2,9	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
Заключения правил Conclusions of the rules	30	5	1	4	[1; 5]
Веса правил Weights of the rules	32	0,3	0,1	0,4	[0; 1]

При вариации параметров функций принадлежности сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{20} , отражающий параметр b_{3y} , лежит в диапазоне возможных значений переменной y и удовлетворяет неравенству $a_{3y} < b_{3y} < c_{3y}$ ($2 < 2,9 < 4$). При вариации параметров заключений правил сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{30} является целым положительным числом, не большим 5 ($4 \leq 5$). При вариации весов правил также сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{32} лежит в интервале $[0; 1]$. Рассмотрим работу оператора мутации для массива W^* . Внутри массива W^* необходимо выбрать случайным образом элементы с индексами k и l ($k < l$), а затем поменять их местами. Элементы нового массива W в этом случае будут определяться по формуле [7]:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_l^*, w_{k+1}^*, \dots, w_k^*, w_{l+1}^*, \dots, w_n^*\}, \quad (6)$$

где k и l – номера элементов, к которым применяется оператор мутации, n – длина массива набора параметров нечеткого регулятора.

Продemonстрируем работу оператора мутации на представленном наборе параметров нечеткого регулятора, записанном в массиве W^* . Введем следующие обозначения: ФП – функции принадлежности; ЗП – заключения правил; ВП – веса правил. Значения элементов, полученных с помощью оператора мутации, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Применение оператора мутации
Table 5. Using a mutation operator

Группы параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter groups	k	l	w_k^*	w_l^*	w_k	Borders Границы w_k	w_l	Borders Границы w_l
ФП + ФП	3	26	1	5	5	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	1	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
ФП + ЗП	4	29	1,75	3	3	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	1,75	[1; 5]
ФП + ВП	7	35	2,5	0,5	0,5	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	2,5	[0; 1]
ЗП + ЗП	28	31	1	4	4	[1; 5]	1	[1; 5]
ЗП + ВП	27	36	2	0,9	0,9	[1; 5]	2	[0; 1]
ВП + ВП	33	35	0,8	0,5	0,5	[0; 1]	0,8	[0; 1]

При мутации параметров функций принадлежности не выполняется условие возрастания параметров, так как значение элемент w_{26} , отражающего значение параметра b_{5y} не удовлетворяет неравенству $a_{5y} < b_{5y}$ ($3,5 > 1$) (табл. 1), поэтому полученный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным.

При мутации параметра функций принадлежности и заключения правила полученный элемент w_{29} , отражающий параметр заключения правила, не является целым числом, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации параметра функций принадлежности и веса правила полученный элемент w_{35} , отражающий вес правила, не лежит в интервале $[0; 1]$, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации параметров заключений правил полученные элементы w_{28} и w_{31} являются целыми числами, поэтому сформированный набор – корректен. При мутации параметров заключений и весов правил полученный элемент w_{36} , отражающий вес правила, не лежит в интервале $[0; 1]$, а элемент w_{36} не является целым числом, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации весов правил полученные элементы w_{33} и w_{35} лежат в интервале $[0; 1]$, поэтому сформированный набор – корректен.

Использование оператора мутации генетического алгоритма в синтезе нечеткого регулятора позволило получить только два корректных набора параметров из шести. Применение одноточечного оператора вариации генетического алгоритма позволило получить все три корректных набора параметров. Включение одноточечного оператора вариации генетического алгоритма в процедуру синтеза нечеткого регулятора более предпочтительно, чем включение оператора мутации.

Рассмотрим применение двухточечного оператора вариации. Параметры нечеткого регулятора делятся на три группы, поэтому можно выделить шесть вариантов сочетания этих групп. Представим параметры нечетких регуляторов, полученных с помощью двухточечного оператора вариации. Номера элементов, которые использовались в работе оператора вариации и значения ошибок представлены в табл. 6.

При вариации двух параметров функций принадлежности сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_3 и w_{25} , отражающие параметры a_{2x} и a_{5y} соответственно, лежат в диапазоне возможных значений переменных x и y и удовлетворяют неравенствам $a_{2x} < b_{2x} < c_{2x}$ ($0,9 < 1,75 < 2,75$) (табл. 1) и $a_{5y} < b_{5y}$ ($3,4 < 5$) (табл. 1).

Таблица 6. Применение двухточечного оператора вариации
Table 6. Using a two-point variation operator

Группы параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter groups	i_1	$w_{i_1}^*$	Δ_1	w_{i_1}	Borders Границы w_{i_1}	i_2	$w_{i_2}^*$	Δ_2	w_{i_2}	Borders Границы w_{i_2}
ФП + ФП	3	1	0,1	0,9	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	25	3,5	0,1	3,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
ФП + ЗП	12	2,5	0,1	2,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	28	1	1	2	[1; 5]
ФП + ВП	14	1,5	0,1	1,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	36	0,9	0,1	1	[0; 1]
ЗП + ЗП	27	2	1	1	[1; 5]	31	4	1	5	[0; 1]
ЗП + ВП	27	2	1	1	[1; 5]	35	0,5	0,1	0,6	[0; 1]
ВП + ВП	34	0,5	0,1	0,6	[0; 1]	35	0,9	0,1	0,4	[0; 1]

При вариации параметров функций принадлежности и заключений сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{12} , отражающий параметр a_{5x} , лежит в диапазоне возможных значений переменной x и удовлетворяет неравенству $a_{5x} < b_{5x}$ ($2,4 < 3,5$) (табл.1), а элемент w_{28} , характеризующий заключение правила является целым положительным числом, не большим 5 ($2 < 5$). При вариации параметров функций принадлежности и веса правила сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{14} , отражающий параметр a_{1y} , лежит в диапазоне возможных значений переменной y и удовлетворяет неравенству $a_{1y} < b_{1y}$ ($1,4 < 2,5$) (табл.1), а элемент w_{36} , характеризующий вес правила лежит в интервале $[0; 1]$.

При вариации параметров заключений правил сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_{27} и w_{31} являются целыми положительными числами, не большими 5 ($1 \leq 5$ и $5 \leq 5$). При вариации параметров заключений и весов правил сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{27} , отражающий заключение правила, является целым положительным числом, не большим 5 ($1 \leq 5$), а элемент w_{35} , характеризующий вес, лежит в интервале $[0; 1]$. При вариации двух весов правил также сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_{34} и w_{35} лежат в интервале $[0; 1]$. Двухточечный оператор вариации генетического алгоритма для синтеза нечеткого регулятора позволяет получить корректные наборы параметров при изменении любых сочетаний их групп.

Вывод. Включение однотоочечного и двухточечного операторов вариации генетического алгоритма в процедуру синтеза нечеткого регулятора позволяет исключить формирование некорректных наборов его параметров. Работа двухточечного оператора вариации является более сложной по сравнению с работой однотоочечного оператора. Однотоочечный оператор вариации генетического алгоритма был успешно применен для синтеза нечеткого регулятора системы стабилизации неустойчивого положения равновесия перевернутого маятника. Алгоритм генетического алгоритма с однотоочечным оператором вариации реализован в авторских компьютерных программах [11, 18].

Библиографический список:

1. Бабокин Г.И., Гнатюк Т.А. Оценка робастности системы управления электроприводом комбайна для различных регуляторов нагрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 10-15.
2. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Исследование варианта структуры нечеткого пид-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. № 1 (9). С. 16-24.
3. Бизянов Е.Е., Гутник Е.Е. Метод получения параметров функций принадлежности нечетких множеств на основе реальных данных для систем автоматизированной обработки информации // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(3):79-86. /doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 3 (7). С. 122-135.
5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 83-95.
6. Вильданов Р.Г., Крышко К.А., Сидоров Д.А., Климович А.С. Моделирование регулятора на базе нечеткой логики для применения на тепловой электростанции // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 2-2. С. 19-21.
7. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. и др. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография. М: Физматлит, 2009. 384 с. ISBN 978-5-9221-1101-0.
8. Грязнов А.О., Тарасян В.С. Нечеткие регуляторы для управления движением на перекрестке // Молодежь в науке: Новые аргументы. Сборник научных работ X Международного молодежного конкурса. Ответственный редактор А.В. Горбенко. 2019. С. 29-33.

9. Каяшев А.И., Емекеев А.А., Сагдатуллин А.М. Автоматизация электропривода насосной станции на основе многомерного нечеткого логического регулятора // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 4. С. 30-33.
10. Куликова И.В. Построение генетического алгоритма для решения задач оптимизации с различными ограничениями для параметров // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 40-44.
11. Куликова И.В. Процедура автоматического синтеза нечетких регуляторов типа Такаги-Сугено-Канга. Свидетельство о государственной регистрации № 2020613003. – Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06 марта 2020.
12. Леготкина Т.С., Хижняков Ю.Н. Адаптивное нечеткое управление нефтегазового сепаратора дожимной насосной станции // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 8. С. 54-59.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.: ил
14. Линенко А.В., Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Нечеткая система управления линейным электроприводом зерноочистительной машины // Достижения науки - агропромышленному производству материалы LV международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет». 2016. С. 205-210.
15. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егулова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 744 с., ил.
16. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Султанов Р.Г., Соловьева О.И. Синтез нечеткого регулятора с заданной многомерной статической характеристикой // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2015. № 1. С. 245-260.
17. Первушина Н.А., Доновский Д.Е., Хакимова А.Н. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". 2018. № 4 (27). С. 82-90.
18. Тарасян В.С., Куликова И.В. Автоматическое обучение нечетких регуляторов MISO-типа. Свидетельство о государственной регистрации № 2014614584. – Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014г.
19. Тарасян В.С., Куликова И.В. Разработка процедуры построения нечеткого регулятора и ее применение для управления движением перевернутого маятника // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1 (17). С. 34-42.
20. Тарасян В.С., Тен Д.О. Оптимизация транспортной инфраструктуры при помощи генетических алгоритмов // Инновационный транспорт. 2013. № 3 (9). С. 29-32.

References:

1. Babokin G.I., Gnatyuk T.A. Ocenka robustnosti sistemy upravleniya elektroprivodom kombajna dlya raz-lichnyh regulyatorov nagruzki // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 2. S. 10-15.[Babokin G.I., Gnatyuk T.A. Evaluation of the robustness of the combine electric drive control system for various load regulators // Bulletin of the Tula State University. Technical science. 2013. No. 2. pp. 10-15. (In Russ)]
2. Bahirev I.V., Kavalero B.V. Issledovanie varianta struktury nechetkogo pid-regulyatora chastoty vra-shcheniya elektroenergeticheskoy gazoturbinnoy ustanovki//Vestnik Permskogo nacional'nogo issledova-tel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2014. № 1 (9). S. 16-24.[Bakhirev I.V., Kavalero B.V. Investigation of a variant of the structure of a fuzzy pid-regulator of the rotational speed of an electric power gas turbine installation // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. 2014. No. 1 (9). pp. 16-24. (In Russ)]
3. Bizyanov E.E., Gutnik E.E. Metod polucheniya parametrov funkciy prinadlezhnosti nechetkih mnozhestv na osnove real'nyh dannyh dlya sistem avtomatizirovannoy obrabotki informacii // Vestnik Dagestansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2019;46(3):79-86. [Bizyanov EE, Gutnik EE Method of obtaining parameters of membership functions of fuzzy sets based on real data for systems of automated information processing // Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (3): 79-86. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86>(In Russ)]
4. Bulatov YU.N., Kryukov A.V. Intellektual'naya nastroyka regulyatorov ustanovok raspredelennoj generacii // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2017. № 3 (7). S. 122-135.[Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Intellectual tuning of regulators of distributed generation plants // Information and mathematical technologies in science and management. 2017. No. 3 (7). pp. 122-135. (In Russ)]
5. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHan Z.H. Intellektual'nye regulatory dlya ustanovok raspredelennoj generacii // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2015. № 2 (46). S. 83-95.[Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Intelligent controllers for distributed generation plants // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 2 (46). S. 83-95. (In Russ)]
6. Vil'danov R.G., Kryshko K.A., Sidorov D.A., Klimkovich A.S. Modelirovanie regulyatora na baze nechetkoj logiki dlya primeneniya na teplovoj elektrostancii // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii. 2017. № 2-2. S. 19-21.[Vil'danov R.G., Kryshko K.A., Sidorov D.A., Klimkovich A.S. Modeling a controller based on fuzzy logic for use at a thermal power plant // Modern trends in the development of science and technology. 2017. No. 2-2. pp. 19-21. (In Russ)]
7. Gladkov L. A., Kurejchik V. V, Kurejchik V. M. i dr. Bioinspirirovannye metody v optimizacii: mono-grafiya. — M: Fizmatlit, 2009. 384 s. ISBN 978-5-9221-1101-0.[Gladkov L. A., Kureichik V. V, Kureichik V. M. et al. Bioinspired methods in optimization: monograph. Moscow: Fizmatlit, 2009.384 p. ISBN 978-5-9221-1101-0. (In Russ)]
8. Gryaznov A.O., Tarasyan V.S. Nечеткие регуляторы для управления движением на перекрестке // Молодежь в науке: Новые аргументы. Сборник научных работ X Международного молодежного конкурса. Ответственный редактор А.В. Горбенко. 2019. S. 29-33.[Gryaznov A.O., Tarasyan V.S. Fuzzy controllers for traffic control at an intersection // Youth in Science: New arguments. Collection of scientific works of the X International Youth Competition. Executive editor A.V. Gorbenko. 2019.pp. 29-33. (In Russ)]
9. Kayashev A.I., Emekeev A.A., Sagdatullin A.M. Avtomatizaciya elektroprivoda nasosnoj stancii na osno-ve mnogomernogo nechetkogo logicheskogo regulyatora // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti. 2014. № 4. S. 30-33.[Kayashev A.I., Emekeev A.A., Sagdatullin A.M. Automation of an electric drive of a pumping station based on a multidimensional fuzzy logical controller // Automation, telemechanization and communication in the oil industry. 2014. No.4. pp. 30-33. (In Russ)]

10. Kulikova I.V. Postroenie geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadach optimizatsii s razlichnymi ogra-nicheniyami dlya parametrov // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2020. № 2. pp. 40-44.[Kulikova I.V. Construction of a genetic algorithm for solving optimization problems with various constraints for the parameters // *Modern science-intensive technologies*. 2020. No. 2. pp. 40-44. (In Russ)]
11. Kulikova I.V. Procedura avtomaticheskogo sinteza nechetkih regulyatorov tipa Takagi-Sugeno-Kanga. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii № 2020613003. – Zaregistrovano v reestre programm dlya EVM 06 marta 2020.[Kulikova I.V. The procedure for automatic synthesis of fuzzy controllers of the Takagi-Sugeno-Kanga type. Certificate of state registration No. 2020613003. - Registered in the register of computer programs on March 06, 2020. (In Russ)]
12. Legotkina T.S., Hizhnyakov YU.N. Adaptivnoe nechetkoe upravlenie neftegazovogo separatora dozhimnoj nasosnoj stancii // *Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie*. 2016. № 8. S. 54-59.[Legotkina TS, Khizhnyakov Yu.N. Adaptive fuzzy control of the oil and gas separator of the booster pump station // *Neurocomputers: development, application*. 2016. No. 8. pp. 54-59. (In Russ)]
13. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. SPb. : BHV-Peterburg, 2005. 736 s.[Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. SPb. : BHV-Petersburg, 2005.736 p . (In Russ)]
14. Linenko A.V., Tuktarov M.F., Bajnazarov V.G. Nechetkaya sistema upravleniya lineynym elektroprivodom zernoochistitel'noj mashiny // *Dostizheniya nauki - agropromyshlennomu proizvodstvu materialy LV mezhdunarodnoj nauchno-tekhneskoj konferencii*. FGBOU VO «Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj ag-rarnyj universitet». 2016. S. 205-210.[Linenko A.V., Tuktarov M.F., Baynazarov V.G. Fuzzy control system of the linear electric drive of the grain cleaning machine // *Achievements of science - for agro-industrial production materials of the LV international scientific and technical conference*. FSBEI HE "South Ural State Agrarian University". 2016.pp. 205-210 (In Russ)]
15. Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya: Uchebnik / Pod red. N.D. Egupova. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 744 s. [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: Textbook / Ed. N. D. Egupova. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2001.744 p., (In Russ)]
16. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Sultanov R.G., Solov'eva O.I. Sintez nechetkogo regulyatora s zadannoj mnogomernoj staticheskoy harakteristikoj // *Elektronnyj nauchnyj zhurnal Neftegazovoe delo*. 2015. № 1. S. 245-260.[Muravyova E.A., Soloviev K.A., Sultanov R.G., Solovyova O.I. Synthesis of a fuzzy controller with a given multidimensional static characteristic // *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2015. No. 1. pp. 245-260. (In Russ)]
17. Pervushina N.A., Donovskij D.E., Hakimova A.N. Razrabotka metodiki sinteza nejro-nechetkogo regulyato-ra s nastrojkoj geneticheskim algoritmom // *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antej"*. 2018. № 4 (27). S. 82-90.[Pervushina N.A., Donovsky D.E., Khakimova A.N. Development of a synthesis technique for a neuro-fuzzy controller with tuning by a genetic algorithm // *Bulletin of the Concern VKO "Almaz - Antey"*. 2018. No. 4 (27). pp. 82-90. (In Russ)]
18. Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Avtomaticheskoe obuchenie nechetkih regulyatorov MISO-tipa. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii № 2014614584. Zaregistrovano v reestre programm dlya EVM 06 marta 2014g.[Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Automatic learning of MISO-type fuzzy controls. State Registration Certificate No. 2014614584. - Registered in the register of computer programs on March 06, 2014. (In Russ)]
19. Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Razrabotka procedury postroeniya nechetkogo regulyatora i ee primenenie dlya upravleniya dvizheniem perevernutogo mayatnika // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2013. № 1 (17). S. 34-42.[Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Development of a procedure for constructing a fuzzy controller and its application to control the motion of an inverted pendulum // *Bulletin of the Ural State University of Railways*. 2013. No. 1 (17). pp. 34-42(In Russ)]
20. Tarasyan V.S., Ten D.O. Optimizatsiya transportnoj infrastruktury pri pomoshchi geneticheskikh algorit-mov // *Innovacionnyj transport*. 2013. № 3 (9). S. 29-32.[Tarasyan V.S., Ten D.O. Optimization of transport infrastructure using genetic algorithms // *Innovative transport*. 2013. No. 3 (9). pp. 29-32. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Куликова Ирина Валерьевна, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины»,
e-mail: ivkulikova@inbox.ru

Information about the author:

Irina V. Kulikova, Senior lecturer, Department of Natural Science, e-mail: ivkulikova@inbox.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.11.2020.

Принята в печать 30.11.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 15.11.2020.

Accepted for publication 30.11.2020.