

Разработка алгоритма настройки адаптивного нечеткого регулятора с двойной базой правил

Е.А. Муравьева

Кафедра автоматизированных технологических и информационных систем
Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета
в г. Стерлитамаке
Стерлитамак, Россия
e-mail: muraveva_ea@mail.ru

Д.С. Радакина

Кафедра автоматизированных технологических и информационных систем
Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета
в г. Стерлитамаке
Стерлитамак, Россия
e-mail: darya.radakina@yandex.ru

Аннотация¹

В ходе написания данной статьи была поставлена цель разработать алгоритм настройки адаптивного нечеткого регулятора с двойной базой правил. Для достижения этой цели разработан нечеткий регулятор, предназначенный для регулирования температуры пара, уходящего от котла. В качестве котлоагрегата рассматривался котел модели БКЗ-75-39ГМА. В ходе написания работы был произведен синтез нечеткого регулятора и его адаптация. На основе проделанной работы был определен алгоритм настройки адаптации нечеткого регулятора.

1. Введение

На сегодняшний день все чаще происходит внедрение искусственного интеллекта в систему управления технологическими объектами [1–12]. В данной работе будет рассматриваться нечеткий регулятор. Нечеткий регулятор представляет собой регулятор, базирующийся на базе нечеткой логики. Принцип действия адаптивного нечеткого регулятора основан на автоматическом изменении нечетких правил управления.

Прежде всего необходимо обосновать выбор именно нечеткого регулятора. В качестве регуляторов также рассматривались ПИ- и ПИД-регуляторы. Но выбор пал именно на нечеткий регулятор (НР), так как ПИД-регулятор не может самостоятельно адаптироваться к параметрическим возмущениям,

возникающим при функционировании сложных технологических объектов.

В основе НР лежит система нечеткого вывода – это процесс получения нечетких заключений о требуемом управлении объектом на основе нечетких условий или предпосылок, представляющих собой информацию о текущем состоянии объекта.

2. Описание алгоритма

При написании данной работы была поставлена цель разработать алгоритм настройки адаптивного нечеткого регулятора с двойной базой правил.

В качестве технологического объекта, для которого будет разрабатываться алгоритм, выбран котлоагрегат модели БКЗ-75-39ГМА. Данный котлоагрегат предназначен для получения перегретого пара температурой 440°C и давлением 3,9 МПа.

Котельная установка – это комплекс устройств, предназначенных для получения водяного пара под давлением. Котельная установка состоит из собственно самого котельного агрегата, производящего водяной пар с заданными давлением и температурой, а также включает в себя ряд вспомогательных устройств, необходимых для приготовления и подачи топлива, питательной воды и воздуха, а также удаления производственных отходов (дымовых газов и зольных остатков топлива). Таким образом, в котле происходит одновременно несколько процессов: нагрев воды, ее испарение и перегрев образовавшегося пара.

Теплоносителем являются продукты сгорания – дымовые газы. Горение топлива происходит в вертикальной топочной камере, образованной экранными трубами. Верхние и нижние концы труб введены в сборные коллекторы. На фронтальной стенке топки на двух ярусах расположены по четыре газо-

Труды Шестой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

мазутных горелки типа ГМУ-10, с помощью которых сжигается топливо. В обогреваемых газами трубах, образующих топку и конвективную шахту, образуется насыщенный водяной пар.

Исходные продукты – вода, воздух, газ. Вода, поступающая в котел, проходит химическую очистку и деаэрацию, и не должна содержать соли, газы. Газовое топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов (метан, этан, пропан, бутан, водород, окись углерода, азот, углекислый газ, кислород). Основным элементом газовой смеси является метан. Это газ без цвета, почти без запаха, практически нерастворим в воде, химически малоактивен. Воздух – в состав воздуха входят:

- азот 78,8%;
- кислород 20,95%;
- инертные газы 0,94%;
- углекислый газ 0,03%.

Готовый продукт – насыщенный пар с температурой 440⁰С, давлением 3,9 МПа, расходом 70 т/ч.

Данный пар в дальнейшем будет использоваться для получения электроэнергии, поэтому важно, чтобы пар имел именно такие значения температуры и давления. Для этого необходимо соблюдать режимную карту работы котлоагрегата. В качестве регулируемого параметра была выбрана температура уходящего от котла пара. Стабилизация температуры пара на отдельных участках и выходе тракта пароперегревателя обеспечивает поддержание минимальной влажности пара, повышает безопасность работы металла, а также экономичность котельной установки.

При адаптации нечеткого регулятора в первую очередь необходимо определить концептуальную модель нечеткого регулятора. Концептуальная модель показывает, какие параметры влияют на регулируемый параметр. Температура пара после I ступени пароперегревателя регулируется с помощью впрыскивающего пароохладителя. Суть работы впрыскивающего пароохладителя заключается в том, что пар, идущий после I ступени пароперегревателя, попадает непосредственно в данный пароохладитель, где происходит впрыск конденсата, который охлаждает данный пар.

Таким образом, на вход нечеткого регулятора будет подаваться температура пара после I ступени пароохладителя, температура конденсата, на выходе нечеткого регулятора будет получена степень открытия клапана подачи конденсата.

Следующим шагом при адаптации нечеткого регулятора является получение модели, которая дает представление о протекании рассматриваемого процесса, в данном случае характеризующая работу впрыскивающего пароохладителя. Регрессионный

анализ – статистический метод исследования. Это наиболее распространенный способ показать зависимость какого-либо параметра от одной или нескольких независимых переменных. Данную модель можно построить, используя регрессионный анализ.

$$y = 3,33 - 1,1 \cdot x_1 - 0,48333 \cdot x_2 - 0,81556 \cdot x_3, \quad (1)$$

где X_1 обозначает температуру пара за I ступенью пароперегревателя $t_{пI}$, X_2 – температура конденсата t_k ; X_3 – степень открытия клапана α ; y – температура пара за II ступенью пароперегревателя $t_{вых}$.

Далее необходимо провести сбор экспертной информации. Сбор экспертной информации представлен анализом существующей информации.

Для анализа информации необходимо описать диапазоны изменения параметров, задействованных в НР. После этого необходимо в каждом диапазоне выбрать 5-7 значений (опорные точки), которые будут непосредственно использованы в расчетах. Максимальное и минимальное значения входов и выходов НР всегда являются опорными точками.

На основе экспертной информации строится таблица опорных точек, которая описывает всю область определения входов и выходов нечеткого регулятора (табл. 1).

Таблица 1
Таблица опорных точек

Входы		Выход
$t_{пI}$	$t_{конденсата}$	α
360	50	20
360	55	40
360	60	60
360	65	80
360	70	100
370	60	20
370	65	40
370	70	60
370	75	80
370	80	100
380	70	20
380	75	40
380	80	60
380	85	80
380	90	100
390	80	20
390	85	40
390	90	60
390	95	80
390	100	100
400	90	20
400	95	40
400	100	60
400	105	80

Далее необходимо определить лингвистические переменные входов и выходов нечеткого регулятора.

Лингвистические переменные входов и выходов нечеткого регулятора описываются диапазоном четких значений и функциями принадлежности для каждого термина.

При описании лингвистических переменных удобнее в данном случае использовать термы треугольной формы, они позволяют получить плавную статическую характеристику. Лингвистические переменные представлены на рис. 1.

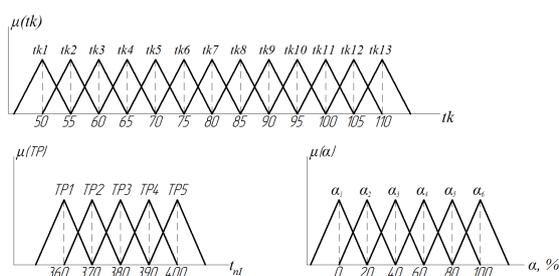


Рис 1. Лингвистические переменные входных и выходных параметров

Следующим шагом является синтез продукционных правил. Строится таблица желаемых значений выходной переменной нечеткого регулятора, то есть степени открытия клапана (табл. 2). Желаемые значения выходной переменной нечеткого регулятора взяты в процессе анализа существующей информации. Использование этих значений позволяет добиться оптимального регулирования параметра. Для каждого значения термина температуры пара $t_{п1}$ и температуры конденсата t_k определяется произвольное желаемое значение степени открытия клапана.

Таблица 2

Таблица желаемых значений

№	$t_{п1}$	t_k	α
1	TP ₁	tk ₁	23
2	TP ₁	tk ₂	36
3	TP ₁	tk ₃	58
4	TP ₁	tk ₄	82
5	TP ₁	tk ₅	98
6	TP ₁	tk ₆	93
7	TP ₁	tk ₇	96
8	TP ₁	tk ₈	99
9	TP ₁	tk ₉	97
10	TP ₁	tk ₁₀	94
11	TP ₁	tk ₁₁	93
12	TP ₁	tk ₁₂	91
13	TP ₁	tk ₁₃	92
14	TP ₂	tk ₁	22
15	TP ₂	tk ₂	21
...
64	TP ₅	tk ₁₂	77
65	TP ₅	tk ₁₃	97

На основе таблицы желаемых значений будут получены продукционные правила. Продукционные правила описывают знания в виде взаимосвязей. Используя лингвистические переменные, можно определить количество получаемых правил, путем перемножения количества термов входных переменных.

Для рассматриваемого объекта будет получено 65 продукционных правил, так как температура пара за I ступенью пароперегревателя $t_{п1}$ имеет 5 термов, температура конденсата t_k 13 термов.

В продукционных правилах определяется базовый и дополнительный консеквент, способ их нахождения представлен в работе [7].

Активизация – это процедура нахождения степени истинности каждого из подзаключений, представленных в базе правил, составляющих консеквенты ядер всех нечетких продукционных правил.

Базовый консеквент – это консеквент, степень истинности которого равна единице.

Дополнительный консеквент – это консеквент, степень истинности которого отлична от единицы.

Рассмотрим первое продукционное правило:

$$\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k1} \text{ then } \alpha = \alpha_2 \text{ and } \alpha = \alpha_3^{0,12}.$$

Из него мы видим, что второй терм является базовым, так как степень истинности его равна единице, третий терм является дополнительным, так как его степень истинности отлична от единицы и равна 0,12.

Полученные продукционные правила представлены ниже:

1. $\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k1} \text{ then } \alpha = \alpha_2 \text{ and } \alpha = \alpha_3^{0,12};$
2. $\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k2} \text{ then } \alpha = \alpha_2^{0,17} \text{ and } \alpha = \alpha_3;$
3. $\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k3} \text{ then } \alpha = \alpha_3^{0,08} \text{ and } \alpha = \alpha_4;$
4. $\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k4} \text{ then } \alpha = \alpha_5 \text{ and } \alpha = \alpha_6^{0,08};$
- ...
65. $\text{If } t_n = T_{n5} \text{ and } t_k = T_{k13} \text{ then } \alpha = \alpha_5^{0,12} \text{ and } \alpha = \alpha_6$

Рассмотрим первое правило: $\text{If } t_n = T_{n1} \text{ and } t_k = T_{k1} \text{ then } \alpha = \alpha_2 \text{ and } \alpha = \alpha_3^{0,12}$. Как видно из следствия этого правила ($\text{then } \alpha = \alpha_2 \text{ and } \alpha = \alpha_3^{0,12}$), у α_2 степень равна 1, у α_3 – 0,12. Это означает, что α_2 – является базовым консеквентом, а α_3 – дополнительным.

По степеням базового и дополнительного консеквентов строится матрица, которая в дальнейшем будет использоваться при написании программного кода, реализующего адаптацию нечеткого регулятора.

Следующим шагом является непосредственно адаптация нечеткого регулятора. Адаптация будет производиться с помощью алгоритма обучения. В качестве алгоритма обучения выбран алгоритм

градиентного спуска, а начальной точкой выбран нечеткий регулятор Мамдани.

Особенность данного регулятора заключается в его легкости в понимании и объяснении выбранного решения.

При синтезе нечеткого регулятора строилась таблица желаемых значений (Таблица 2), но на самом деле входные параметры могут принимать различные значения. Адаптация позволит нечеткому регулятору подстраиваться под эти изменения.

Для этого в первую очередь необходимо определить характеристики полученных ранее продукционных правил. Способ определения данных характеристик представлен в работе [8].

Полученные характеристики:

$$W_1=2,06;$$

$$W_2=2,585;$$

$$W_3=3,054;$$

$$W_4=5,04;$$

$$W_5=5,054;$$

...

$$W_{65}=5,56.$$

Следующим шагом является получение новых продукционных правил. Получить их можно, используя разработанную на начальном этапе модель (1), характеризующую протекание технологического процесса.

В модель вводятся произвольные значения входные параметров и произвольное желаемое значение выходной температуры, а модель самостоятельно находит выходной параметр – необходимую для данных значений степень открытия клапана. Результаты занесены в табл. 3.

Полученные с помощью модели значения будут использоваться для составления новых продукционных правил и получения характеристик этих правил.

Полученные правила и характеристики учитывают более широкий диапазон значений входных и выходных параметров, а значит более точно характеризуют работу котлоагрегата.

Процесс получения правил и характеристик описан в работе [8]. Полученные правила и характеристики представлены в таблице 4.

Полученные продукционные правила и характеристики будут использоваться для программной реализации адаптации нечеткого регулятора. Данный программный код будет включать в себя все этапы синтеза и адаптации нечеткого регулятора.

Таблица 3
Значения, рассчитанные моделью

$t_{п1}$	t_k	$t_{вых}$	α
363	54	362	18
365	56	345	40
368	58	310	86
372	63	327	68
378	59	315	93
376	82	340	46
374	84	270	128
376	92	334	47
371	83	352	24
373	104	300	78
372	102	325	47
377	98	350	25
374	106	322	51
379	108	306	76
373	87	290	100
382	52	343	68
384	59	376	26
387	63	356	52
383	57	335	76
386	67	313	101
392	78	324	89
389	84	370	25
393	88	352	50
394	92	331	75
397	102	309	100
388	108	359	23
396	104	368	25
387	104	337	51
398	107	328	75
392	98	358	36
392	53	369	49
398	61	394	22
391	72	357	51
393	56	347	75
394	78	317	101
396	82	321	96
398	94	375	25
392	87	351	51
397	98	331	76
391	107	364	22
396	108	366	25
394	102	340	58
392	99	325	76
399	109	368	26

Таблица 4

Таблица новых продукционных правил и их характеристик

№ продукц. правила	Хар-ка продукц. правила W*	Новые правила
1	1,0495	If $t_n = T_{n1}$ and $t_k = T_{k1}$ then $\alpha = \alpha_1$ and $\alpha = \alpha_2^{0,099}$
2	2,5175	If $t_n = T_{n1}$ and $t_k = T_{k2}$ then $\alpha = \alpha_2^{0,035}$ and $\alpha = \alpha_3$
3	3,042	If $t_n = T_{n1}$ and $t_k = T_{k3}$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,084}$
4	4,992	If $t_n = T_{n2}$ and $t_k = T_{k3}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,984}$ and $\alpha = \alpha_5$
5	5,013	If $t_n = T_{n2}$ and $t_k = T_{k3}$ then $\alpha = \alpha_5$ and $\alpha = \alpha_6^{0,026}$
6	5,561	If $t_n = T_{n2}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,122}$ and $\alpha = \alpha_6$
7	4,488	If $t_n = T_{n2}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_4$ and $\alpha = \alpha_5^{0,976}$
8	5,591	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,182}$ and $\alpha = \alpha_6$
9	4,639	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,278}$ and $\alpha = \alpha_5$
10	4,6315	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,263}$ and $\alpha = \alpha_5$
11	5,573	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,146}$ and $\alpha = \alpha_6$
12	5,627	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,254}$ and $\alpha = \alpha_6$
13	2,004	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k5}$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,008}$
14	1,973	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k6}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,946}$ and $\alpha = \alpha_2$
15	4,627	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,254}$ and $\alpha = \alpha_5$
16	1,944	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k5}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,888}$ and $\alpha = \alpha_2$
17	1,504	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,008}$ and $\alpha = \alpha_2$
18	2,045	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k6}$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,09}$
19	4,636	If $t_n = T_{n3}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,272}$ and $\alpha = \alpha_5$
20	3,049	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,098}$
21	1,513	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,026}$ and $\alpha = \alpha_2$
22	3,004	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,008}$
23	4,022;	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,044}$ and $\alpha = \alpha_5$
24	2,074	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,148}$
25	5,583	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,166}$ and $\alpha = \alpha_6$
26	5,562	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,124}$ and $\alpha = \alpha_6$
27	4,022	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_4$ and $\alpha = \alpha_5^{0,044}$
28	5,589	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,178}$ and $\alpha = \alpha_6$
29	4,488	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k12}$ then $\alpha = \alpha_4$ and $\alpha = \alpha_5^{0,976}$
30	5,062	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k10}$ then $\alpha = \alpha_5$ and $\alpha = \alpha_6^{0,124}$
31	1,561	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,122}$ and $\alpha = \alpha_2$
32	1,567	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k7}$ then $\alpha = \alpha_1^{0,134}$ and $\alpha = \alpha_2$
33	2,977	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_2^{0,954}$ and $\alpha = \alpha_3$
34	2,074	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,148}$
35	3,03	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k10}$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,06}$
36	3,061	If $t_n = T_{n4}$ and $t_k = T_{k8}$ then $\alpha = \alpha_3$ and $\alpha = \alpha_4^{0,122}$
37	2,964	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k10}$ then $\alpha = \alpha_2^{0,928}$ and $\alpha = \alpha_3$
38	2,098	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k9}$ then $\alpha = \alpha_2$ and $\alpha = \alpha_3^{0,196}$
39	3,977	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_3^{0,954}$ and $\alpha = \alpha_4$
40	4,533	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k12}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,066}$ and $\alpha = \alpha_5$
41	4,548	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k12}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,096}$ and $\alpha = \alpha_5$
42	5,506	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k13}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,012}$ and $\alpha = \alpha_6$
43	4,524	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k12}$ then $\alpha = \alpha_4^{0,048}$ and $\alpha = \alpha_5$
44	4,016	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k11}$ then $\alpha = \alpha_4$ and $\alpha = \alpha_5^{0,032}$
45	5,548	If $t_n = T_{n5}$ and $t_k = T_{k13}$ then $\alpha = \alpha_5^{0,096}$ and $\alpha = \alpha_6$

Далее представлен фрагмент программного кода:

```

«(* фаззификация *)
for i:=1 to 5 do mp[i]:=0.0; end_for; (* вычисление
функций принадлежности входных переменных t *)
for i:=1 to 13 do mk[i]:=0.0; end_for; (* вычисление
функций принадлежности входных переменных t *)
if tp<=up[1] then
    mp[1]:=1.0;

```

else

```

i:=1;
while (tp>up[i])and(i<=5) do i:=i+1;end_while;
if i=6 then
    mp[5]:=1.0;
else
    mp[i]:=(tp-up[i-1])/(up[i]-up[i-1]);
    mp[i-1]:=1.0-mp[i];

```

Разработка алгоритма настройки адаптивного нечеткого регулятора с двойной базой правил

```

        end_if;
end_if;
if tk<=uk[1] then
    mk[1]:=1.0;
else
    i:=1;
    while (tk>uk[i])and(i<=13) do
i:=i+1;end_while;
    if i=14 then
        mk[13]:=1.0;
    else
        mk[i]:=(tk-uk[i-1])/(uk[i]-uk[i-1]);
        mk[i-1]:=1.0-mk[i];
    end_if;»

```

Представленный программный код реализован в среде Unity Pro на языке ST на базе ПЛК Modicon M340.

3. Заключение

В ходе написания данной статьи был изучен нечеткий регулятор, который выбран для регулирования температуры уходящего от котла пара. Кроме того, разработан алгоритм адаптации нечеткого регулятора, который включает в себя этапы:

1. Определение концептуальной модели нечеткого регулятора.
2. Разработка модели, характеризующей протекание рассматриваемого технологического процесса.
3. Синтез нечеткого регулятора. Синтез включает в себя: сбор экспертной информации, построение таблицы опорных точек, определение лингвистических переменных, построение таблицы желаемых значений, синтез полученных производственных правил.
4. Адаптация нечеткого регулятора: получение характеристик полученных на этапе синтеза производственных правил, использование модели, характеризующей протекание технологического процесса, для получения новых характеристик и новых производственных правил.
5. Разработка программного кода, реализующего адаптацию нечеткого регулятора.

Список используемых источников

1. Финаев В.И., Глод О.Д. Нечеткий регулятор для производственных процессов. Известия ЮФУ. Технические науки. 1997. № 1 (4). С. 87-88.
2. Kayashev A., Muravyova, E., Sharipov M., Emekeev A., Sagdatullin A. Verbally defined processes controlled by fuzzy controllers with input/output parameters represented by set of precise terms. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014.

3. Васильев С. Н., Кудинов Ю. И., Пашенко Ф. Ф., Дургарян И. С., Келина А. Ю., Кудинов И. Ю., Пашенко А. Ф. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. ч. 1. Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы. Датчики и системы. 2017. № 1 (210). С. 4-19.
4. Коваленко С.Н., Левенец А.В. Разработка и исследование модели нечёткого регулятора уровня кубовой жидкости ректификационной колонны. В сборнике: Информационные технологии XXI века материалы международной научной конференции. 2013. С. 139-144.
5. Васильев С. Н., Кудинов Ю. И., Пашенко Ф. Ф., Дургарян И. С., Келина А. Ю., Кудинов И. Ю., Пашенко А. Ф. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. ч. 1. Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы. Датчики и системы. 2017. № 1 (210). С. 4-19.
6. Ланграф С.В., Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечётким регулятором. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 316. № 4. С. 168-173.
7. Synthesis methods for fuzzy controller with double base of rules Solovyov K. A., Muravyova E. A. Proceedings of the 4th International conference: Information technologies for intelligent decision-making support (ITIDS'2016). 2016.P. 200-203.
8. Fuzzy controller adaptation Muravyova E.A., Sharipov M.I., Radakina D.S. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Mechanical Engineering" 2017. С. 082033.
9. Muravyova E. Intellectual control of oil and gas transportation system by multidimensional fuzzy controllers with precise terms / Muravyova E., Sagdatullin A., Emekeev A. // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 756. С. 633.
10. Muravyova E., Sagdatullin A., Sharipov M. Modelling of Fuzzy Control Modes for the Automated Pumping Station of the Oil and Gas Transportation System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – 132 (1), 012028.
11. Muravyova E.A. Fuzzification concept using the any-time algorithm on the basis of precise term sets // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, May 2017 / IEEE. - СПб., 2017.
12. Muravyova E.A. Two fuzzy controller synthesis methods with the double base of rules: Reference points and training using // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 16-19 May 2017 / IEEE. - СПб., 2017.