

**Долматов Андрей Анатольевич** – ООО "СКФ Менеджмент Сервисиз (Новороссийск); e-mail: daa50@mail.ru; Краснодарский край, Новороссийск, ул. Свободы, 1; тел.: 89054777623; Старший помощник капитана.

**Chernyshev Yury Olegovich** – Don State Technical University; e-mail: myvnn@list.ru; Rostov-on-Don, Russia, Gagarin square, 1, Russia; phone: +78632738510; the department of automation of productions; dr. of eng. sc.; professor.

**Ventsov Nikolay Nikolaevich** – e-mail: vencov@list.ru; phone: +78632738582; the department of information technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Dolmatov Andrey Anatolevich** – SCF Management Services (Novorossiysk) Ltd; e-mail: daa50@mail.ru; Krasnodar region, Novorossiysk, 1, Svobody street, Russia; phone: +79054777623; Chief Officer.

УДК 581.5:681.3

**В.В. Игнатьев, А.А. Пушнина, И.В. Пушнина, О.Б. Спиридонов, В.И. Финаев**

### **РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА В КОТЕЛ**

*Цель данной работы состоит в исследовании и формализации работы котельного оборудования в условии неполноты исходных данных для разработки модели нечеткого регулятора для управления подачей газа в котел на примере работы водогрейного котла типа КВ-ГМ при обеспечении стабильного значения температуры подогретой воды на выходе котла. Для достижения поставленной цели рассмотрена классификация промышленных котлов. Выполнен аналитический обзор известных работ, в которых рассматривалось решение похожих задач. Анализ показал, актуальным направлением развития систем управления котлоагрегатами является применение методов искусственного интеллекта, но задаче управления расходом газа в водогрейных котлах уделено ещё недостаточное внимание. Рассмотрено устройство и принцип работы котла типа КВ-ГМ, физическая модель котлоагрегата, позволяющая из уравнения теплового баланса определять пределы требуемого расхода газа, воздуха и рассчитывать коэффициент полезного действия. При задании выходной переменной в виде нечеткого интервала, определяется нечеткий интервал расхода газа и определено идеальное соотношение расхода газа к количеству воздуха. При разработке нечеткого регулятора определены лингвистические переменные «ошибка управления», «скорость изменения ошибки», «угол поворота исполнительного органа», параметры базовых множеств и построены функции принадлежности нечетких переменных. Экспертами заданы правила принятия решений. Разработана структурная схема нечеткого регулятора в FIS-редакторе MATLAB, структурная схема системы управления в Simulink и выполнено моделирование в статистическом режиме котла, при подаче скачкообразного управляющего воздействия и при наличии возмущений. Применение нечеткого регулятора обеспечивает устойчивость управления, в отличие от применения систем управления, построенных на методах классической теории автоматического управления.*

*Газовый котел; подогрев воды; управление; неопределённость; принятие решений; моделирование; алгоритмизация; имитация.*

**V.V. Ignatyev, A.A. Pushnina, I.V. Pushnina, O.B. Spiridonov, V.I. Finaev**

### **DEVELOPMENT OF FUZZY CONTROLLER FOR FUEL SUPPLYING CONTROL IN BOILER**

*The purpose of this paper is to analyze and formalize the operation of the water boiler plant in the condition of the initial data incompleteness for development of a fuzzy controller model to control the gas supply to the boiler type KV-GM to maintain a stable water temperature at the boiler output.*

The classification of industrial boilers is considered to achieve the goal. A brief analytical review of the papers, in which the solution of similar problems is considered, is carried out. The analysis shows that the urgent direction of development of the boiler control systems is the application of the artificial intelligence methods. At the same time, an insufficient attention is paid to the problem of the gas consumption controlling in water boilers. The construction and operating principle of the KV-GM boiler, the physical model of the boiler, which allows determining the limits of the required gas and air flow from the heat balance equation and calculate the efficiency, are considered. When setting the output variable as a fuzzy interval, a fuzzy interval of the gas flow and an ideal gas-to-air ratio for the boiler's operating process are determined. When developing a fuzzy controller, the linguistic variables "control error", "error rate", "rotation angle of the accusative mechanism", parameters of the base sets and fuzzy variables membership function are defined. Experts define the decision-making rules. A block diagram of the fuzzy controller in the MITLAB FIS editor, a structural diagram of the control system in Simulink are developed. The simulation is performed in the statistical mode of the boiler, when a salutatory control action is applied and in the presence of disturbances. It is shown that the use of a fuzzy controller ensures the stability of control in contrast to the application of the control systems based on the methods of the classical theory of automatic control.

Gasboiler; waterheating; control; uncertainty; making decision; simulation; algorithmization; simulation modeling.

**Введение.** Задача автоматизированного управления котельными агрегатами относится к числу трудноформализуемых задач, так как применять адекватные математические модели для управления подачей топливной смеси в котел невозможно.

Классификация промышленных котлов показана на рис. 1. По применяемому теплоносителю котлы делят на паровые и водогрейные, а в рамках данной статьи будет рассмотрено управление водогрейными котлами. Отличие водогрейных котлов том, что в них не допускается кипение воды, и они применяются на котельных и ТЭЦ. Режим эксплуатации водогрейных котлов – низкотемпературный; температура воды не достигает значения 115 °С.



Рис. 1. Классификация промышленных котлов

Эффективное решение задач управления методами теории автоматического управления можно при наличии достаточно полной математической модели объекта [1, 2], которая в рассматриваемом случае отсутствует. Отсутствие математической модели определено, прежде всего, тем, что не существует математических моделей, описывающих процесс горения. В лучшем случае можно применять модели теплового баланса, рассчитывать теплоотдачу заданного числа топлива и прочее. Однако, работой котельных агрегатов необходимо управлять и управлять так, чтобы оптимизировать затраты топлива при получении требуемого количества тепла.

При отсутствии адекватных моделей объектов управления достаточно хорошо зарекомендовали себя модели принятия решений, позволяющие создавать нечеткие регуляторы [3], а также в совокупности с известными классическими регуляторами создавать гибридные регуляторы [4].

Под котельным оборудованием или котельными установками [5] понимается комплект инженерных сооружений для превращения химической энергии топлива в тепловую энергию с целью получения горячей воды или пара. Управление котельным агрегатом считается эффективным в том случае, если осуществляется бесперебойное питание котла, при обеспечении безопасного его функционирования и полного сгорания топлива, необходимого для нагрева воды до заданной температуры. Таким образом, очевидна актуальность задачи управления котельным оборудованием в данном аспекте.

Анализ библиографических источников [6–10] подтвердил актуальность применения методов искусственного интеллекта для решения задач управления котельным оборудованием. Выполненный анализ показал, что задаче управления расходом газа в водогрейных котлах уделено недостаточное внимание.

**Устройство и принцип работы котла.** На рис. 2 приведена схема устройства котла типа КВ-ГМ, на примере которого рассматривается решение задачи управления.

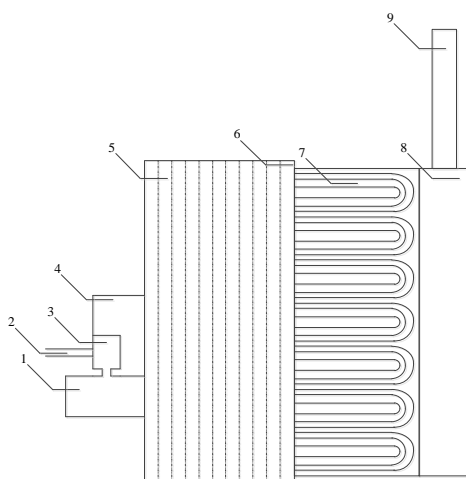


Рис. 2. Схема устройства котла типа КВ-ГМ: 1 – воздушный насос, 2 – газопровод, 3 – устройство приготовления топлива, 4 – горелочное устройство, 5 – экраны, 6 – перегородка в топке, 7 – конвективная часть, 8 – дымосос, 9 – дымовая труба

Работа котельной установки состоит в передаче теплоты воде при сгорании топлива. Газ через газораспределительное устройство (ГРУ) по трубопроводам подается в устройство приготовления топлива, где происходит образование газозвушной смеси. Тепло путем излучения передается теплоносителю-воде в трубах. Оставшееся тепло передается в конвективную часть котла. Затем теплоноситель идет на распределительный узел, откуда вода подается на тепловые нужды.

**Физическая модель котлоагрегата.** Тепловой баланс котла определен формулой [11]:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (1)$$

где  $Q_p^p$  – тепло поданное в котлоагрегат;  $Q_1$  – полезное тепло для образования пара или нагрев воды;  $Q_2$  – потеря тепла с уходящими газами;  $Q_3$  и  $Q_4$  – потери тепла от неполноты сгорания топлива;  $Q_5$  – потеря тепла в окружающую среду;

$Q_6$  – потеря тепла с физическим шлаком. Обычно  $Q_p^p = Q_n^p$ , где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива.

Так как современные котлы работают на газе, то  $Q_4$  и  $Q_6$  равны 0. Пренебрежем значение  $Q_5$ , т.к. потери тепла в окружающую среду не учитываются. Тогда формула (1) будет иметь вид:

$$Q_n^p = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (2)$$

В формуле (2) обе части разделим на  $Q_n^p$  и умножим на 100, тогда:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3, \quad (3)$$

где  $q_1 = \frac{Q_1}{Q_n^p}$  определит значение КПД  $\eta_k$  котла по формуле:

$$\eta_k = q_1 \times 100. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) составим выражение для определения КПД:

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3). \quad (5)$$

Потери тепла с уходящими газами находятся по формуле:

$$Q_2 = (V_{сг} c_{сг} + V_{вн} c_{вн}) t_{yx} - Q_{возд} - Q_{мон} - Q_{ф}, \quad (6)$$

где  $Q_{возд}$  – тепло, уносимое воздухом;  $Q_{мон}$  – физическое тепло топлива;  $Q_{ф}$  – тепло распыливающего пара, равно нулю при использовании газового топлива;  $V_{сг}$  и  $V_{вн}$  – объем сухих газов и водяных паров в продуктах сгорания топлива;  $c_{сг}$  и  $c_{вн}$  – средняя объемная теплоемкость соответственно водяных паров и сухих газов;  $t_{yx}$  – температура уходящих газов.

В рассматриваемом котле нет воздухоподогреватель, поэтому  $Q_{возд} = 0$ ,  $Q_{мон} = 0$ , тогда из формулы (3) получим:

$$q_2 = \frac{(V_{сг} c_{сг} + V_{вн} c_{вн}) t_{yx}}{Q_n^p}. \quad (7)$$

Потери тепла из-за неполноты сгорания газа зависят от вида топки. Для газового котла с камерной топкой значение  $q_3 = 1,5\%$  [11], коэффициент избытка воздуха  $\alpha_m = 1,15$ , который равен

$$\alpha_m = \frac{V_\alpha}{V_0}, \quad (8)$$

где  $V_\alpha$  – действительное количество воздуха,  $V_0$  – теоретически необходимое количество воздуха.

**Модель управления котлоагрегатом с нечеткими параметрами.** Температура воды на входе котла не должна быть ниже  $55^\circ\text{C}$ , исходя из требований санитарных норм РФ, а максимальная температура воды на выходе котла, согласно режимной карте, равна  $95^\circ\text{C}$  и соответствует федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [12]. Исходя из обозначения котла КВ-ГМ-2,5–95, максимальная мощность (теплопроизводительность) данного котла  $Q_k = 2,5$  МВт.

Расход воды через котел является постоянной величиной и принимается равным  $D_k = 43$  м<sup>3</sup>/ч. Расход воды должен быть равным во избежание аварийных ситуаций внутри котла. Существует два способа поддержания постоянного количества воды, проходящей через котел: подкачка необходимого количества воды и использование теплообменника [13]. В рассматриваемой ситуации обеспечение постоянного расхода воды не является функцией СУ и находится за пределами исследуемой системы.

Расход газа  $B$  является регулируемой величиной. Расход газа зависит от текущей нагрузки, то есть теплопроизводительности. Величина  $B$  влияет на расход воздуха  $V$ . Расход газа определяется по формуле:

$$B = \frac{Q_k \cdot 10^6}{q} \text{ [нм}^3\text{/ч]}, \quad (9)$$

где  $Q_k$  – теплопроизводительность котлоагрегата, ккал/ч;  $q$  – удельная объемная теплотворность топлива, ккал/м<sup>3</sup>. Для природного газа  $q \approx 8000$  ккал/м<sup>3</sup>.

Отношение (9) показывает закон изменения расхода газа относительно изменения теплопроизводительности котла.

В свою очередь разница температур на выходе котла  $T_{\text{вых}}$  и на входе  $T_{\text{вх}}$  показывает изменение теплопроизводительности. Зависимость данных величин определяется следующей формулой:

$$Q_k = D_k \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (10)$$

где  $D_k = 43$  м<sup>3</sup>/ч.

В зависимости от расхода газа меняется расход воздуха, необходимого для приготовления топливно-воздушной смеси. На 1 Гкал/ч газа приходится 1110 м<sup>3</sup>/Гкал воздуха.

$$V_0 = Q_k \cdot 1110 \text{ [нм}^3\text{/ч]}, \quad (11)$$

где  $V_0$  – расход воздуха.

Однако в реальных условиях для обеспечения максимального сгорания топлива необходимо подавать воздуха значительно больше, чем теоретически необходимо. Это объясняется несовершенством организации процессов горения топлива в топках и особенно неполным смешиванием газа и воздуха. Вследствие чего, часть воздуха не участвует в горении, и это приводит к неполноте сгорания топлива и выбросу большого количества СО в атмосферу.

В связи с вышесказанным существует коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , который представляет собой отношение действительного количества необходимого для получения топливно-воздушной смеси воздуха  $V_0$  к расчетному количеству необходимого количества воздуха:

$$\alpha = \frac{V_0}{V_0}. \quad (12)$$

Для камерных горелок этот коэффициент принимается равным  $\alpha = 1,5$  % [11]. Учитывая вышесказанное, получаем формулу для определения  $V_0$ :

$$V_0 = 1665 \cdot Q_k \text{ [нм}^3\text{/ч]}. \quad (13)$$

Переменная  $T_{\text{вых}}$  – нечеткий интервал, который задается экспертами с учетом данных режимной карты котла КВ-ГМ-2,5-9,5 (рис. 3).

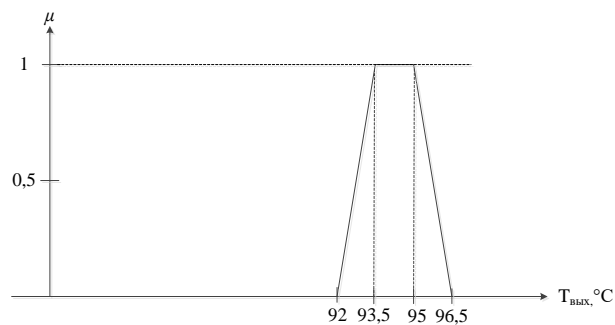


Рис. 3. Вид функции принадлежности нечеткого интервала «температура на выходе котла»

Значения расхода газа  $B$ , как нечеткого интервала, можно определить по значениям температуры входа  $T_{ex}$ . Учитывая, что  $B$  является нечетким интервалом, формула (9) примет следующий вид:

$$\tilde{B} = \frac{\tilde{Q}_k \cdot 10^6}{q}, \quad (14)$$

где  $\tilde{Q}_k$  - нечеткий интервал «теплопроизводительность котла», ккал/ч;  $q$  – удельная объемная теплотворность топлива, ккал/м<sup>3</sup>.

Так как теплопроизводительность котла также является нечетким интервалом, то формула (10) примет вид:

$$\tilde{Q}_k = D_k \cdot (T_{обх} - \tilde{T}_{ex}), \quad (15)$$

где  $\tilde{T}_{ex}$  - нечеткий интервал «температура входа».

Из (14)–(15) следует, что

$$\tilde{B} = \frac{D_k \cdot (T_{обх} - \tilde{T}_{ex}) \cdot 10^6}{q}. \quad (16)$$

При разных значениях  $T_{ex}$  можно определить разные значения  $B$ . По экспертным данным температура входа котла может меняться в пределах [55 °С, 75 °С]. Зададим  $T_{ex}$  также в виде нечетких интервалов для выполнения исследований. Результаты заданий приведены в табл. 3.

Таблица 3

Варианты задания	Параметры нечеткого интервала $T_{ex}$			
	$\underline{T}_{ex} - \alpha$	$\underline{T}_{ex}$	$\overline{T}_{ex}$	$\overline{T}_{ex} + \beta$
1	51	53	55	57
2	56	58	60	62
3	61	63	65	67
4	66	68	70	72
5	71	73	75	77

На основании полученных данных можно рассчитать расход газа, как нечеткий интервал по формуле (16) (см. табл. 4).

Таблица 4

$T_{вх}$	$\underline{B} - \alpha$	$\underline{B}$	$\overline{B}$	$\overline{B} + \beta$
$T_{вх1}$	236,5	225,75	215	204,25
$T_{вх2}$	209,63	198,88	188,13	177,38
$T_{вх3}$	182,78	172	161,25	150,5
$T_{вх4}$	155,88	145,13	134,38	123,63
$T_{вх5}$	129	118,25	107,5	96,75

Исходя из формул (9) и (13) можно найти идеальное соотношение расхода газа к количеству воздуха для рабочего процесса котла:

$$V_0 = 13,333 \cdot B. \quad (17)$$

**Разработка нечеткого регулятора.** Известно [14–18], что нечеткие регуляторы эффективны при управлении котлоагрегатами, и, можно сказать, их структуры идентичны. Схема системы управления котлоагрегатом с нечетким регулятором показана на рис. 4.

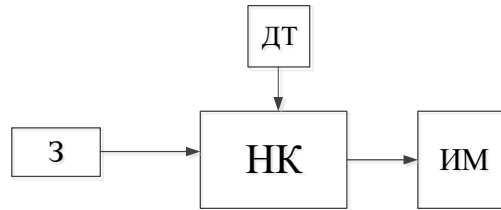


Рис. 4. Структурная схема системы управления: ДТ – датчик температуры, З – задание, ИМ – исполнительный механизм, НК – нечеткий контроллер

Входными параметрами нечеткого контроллера являются ошибка управления  $\varepsilon$  и скорость изменения ошибки  $\dot{\varepsilon}$ . Выходным параметром контроллера является угол поворота  $\varphi$ . Параметры  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  и  $\varphi$  представляют собой лингвистические переменные (ЛП) «ошибка управления», «скорость изменения ошибки», «угол поворота» соответственно.

Для ЛП  $\varepsilon$  зададим терм-множество  $T(\varepsilon) = \{NL - \text{«большая отрицательная»}, NM - \text{«средняя отрицательная»}, NS - \text{«маленькая отрицательная»}, ZR - \text{«ноль»}, PS - \text{«маленькая положительная»}, PM - \text{«средняя положительная»}, PL - \text{«большая положительная»}\}$ . Причем значению «-1» соответствует ошибка в  $-40^\circ\text{C}$ , а значению «1» -  $40^\circ\text{C}$ .

Для ЛП  $\dot{\varepsilon}$  зададим терм-множество  $T(\dot{\varepsilon}) = \{NL - \text{«большая отрицательная»}, NM - \text{«средняя отрицательная»}, NS - \text{«маленькая отрицательная»}, ZR - \text{«ноль»}, PS - \text{«маленькая положительная»}, PM - \text{«средняя положительная»}, PL - \text{«большая положительная»}\}$ .

Для ЛП  $\varphi$  зададим терм-множество  $T(\varphi) = \{NL - \text{«очень маленький»}, NM - \text{«маленький»}, NS - \text{«не очень маленький»}, ZR - \text{«средний»}, PS - \text{«не очень большой»}, PM - \text{«большой»}, PL - \text{«очень большой»}\}$ . Причем за нулевое положение угла поворота принимается значение  $45^\circ$ , значению «-1» соответствует  $0^\circ$ , а значению «1» соответствует угол  $90^\circ$ .

Вид функций принадлежности (ФП) ЛП  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  и  $\varphi$  идентичен, и представлен на рис. 5.

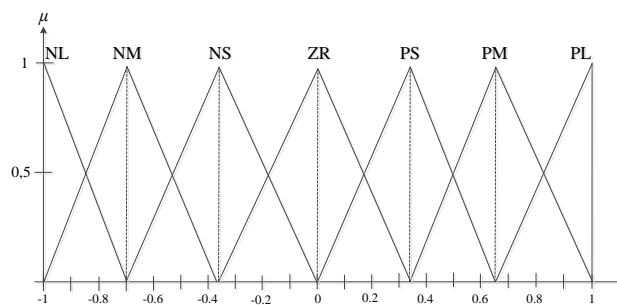


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистических переменных нечеткого регулятора

База правил нечеткого регулятора приведена в табл. 5.

Таблица 5

$\begin{matrix} \cdot \\ \xi \\ \varepsilon \end{matrix}$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR

Моделирование нечеткого регулятора осуществляется в среде MATLAB [19, 20]. Структурная схема нечеткого регулятора в FIS-редакторе MATLAB представлена на рис. 6.

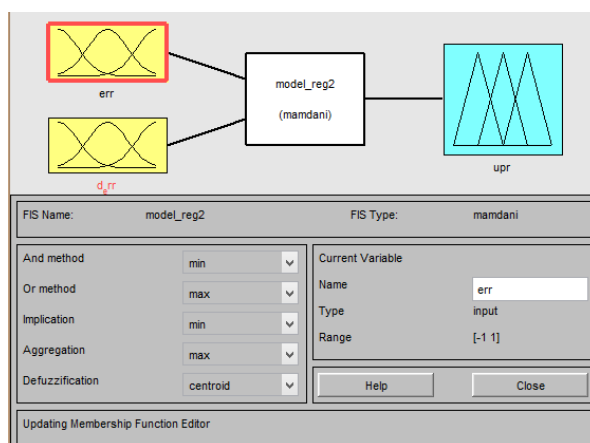


Рис. 6. Структурная схема нечеткого регулятора в FIS-редакторе MATLAB

Разрабатываемая система управления котлоагрегатом должна выполнять следующие задачи: обрабатывать задание, как результат изменения нагрузки котла, которая задается оператором; обрабатывать изменяющиеся во времени возмущения; обрабатывать изменения параметров котла, как результат, например, некачественного топлива, загрязненных труб и т.д.

Структурная схема системы управления в Simulink показана на рис. 7. Результаты моделирования функционирования котла без возмущений представлены на рис. 8.

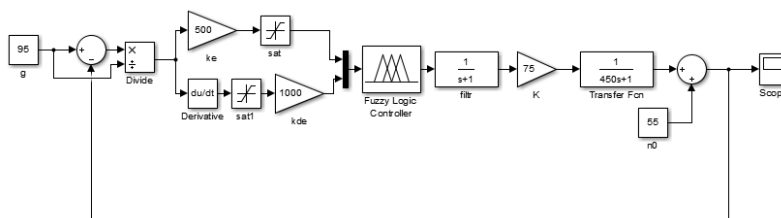


Рис. 7. Структурная схема системы управления в Simulink



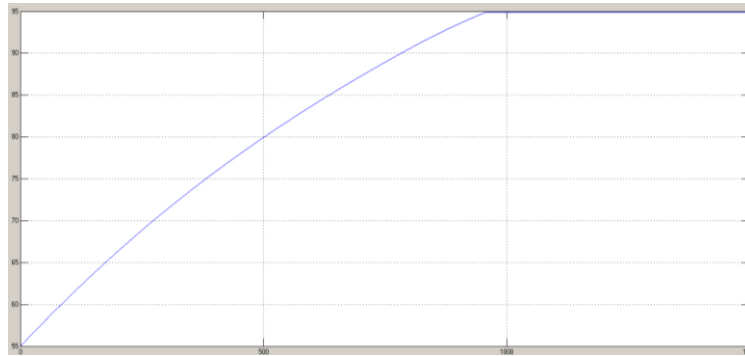


Рис. 8. Переходный процесс объекта управления при нормальных условиях

В разное время года нагрузка на котел разная, следовательно, заданная температура может изменяться в некоторых пределах. На рис. 9 показано скачкообразное изменение задания температуры во времени. На рис. 10 показан график переходного процесса, свидетельствующий, что нечеткий регулятор «отработал» задание за достаточно короткий отрезок времени.

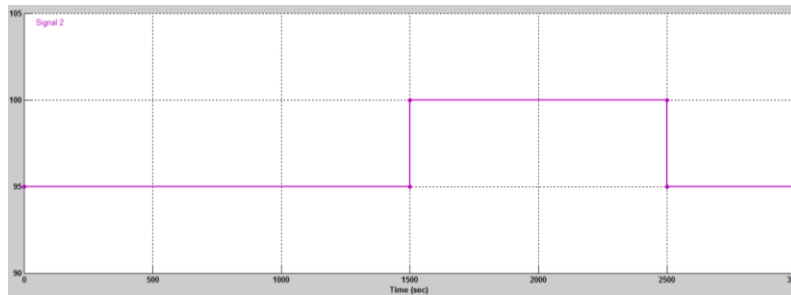


Рис. 9. График изменения заданного значения температуры от времени

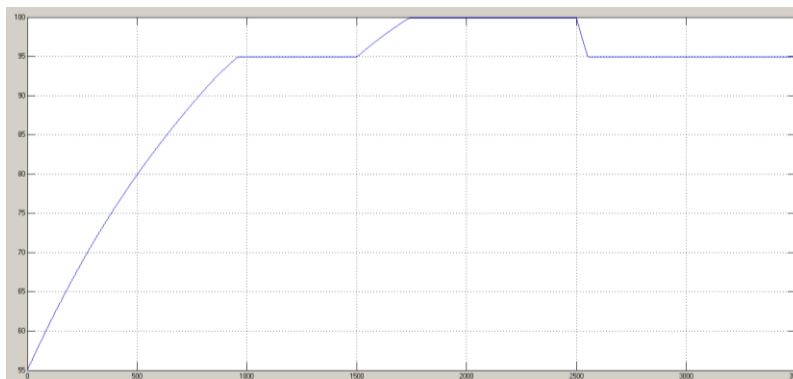


Рис. 10. Переходный процесс объекта управления

При работе котла могут появиться непредвиденные возмущения, отрицательно влияющие на функционирование котла. На рис. 11 показана схема звена возмущений, составленная в Simulink, а на рис. 12 приведен график изменения значений возмущений. Результаты моделирования отображены на рис. 13.

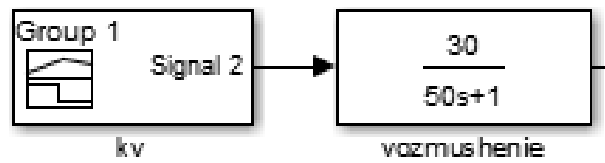


Рис. 11. Звено возмущений в Simulink

Из рис. 13 следует, что нечеткий регулятор решает задачу «отработки» возмущения, т.е. стабилизирует значение температуры на выходе котлоагрегата.

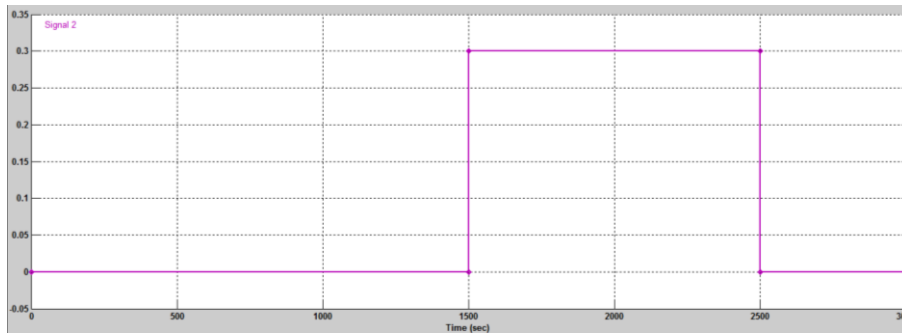


Рис. 12. График изменения коэффициента возмущения

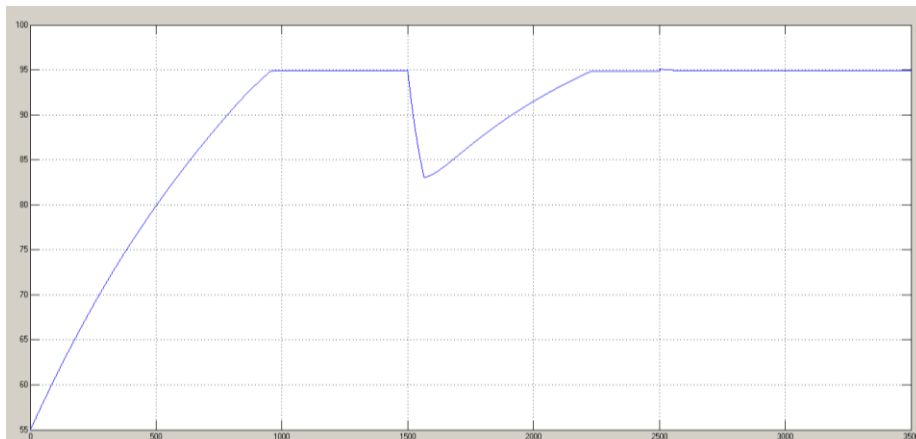


Рис. 13. Переходный процесс ОУ при изменяющихся во времени возмущениях

Также выполнено моделирование, показывающее работу регулятора при изменяющихся параметрах котла во времени в результате старения оборудования. Показано, что система управления котлоагрегатом обрабатывает изменяющиеся параметры котлоагрегата с небольшой ошибкой.

**Выводы.** Разработанный в данной статье алгоритм синтеза нечеткого регулятора для управления подачей топлива (газа) в котлоагрегат (на примере работы котла КВ-ГМ) и выполненное имитационное моделирование показали, что применение нечеткого регулятора обеспечивает, в отличие от систем управления, построенных на методах классической теории автоматического управления, устойчивость управления при любых возмущениях и при естественном старении оборудования котлоагрегата без выполнения требований дополнительной настройки регулятора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Изд-во "Профессия", 2003. – 752 с.
2. *Красовский А.А. и др.* Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. 1. – 400 с.
3. *Соловьев В.В., Финаев В.И.* Методика синтеза адаптивного нечеткого регулятора для объекта с неопределенной моделью // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 78-83.
4. *Игнатьев В.В.* Метод синтеза систем гибридного управления на основе объединения классической и нечеткой моделей объекта: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01; 05.13.06. – Ростов-на-Дону: Библиотека ДонГТУ, 2011.
5. Котельные установки. – <http://enmh.ru/article/171-kotelnye-ustanovki.html>.
6. *Шушур А.Н., Данышина Т.Э.* Нечеткое управление впрысками в пароводяной тракт прямооточного котла ТЭС // Штучный интеллект. – 2012. – № 4. – С. 522-527.
7. *Владыко А.Г.* Разработка и исследование моделей систем управления параметрами котлоагрегата на основе математического аппарата теории нечетких множеств: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Комсомольск-на Амуре: Гос. тех. ун-т., 2000. – 24 с.
8. *Горикова К.Л.* Синтез нечеткого регулятора для объекта управления с чистым запаздыванием // Наука и современность. – 2012. – Вып. № 15-1. – С. 64-77.
9. *Загородних Н.А.* Автоматизация процесса управления пиковым теплоисточником в комбинированной системе теплоснабжения в условиях воздействия внешних возмущающих факторов с использованием нечетких алгоритмов: автореферат диссертации: 05.13.06. – <http://tekhnosfera.com/avtomatizatsiya-protsesta-upravleniya-pikovym-teploistochnikom-v-kombinirovannoy-sisteme-teplosnabzheniya-v-usloviyah-voz> (дата обращения 4.04.2017).
10. *Abdur Rohman, Bitopan Kakati, Riddhiman Saikia, Jamini Das, Amarjyoti Goswami, Anilesh Dey.* Automation of boiler temperature and water level control using fuzzy logic // Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016: International Conference on the 6-8 April 2016.
11. *Павлов И.И., Федоров М.Н.* Котельные установки и тепловые сети: учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Строиздат, 1977.
12. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ. – [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15234](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234) (дата обращения 18.04.2017).
13. *Григорьев В.А. и др.* Краткий справочник по теплообменным аппаратам. – М.: ВО «Агропромиздат», 1987.
14. *Гостев В.И.* Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.
15. *Shizhong Yang, Chunjiang Qian, Weisong Tian.* Nonlinear adaptive control based on parameter identification for a boiler system // In 53rd ISA POWID Symposium. – 2010. – Vol. 483. – P. 82-93.
16. *Sha Wen, Jiang Yong Cheng.* The Research and Application on Intelligent Control in Boiler Combustion System // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 23. – P. 167-173.
17. *Simna Surendran, Vimal Kumar.* Neural Network Based PI Controller Parameter Calculation on a Boiler Drum Level System // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 24. – P. 1616-1622.
18. *Коберси И.С., Абдулмалик С., Игнатьев В.В.* Сравнение нечеткого и контроля уровня нефти // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 253-260.
19. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.
20. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MAtLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.

## REFERENCES

1. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [The theory of automatic control systems]. 4 th ed. St. Petersburg: Izd-vo "Professiya", 2003, 752 p.
2. *Krasovskiy A.A. i dr.* Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied control theory: Optimization approach in the theory of management], ed. by A. Kolesnikova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000. Part 1, 400 p.

3. Solov'ev V.V., Finaev V.I. Metodika sinteza adaptivnogo nechetkogo regulatora dlya ob"ekta s neopredelennoy model'yu [Technique of synthesis of the adaptive fuzzy regulator for object with uncertain model], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 78-83.
4. Ignat'ev V.V. Metod sinteza sistem gibridnogo upravleniya na osnove ob"edineniya klassicheskoy i nechetkoy modeley ob"ekta: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method of synthesis of hybrid control systems by combining classical and fuzzy models of the object. Cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.01; 05.13.06. Rostov-on-Don: Biblioteka DonGTU, 2011.
5. Kotel'nye ustanovki [Boiler installations]. Available at: <http://enmh.ru/article/171-kotelnye-ustanovki.html>.
6. Shushura A.N., Dan'shina T.E. Nechetkoe upravlenie vpryskami v parovodyanoy trakt pryamotochnogo kotla TES [Fuzzy control injections in the water-steam circuit once-through boiler thermal power plant], *Shtuchniy intelekt* [Artificial intelligence], 2012, No. 4, pp. 522-527.
7. Vladyko A.G. Razrabotka i issledovanie modeley sistem upravleniya parametrami kotloagregata na osnove matematicheskogo apparata teorii nechetkikh mnozhestv: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The development and study of model parameters of the boiler unit on the basis of mathematical apparatus of theory of fuzzy sets: the author's abstract. Cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.18. Komsomol'sk-na Amure: Gos. tekhn. un-t., 2000, 24 p.
8. Gorshkova K.L. Sintez nechetkogo regulatora dlya ob"ekta upravleniya s chistym zapazdyvaniem [Synthesis of a fuzzy controller for the control object with pure delay], *Nauka i sovremennost'* [Science and Modernity], 2012, Issue No. 15-1, pp. 64-77.
9. Zagorodnikh N.A. Avtomatizatsiya protsessa upravleniya pikovym teploistochnikom v kombinirovannoy sisteme teplosnabzheniya v usloviyakh vozdeystviya vneshnikh vozmushchayushchikh faktorov s ispol'zovaniem nechetkikh algoritmov: avtoreferat dissertatsii [Process automation control peak heat source in the combined heat supply system in conditions of influence of external disturbing factors using fuzzy algorithms: thesis]: 05.13.06. Available at: <http://tekhnosfera.com/avtomatizatsiya-protsesta-upravleniya-pikovym-teploistochnikom-v-kombinirovannoy-sisteme-teplosnabzheniya-v-usloviyah-voz> (accessed 4 April 2017).
10. Abdur Rohman, Bitopan Kakati, Riddhiman Saikia, Jamini Das, Amarjyoti Goswami, Anilesh Dey. Automation of boiler temperature and water level control using fuzzy logic, *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016: International Conference on the 6-8 April 2016*.
11. Pavlov I.I., Fedorov M.N. Kotel'nye ustanovki i teplovye seti: uchebnik dlya tekhnikumov [Boiler plants and heat networks: the textbook for technical schools]. 2nd ed. Moscow: Stroizdat, 1977.
12. Federal'nyy zakon «O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov» ot 21.07.1997 № 116-FZ [Federal law "On industrial safety of hazardous production facilities" from 21.07.1997 № 116-FZ]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15234](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234) (accessed 18 April 2017).
13. Grigor'ev V.A. i dr. Kratkiy spravochnik po teploobmennym apparatam [Quick reference heat-exchange apparatus]. Moscow: VO «Agropromizdat», 1987.
14. Gostev V.I. Nechetkie regulatory v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Kiev: Radioamator, 2008, 972 p.
15. Shizhong Yang, Chunjiang Qian, Weisong Tian. Nonlinear adaptive control based on parameter identification for a boiler system, *In 53rd ISA POWID Symposium*, 2010, Vol. 483, pp. 82-93.
16. Sha Wen, Jiang Yong Cheng. The Research and Application on Intelligent Control in Boiler Combustion System, *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 23, pp. 167-173.
17. Simna Surendran, Vimal Kumar. Neural Network Based PI Controller Parameter Calculation on a Boiler Drum Level System, *Procedia Technology*, 2016, Vol. 24, pp. 1616-1622.
18. Kobersi I.S., Abdulmalik S., Ignat'ev V.V. Sravnenie nechetkogo i kontrolya urovnya nefi [Compare between flc and pid regulators in the oil level control task], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 253-260.
19. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2007, 288 p.
20. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MAtLAB i FuzzyTECH [Fuzzy modeling in MAtLAB and FuzzyTECH]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Я.Е. Ромм.

**Игнатъев Владимир Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: vova3286@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 89286083925; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; начальник отдела.

**Спиридонов Олег Борисович** – e-mail: oleg.spiridonov@mail.ru; тел.: 88634328099; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; директор.

**Пушнина Анастасия Алексеевна** – e-mail: a.pushnina@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89286133017; кафедра систем автоматического управления; студентка.

**Пушнина Инна Валерьевна** – e-mail: inna.pushnina@gmail.com; тел.: 89286133017; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

**Финаев Валерий Иванович** – e-mail: finaev\_val\_iv@tsure.ru; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Ignatyev Vladimir Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: vova3286@mail.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79286083925; Design Bureau of Modelling and Controlling Systems; head of department.

**Spiridonov Oleg Borisovich** – e-mail: oleg.spiridonov@mail.ru; phone: +78634328099; Design Bureau of Modelling and Controlling Systems; director.

**Pushnina Anastasiia Alekseevna** – e-mail: a.pushnina@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; student.

**Pushnina Inna Valeryvna** – e-mail: inna.pushnina@gmail.com; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; assistant.

**Finaev Valeri Ivanovich** – e-mail: fin\_val\_iv@tsure.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.