

УДК 681.5.013

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ НА ВЫХОДЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

*Д.С. Лысенко\**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается опыт разработки адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора. При разработке адаптивной системы управления решен ряд последовательных задач управления: создание нелинейной модели котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети, исследование частотных характеристик нейросетевой модели, идентификация структуры и параметров объекта управления, синтез типового регулятора, создание алгоритма адаптации параметров типового регулятора на базе аппарата нечеткой логики. В качестве объекта управления рассматривается котел-утилизатор водогрейный (КУВ). Объект управления представлен многомерной термодинамической системой с нелинейными характеристиками. Обучение и верификация нейросетевой модели проведены на данных, полученных в процессе эксплуатации котла. Идентификация структуры и параметров объекта управления осуществлена по данным частотной характеристики нейросетевой модели котла. Алгоритм адаптации параметров типового регулятора содержит наборы параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления. В статье представлены: описание этапов синтеза адаптивной системы управления, результаты исследования нейросетевой модели в частотной области, результаты идентификации объекта управления, расчет параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления, описание нечеткого алгоритма адаптации, результаты моделирования.

**Ключевые слова:** адаптивная система управления, структурная идентификация, параметрическая идентификация, частотные методы идентификации, искусственная нейронная сеть, нечеткая логика, котел-утилизатор водогрейный

### Введение

Как объект управления котел-утилизатор водогрейный (КУВ) является многомерной термодинамической системой с нелинейными характеристиками. Численные методы создания моделей теплообменных аппаратов не всегда применимы из-за высокой вычислительной емкости [1, 2]. Модели сложных технологических процессов могут быть реализованы на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий [3–5]. Результаты исследования [6, 7] посвящены синтезу адаптивных моделей котла-утилизатора КУВ на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий. Однако синтез таких моделей не подразумевает создания традиционного математического описания

---

\* Дмитрий Сергеевич Лысенко, аспирант кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

объекта, что накладывает ряд ограничений на применение их в задачах расчета параметров типового регулятора.

В настоящее время самым распространенным типом регулятора является ПИД-регулятор и его вариации П, ПИ, ПД [8, 9]. В работах [10, 11] приводится информация о системах управления котлоагрегата, реализованных на базе ПИД-регулятора. Относительно небольшое число степеней свободы, присущее линейному ПИД-регулятору, не позволяет получить переходный процесс нужного качества при управлении объектом с нелинейными характеристиками [12]. Нестационарность объекта управления без перенастройки коэффициентов ПИД-регулятора приводит к ухудшению качества управления, что выражается в увеличении энергопотребления и преждевременном износе установки [10].

Замкнутые системы управления, включающие ПИД-регулятор с алгоритмом адаптации, позволяют повысить качество управления. В отличие от алгоритмов [13, 14], в которых параметры регулятора настраиваются эмпирическим способом, алгоритмы адаптации [15, 16] имеют ясную структуру и поддаются обобщению. В основе таких алгоритмов лежит использование модели объекта управления для расчета или адаптации параметров регулятора. Идентификация математической модели имеет ключевую функцию в таких алгоритмах адаптации [17].

Эффективным методом идентификации технологических объектов является идентификация по частотным характеристикам [18]. Для идентификации частотными методами необходимо сформировать гармоническое испытательное воздействие на входе объекта. Как правило, такое воздействие нарушает нормальный режим работы технологической установки [19].

В работе предложено использовать нейросетевую модель котла-утилизатора для исследования характеристик объекта в частотной области и идентификации его структуры и параметров. Независимо от данного исследования схожую методологию идентификации разработали авторы работ [20, 21].

В области автоматического управления аппарат нечеткой логики и нейронные сети оказались подходящим средством для решения нелинейных задач управления, для которых обычные методы управления не дают удовлетворительных с практической точки зрения решений [12, 17]. В системах управления с ПИД-регуляторами аппарат нечеткой логики и нейронные сети нашли широкое применение. В работах [22, 23] представлен вариант гибридно-параллельной системы управления на базе нейронной сети и аппарата нечеткой логики. В работах [24, 25] нейронная сеть и нечеткая логика выступают как инструмент адаптации параметров ПИД-регулятора. В работах [26, 27] на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий были созданы нелинейные аналоги ПИД-регулятора.

При разработке адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора должны быть решены следующие задачи:

- 1) синтез динамической нейросетевой модели котла-утилизатора;
- 2) проведение активного эксперимента над динамической нейросетевой моделью и получение частотных характеристик нейросетевой модели КУВ;
- 3) идентификация структуры и параметров объекта управления по частотным характеристикам нейросетевой модели КУВ;
- 4) расчет параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления;
- 5) синтез алгоритма адаптации параметров типового регулятора, учитывающего текущее состояние объекта управления.

В качестве управляемой величины рассматривается температура сетевой воды на выходе котла-утилизатора. Управляющее воздействие – расход сетевой воды через поверхности нагрева котла. Для регулирования и поддержания заданного значения температуры сетевой воды на выходе котла КУВ используется ПИ-регулятор. Аппарат нечеткой логики используется для реализации алгоритма адаптации параметров ПИ-регулятора.

Инструментом реализации были выбраны пакет прикладных программ MATLAB с библиотеками System Identification, Neural Network Toolbox, Fuzzy Toolbox и пакет моделирования динамических систем Simulink.

### Описание объекта управления

Котлы-утилизаторы используют энергию отработанного газа после газотурбинных установок (ГТУ). Характерных для топливосжигающих котлоагрегатов горелок, систем подготовки и подачи топлива котлы-утилизаторы не имеют [28]. Котлы предназначены для подогрева сетевой воды, которая используется для обеспечения технологических процессов или отопления и горячего водоснабжения промышленных или жилых комплексов [29]. На рис. 1 представлена функциональная схема разрабатываемой системы автоматического управления температурой сетевой воды за котлом с указанием действующих на объект возмущений.

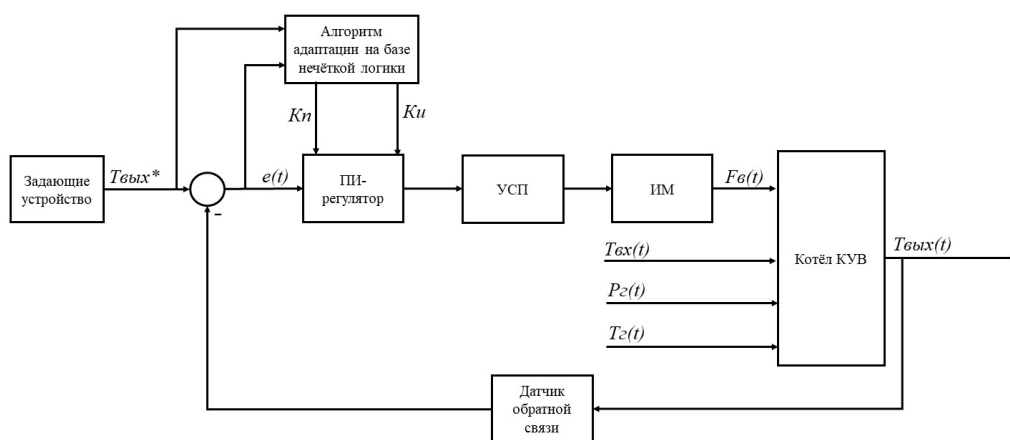


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора:  $T_{вых}(t)^*$  – заданное значение управляемой величины;  $e(t)$  – ошибка управления;  $K_n$ ,  $K_i$  – пропорциональный и интегральный коэффициент регулятора; УСП – управляемый силовой преобразователь; ИМ – исполнительный механизм;  $F_v(t)$  – расход сетевой воды через поверхности нагрева (управляющее воздействие);  $T_{вх}(t)$  – температура сетевой воды на входе в котел (возмущающее воздействие);  $P_g(t)$  – давление газа на входе в котел (возмущающее воздействие);  $T_g(t)$  – температура газа на входе в котел (возмущающее воздействие);  $T_{вых}(t)$  – управляемая величина (температура сетевой воды за котлом)

Котел-утилизатор работает в нескольких режимах [7]: «Разгон ГТУ», «Номинальная нагрузка ГТУ», «Останов ГТУ». В динамических режимах «Разгон ГТУ» и «Останов ГТУ», когда параметры газа изменяются в широком диапазоне, автоматическое регулирование температуры сетевой воды за котлом

нецелесообразно. В режиме «Номинальная нагрузка ГТУ», когда параметры газа вышли на номинальные значения, необходимо осуществлять автоматическое регулирование температуры воды на выходе котла.

### **Адаптивная система управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора**

Разработка адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе из котла включает пять последовательных этапов.

**1. Синтез нейросетевой модели.** В работе [7] описан процесс синтеза нейросетевой модели котла-утилизатора. Выходной переменной нейросетевой модели выступает температура сетевой воды на выходе котла ( $T_{вых}$ ). В качестве входных переменных используются: расход сетевой воды ( $F_e$ ), температура сетевой воды на входе в котел ( $T_{ex}$ ), давление отработанного газа на входе в котел ( $P_c$ ), температура газа на входе в котел ( $T_c$ ). Для обучения и верификации нейронной сети использовались архивные тренды, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора. Нейросетевая модель котла-утилизатора построена на базе двухслойной рекуррентной нейронной сети и представляет собой дискретно-совпадающую модель с частотой дискретизации 1/60 Гц.

**2. Активный вычислительный эксперимент над динамической нейросетевой моделью.** В табл. 1 приводятся значения параметра ( $T_{вых}$ ), которые были взяты в качестве рабочих точек при получении данных частотного отклика объекта. На входе ( $F_e$ ) нейросетевой модели был сформирован сигнал синусоидальной формы на частотах  $\omega$ , равных 0.01, 0.028, 0.083, 0.24, 0.69, 2.1 рад/такт. Значение амплитуды испытательного сигнала было выбрано 5 % от опорного значения. В табл. 1 приводятся результаты расчёта частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора, с указанием опорных значений испытательного сигнала ( $F_e$ ). Параметры испытательного сигнала подобраны экспериментально. Испытательный сигнал позволяет получить тот объем данных частотной характеристики, который необходим для идентификации математической модели объекта управления.

*Таблица 1*

**Результаты расчёта частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора**

| $\omega$ , рад/такт                                                          |    | 0,01      | 0,028    | 0,083    | 0,24    | 0,69    | 2,1     |
|------------------------------------------------------------------------------|----|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| $T_{вых} = 72\text{ }^{\circ}\text{C};$<br>$F_B = 660\text{ м}^3/\text{час}$ | Re | -0,0202   | -0,0202  | -0,0205  | -0,0223 | -0,026  | -0,0222 |
|                                                                              | Im | 0,000039i | 0,00011i | 0,00036i | 0,0018i | 0,019i  | 0,0035i |
| $T_{вых} = 82\text{ }^{\circ}\text{C};$<br>$F_B = 475\text{ м}^3/\text{час}$ | Re | -0,0989   | -0,0986  | -0,0968  | -0,0831 | -0,0178 | -0,0245 |
|                                                                              | Im | 0,0021i   | 0,0060i  | 0,0172i  | 0,0453i | 0,0708i | 0,0068i |
| $T_{вых} = 92\text{ }^{\circ}\text{C};$<br>$F_B = 390\text{ м}^3/\text{час}$ | Re | -0,1249   | -0,1246  | -0,1216  | -0,0994 | -0,0114 | -0,0234 |
|                                                                              | Im | 0,0031i   | 0,0085i  | 0,0243i  | 0,0623i | 0,0811i | 0,0133i |

Обозначения, принятые в табл. 1:  $\omega$  – диапазон частот испытательного сигнала; Re – действительная часть комплексной частотной характеристики; Im – мнимая часть комплексной частотной характеристики. Единицы измерения  $\omega$  задаются в рад/такт. Величина такта времени рассчитывается исходя из частоты дискретизации нейронной сети.

При проведении активного вычислительного эксперимента значение температуры воды на входе котла ( $T_{\text{вх}}$ ) было равно 45 °С, давление ( $P_{\text{г}}$ ) и температура газа ( $T_{\text{г}}$ ) были равны 0,55 кПа и 500 °С. В результате активного вычислительного эксперимента была рассчитана комплексная частотная характеристика для каждого состояния объекта управления. При расчете комплексной частотной характеристики использовался алгоритм [30]. В табл. 1 приводятся результаты расчета частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора для разных значений  $T_{\text{вых}}$ .

**3. Идентификация структуры и параметров объекта управления.** Традиционным при синтезе систем автоматического управления является подход, при котором получают линеаризованную модель объекта управления в виде передаточной функции или модели пространства состояний [31, 32]. Данные комплексной частотной характеристики, полученной в результате активного вычислительного эксперимента над нейросетевой моделью, аппроксимировались передаточными функциями вида

$$W(p) = \frac{b_0}{a_1 p + a_0}, \quad (1)$$

$$W(p) = \frac{b_0 e^{-p\tau}}{a_1 p + a_0}, \quad (2)$$

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3)$$

В качестве инструмента идентификации использовалась библиотека System Identification пакета прикладных программ MATLAB. В качестве алгоритма оптимизации и поиска параметров математической модели был выбран метод последовательного квадратичного программирования.

В табл. 2 приводится оценка схожести ( $L$ ) частотных характеристик нейросетевой модели и структур математических моделей (1) – (3). При оценке схожести ( $L$ ) сравнивались частотные характеристики нейросетевой модели и моделей (1) – (3) в диапазоне частот  $\omega$  от 0,01 до 2,1 рад/такт. Схожесть ( $L$ ) рассчитывается по нормализованной среднеквадратичной ошибке (NRMSE) и показывает процент совпадения между частотными характеристиками нейросетевой модели и моделями (1) – (3). При расчете ( $L$ ) использовалась стандартная функция библиотеки System Identification [33]. По наибольшему значению ( $L$ ) была выбрана модель (3).

Таблица 2

**Сравнение частотных характеристик нейросетевой модели  
и моделей (1)-(3)**

| $T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$ | $L(1), \%$ | $L(2), \%$ | $L(3), \%$ |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| 72                               | 44,8       | 35,9       | 82,9       |
| 82                               | 87,4       | 53,7       | 98,2       |
| 92                               | 90,7       | 58,1       | 97,1       |

При  $T_{\text{вых}} = 72^\circ\text{C}$  объект управления может быть представлен колебательным звеном

$$W_{\text{oy}}(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}.$$

При  $T_{\text{вых}} = 82, 92^\circ\text{C}$  объект управления может быть представлен последовательным соединением двух апериодических звеньев 1-го порядка

$$W_{\text{oy}}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

В табл. 3 приводятся параметры объекта управления (канал «Расход сетевой воды через поверхности нагрева» – «Температура сетевой воды на выходе котла-утилизатора»).

Таблица 3

**Результат идентификации параметров моделей объекта управления**

| $T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$ | $k, ^\circ\text{C}$ | $T, \text{ такт}$ | $\xi$ | $T_1, \text{ такт}$ | $T_2, \text{ такт}$ |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 72                               | -0,22               | 0,6               | 0,23  | —                   | —                   |
| 82                               | -0,098              | —                 | 1,09  | 1,11                | 0,45                |
| 92                               | -0,12               | —                 | 1,36  | 1,77                | 0,15                |

**4. Расчет замкнутой системы управления с изменяющейся полосой пропускания.** Полоса пропускания является важной характеристикой системы. Чем шире полоса пропускания, тем быстрее замкнутая система управления отработает координатное возмущение. Координатное возмущение обусловлено значительно более быстрыми процессами, чем параметрическое возмущение. Поэтому спектральный состав параметрического возмущения принимается существенно более низкочастотным по сравнению с координатным. При наличии на объекте параметрического возмущения, связанного с изменением внутренних параметров, замкнутая система с широкой полосой пропускания будет работать неэффективно или периодически будет терять устойчивость [34]. В работе предложено компенсировать воздействие параметрического возмущения через уменьшение верхней границы полосы пропускания замкнутой системы управления.

Для каждого значения рабочей точки ( $T_{\text{вых}}$ ) были рассчитаны два набора параметров ПИ-регулятора. Каждый набор параметров регулятора соответствует замкнутой системе с разным диапазоном частот полосы пропускания. Верхняя граница полосы пропускания  $\omega_1, \omega_2$  для каждой рабочей точки подобрана экспериментально по результатам анализа ЛАЧХ замкнутой системы управления. Нижние границы полосы пропускания приняты равными нулю. В табл. 4 приведены результаты расчета параметров типового регулятора с указанием верхней границы частоты полосы пропускания ( $\omega_1, \omega_2$ ).

Для расчета параметров регулятора использовалась функция PIDTUNE пакета прикладных программ MATLAB. Апробация разрабатываемых методик настройки параметров регулятора проводилась на нейросетевой модели КУВ. Нейросетевая модель является дискретной моделью, в связи с чем форма реализации регулятора – дискретный ПИ-регулятор. Принцип действия – регулятор обратного действия.

Результаты расчёта параметров типового регулятора

|                                  |       |                      |      |                      |      |                      |
|----------------------------------|-------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|
| $T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$ | 72    |                      | 82   |                      | 92   |                      |
| $\omega_1, \text{рад./такт}$     | 0,21  |                      | 0,43 |                      | 0,55 |                      |
| $K_{\Pi}$                        | 4,72  | Набор параметров № 1 | 3,79 | Набор параметров № 2 | 7,1  | Набор параметров № 3 |
| $K_{\Pi}$                        | 9,44  |                      | 4,95 |                      | 5,95 |                      |
| $\omega_2, \text{рад./такт}$     | 0,084 |                      | 0,11 |                      | 0,12 |                      |
| $K_{\Pi}$                        | 1,89  | Набор параметров № 4 | 0,57 | Набор параметров № 5 | 0,52 | Набор параметров № 6 |
| $K_{\Pi}$                        | 3,78  |                      | 1,14 |                      | 1,04 |                      |

**5. Синтез алгоритма адаптации параметров типового регулятора на базе нечеткой логики.** В качестве входных переменных нечеткого алгоритма адаптации параметров типового регулятора были выбраны: заданное значение ( $T_{\text{вых}}^*$ ) и ошибка управления  $e(t)$ . Выходные переменные нечеткого алгоритма адаптации: пропорциональный коэффициент ( $K_{\text{п}}$ ) и интегральный коэффициент ( $K_{\text{и}}$ ) регулятора. Была осуществлена фаззификация входных и выходных лингвистических переменных. Входная лингвистическая переменная ( $T_{\text{вых}}^*$ ) имеет три терма: диапазон изменения № 1 ( $Tz_1$ ), диапазон изменения № 2 ( $Tz_2$ ), диапазон изменения № 3 ( $Tz_3$ ). В качестве функций принадлежности для всех термов лингвистической переменной была выбрана треугольная функция принадлежности

$$\mu_i(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{при } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{при } b \leq x \leq c; \\ 0, & \text{при } c \leq x. \end{cases} \quad (4)$$

Входная лингвистическая переменная  $e(t)$  имеет три терма: большое отрицательное ( $NL$ ), нормальное ( $N$ ) и большое положительное ( $PL$ ). Для терма ( $NL$ ) была выбрана Z-подобная функция принадлежности

$$\mu_z(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \leq a; \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & \text{при } a < x \leq \frac{a+b}{2}; \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \text{при } \frac{a+b}{2} < x \leq b; \\ 0, & \text{при } b \leq x, \end{cases} \quad (5)$$

для терма ( $N$ ) была выбрана треугольная функция принадлежности, для терма ( $PL$ ) была выбрана S-подобная функция принадлежности

$$\mu_S(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq a; \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{при } a < x \leq \frac{a+b}{2}; \\ 1 - 2 \left( \frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \text{при } \frac{a+b}{2} < x \leq b; \\ 1, & \text{при } b \leq x. \end{cases} \quad (6)$$

Выбор функций параметров  $e(t)$  осуществлялся с учетом рекомендаций [6, 35].

В табл. 5 представлены конечные параметры функций принадлежности. Параметры функции (4) записаны в последовательности  $[a, b, c]$ , параметры функций (5), (6) записаны в последовательности  $[a, b]$ .

Таблица 5

**Координаты функций принадлежности алгоритма адаптации параметров типового регулятора**

| Название входа                         | Диапазон изменения | Координаты функций принадлежности |                    |                    |
|----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Заданное значение ( $T_{\text{вых}}$ ) | 72 ÷ 92 °C         | ( $Tz_1$ )                        | ( $Tz_2$ )         | ( $Tz_3$ )         |
|                                        |                    | [72.0, 77.0, 82.0]                | [77.0, 82.0, 88.0] | [82.0, 87.0, 92.0] |
| Ошибка управления $e(t)$               | -25 ÷ +25 °C       | ( $NL$ )                          | ( $N$ )            | ( $PL$ )           |
|                                        |                    | [-25.0, 0]                        | [-5.0, 0, 5.0]     | [0, 25.0]          |

В качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Сугено [12]. Константы базы правил приводятся в табл. 4. Правила базы имеют следующий вид:

$R_1$ : Если  $(T_{\text{вых}}^* = Tz_1) \wedge (e(t) = NL)$ , то  $K_{\Pi} = 4,72 \wedge K_{\Pi} = 9,44$ ;

$R_2$ : Если  $(T_{\text{вых}}^* = Tz_1) \wedge (e(t) = N)$ , то  $K_{\Pi} = 1,89 \wedge K_{\Pi} = 3,78$ ;

...

$R_9$ : Если  $(T_{\text{вых}}^* = Tz_3) \wedge (e(t) = PL)$ , то  $K_{\Pi} = 0,52 \wedge K_{\Pi} = 1,04$ .

Количество правил определяется произведением количества лингвистических термов всех входных переменных. Это обеспечивает полноту базы правил. В табл. 6 представлена база правил нечеткого алгоритма адаптации параметров типового регулятора.

Таблица 6

**База правил алгоритма адаптации параметров типового регулятора**

| $e(t)$ | $Tz_1$               | $Tz_2$               | $Tz_3$ $Tz_3$        |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $NL$   | Набор параметров № 1 | Набор параметров № 2 | Набор параметров № 3 |
| $N$    | Набор параметров № 4 | Набор параметров № 5 | Набор параметров № 6 |
| $PL$   | Набор параметров № 1 | Набор параметров № 2 | Набор параметров № 3 |

## Вычислительный эксперимент

В результате выполнения всех этапов разработки адаптивной системы управления была разработана замкнутая система управления температурой сетевой воды на выходе котла КУВ. Замкнутая система управления представлена ПИ-регулятором с алгоритмом адаптации параметров на базе нечеткой логики. В качестве модели объекта управления использовалась нейросетевая модель котла-утилизатора. В качестве величины задания ( $T_{вых}^*$ ) использовались равномерно распределенные случайные значения в диапазоне от 72 до 92 °С. Интервал изменения задания – 200 тактов. На рис. 2 приводится структура Simulink-модели, реализующей разработанную систему управления в пакете моделирования динамических систем Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

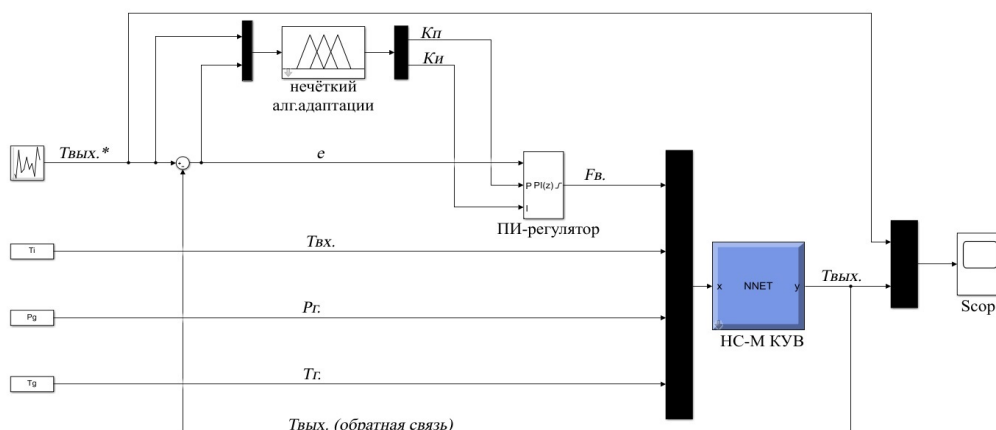


Рис. 2. Simulink-модель контура автоматического регулирования температуры сетевой воды на выходе котла КУВ:  $T_{вых}^*$  – заданное значение управляемой величины;  $e$  – ошибка управления;  $F_{в.}$  – расход сетевой воды через поверхности нагрева (управляющее воздействие);  $T_{вх.}$  – температура воды на входе в котел;  $P_{г.}$  – давление газа на входе в котел;  $T_{г.}$  – температура газа на входе в котел;  $T_{вых.}$  – управляемая величина

При проведении вычислительного эксперимента на входы нейросетевой модели ( $T_{вх.}$ ), ( $P_{г.}$ ), ( $T_{г.}$ ) были поданы реальные значения переменных, снятые при эксплуатации котла в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ». На рис. 3 приводятся данные об изменении переменных  $T_{вх.}$ ,  $P_{г.}$ ,  $T_{г.}$ , которые были использованы при проведении активного вычислительного эксперимента.

На рис. 4 приводятся результаты моделирования замкнутых систем управления с ПИ-регулятором без алгоритма адаптации (ПИ-рег. без АА) и с ПИ-регулятором с алгоритмом адаптации (ПИ-рег. с АА). ПИ-регулятор без алгоритма адаптации имел параметры  $K_{п} = 4.72$ ,  $K_{и} = 9.44$  (набор параметров № 1, запас устойчивости по фазе  $\varphi = 87^\circ$ , максимальный запас устойчивости может быть задан  $\varphi = 90^\circ$ ). Исходя из кривых переходного процесса в некоторых случаях при изменении ( $T_{вых}^*$ ) в замкнутом контуре с ПИ-регулятором без алгоритма адаптации наблюдается перерегулирование и небольшой колебательный процесс. В замкнутом контуре управления с ПИ-регулятором

и алгоритмом адаптации при изменении задания перерегулирование отсутствует, регулятор обрабатывает задание без потери качества управления. В отличие от регулятора с алгоритмом адаптации ПИ-регулятор без алгоритма адаптации более чувствителен к изменению переменных  $T_{вх}$ ,  $P_{г}$ ,  $T_{г}$ .

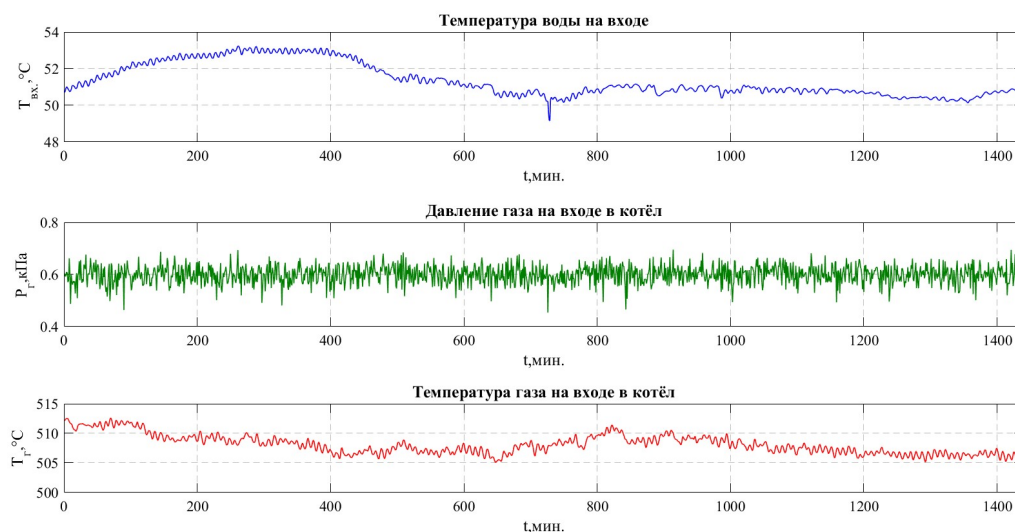


Рис. 3. Данные об изменении переменных  $T_{вх}$ ,  $P_{г}$ ,  $T_{г}$  при эксплуатации котла-утилизатора КУВ в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ»

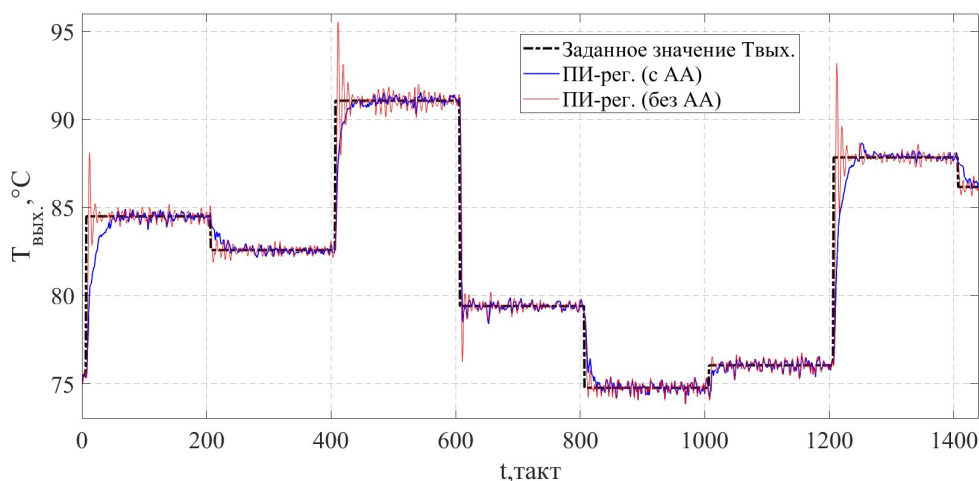


Рис. 4. Результат моделирования замкнутой системы управления при изменении заданного значения ( $T_{вых}^*$ )

## Заключение

На основе синергии традиционных методов теории управления с аппаратом нечеткой логики и нейронных сетей была решена задача управления котлом-утилизатором. В работе была предложена методика идентификации аппроксимирующей передаточной функции (структура и параметры) объекта управления частотными методами без прямого воздействия на установку.

Активный вычислительный эксперимент по получению частотных характеристик был реализован на нейросетевой модели установки. Разработан алгоритм настройки параметров типового регулятора на базе аппарата нечеткой логики. В основе алгоритма лежит принцип взаимосвязи коэффициентов регулятора с граничным значением полосы пропускания замкнутой системы управления. Реализованный алгоритм настройки коэффициентов регулятора имеет ясную структуру и принципы функционирования. По мнению автора, разработанные подходы имеют следующие положительные стороны и ограничения.

*Положительные стороны:*

1. На базе нейросетевых технологий может быть создана динамическая модель теплообменного аппарата с нелинейными характеристиками в условиях отсутствия полной информации об объекте моделирования. Наблюдаемыми могут быть только входы и выходы системы. При этом результаты апробации нейросетевой модели на реальных данных показали приемлемую точность модели [7].

2. Предложенная методика идентификации объекта частотными методами позволяет провести активный эксперимент на модели взамен воздействия на реальную технологическую установку. Схожая методика идентификации была апробирована в сторонних исследованиях, на схожих объектах [20, 21].

3. Предложен алгоритм адаптации параметров типового регулятора, который позволяет учитывать нелинейные свойства объекта управления. Синтез схожих по принципу реализации алгоритмов адаптации параметров типового регулятора на базе нечеткой логики приводится в работах [9, 35]. Однако в предложенных авторами алгоритмах настройка коэффициентов регулятора осуществляется на основе эмпирических знаний. В данной работе принцип настройки коэффициентов регулятора и границы их изменения были привязаны к полосе пропускания замкнутой системы управления и определены более четко.

*Ограничения:*

1. Для синтеза нейросетевой модели необходимы данные для ее обучения. Без данных синтез нейросетевой модели невозможен; соответственно, реализация последующих этапов также невозможна.

2. При выборе рабочих точек для расчета частотных характеристик и проведения вычислительного эксперимента рекомендуется соблюдать ограничение: диапазоны изменения активного воздействия и отклика нейросетевой модели должны укладываться в диапазоны изменения этих параметров в обучающей выборке. В связи с этим при проведении вычислительного эксперимента заданное значение ( $T_{вых}^*$ ) было ограничено диапазоном от 72 до 92 °С – соответствовало диапазону изменения параметра ( $T_{вых}$ ) в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ».

3. В существующей реализации алгоритма адаптации параметров типового регулятора отсутствует функция аналитического расчёта оптимального диапазона полосы пропускания замкнутой системы управления. Результаты расчёта диапазонов полосы пропускания в алгоритме адаптации параметров типового регулятора носят экспериментальный характер и не содержат общих рекомендаций по реализации предложенного алгоритма на других объектах управления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимов А.Г. Синтез нейросетевых структур для моделирования управляемых объектов с распределенными параметрами: Автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.13.01. М.: Московский инженерно-физический институт, 2008. 26 с.
2. Данилушкин И.А. Численно-аналитическая модель теплообмена для потока с переменной скоростью // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI международной конференции. Т. 1. Самара: Офорт, 2019. С. 262–265.
3. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Разработка нейросетевой модели малоразмерного газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 131–144.
4. Дорофеев Е.А., Игнатьев Д.И., Храбров А.Н. Применение искусственных нейронных сетей для моделирования нестационарных аэродинамических характеристик // Аэрокосмические исследования, прикладная механика. Труды МФТИ, 2011. Т. 3, № 3. С. 64–72.
5. Головкин Н.А., О.С. Логунова. Оценка архитектуры искусственных нейронных сетей для моделирования процессов нагрева стальной полосы на агрегате непрерывного горячего цинкования // Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 62 (968). С. 33–39.
6. Лысенко Д.С., Данилушкин И.А. Разработка модели котла-утилизатора на базе аппарата нечеткой логики // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 268–271.
7. Лысенко Д.С., Данилушкин И.А. Динамическая модель котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2020. Вып. 2 (65). С. 59–72.
8. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
9. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78–88.
10. Кулаков Г.Т., Горельшьева М.Л. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика: научно-технический и производственный журнал. 2009. № 4. С. 62–69.
11. Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла // Научный вестник НГТУ. 2014. Т. 55, № 2. С. 36–42.
12. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 798 с.
13. Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера – Николса: учеб.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.
14. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. Pp. 175–185.
15. Бажанов В.Л., Кузьмин А.В., Кузьмин Н.В. Настройка ПИД-регуляторов с помощью метода масштабирования на объектах управления с запаздыванием и на объектах высокого порядка // Автоматизация в промышленности. 2009. № 2. С. 15–20.
16. Барабанов А.Е. Применение метода наименьших квадратов для построения адаптивного оптимального управления линейным динамическим объектом // Автомат. и телемех., 1983. Вып. 12. С. 57–65.
17. Омату С., Халид М., Юсуф Р. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. Пер. Н.В. Батина. Под. ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. ИПРЖР. 2000. 272 с. (Нейрокомпьютеры и их применение).
18. Пьявченко Т.А. Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7. С. 216–219.
19. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов. Автомат. и телемех. Вып. 2, 2014. С. 16–30.
20. Шумихин А.Г., Бояришинова А.С. Применение нейросетевых динамических моделей в задачах параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического

- университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 3. С. 21–37.
21. Шумихин А.Г., Александрова А.С., Мустафин А.И. Параметрическая идентификация технологического объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 26. С. 29–41.
  22. Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А. Система управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом на основе гибридного нейрорегулятора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 209–215.
  23. Игнатьев В.В., Спиридонов О.Б., Курейчик В.М., Ковалёв А.В., Игнатьев А.С. Методы гибридного управления в интеллектуальных системах на основе ПИД и ПИД-Fuzzy регуляторов // Вестник РГРТУ. 2017. № 62. С. 110–118.
  24. Еременко Ю.И., Полеценко Д.А., Глуценко А.И., Фомин А.В. Об оценке применимости различных структур нейронной сети в реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления тепловыми объектами // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3.2 (57). С. 236–241.
  25. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Терёбов Д.С., Евтушенко Е.В. Алгоритм настройки системы нечеткого логического вывода типа Мамдани // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Математика, физика, механика. 2018. Т. 10, № 3. С. 110–118.
  26. Burakov M.V., Kurbanov V.G. Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017. Vol. 12, no. 4. Pp. 1226–1229.
  27. Муравьёва Е.А., Юрасов А.О. Применение нейронных сетей, имитирующих ПИД-регулятор для управления деаэратором // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 2. Т. 16. С. 59–65.
  28. Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. Котельные установки и парогенераторы. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
  29. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
  30. Laub A.J. Efficient Multivariable Frequency Response Computations // IEEE<sup>®</sup> Transactions on Automatic Control, AC-26. 1981. Pp. 407–408.
  31. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. ред. Г.А. Филипова, Ф.Ф. Пашенко. М.: Физматлит, 2013. 448 с.
  32. Ковалёв Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л. Теория автоматического управления: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. 79 с.
  33. Сайт компании MathWorks (MATLAB) [Электронный ресурс]: URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/compare.html> (Дата обращения 03.09.22).
  34. Khobin V.A., Levinskyi M.V. Own motion filters optimization for self-tuning ACS with the technological type of control object // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2016. № 4. Pp. 120–129.
  35. Бураков М.В., Коновалов А.С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора. Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2022 г.*

# ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE WATER TEMPERATURE AT THE OUTLET OF THE WASTE BOILER

**D.S. Lysenko**\*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

**Abstract.** *The experience of developing an adaptive system for controlling the temperature of network water at the outlet of a waste heat boiler is considered. When developing an adaptive control system, a number of sequential control problems were solved: creating a nonlinear model of a waste heat boiler based on a recurrent neural network, studying the frequency characteristics of a neural network model, identification structure and parameters of a control object, synthesizing a typical controller; creating an algorithm for adapting the parameters of a typical controller based on a fuzzy logic. A waste heat boiler is considered as a control object. The control object is represented by a multidimensional thermodynamic system with non-linear characteristics. Training and verification of the neural network model was carried out on the data obtained during the operation of the boiler. Identification of the structure and parameters of the control object is carried out according to the frequency response of the neural network model of the boiler. The algorithm for adapting the parameters of a typical controller contains sets of parameters of a typical controller for different states of the system with different bandwidths. The article presents a description of the stages of synthesis of an adaptive control system, the results of studying a neural network model in the frequency domain, the results of identifying a control object, calculating the parameters of a typical controller for different system states, describing a fuzzy adaptation algorithm, and modeling results.*

**Keywords:** *adaptive control system, structural identification, parametric identification, frequency identification methods, artificial neural network, fuzzy logic, waste heat boiler*

## REFERENCES

1. Trofimov A.G. Synthesis of neural network structures for modeling controlled objects with distributed parameters // abstract of the thesis of a candidate of technical sciences: 05.13.01. M.: Moscow Engineering Physics Institute, 2008. 26 p.
2. Danilushkin I.A. Numerical-analytical model of heat transfers for a flow with a variable speed // Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI international conference. T. 1. Samara: Etching, 2019. Pp. 262–265.
3. Kuznetsov A.V., Makaryants G.M. Development of a neural network model of a small-sized gas turbine engine // Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2016. V. 15, No. 2. Pp. 131–144.
4. Dorofeev E.A., Ignatiev D.I., Khrabrov A.N. The use of artificial neural networks for modeling non-stationary aerodynamic characteristics // Aerospace research, applied mechanics Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology – 2011. Vol. 3, No. 3. Pp. 64–72.
5. Golovko N.A., Logunov O.S. Evaluation of the architecture of artificial neural networks for modeling the heating processes of a steel strip on a continuous hot dip galvanizing unit // Bulletin of NTU “KhPI”, 2012. No. 62 (968). Pp. 33–39.
6. Lysenko D.S., Danilushkin I.A. Development of a waste heat boiler model based on the apparatus of fuzzy logic // Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI international conference. T. 2. Samara: Etching, 2019. C. 268–271.

---

\* Dmitriy S. Lysenko, Postgraduate Student.

7. *Lysenko D.S., Danilushkin I.A.* Dynamic model of a waste-heat boiler based on a recurrent neural network // Bulletin of the Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2020. Issue 2 (65). Pp. 59–72.
8. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
9. *Denisenko V.* PID controllers: principles of construction and modification. Part 1 // Modern automation technologies. 2007. No. 1. Pp. 78–88.
10. *Kulakov G.T., Gorelysheva M.L.* Study of the influence of the quality of superheated steam temperature control on the service life of the metal of the boiler superheater // News of higher educational institutions and energy associations of the CIS // Energy: scientific and technical and production magazine. 2009. No. 4. Pp. 62–69.
11. *Kutsiy N.N., Lukyanov N.D.* Synthesis of a control system for a multiply connected object using a genetic algorithm on the example of a once-through boiler // Scientific Bulletin of NSTU. 2014. V. 55, No. 2. Pp. 36–42.
12. *Pegat A.* Fuzzy modeling and control. M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2015. 798 p.
13. *Vadutov O.S.* Tuning typical regulators according to the Ziegler-Nichols method: a teaching aid. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2014. 10 p.
14. *Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B.* On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. Pp. 175–185.
15. *Bazhanov V.L., Kuzmin A.V., Kuzmin N.V.* Tuning PID controllers using the scaling method on control objects with delay and on high-order objects // Automation in Industry. 2009. No. 2. Pp. 15–20.
16. *Barabanov A.E.* Application of the least squares method for constructing an adaptive optimal control of a linear dynamic plant // Avtomat. i telemekh. 1983. № 12. Pp. 57–65.
17. *Omatu S., Khalid M., Yusuf R.* Neurofeedback and its applications. Book 2. Per. N.V. Batina. Ed. A.I. Galushkina, V.A. Ptichkin. IPRZHR. 2000. 272 p.
18. *Piavchenko T.A.* Method for identifying an industrial facility by its time and frequency characteristics // Izvestia SFU. Technical science. 2010. No. 7. Pp. 216–219.
19. *Aleksandrov A.G., Palenov M.V.* State and development prospects of adaptive PID controllers // Avtomat. i telemekh. 2014, № 2, Pp. 16–30.
20. *Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S.* Application of neural network dynamic models in the problems of parametric identification of a technological object as part of a control system // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2015. No. 3. Pp. 21–37.
21. *Shumikhin A.G., Aleksandrova A.S., Mustafin A.I.* Parametric identification of a technological object in the mode of its operation using the technology of neural networks // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2018. No. 26. Pp. 29–41.
22. *Budko M.B., Budko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A.* Control system for a multirotor unmanned aerial vehicle based on a hybrid neuroregulator // Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2019. V. 19. No. 2. Pp. 209–215.
23. *Ignatiev V.V., Spiridonov O.B., Kureichik V.M., Ignatiev A.V.* Methods of hybrid control in intelligent systems based on PID and PID-Fuzzy controllers // Vestnik RGRTU. 2017, No. 62. Pp. 110–118.
24. *Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I., Fomin A.V.* On assessing the applicability of various structures of a neural network in the implementation of a neural network optimizer of PI controller parameters for controlling thermal objects // Control Systems and Information Technologies, No. 3.2 (57), 2014. Pp. 236–241.
25. *Golosovsky M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S., Yevtushenko E.V.* Algorithm for setting up a Mamdani-type fuzzy inference system // Bulletin of SUSU. Series: Mathematics, Physics, Mechanics. 2018. V. 10, No. 3. Pp. 110–118.
26. *Burakov M.V., Kurbanov V.G.* Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017. Vol. 12, № 4. Pp. 1226–1229.
27. *Muravyova E.A., Yurasov A.O.* Application of neural networks simulating a PID controller to control a deaerator // Electrotechnical and information complexes and systems. 2020. No. 2, V.16. Pp. 59–65.
28. *Lipov Y.M., Tretyakov Y.M.* Boiler plants and steam generators. M.: Regular and chaotic dynamics, 2005. 592 p.
29. *Zykov A.K.* Steam and hot water boilers. M.: Energoatomizdat, 1987. 128 p.

30. *Laub A.J.* Efficient Multivariable Frequency Response Computations // IEEE® Transactions on Automatic Control, AC-26 (1981). Pp. 407–408.
31. Thermal-hydraulic models of power station equipment / Under the general. Ed. by *G.A. Filipova, F.F. Pashchenko*. M.: FIZMATLIT, 2013. 448 p.
32. *Kovalev D.A., Sharyakov V.A., Sharyakova O.L.* Theory of automatic control: textbook / Higher School of Economics SPbGUPTD. St. Petersburg, 2020. 79 p.
33. Website of the company MathWorks (MATLAB) [Electronic resource]: URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/compare.html> (Accessed 09.03.22).
34. *Khobin V.A., Levinskyi M.V.* Own motion filters optimization for self-tuning ACS with the technological type of control object // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2016. № 4. Pp. 120–129.
35. *Burakov M.V., Kononov A.S.* Fuzzy supervisor for PID controller. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy // Information and Control Systems, 2018, no. 5. Pp. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.