

UDC 629.12.056

ARTICLE HISTORY

Received 10.12.2022

Accepted 26.12.2022

Mikhailenko Vladislav Sergeevich¹, Kharchenko Roman Yurievich²,
Leshchenko Valery Vladislavovich³
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com², lvvlvv@ukr.net³

Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers

Михайленко В.С.¹, Харченко Р.Ю.², Лещенко В.В.³
National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com², lvvlvv@ukr.net³

Нечітка методика апроксимації значень параметрів динамічних моделей суднових КОТЛІВ

Abstract – In order to reduce the complexity of the process of calculating the thermal coefficients of the equations of the dynamics of physical processes in ship steam boilers, a new approximation technique is proposed. The methodology is based on the calculation of the values of the coefficients of the parameters of the dynamic equations describing the physical processes in the ship's steam boilers. The calculation was carried out on the three most frequently used thermal load operating modes of the steam boiler (25 %, 50 %, 75 %). The use of the fuzzy algorithm of I. Mamdani in the proposed methodology allows taking into account the nonlinear properties of physical parameters and carrying out their approximation over the entire operating range of the thermal load of ship steam boilers. To implement the fuzzy algorithm of I. Mamdani, fuzzification of boiler load parameters and differential equation coefficients was carried out in the specialized MatLab editor package (Fuzzy Logic Toolbox). The proposed technique demonstrates a high level of adequacy of experimental and theoretical values of heat coefficients during comparative analysis. The methodology allows using the obtained equations in further studies of the properties of marine steam boilers in order to improve their structural, ecological and economic characteristics. It can be noted that the analysis of the equations allows the

calculation of the setting parameters of the PID-regulator in the system of automatic control of the "fuel-air" combustion process.

Анотація – З метою зниження трудомісткості процесу розрахунку теплових коефіцієнтів рівнянь динаміки фізичних процесів у суднових парових котлах запропоновано нову методику апроксимації. Методика заснована на розрахунку значень коефіцієнтів параметрів динамічних рівнянь, що описують фізичні процеси в суднових парових котлах. Розрахунок проведений на трьох найбільш часто використовуваних теплових навантажених режимах роботи парового котла (25 %, 50 %, 75 %). Використання нечіткого алгоритму І. Мамдані у запропонованій методиці дозволяє враховувати нелінійні властивості фізичних параметрів та проводити їх апроксимацію на всьому робочому діапазоні теплового навантаження суднових парових котлів. Для реалізації нечіткого алгоритму І. Мамдані у спеціалізованому пакеті MatLab редакторі (Fuzzy Logic Toolbox) проведена фазифікація параметрів навантаження котла та коефіцієнтів диференціального рівняння. Запропонована методика демонструє високий рівень адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів під час проведення порівняльного аналізу. Методика дозволяє використовувати отримані рівняння у подальших дослідженнях властивостей судових парових котлів з метою покращення їх конструктивних, екологічних та економічних характеристик. Можна відзначити, що аналіз рівнянь дозволяє проводити розрахунок настроювальних параметрів ПІД-регулятора в системі автоматичного керування процесом горіння "палива-повітря".

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-121-131

It is known that the coefficient of excess air α , which cannot be directly measured, can be determined by the oxygen content in the flue gases of a ship's steam boiler (SSB) almost independently of the fuel composition [1]. The coefficient of excess air is determined by air consumption M_L and fuel consumption B_T . However, in practice, the oxygen content ΔC_{O_2} cannot be measured at a point located directly behind the end zone of the combustion process. In most cases, the sampling point is located in the convective part of the boiler. At the same time, the gases are first mixed in the combustion zone, then transported through radiative surfaces and then additionally mixed in the zone of convective heating surfaces. Deep mixing occurs in the smoke extractor (especially in the centrifugal type smoke extractors).

To determine the optimal fuel-air ratio in the processes of liquid fuel combustion in the SSB furnace, the traditional method is used at the stage of

automatic control system (ACS) development [2]. The technique is based on the calculation of the coefficients of the parameters of differential equations describing the processes of oxygen content in flue gases. The analysis of the equations allows to calculate the tuning parameters of the PID - controller in the ACS by the combustion process. Let's consider the use of the traditional technique on the example of the "fuel-air" subsystem, which can be approximated by equals [3]:

$$T_2 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + T_1 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = k_2 \Delta M_L (t - \tau) + k_4 \Delta B_T (t - \tau), \quad (1)$$

where τ is the transport delay time; (taken to be equal to the inertia value of the gas analyzer itself, for the gas analyzer $\tau = 30$ sec):

$$T_2 = T_B^2; T_1 = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_2 = \frac{21}{\bar{M}_L \bar{\alpha}}; k_4 = -\frac{21}{\bar{B}_T \bar{\alpha}},$$

where \bar{B}_T is the nominal fuel consumption, kg/sec; $\bar{\alpha}$ – coefficient of excess air; \bar{T}_B – the average time of passage of flue gases from the furnace to the place of measurement, sec.

Output data for the Mitsubishi MAS 35 SSB (35 tons of steam per hour) with mass consumption of fuel and air [4]:

$$\bar{B}_T^{75\%} = 0,54, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{75\%} = 11,8, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{50\%} = 1,2;$$

$$\bar{T}_B = 12, \text{ sec}; T_B = \frac{12}{3} = 4, \text{ sec.}$$

$$\text{Then } k_2 = \frac{21}{11,8 \cdot 1,2} = 1,48, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,52 \cdot 1,2} = -33,9, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg.}$$

For mode 50 % of nominal:

$$\bar{B}_T^{50\%} = 0,35, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{50\%} = 5,8, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{50\%} = 1,2;$$

$$k_2 = \frac{21}{5,8 \cdot 1,2} = 3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,35 \cdot 1,2} = -50, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg.}$$

For mode 25 % of nominal:

$$\bar{B}_T^{25\%} = 0,18, \text{ kg/sec}; \bar{M}_L^{25\%} = 3,3, \text{ kg/sec}; \bar{\alpha}^{25\%} = 1,3.$$

$$\text{Then } k_2 = \frac{21}{3,3 \cdot 1,2} = 5,3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg}; k_4 = -\frac{21}{0,18 \cdot 1,3} = -91,3, \text{ \%} \cdot \text{sec/kg.}$$

The values of the calculations are given in Tab. 1.

After substituting the values (see Tab. 1) in (1), we obtain:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L (t - 30) - 91,3 \Delta B_T (t - 30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L (t - 30) - 50 \Delta B_T (t - 30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L (t - 30) - 33,9 \Delta B_T (t - 30).$$

Table 1

Calculated coefficients of equation (1)

Coefficients of equation	25 %	50 %	75 %
T_2 , sec	64	36	25
T_1 , sec	8	6	5
k_2 , kg/sec % movement of the regulatory body (RB)	5,3	3,0	1,5
k_4 , kg/sec % movement of RB	-91,3	-50,0	-33,9

The solution of this system under zero initial conditions is shown in Fig. 1.

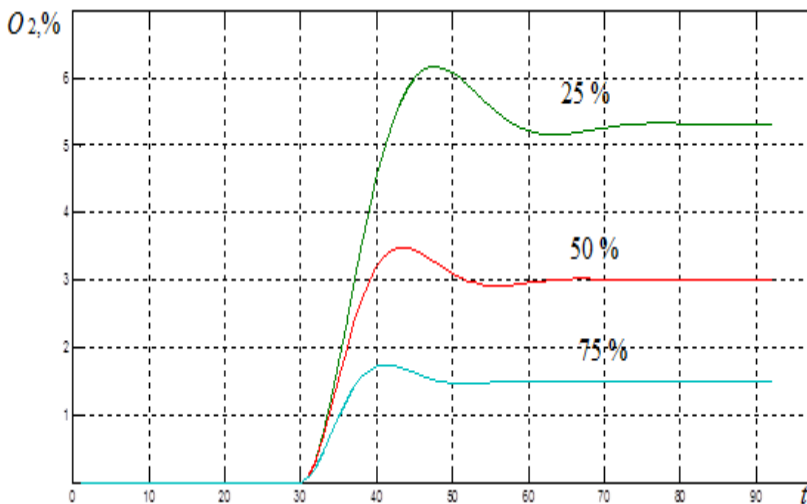


Fig. 1. Transient characteristics along the channel "change in air flow - change in O_2 content" during the heat load of the SSB (25, 50, 75 %)

At the same time, the technique presented above is laborious and takes into account the analysis of physical processes for only one operating mode of the SSB.

To reduce the complexity and speed up the process of calculating thermal coefficients, the authors present a method for approximating the thermal calculated coefficients of differential equations describing the dynamics of the controlled parameters of the SSB. As an example, for the implementation of the proposed technique, equation (1) presented above and the initial data obtained during the calculations (see Tab. 1) are used.

The first stage of the methodology for developing a fuzzy decision support system or a fuzzy expert system (FES) when identifying the parameters of SSB subsystems is the definition of input and output variables (Fig. 2). The program is implemented using the MatLab (FLT) package [5]. In the presented figure, the input parameter of FES is the thermal load of the SSB, which is determined by the current steam consumption, and the output parameters are the calculated coefficients of the dynamic equation under study (see the equation (1)).

The second stage is the process of fuzzification of input and output of the expert system (Fig. 3 – 6).

The rest of the coefficients also go through the stage of fuzzification with the help of triangular membership functions in a similar way (Fig. 6).

At the third stage, a knowledge base is developed in the MatLab package using a fuzzy inference system that implements the Sugeno algorithm [6 – 8]. At the next stage of the methodology, the adequacy of the FES is checked by comparing the values of the calculated coefficients from the table. 1 and values calculated by the program (Fig. 7).

The FES verification was also checked on two other known operating modes, the deviation of which is within the permissible limits of no more than 5 %. Taking into account the procedure of interpolation of non-linear values for the regime of 35 % heat load, the proposed FES produces the following values of heat coefficients (Fig. 7).

As can be seen from Fig. 7, the values of the coefficients obtained by the FEC correspond to the values of the table. 1 at 50 % load. Thus, the developed FES can be considered an effective tool for calculating the values of the presented equations.

At the next stage of the methodology, the values of thermal coefficients are calculated for a thermal regime of 35 % of the nominal one (the mode of operation of the SSB at the ship's parking lot). The new values are shown in Fig. 8.

The calculated values of thermal coefficients (1) determined by FES for three thermal regimes of SSB are presented in Tab. 2.

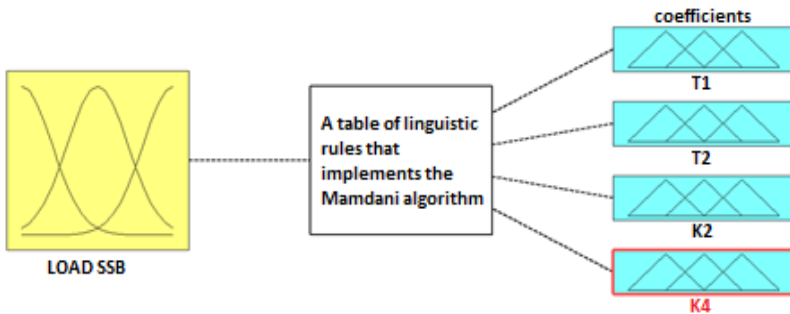


Fig. 2. A program interface synthesized by FES for calculating the thermal coefficients of the SSB depending on the thermal load

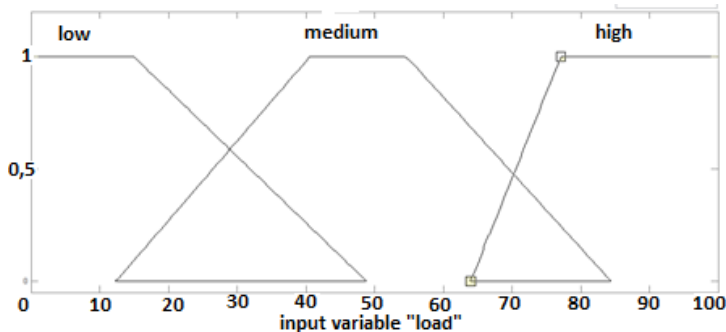


Fig. 3. The membership functions of the variable "heat load of SSB"

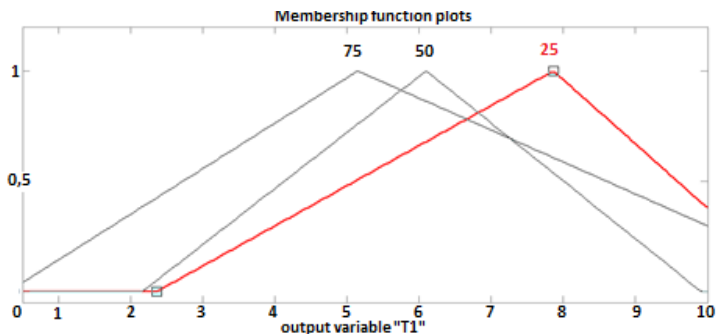


Fig. 4. Membership functions of T_1 coefficient values

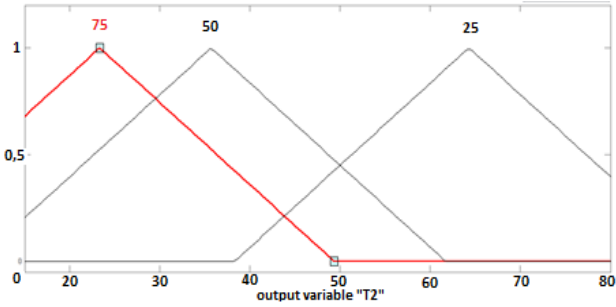


Fig. 5. Membership functions of T_2 coefficient values

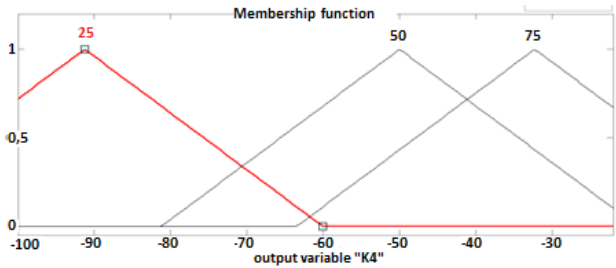


Fig. 6. Membership functions of K_4 coefficient values

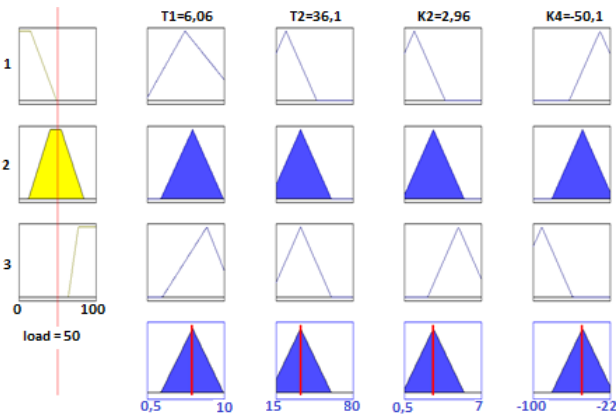


Fig. 7. Calculation of the values of the coefficients of equation (1) using the FES at a heat load of 50 %: $T_1 = 6,06$; $T_2 = 36,1$; $K_2 = 2,96$; $K_4 = -50,1$

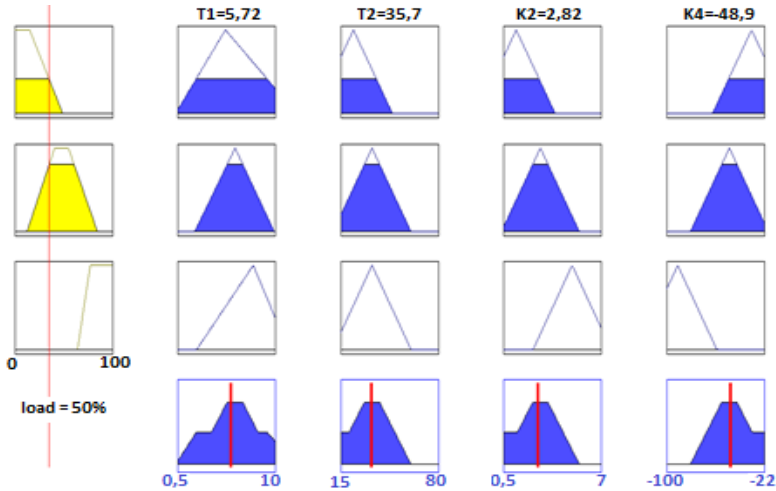


Fig. 8. The interface showing the results of the calculation of the FES of the thermal mode of the SSB, equal to 35% of the nominal

Table 2

The value of thermal coefficients

Load from nominal	17 %	35 %	85 %
T_2 , sec	64	36	25
T_1 , sec	8	6	5
k_2 , kg/sec % movement of RB	5,3	3,0	1,5
k_4 , kg/sec % movement of RB	-91,3	-50,0	-33,9

After substituting the values (see Tab. 2) in (1), we obtained:

$$64 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 8 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 5,3 \Delta M_L(t-30) - 91,3 \Delta B_T(t-30);$$

$$36 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 6 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 3 \Delta M_L(t-30) - 50 \Delta B_T(t-30);$$

$$25 \frac{d^2 \Delta C_{O_2}}{dt^2} + 5 \frac{d \Delta C_{O_2}}{dt} + \Delta C_{O_2} = 1,5 \Delta M_L(t-30) - 33,9 \Delta B_T(t-30).$$

In this way, the developed FES allows you to obtain the value of thermal and hydraulic coefficients for all operating modes of the SSB robots.

Knowledge of the mathematical models of the main channels of the SSB allows you to choose the optimal settings for the corresponding controllers in the ACS of the key processes of the SSB, as well as to conduct an additional study of the dynamic processes of the SSB. It can be noted that the proposed method is universal for all types of SSB.

Conclusions

A universal method of approximation of the estimated coefficients of the equations of the dynamics of the parameters of all structural types of SSB is proposed, which implements a nonlinear fuzzy inference algorithm and demonstrates a high degree of adequacy of the experimental and theoretical values of the thermal coefficients. The method allows you to use the obtained equations in further studies of the properties of SSB in order to improve their constructive, ecological and economic characteristics.

REFERENCES

1. Михайленко, В. С., Лещенко, В. В., Сакали, С. М., & Харченко, Р. Ю. (2020). Нейромережева система моніторингу показників шкідливих викидів суднового парового котла. *Automation of Ship Technical Facilities*, 26 (1), 41 – 57. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-41-57>.
2. Mikhaylenko, V. S., Kharchenko, R. Y., & Shcherbinin, V. A. (2020). Analysis of the Predicting Neural Network Person Recognition System by Picture Image. *Automatic Control and Computer Sciences*, 54(3), 249 – 258. doi:10.3103/s0146411620030037.
3. Ложечников В. Ф. Аналитическая многорежимная модель динамики газовой души трюма барабанного котла / В. Ф. Ложечников, В. С. Михайленко, И. Н. Максименко // *Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы (ААЭКС)*. – 2007. – №2(20). – С. 29 – 34.
4. Instruction manual ship auxiliary boiler MAC – 35B / Mitsubishi heavy industries, LTD. <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/mitsubishi-heavy-industries-ship-ocean/boiler-mac-b/32135-20232.html>.
5. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ, 2003. – 720 с.
6. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents / M. Sugeno // *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. – 1997. – № 7. – P. 201 – 224.
7. Михайленко В.С. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах суднових парових котлів / В.С. Михайленко, В.А. Щербінін, В.В. Лещенко, Р.Ю. Харченко, Н.В. Ложечнікова //

Informatics and Mathematical Methods in Simulation Vol. 10 (2020), No. 3 – 4, pp. 154 – 166. doi: 10.15276/imms.v10.no3-4.154.

8. Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers / Mikhailenko, V.S., Kharchenko, R.Yu., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V. // CEUR Workshop Proceedings this link is disabled, 2021, 3126. P. 367 – 373.

Abstract – In order to reduce the complexity of the process of calculating the thermal coefficients of the equations of the dynamics of physical processes in ship steam boilers, a new approximation technique is proposed. The methodology is based on the calculation of the values of the coefficients of the parameters of the dynamic equations describing the physical processes in the ship's steam boilers. The calculation was carried out on the three most frequently used thermal load operating modes of the steam boiler (25 %, 50 %, 75 %). As an example of the dynamics equation, the coefficients for the process of oxygen formation in flue gases during liquid fuel combustion were calculated. The use of the fuzzy algorithm of I. Mamdani in the proposed methodology allows taking into account the nonlinear properties of physical parameters and carrying out their approximation over the entire operating range of the thermal load of ship steam boilers. To implement the fuzzy algorithm of I. Mamdani, fuzzification of boiler load parameters and differential equation coefficients was carried out in the specialized MatLab editor package (Fuzzy Logic Toolbox). The procedure of fuzzification or finding the values of membership functions of fuzzy sets based on the initial data was carried out using triangular functions. The proposed technique demonstrates a high level of adequacy of experimental and theoretical values of heat coefficients during comparative analysis. The graphical interface of the program that implements fuzzy approximation allows you to determine the coefficients of the dynamics equations in all operating modes of the ship's boiler. The methodology allows using the obtained equations in further studies of the properties of marine steam boilers in order to improve their structural, ecological and economic characteristics. It can be noted that the analysis of the equations allows the calculation of the setting parameters of the PID-regulator in the system of automatic control of the "fuel-air" combustion process. And also for further adaptation of the control system of the fuel combustion process at all loading modes of operation of the ship's steam boiler.

Анотація – З метою зниження трудомісткості процесу розрахунку теплових коефіцієнтів рівнянь динаміки фізичних процесів у суднових парових котлах запропоновано нову методику апроксимації.

Методика заснована на розрахунку значень коефіцієнтів параметрів динамічних рівнянь, що описують фізичні процеси в судових парових котлах. Розрахунок був проведений на трьох найбільш часто використовуваних теплових навантажених режимах роботи парового котла (25 %, 50 %, 75 %). Як приклад рівняння динаміки проведено розрахунок коефіцієнтів для процесу утворення кисню в димових газах при горінні рідкого палива. Використання нечіткого алгоритму І. Мамдані у запропонованій методиці дозволяє враховувати нелінійні властивості фізичних параметрів та проводити їх апроксимацію на всьому робочому діапазоні теплового навантаження судових парових котлів. Для реалізації нечіткого алгоритму І. Мамдані у спеціалізованому пакеті MatLab редакторі (Fuzzy Logic Toolbox) була проведена фазифікація параметрів навантаження котла та коефіцієнтів диференціального рівняння. Процедура фазифікації або знаходження значень функцій належності нечітких множин на основі вихідних даних проводилася за допомогою трикутних функцій. Запропонована методика демонструє високий рівень адекватності експериментальних і теоретичних значень теплових коефіцієнтів під час проведення порівняльного аналізу. Графічний інтерфейс програми, яка реалізує нечітку апроксимацію, дозволяє визначити коефіцієнти рівнянь динаміки на всіх робочих режимах роботи судового котла. Методика дозволяє використовувати отримані рівняння у подальших дослідженнях властивостей судових парових котлів з метою покращення їх конструктивних, екологічних та економічних характеристик. Можна відзначити, що аналіз рівнянь дозволяє проводити розрахунок настроювальних параметрів ПІД-регулятора в системі автоматичного керування процесом горіння "палива-повітря". А також для подальшої адаптації системи управління процесом горіння палива на всіх навантажувальних режимах роботи судового парового котла.