

Михайленко В.С.¹, Лещенко В.В.²
НУ «Одеська морська академія»,
vladmihailen@gmail.com¹, lvvlvv@ukr.net²

Удосконалення управління процесом горіння палива в суднових котлах

Vladislav Mikhailenko¹, Valery Leshchenko²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, lvvlvv@ukr.net²

Improvement of the control for the combustion of fuel in ship boilers

Анотація - З метою підвищення ефективності процесу горіння палива запропонована система автоматичного управління процесу корекції витрати повітря, яка оснащена додатковими каналами контролю кольору факела пальника і кольору димових газів суднового котла. До запропонованої нейромережевої САУ горіння пропонується додатковий контур оцінки даних параметрів, що діє за нечітким алгоритмом І. Збір експериментальних даних і навчання нейромережі в залежності від парового навантаження та кольору факела пальника з апробацією системи у програмному середовищі дозволили получить висновок про поліпшені показники якості процесів експлуатації.

Abstract - In order to increase the efficiency of the fuel combustion process, a system of automatic control of the air flow correction process was proposed, which is equipped with additional channels for controlling the color of the burner torch and the color of the ship's boiler flue gases. An additional circuit for estimating these parameters is proposed to the proposed neural network ACS of combustion, which operates according to the fuzzy algorithm of I. Data collection and training of the neural network to calculate the correction of the excess air coefficient depending on the steam load and the color of the torch torch with system testing in the software environment allowed to obtain a conclusion about the improved performance of operating processes.

DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-73-83

У суднових котлах (СК) при спалюванні рідкого палива або зрідженого газу, полум'я в зоні горіння не завжди відрізняється стійкістю: в деяких ситуаціях може відбутися його відрив, що створює загрозу вибуху в топці котла. Тому суднове котельне обладнання в обов'язковому порядку оснащується системою контролю полум'я [1]. Однак, присутні на ринку сучасні системи виявлення полум'я мають ряд недоліків, зокрема, низьку селективність, чутливість до сторонніх засвічення та ін. Так, оптичні сигналізатори полум'я, які мають в якості сенсора фотодіоди і фоторезистори, чутливі до пульсації факела. У деяких випадках факел гасне, а оптичний датчик показує наявність полум'я, тому що він реєструє неправдиві пульсації, що залишилися через коливання гарячого повітря або димових газів на стінки топки [2]. Крім того, для СК з трьома і більше пальниками одним з головних вимог, що пред'являються до системи контролю полум'я, є індивідуальний контроль факела [3]. Датчик, змонтований на одній пальнику, не повинен реагувати на виникнення, згасання або відрив полум'я на інших пальниках, оскільки це може привести, як мінімум, до вибуху газу в топці, а як максимум - до масштабної аварії СК. Підтримка роботи пальника в правильно налаштованому стані важливо для безпечної і ефективної роботи СК.

Правильність настройки автоматики пальника можна оцінити візуально за кольором полум'я при роботі. Колір і поведінку полум'я може бути непрямим індикатором, правильно відрегульоване співвідношення палива і окислювача. Різні кольори полум'я виникають через різні кількості кисню, що виконує роль окислювача. Збільшуючи подачу кисню, отримуємо більш високі температури при згорянні і як наслідок більш повне згоряння з меншим появою сажі. Коли процес окислення палива не отримує достатню кількість кисню, тоді помітні зміни кольору полум'я на червоний, помаранчевий або жовтий. При більш глибоких відхиленнях можна помітити сліди темної сажі у кінчика полум'я. Через нестачу кисню температура полум'я зменшується, при цьому виділяється більше кількість окису вуглецю [4]. На практиці повноту згоряння палива оператори агрегатів суднових енергетичних установок (СЕУ) контролюють по кольору полум'я в топці і кольору диму, що виходить з труби СК. Згідно рекомендації [5] при хорошому горінні полум'я повинно бути світло-жовтим або помаранчевим без почервоніння або потемніння в окремих ділянках топки, а дим - світло-сірим або коричневим. Темно-червоне полум'я і темний дим свідчать про нестачу повітря, а світлий вогонь з іскрами і білуватий дим - про надмірне надлишку повітря. Ознакою незадовільного процесу розпилування палива є поява в

полум'я темно-червоних смуг. Ознакою повного горіння палива в судовому парогенераторі є світло-жовте полум'я в топці [6].

З метою підвищення ефективності процесу горіння палива запропонується система автоматичного управління (САУ) процесу корекції витрати повітря, яка оснащена додатковими каналами контролю кольору факела пальника і кольору димових газів СК.

Відомо, що динамічні параметри характеристик СПУ, певні для початкового етапу пуску у процесі налагоджування, значно відрізняються від тих же параметрів, визначених на робочих режимах [7]. У зв'язку з цим, застосування адаптивних інтелектуальних систем управління, наприклад нейронних мереж (НМ), багаторежимними парогенеруючими процесами у СК з функцією самонавчання може бути доцільно.

У запропонованій структурі нейроуправління процесом горіння в СК (рис. 1), інформація про поточний витраті палива надходить на вхід нейромережевого контролера (НМК) на рис. 1, позначеного (FFC), якій виробляє коригуючий вплив у процес повітроподачі. Для випадків зміни марки мазуту або переходу з мазуту на дизельне паливо, а в ряді випадків при бажанні судовласника, використовувати в якості альтернативного палива зріджений газ, нейромережева САУ використовує додаткові датчики QE кольору димових газів. Інформація від датчиків кольору диму після перетворення сигналу в нечіткому модулі QC (див. позицію передачі сигналу (1-1) на рис. 1), передається на нейромережевий контролер FFC (позиція (1-6) на рис. 1) якій регулює подачу повітря. Також на НМК надходять сигнали по каналах зворотного зв'язку від киснеміра (QE^{O2} (1-5)) і датчика поточної витрати повітря (FE (1-1)) (див. рис. 1). Таким чином, запропонована нейромережева САУ реалізує комбінований принцип управління.

Ефективність процесу спалювання характеризується відсутністю втрат від неповноти згоряння палива, а також коефіцієнтом надлишку повітря α . Чим більше цей коефіцієнт, тим більше втрати теплоти з відхідними з котла продуктами згоряння [8].

З урахуванням важливості, для ефективної роботи САУ процесу горіння визначення кольору диму і полум'я пальника, до нейромережевої САУ горіння пропонується додатковий контур оцінки даних параметрів, що діє за нечітким алгоритмом І. Мамдані [9] і видає оцінку ефективності процесу горіння палива в СК в вигляді рекомендації відносно α , на рис. 1 показаний QC. Етапи розробки експертної системи оцінки якості процесу горіння за показниками кольору диму і кольору полум'я пальника у програми MatLab представлені на (рис. 2 - 4).

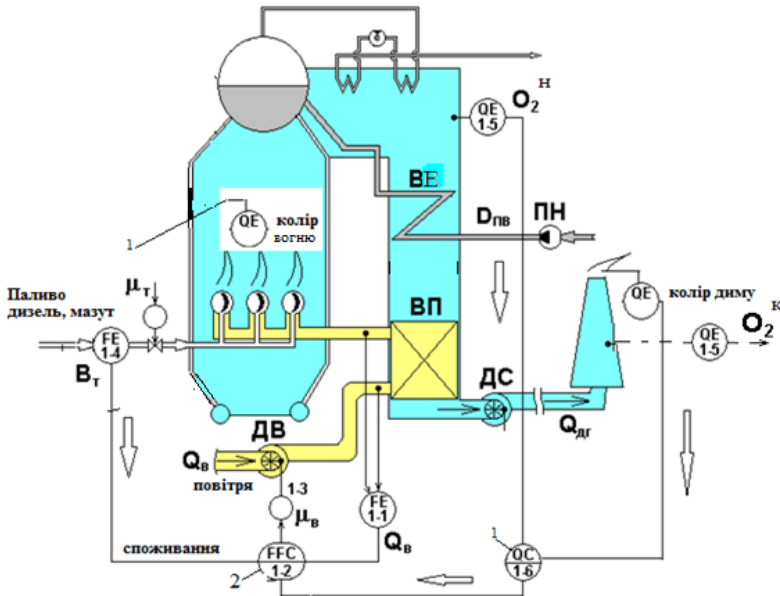


Рис. 1. Схема системи управління процесом горіння палива в СК Mitsubishi Marin Main Boiler MB паропродуктивністю 50 т/год, з контролем кольору вогню факела: ДС – димосос; ВП – повітряний підігрівач; ВЕ – водяний економайзер; ПН – живильний насос; FFC – нейромережевий контролер (НМК); FE – витратомір; QE – датчик кольору; QE^{O2} – датчик змісту кисню

Вхідними параметрами в нечітку експертну систему є колір диму і колір факела (оцінюваний за допомогою фотодатчиків), а вихідним - коефіцієнт надлишку повітря α (рис. 5).

Присвоївши кожному кольору відповідну шкалу, програма розраховує коефіцієнт надлишку повітря і показує ефективність процесу горіння палива.

Таким чином, запропонована система оцінки контролю кольору полум'я і кольору димових газів буде працювати за схемою, представленій на рис. 6. На схемі показано, що сигнал від датчика кольору полум'я надходить на робочу станцію оператора, на якій встановлена експертна система оцінки коефіцієнта надлишку повітря з можливістю його корекції оператором за допомогою клапана 1 (див. рис. 6).

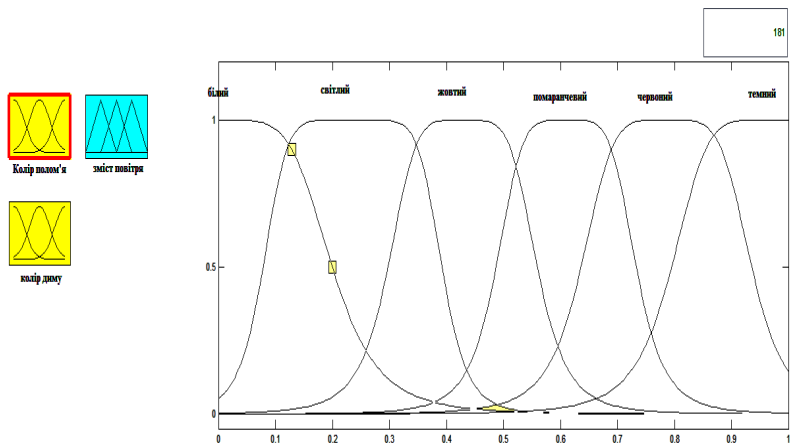


Рис. 2. Етап фазифікації параметра «колір полум'я» в програмі FTL

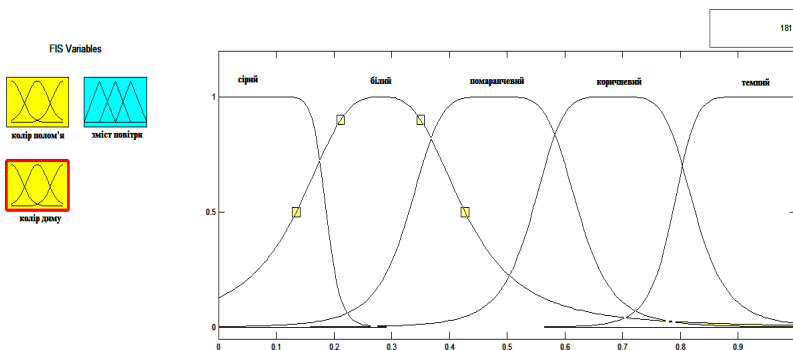


Рис. 3. Етап фазифікації параметра «колір диму»

Для запропонованої універсальної нейромережевої САУ горіння палива в топці СК використана технологія застосування двох нейронних мереж, одна з яких виконує функцію нейроконтролера (НМК), а друга - функцію нейроемулатора, який навчається моделювати динаміку об'єкту управління [10, 11]. Оскільки використана структура являє собою багатoshарову мережу і алгоритм зворотного поширення помилки можна узагальнити на будь-яку

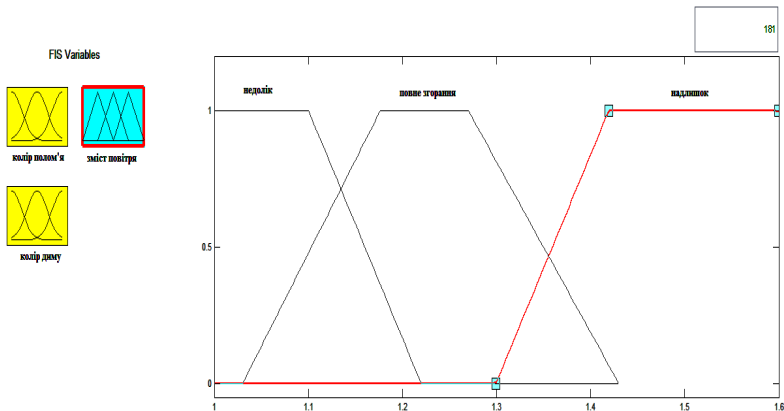


Рис. 4. Етап фазифікації параметра «коэффициент надлишку повітря в вихідних газах»

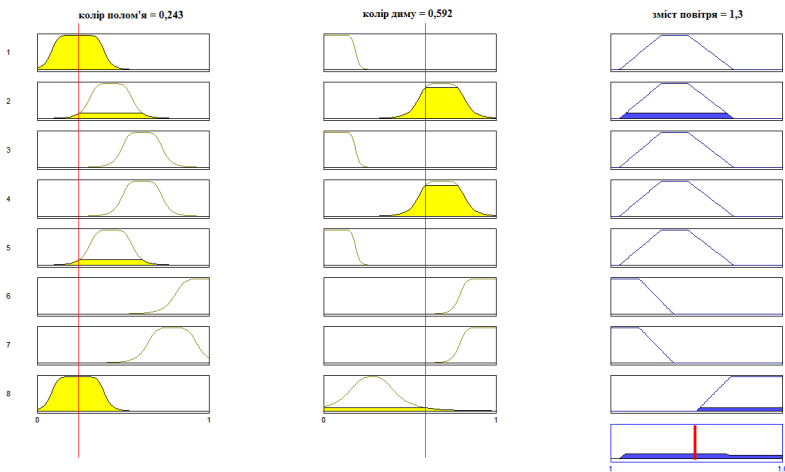


Рис. 5. Робота НЕС в програмі по визначенню α : значення α рівне 1,3 вказує на повне згорання палива в топці допоміжного СК

мережу з прямим розповсюдженням сигналу, то запропонований модуль НМК навчається як і звичайна нейронна мережа. Для цього буде потрібно навчальна вибірка у вигляді пар (\bar{x}, d) , де $\bar{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$ - це вхідний вектор, d - еталонний сигнал. Завдання полягає в такій модифікації (корекції) параметрів модуля НМК,

описаного виразом, щоб міра помилки, що задається виразом, була мінімальною:

$$e = \frac{1}{2} [y(\bar{x}) - d]^2.$$

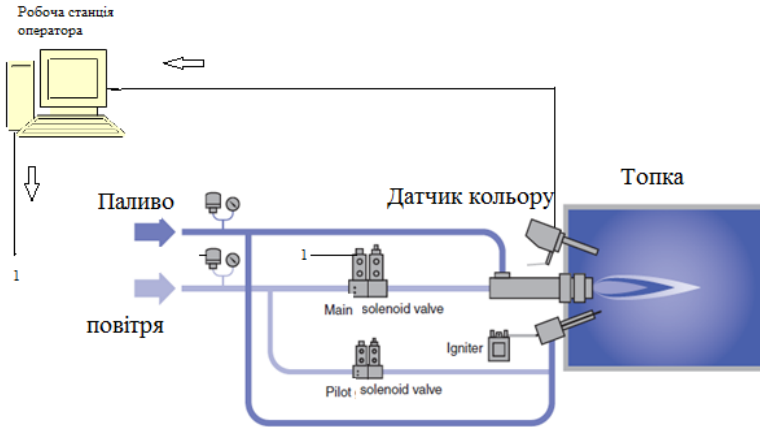


Рис. 6. Структурна схема САУ процесу горіння у топці СК

Процес навчання НМ буде закінчений, коли помилка досягне встановленої мінімальної величини.

Для навчання НМК проведено моделювання з типовим ПД-регулятором. У проведеному імітаційному експерименті в пакеті MatLab [11], ПД-регулятор був адаптований під зміни властивостей керованого об'єкта (топці СК). Варіюванням значень об'єкту по каналу управління: T і K , передбачається ініціювати зміни значень параметрів ПД-регулятора: K_p , T_i , K_d . Тобто адаптувати їх з метою досягнення очікуваного перехідного процесу. Об'єктом управління є САУ горіння палива допоміжного СК в номінальному режимі. Параметр моделі T змінювався в залежності від парового навантаження СК в діапазоні: 5; 25; 45; 105. Відповідно, оптимізуються значення налаштувань ПД-регулятора згідно методикам [12, 13]. В якості навчальної вибірки для НМ використовуються значення сигналів неузгодженості e_i - входи в НМК - і значення оптимальних керуючих впливів u_i , виміряні на виході ПД-регулятора в САУ.

Для перевірки ефективності роботи НМК в САУ горіння палива СК використовується структура з нейроемулятором [14]. Пропонована структура нейроемулятора, отримана за допомогою програми Neural Network [14]. Для моделювання НМ САУ оптимізації α в залежності

від парового навантаження агрегатів СЕУ (рис. 7) використовувався спеціалізований математичний пакет MatLab (Simulink і Nero Toolbox) та методика [13].

Процеси модельованої НМ САУ корекції α показані на рис. 8.

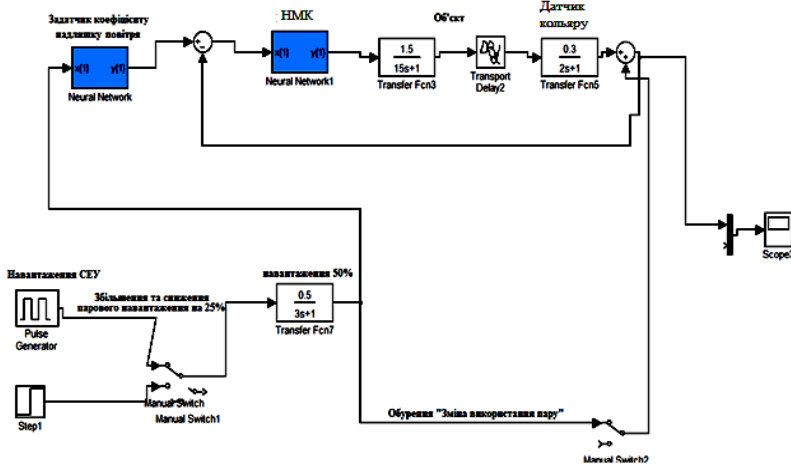


Рис. 7. Моделювання НМСАУ оптимізації α з метою підвищення ефективності процесу горіння палива

Як видно з представлених характеристик (див. рис. 8), запропонована НМ САУ корекції коефіцієнтом надлишку повітря успішно підтримує задані значення в залежності від парової навантаження СЕУ, що дозволяє підтримувати ККД СК на високому рівні.

Додаткові дослідження показали, що при зміні завдання контролерам, а також значень параметрів об'єкта (в силу впливу внутрішніх збурень), САУ процесу горіння продемонструвала допустимий час регулювання і стійкість. Імітація зміни режиму роботи СК (паровий навантаження агрегатів СЕУ на вантажних режимах роботи танкера) з переходом від номінального на 25 і 65 % навантаження суднового допоміжного парового котла марки Mitsubishi MB продуктивністю 50 т/год [15] з метою перевірки адаптивних властивостей запропонованої САУ (рис. 9), показала, що на других теплових режимах роботи парового СК нейромережева САУ також досягає заданих показників якості.

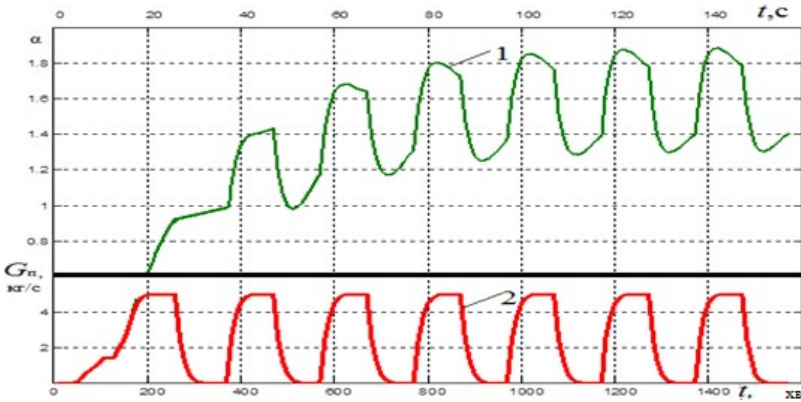


Рис. 8. Процеси впливу парового навантаження СЕУ (2) на корекцію α (1) для досягнення ефективного режиму горіння палива СК марки СК Mitsubishi MB 50 т/год

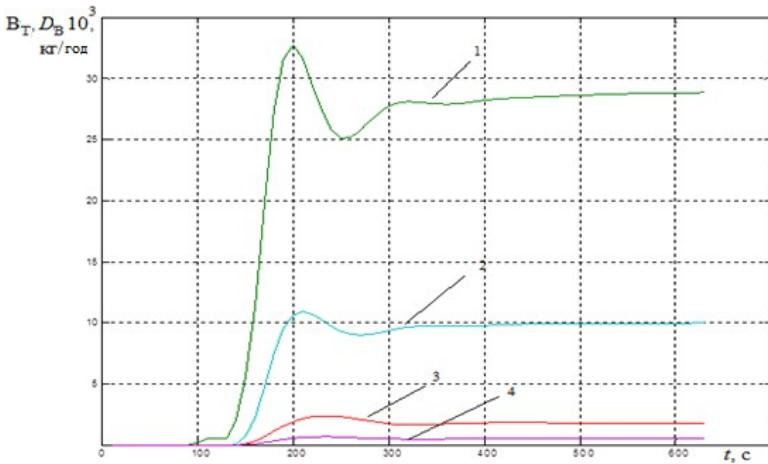


Рис. 9. Процеси НМ САУ горіння палива в топці СК марки MB 50: 1, 2 - процеси підтримання витрати повітря (D_B), при навантаженні 65 і 25 %; 3, 4 - процеси підтримки витрати палива (B_T) при навантаженні 65 і 25 %

Висновки

Доведено, що застосування нейромережевої САУ з функцією контролю кольору вогню факелу у топці СК, на прикладі СК марки Mitsubishi MB паровою продуктивністю 50 т/год, продемонструвало

поліпшені показники якості процесів експлуатації в порівнянні з типовою САУ горіння з ПДД - регулятором, що сприяє підвищенню показників надійності роботи елементів топки котла і забезпечує підтримку заданого теплового режиму на всьому діапазоні парової навантаження агрегатів СЕУ, а також дозволяє своєчасно корегувати коефіцієнт залишку повітря, тобто не допускати перевитрат палива.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Правила технической эксплуатации судовых вспомогательных паровых котлов. – Санкт–Петербург: Гипрорыбфлот-Сервис, 2018. – 80 с.
2. Ветольский Э.М. Предотвращение аварий судовых паровых котлов / Э.М. Ветольский. – Владивосток: АТР, 1995. – 116 с.
3. Полтавцев О.В., Датчики контроля пламени – один из важнейших факторов безопасной работы котельной //Новости теплоснабжения. 2016. - № 12 (196), – С. 35 - 37.
4. Дементьев К.С. Проектирование судовых парогенераторов / К.С. Дементьев, В.А Романов. – М.: Судостроение, 2016. – 336 с.
5. Денисенко Н.И. Судовые котельные установки / Н.И Денисенко, И.И. Костылев. – М.: Элмор, 2015. – 290 с.
6. Белоусов В.Н. Топливо и теория горения / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова. – СПб.: ГТУРП, 2011. – 84 с.
7. Михайленко В.С. Концепція розробки систем управління судовими пароенергетичними установками [Текст]: дис. докт. тех. наук: 05.05.03: – Одеса, НУ «ОМА», 2021. – 379 с.
8. Михайленко В.С., Нейромережева система моніторингу показників шкідливих викидів судового парового котла / Михайленко В.С., Лещенко В.В., Сакали С.М., Харченко Р.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. . – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ «ОМА». - С. 63 - 71.
9. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci. – 1974. - Vol. 121, 1974. – P. 1585 – 1588.
10. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
11. Дьяконов В., Круглов В. МАТЛАВ. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник /В. Дьяконов, В. Круглов. – С. Пб.: Питер, 2001. – 448 с.

12. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. Методы настройки нечеткого адаптивного ПИД-регулятора // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. - № 2. - С. 174 - 179.

13. Mikhailenko V. S. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // Automatic Control and Computer Sciences. - 2014. - Vol. 48. - No. 6. – P. 334 – 344.

14. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учебное пособие / М.В. Бураков. – СПб.: Изд-во ГУАП, 2013. – 284 с.

15. Mitsubishi Auxiliary Boiler MAC-B. URL: <https://ru.scribd.com/document/334763233/Mitsubishi-Auxiliary-Boiler-MAC-B-pdf>.

Annotation – The article discusses the issues of increasing the efficiency of the combustion of liquid fuel in the furnaces of ship steam boilers using the proposed neural network system for automatic correction of the excess air coefficient.

It is indicated that modern systems for automatic flame detection have a number of disadvantages, in particular, low sensitivity to extraneous illumination, etc. hot air or flue gases on the walls of the boiler furnace. Such pulsations reduce the reliability of the combustion monitoring and control system. Therefore, the task of developing and introducing on ships new, economically inexpensive and effective methods of effective control and management of the fuel combustion process in ship boilers using modern means of intelligent control is urgent.

On the basis of the experiments carried out on a Mitsubishi MV 50 marine steam boiler and the collected experimental data, the values for training the neural network system of the air flow correction process, taking into account the color of the burner flame and the color of the flue gases, were obtained. The use of a trained neural network in the control system, taking into account the fuzzy expert system for monitoring the color of the flame and smoke, makes it possible to achieve the best excess air ratio depending on the steam load of the SEP units. Simulation modeling of the proposed neural system was carried out in a specialized program Matlab (Neural Networks Toolbox).

The simulation results showed that the use of a neural network control system for the combustion of liquid fuel, using the example of a marine boiler, allows maintaining a given thermal regime over the entire range of steam load of the power plant units, and also allows timely correction of the excess air ratio, i.e. avoid excessive consumption of fuel.