

**Список використаних джерел**

1. Діалогова система ELIZA. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/ELIZA> (дата звернення 10.02.2024).
2. Сучасні голосові асистенти. URL: <https://bit.ua/2021/07/dlya-sproshhennya-roboty-dobirka-najzruchnishyh-golosovyh-pomichnykiv/> (дата звернення 12.02.2024).
3. Технологія Word2vec. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Word2vec> (дата звернення 10.02.2024).
4. Навчання моделі seq2seq. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/mashinnoe-obuchenie/uchebnik-nltk/10-model-seq2seq> (дата звернення 11.02.2024).
5. Бібліотеки Python. URL: <https://docs.python.org/3/library/index.html> (дата звернення 16.02.2024).
6. Драйвера Nvidia. URL: <https://developer.nvidia.com/cuda-downloads> (дата звернення 18.02.2024).
7. API ключі. URL: <https://blog.bitbanker.org/ru/chto-takoe-api-klyuch-i-kak-ispolzovat-ego-bezopasno/chto-takoe-klyuch-api> (дата звернення 09.02.2024).
8. Node.js. URL: <https://nodejs.dev/en/learn/> (дата звернення 03.02.2024).
9. Документація ChatGPT. URL: <https://chatgpt.com.ua/docs> (дата звернення 07.02.2024).
10. Підключення API. URL: <https://platform.openai.com/docs/guides/chat> (дата звернення 07.02.2024).

References

- [1] ELIZA dialog system [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/ELIZA>. [Accessed Feb. 10, 2024].
- [2] Modern voice assistants [Online]. Available: <https://bit.ua/2021/07/dlya-sproshhennya-roboty-dobirka-najzruchnishyh-golosovyh-pomichnykiv/>. [Accessed Feb. 12, 2024].
- [3] Word2vec technology [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Word2vec>. [Accessed Feb. 10, 2024].
- [4] Teaching the seq2seq model [Online]. Available: <https://coderlessons.com/tutorials/mashinnoe-obuchenie/uchebnik-nltk/10-model-seq2seq>. [Accessed Feb. 11, 2024].
- [5] Python libraries [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/index.html>. [Accessed Feb. 16, 2024].
- [6] Nvidia drivers [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/cuda-downloads>. [Accessed Feb. 18, 2024].
- [7] API keys [Online]. Available: <https://blog.bitbanker.org/ru/chto-takoe-api-klyuch-i-kak-ispolzovat-ego-bezopasno/chto-takoe-klyuch-api>. [Accessed Feb. 9, 2024].
- [8] Node.js [Online]. Available: <https://nodejs.dev/en/learn/>. [Accessed Feb. 3, 2024].
- [9] ChatGPT documentation [Online]. Available: <https://chatgpt.com.ua/docs>. [Accessed Feb. 7, 2024].
- [10] API connection [Online]. Available: <https://platform.OpenAI.com/docs/guides/chat>. [Accessed Feb. 7, 2024].

Отримана в редакції 08.05.2024. Прийнята до друку 30.05.2024. Received 08 May 2024. Approved 30 May 2024. Available in Internet 30 July 2024

УДК 621.18-182.2

ДО ПИТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОТЛОАГРЕГАТУ ДКВр-10-13 В КОТЕЛЬНЯХ ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

ON THE ISSUE OF AUTOMATION OF DKVr-10-13 BOILER UNITS IN BOILER ROOMS OF FOOD ENTERPRISES

Черняк О.І.¹, Світій І.М.²
Chernyak O.I.¹, Svityi I.M.²

^{1,2} Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

1,2 Odessa National University of Technology, Odessa, Ukraine

ORCID ID: ¹ <https://orcid.org/0009-0001-5329-575X>, ² <https://orcid.org/0000-0001-8524-5565>

E-mail: ¹alex_c@te.net.ua, ²swityi@yahoo.com

Copyright © 2024 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i2.2839>

Анотація. Технологічні процеси на підприємствах харчової промисловості пов'язані з великим споживанням



теплоти, яку одержують у їх власних парових котельнях. Актуальним є вдосконалення систем автоматичного керування (САК) вироблення пари в котлоагрегатах котельнь, з метою підвищення їх енергоефективності та зменшення енергоспоживання. Відомі подібні САК мають недостатню динамічну точність керування внаслідок неврахування істотного збурення - відбору пари споживачами. В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем запропоновано ефективну систему автоматичного керування виробленням пари в котлоагрегаті ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності. В ході дослідження проаналізовано технологічний процес вироблення пари, розроблено комплекс моделей котла, як об'єкта керування та здійснено їх цифрову реалізацію в середовищі Matlab Simulink; розроблено алгоритми керування, що забезпечують підвищення ефективності функціонування та динамічної точності стабілізації регульованих змінних котла, розроблено алгоритми логічного керування котлом; вибрано технічні засоби та розроблено технічну структуру системи керування котлом; розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні на базі SCADA-системи Genie; розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів цифрового керування на функціонально- і вільно-програмованих контролерах; розроблено фрагменти проектної документації технічного забезпечення системи керування; обґранкувано економічну доцільність та інвестиційну привабливість розробки, розглянуто питання техніки безпеки та охорони праці при експлуатації котла.

Abstract. Food industry enterprises' technological processes are associated with a large consumption of heat, which is received in their own steam boiler houses. It is urgent to improve automatic control systems (ACS) of steam generation in boiler units of boiler houses, with the aim of increasing their energy efficiency and reducing energy consumption. Known similar ACSs have insufficient dynamic accuracy of control due to failure to take into account a significant disturbance - consumption of steam by consumers. In Odesa National University of Technology, at the Department of Technological Processes Automation and Robotic Systems, an effective system of automatic control of steam production in the DKVr-10-13 boiler unit of increased dynamic accuracy is proposed. In the course of the study, the technological process of steam production was analyzed, a set of boiler models was developed as a control object, and their digital implementation was carried out in the Matlab Simulink environment; control algorithms have been developed, which ensure an increase in the efficiency of operation and dynamic accuracy of stabilization of regulated variables of the boiler, algorithms for logical control of the boiler have been developed; technical means were selected and the technical structure of the boiler control system was developed; the graphic interface of the automated workplace of the boiler plant operator based on the Genie SCADA-system was developed; developed software for the implementation of digital control algorithms on functional and freely programmable controllers; fragments of project documentation for technical support of the control system were developed; the economic expediency and investment attractiveness of the development were delineated, the issue of safety and occupational health during the operation of the boiler was considered.

Ключові слова: виробництво пари, котел, котлоагрегат, автоматизація, система автоматичного керування, підвищення динамічної точності.

Keywords: steam generation, boiler, boiler unit, automation, automatic control system, dynamic accuracy improvement.

Вступ. Технологічні процеси виробництва продукції на підприємствах харчової промисловості пов'язані з великим споживанням теплоти, яку одержують у власних парових котельнях підприємств. Їхню роботу характеризують різкі коливання парового навантаження через нерівномірне надходження на переробку сільськогосподарської сировини та наявність технологічного обладнання періодичної (дискретної) та комбінованої (поєднання періодичної та безперервної) дії.

Шляхи підвищення ефективності витрати палива безпосередньо в парокотельному цеху підприємства полягає в тому, щоб підвищити ефективність використання палива шляхом збільшення ККД котлів за рахунок впровадження нового, більш прогресивного обладнання або реконструкції чинного, а також утилізації теплоти димових газів.

Однак ефективність збільшення ККД котлів може бути істотно знижена в реальних умовах експлуатації парового котла, оскільки навіть таке ідеальне паливо, як газове, залежно від кількості повітря, що подається на його спалювання, може забезпечувати різний ефект його застосування. У зв'язку з цим слід розрізнити максимально можливий для конкретної установки ККД котла, який зазвичай визначається експериментально в так званих парадних умовах роботи при незмінному відборі пари та постійному тиску в його барабані та експлуатаційне значення ККД котла. Значення останнього визначає ефективність використання палива.

Досягнення максимального експлуатаційного значення ККД слід вважати ще одним напрямом, який забезпечує підвищення ефективності використання палива шляхом оптимального керування процесом його спалювання. Цей напрям актуально стосовно парових котельнь харчових підприємств з частими і глибокими змінами парового навантаження, оскільки система автоматики повинна працювати як у статичному, так і в динамічному режимах, забезпечуючи при цьому максимальне значення експлуатаційного ККД котла.

У реальних умовах парової котельні харчового підприємства нерідко з'являються режими, за яких відбір пари від працюючих котлів короткочасно перевищує номінальну продуктивність. Виключити втрати палива котлом у таких режимах покликана система автоматичного керування. У цілому забезпечення високої ефективності виробництва пари неможливе без впровадження сучасних систем автоматичного керування (САК).

Однак складність об'єкту керування не сприяла широким дослідженням та впровадженню передових підходів



до автоматизації в сферу енергетики.

Таким чином, потреби практики у підвищенні технологічної ефективності та безпеки експлуатації енергетичного обладнання з одного боку і існуючий рівень розвитку науки і техніки в цій галузі з іншого суперечать один одному. Шляхом вирішення цієї суперечності може бути цілеспрямоване вдосконалення САК енергетичним обладнанням. Такий шлях є практично безальтернативним, оскільки традиційні шляхи підвищення енергетичної ефективності, наприклад, за рахунок удосконалення конструкції енергетичного обладнання, поліпшення теплоізоляції тощо, лише дещо пом'якшують вказану суперечність, не вирішуючи її. Цей стан справ обумовлює актуальність удосконалення САК енергетичним обладнанням з метою підвищення його енергоефективності та зменшення енергоспоживання відповідними технологічними процесами.

Серед задач, які стоять перед сучасними САК парогенеруючим обладнанням, можна виділити як основні такі: надання оперативному персоналу достатньої, достовірної та своєчасної інформації про хід технологічного процесу, про стан обладнання та технічних засобів автоматизації; автоматичне керування технологічним обладнанням у нормальних, перехідних, аварійних та спеціальних режимах роботи; оптимальне ведення процесу з метою отримання теплоти заданої якості та кількості тощо.

Серед основних джерел теплоти для виробничих потреб найбільш розповсюджені котельні агрегати різних конструкцій, у тому числі парові, зокрема типу ДКВр, в яких застосовують традиційні, типові схеми автоматичного керування, що не забезпечують достатню ефективність пароутворення, а значить конкурентоспроможність виробників пари. У зв'язку з цим необхідна розробка ефективних систем автоматичного керування процесом виробництва пари і алгоритмів їх синтезу. Зокрема актуальним є підвищення ефективності автоматичного керування котлоагрегатом ДКВр-10-13.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Питанням автоматизації технологічного процесу виробництва пари займалося багато дослідників. Так СВ Альтера запропонували автоматизовану систему керування котельною, яка містить автоматичне та ручне регулювання навантаження за температурою води на виході (для водогрійних котлів) або тиску пари (для парових) шляхом керування шиберами вентилятора та газової заслінки; автоматичне або ручне регулювання розрідження в топці шляхом керування шиберами димососа; автоматичне або ручне регулювання рівня води в барабані парового котла шляхом керування живильним насосом [1]. Однак наведена система має недостатню динамічну точність керування внаслідок неврахування дії контрольованого збурення – споживання пари споживачем на контур регулювання тиску пари. ПП ПромМонтажНаладка розробило автоматичну систему керування котельною, яка містить автоматичне підтримання заданого тиску пари в котлі, шляхом зміни швидкості обертів шнека подачі палива, автоматичне підтримання заданого рівня води в барабані котла, зміною положення клапану подачі живильної води в котел, автоматичне підтримання тиску повітря на горіння пропорційно до обертів шнека подачі палива відповідно до співвідношення паливо-повітря шляхом зміни обертів двигуна вентилятора, автоматичне підтримання заданого розрідження в топці котла, шляхом зміни обертів двигуна димососа [2]. Однак ця система також має недостатню динамічну точність керування в результаті неврахування дії контрольованого збурення – споживання пари споживачем на контур регулювання тиску пари. Р. К. Стасевич, О. В. Садовий та ін. запропонували безперервний вимір вмісту оксиду вуглецю в димовому тракті, витрати тиску повітря та палива, розрідження в димовому тракті, підтримування в топці заданого вмісту оксиду вуглецю та кисню шляхом зміни обертів вентилятора і димососа [3]. Недоліком способу є не дотримання граничного значення ККД, адже керують лише за максимальним значенням відношення продуктивності котлоагрегату до витрати палива. В. А. Барський розробив адаптивну систему керування тяго- дуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3 [4]. Однак, складність інсталяції та висока вартість комплексу унеможливило його широке застосування у теплоенергетиці. Чимало вітчизняних дослідників розглядають рівень води в барабані котла як один з найважливіших його регульованих параметрів, до якого виставляються жорсткі вимоги, оскільки істотне зниження або підвищення рівня води в барабані суттєво знижує ефективність його роботи і може призвести до виходу з строю котлоагрегату в цілому [5]. Рура А.С., Тарахтій О.С. обґрунтовують, що регулювання живлення котлів невеликої потужності зазвичай здійснюється 1-імпульсними регуляторами за сигналами датчиків рівня води в барабані. У котлах середньої та великої паропроодуктивності з малим водяним об'ємом застосовуються 2-імпульсні регулятори живлення за рівнем води і витратою пари, а також 3-імпульсні, що регулюють живлення парового котла за сигналами по рівню води, витраті живильної води та витраті пара. 3-імпульсні системи регулювання отримали найбільше розповсюдження на енергетичних парових котлах та котлах середньої потужності паропроодуктивністю від 50 т/год і малим запасом води [6]. Хоптій В.Я. розглядає автоматизоване керування виробництвом пари, з метою оптимізації роботи парогенератора, яке забезпечує ефективне використання палива, підтримку витрати, температури, тиску пари, економію електрики [7]. Наступною пропозицією є система автоматичного керування подачею повітря в топку котла, шляхом виміру навантаження котла, витрати палива та повітря з керуючим впливом на приводи дуттьових вентиляторів та коригуючого впливу за співвідношенням паливо-повітря [8]. Недоліком даного способу є обмеження точності регулювання співвідношення паливо-повітря. Ще одним відомим рішенням є спосіб автоматичного керування подачею повітря в топку котла, що забезпечує режим оптимального горіння [9]. Недоліком цього способу є низька якість регулювання витрати палива та повітря. Серед зарубіжних пропозицій щодо систем автоматичного контролю якості процесу горіння найбільшого поширення набули стаціонарні багатофункціональні пристрої на базі використанні датчиків O_2 , CO , CO_2 , H_2O , NO_x тощо [10-12]. Однак такі системи не є універсальними і можуть



бути використанні тільки разом з котлами певного типу.

Узагальнюючи відомі рішення щодо автоматичного керування технологічним процесом в парових котлах, слід відмітити загальний недолік, - низька динамічна точність керування внаслідок неврахування істотного збурення - відбір (споживання) пари споживачами.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем було запропоновано ефективну систему автоматичного керування котлоагрегатом ДКВр-10-13 шляхом підвищення динамічної точності керування процесом [13].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу керування вироблення пари в котлоагрегаті ДКВр-10-13 шляхом розробки ефективної системи автоматичного керування цим процесом, яка забезпечує його високу динамічну точність за рахунок компенсації контрольованого збурення.

Для досягнення цієї мети було вирішено наступні завдання:

- аналіз технологічного процесу виробництва пари, обґрунтування доцільності модернізації системи автоматичного керування котлом ДКВр-10-13;
- розробка комплексу моделей котла, як об'єкта керування та їх цифрова реалізація в середовищі Matlab Simulink;
- розробка алгоритмів керування, що забезпечують підвищення ефективності функціонування та динамічної точності стабілізації регульованих змінних котла
- розробка алгоритмів логічного керування (пуску і зупинки) котлом;
- вибір технічних засобів та розробка технічної структури системи керування котлом;
- розробка графічного інтерфейсу автоматизованого робочого місця оператора котельні на базі SCADA-системи Genie;
- розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритмів цифрового керування на функціонально- і вільно-програмованих контролерах;
- розробка фрагментів проектної документації технічного забезпечення системи керування;
- обґрунтування економічної доцільності та інвестиційної привабливості розробки, аналіз питань техніки безпеки та охорони праці при експлуатації котла.

Методи і матеріали дослідження. Основним використаним методом дослідження є метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей було використано методи активного та пасивного експерименту та інженерні методики ідентифікації моделей об'єкта керування. При синтезі САР було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу САР, оптимального параметричного синтезу, принцип двоканальності Петрова, принцип інваріантності. Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання.

Результати дослідження. На початку дослідження було проаналізовано процес виробництва пари як об'єкт керування, обґрунтовано доцільність модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 в котельнях харчових підприємств.

Для виробництва пари використовують котельні установки, які виробляють пару в великому об'ємі та високих параметрів (енергетичні); котельні установки для виробничих потреб підприємств, в тому числі технологічних потреб агропромислового комплексу (промислові); котельні установки, які виробляють пару, гарячу воду для опалення, вентиляції та гарячого водопостачання виробничих та житлових приміщень (опалювальні).

Промислові котельні консервних, молочно-консервних, олійно-жирових комбінатів, м'ясокомбінатів та комбінатів хлібопродуктів; цукробурякових, спиртових, пиво-, вино- та хлібозаводів, інших харчових підприємств комплектують барабанними котлами малої потужності – паропродуктивністю до 0,56 кг/с (2 т/год) та середньої потужності – 0,56 – 5,6 кг/с (2 - 20 т/год) та більше.

У загальному випадку барабанний котел складається з топкового пристрою для спалювання палива з повітрям (топка), випарника, підігрівача живильної води (економайзер), пароперегрівача, повітропідігрівача, насоса подачі поживної води, дуттьового вентилятора подачі повітря, витяжного вентилятора димових газів (димосос), каркасу та обмурівки, трубопроводів води, пари, повітря, газу, арматури, гарнітури.

Для харчових підприємств сьогодні доцільним є застосування котлів типу ДКВр паропродуктивністю 0,7 кг/с (2,5 т/год), 1,11 кг/с (4 т/год), 1,81 кг/с (6,5 т/ч), 2,78 кг/с (10 т/год) і тиском насиченої пари 1,3 МПа (13 кг/см²) з газомазутними топками, двобарабанних, вертикально-водотрубних, призначених для вироблення як насиченої так і перегрітої пари для реалізації технологічних процесів підприємств, системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, що виробляються Монастирищенським (Черкаська область) заводом котельного обладнання Енергометмаш.

Котли ДКВр мають високий, до 91%, ККД і є збірною конструкцією, що допускає переведення котлів з палива одного виду на інший. Широкий діапазон регулювання продуктивності (від 60 до 130% від номіналу) дозволяє використовувати котли з максимальною ефективністю та значно заощадити витрати на теплоенергопостачання.

Розглянемо двобарабанний котел водотрубний реконструйований ДКВр-10-13 (рис. 1), що забезпечує продуктивність вироблення пари 2,78 кг/с (10т/год) тиском 1,3 МПа (13 кг/см²).

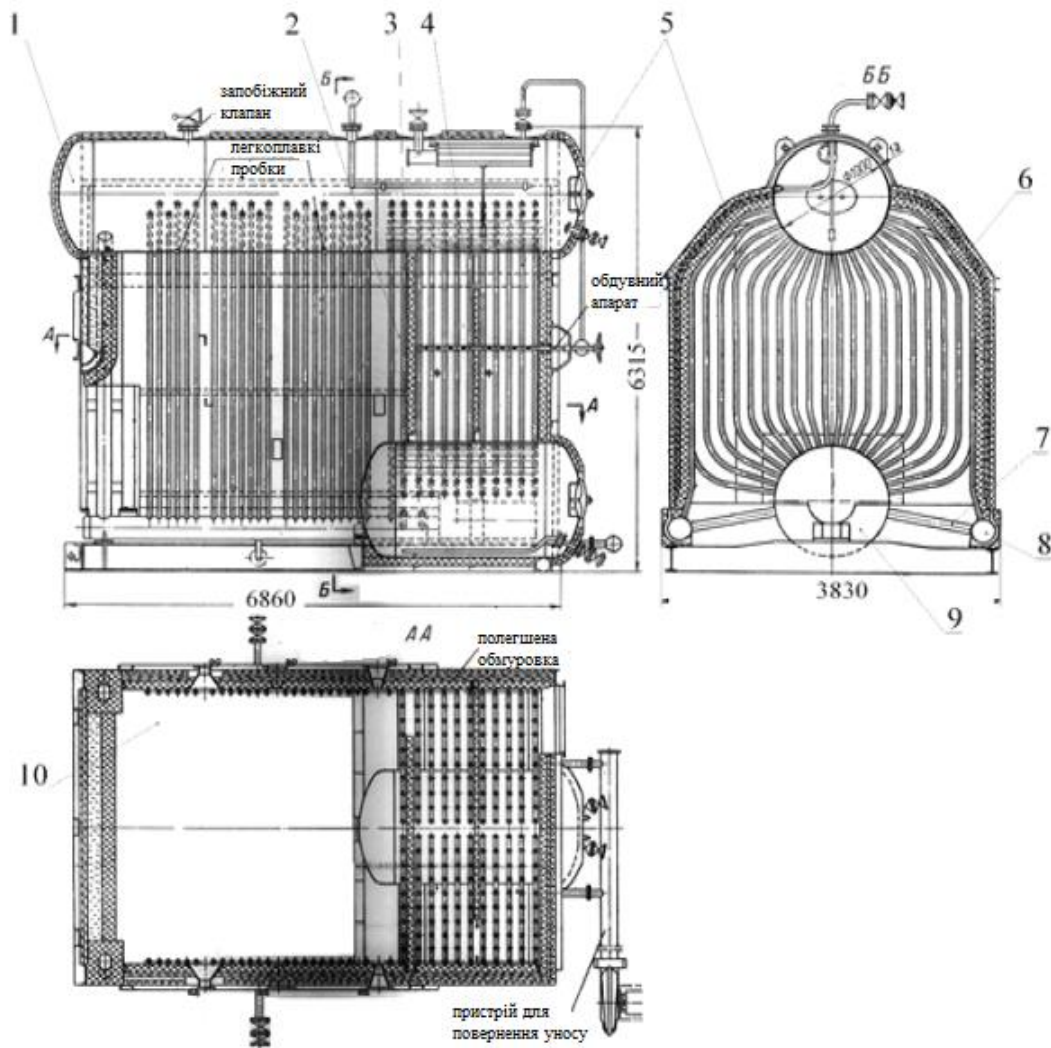


Рис. 1.- Схема котла ДКВр-10-13

Fig. 1.- Boiler scheme DKVr-10-13

Котел має довгий верхній 1 і короткий нижній 9 барабани для розділення води і пари, розташовані вздовж осі котла. Барабани з'єднані гнучими кип'ятильними трубами, що утворюють розвинений конвективний пучок 5. Перед конвективним пучком розташована екранована топкова камера 10. Труби бічних екранів 6 завальцьовані у верхньому барабані, нижні кінці екранних труб приварені до нижніх колекторів 8.

Топкова камера 10 розділяється трубами заднього екрана 3 на власне топку і камеру догорання 2, яка відокремлюється від топки трубами заднього екрана 3. Перший ряд труб конвективного пучка є одночасно і заднім екраном камери. Усередині конвективного пучка встановлюється чавунна перегородка 4, що розділяє його на перший та другий газоходи.

Живлення бічних екранів водою 6 здійснюється з нижніх колекторів 8, куди вода надходить по опускних трубах з верхнього барабана і, одночасно, по сполучних трубах 7 з нижнього барабана. Така схема підведення води в колектори підвищує надійність роботи котла при зниженому рівні води та сприяє зменшенню відкладень шламу у верхньому барабані.

Рух води по опускних трубах (вниз) і пароводяної суміші по трубах, що обігріваються (вгору) в рециркуляційному контурі: верхній барабан - труби, що не обігріваються - нижній барабан - труби, що обігріваються, здійснюється за рахунок напору, створюваного різницею ваг стовпів рідини опускних труб і пароводяної суміші (підйомних) труб.

Розглянемо процес виробництва пари в котлі ДКВр-10-13 як об'єкті керування (ОК). Основними технічними характеристиками парового котла, що забезпечують тиск, температуру і витрату продукту - насиченої пари (її характеризують тиск P_n і витрата F_n), є рівень води L_b і тиск у верхньому барабані P_b , що дорівнює P_n , розрідження у верхній частині топки - P_T , і співвідношення витрати палива F_T і витрати повітря, що нагнітається F_{B3} . Ці параметри можна віднести до наступних регламентів – технологічного (P_n), експлуатаційного (L_b , P_T), техніко-економічного (F_n , F_T). До техніко-економічного та екологічного регламенту віднесемо також витрати живильної води F_b , витрати F_d , температуру T_d , склад Q_d (концентрацію O_2 або CO_2 , шкідливості – CO , NO_x , SO_y) димових газів, витрату повітря, що нагнітається F_{B3} (рис. 2).

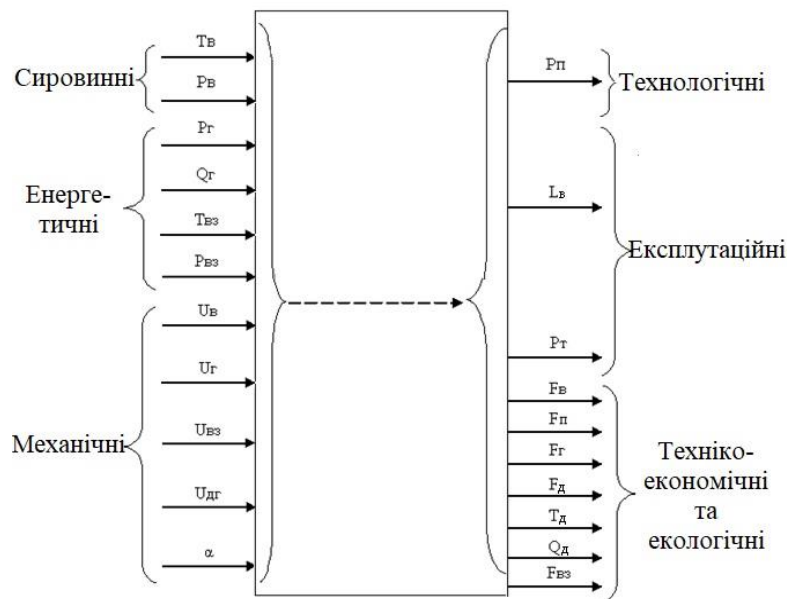


Рис. 2.- Параметрична схема виробництва пари в котлі ДКВр-10-13
Fig. 2.- Parametric diagram of steam production in the DKVr-10-13 boiler

Ці показники залежать від вхідних та проміжних параметрів: температури T_v та тиску P_v живильної води, які віднесемо до сировинних параметрів; тиску P_r , температури T_r , теплоти згоряння палива – газу Q_r , температури $T_{вз}$ та тиску $P_{вз}$ повітря, що нагнітається вентилятором, тиску димових газів P_d , які віднесемо до енергетичних параметрів; ступінь відкриття регулюючого органу (% х.р.о.) подачі живильної води u_v , газу – u_r , повітря – $u_{вз}$ у топку, відведення димових газів – $u_{дг}$, коефіцієнт теплообміну газів з поверхнею нагрівання котла – α – до механічних.

Найкращі умови протікання процесу отримання пари в паровому котлі барабанного типу створюються шляхом стабілізації: рівня води в барабані, тиску пари в паропроводі (барабані), розрідження в топці, дозування палива і повітря. Відхилення рівня води в барабані від номінального значення у бік зниження може викликати перегрів барабана та екранних труб, що пов'язано з порушенням їхньої міцності. При надмірному рівні води станеться надмірне зволоження пари, що не дозволяє підтримувати його параметри на заданому значенні.

Недостатнє розрідження в топці погіршує конвективний теплообмін у топці та димоходах через невелику швидкість димових газів та забруднення поверхонь теплообміну. Підвищене розрідження погіршує радіаційний теплообмін через швидке видалення продуктів згоряння і може призвести навіть до відриву факела від пальника. Нестача палива, що подається до пальників, призводить до зниження паропроductивності котла, а надлишок палива – до неприпустимого підвищення тиску в барабані, спрацьовування запобіжних клапанів та перевитрати палива.

Кількість повітря, що нагнітається в топку, повинна відповідати кількості палива, що подається, інакше або паливо згорятиме не повністю при нестачі повітря, або температура топкових газів знизиться внаслідок надлишку повітря. Порушення проектного водно-хімічного режиму котла може призвести до накипівтворення, що погіршує теплопередачу.

Розгляд особливостей процесів згоряння палива, тепло- та масообміну, що протікають у барабанному котлі, дозволяє сформулювати основні завдання його автоматизації: стабілізувати навантаження котла по парі, живлення котла водою; стабілізувати горіння в топці та підтримання в ній заданого надлишку повітря при спалюванні палива (газу).

Барабанний паровий котел як об'єкт автоматичного регулювання характеризується рядом властивостей, що ускладнюють його автоматизацію. Це, в першу чергу, велика кількість взаємопов'язаних вхідних та проміжних параметрів, по-друге, наявність глибоких збурень щодо витрати пари (до 30%), що відбирається технологічними споживачами, і, по-третє, це - високі вимоги, що висуваються до точності підтримки вхідних та проміжних параметрів, надійності роботи засобів автоматизації.

Взаємопов'язаність вхідних та проміжних параметрів визначається необхідністю підтримки теплового та матеріального балансу. Кількість палива, що спалюється, має відповідати кількості вироблюваної пари, яка, у свою чергу, повинна відповідати витраті води. Для економічності спалювання необхідно підтримувати постійне співвідношення витрат палива та дуттєвого повітря, а також забезпечити стійкий факел у топці.

Порушення теплового та матеріального балансу можуть призвести до значних відхилень параметрів роботи котла від номінального режиму, що створює небезпеку аварії та навіть руйнування обладнання, загрозу здоров'ю обслуговуючого персоналу. Для захисту котла від аварійних режимів необхідно передбачити заходи, що дозволяють або привести в допустимі межі параметри, що відхилилися від норми, або - призупинити процеси горіння і пароутворення. До таких аварійних режимів відносяться, наприклад, підвищення тиску в барабані котла,



надмірне змінення рівня води в барабані, підвищення яскравості та згасання факела, зупинка димососа тощо.

Для отримання економічного ефекту від модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 необхідно забезпечити виконання умов експлуатаційного та технологічного регламентів. Вироблення грійоючої пари регламентується її тиском $P_{п}$ і рівнем води $L_{в}$ в барабані котла, - віднесемо їх до регульованих координат. До регулюючих параметрів віднесемо положення регулюючих органів подачі газу на пальник $u_{г}$ та подачі живильної води в барабан котла $u_{в}$. Решту вхідних параметрів віднесемо до збурень.

Процес регулювання будемо розглядати на часовому проміжку, порівняному з тривалістю зміни на підприємстві. За цей період основні параметри газу, повітря та живильної води змінюються незначно. Тому зміни цих параметрів врахуємо у складі векторів неконтрольованих збурень f_1 і f_2 . Оскільки котел працює в умовах змінного навантаження, для підвищення якості регулювання доцільно враховувати споживання пари, що характеризує навантаження котла. Тому витрати пари $F_{п}$ доцільно віднести до контрольованих збурень. Побудовано координатну схему ОК (рис. 3).

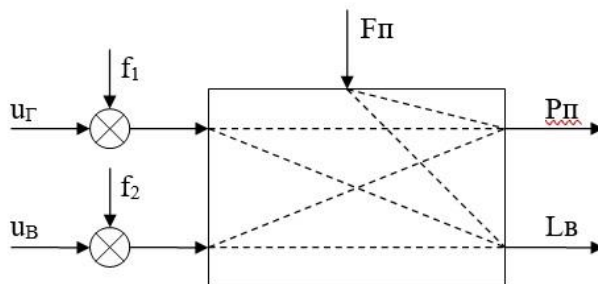


Рис. 3. – Координатна схема об'єкта керування
Fig. 3. – Coordinate diagram of the control object

Проведено активний і пасивний експеримент, розроблено комплекс математичних моделей технологічного процесу отримання грійоючої пари в котлі ДКВр-10-13 як об'єкта керування за результатами параметричної ідентифікації, якій були піддані перехідні характеристики, отримані «експериментальним» шляхом. Далі моделі були реалізовані в середовищі Matlab та отримані їх перехідні характеристики. Одержані моделі прийнято адекватними реальному об'єкту і використано їх для аналізу та синтезу системи автоматичного керування аналізованим агрегатом. В основу побудови САК покладено принцип замкненого керування.

Як показали проведені дослідження, САР тиску пари в барабані котла в умовах дії збурень має недостатню динамічну точність, на яку впливає канал контрольованого збурення « $F_{п} - P_{п}$ ». Доцільним є підвищення динамічної точності САР шляхом компенсації дії контрольованого збурення на контур регулювання тиску пари за рахунок побудови САР, інваріантної до контрольованого збурення (рис. 4).

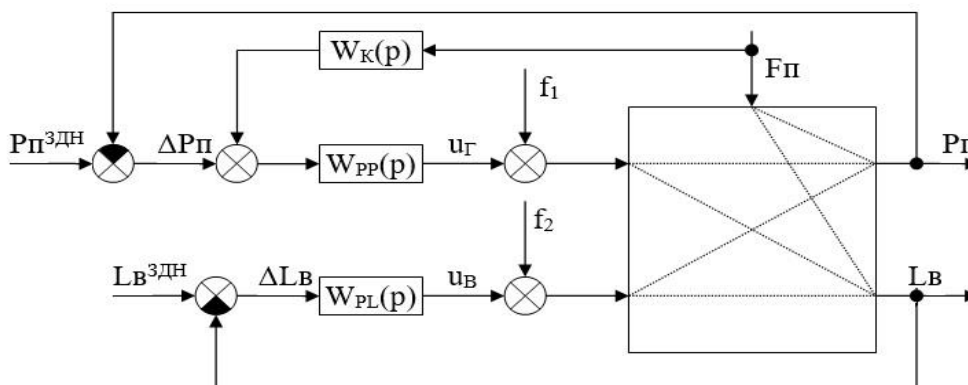


Рис. 4.- Структурна схема САР підвищеної динамічної точності
Fig. 4.- Structural diagram of SAR with increased dynamic accuracy

$P_{п}^{здн}$, $L_{в}^{здн}$ – задані значення тиску грійоючої пари та рівня води в барабані котла відповідно; $\Delta P_{п}$, $\Delta L_{в}$ – помилки регулювання тиску грійоючої пари та рівня води в барабані котла відповідно; $W_K(p)$, $W_{PP}(p)$, $W_{PL}(p)$ - передаточні функції корегуючого зв'язку, регулятора тиску грійоючої пари, регулятора рівня води в барабані котла відповідно

В результаті підвищення динамічної точності САР за рахунок введення в регулятор тиску пари в барабані котла коригувального зв'язку в умовах дії всіх збурень якість перехідних процесів і за тиском пари, і за рівнем води в барабані покращилася як за критерієм, так і за прямими показниками якості (рис. 5), (табл. 1).

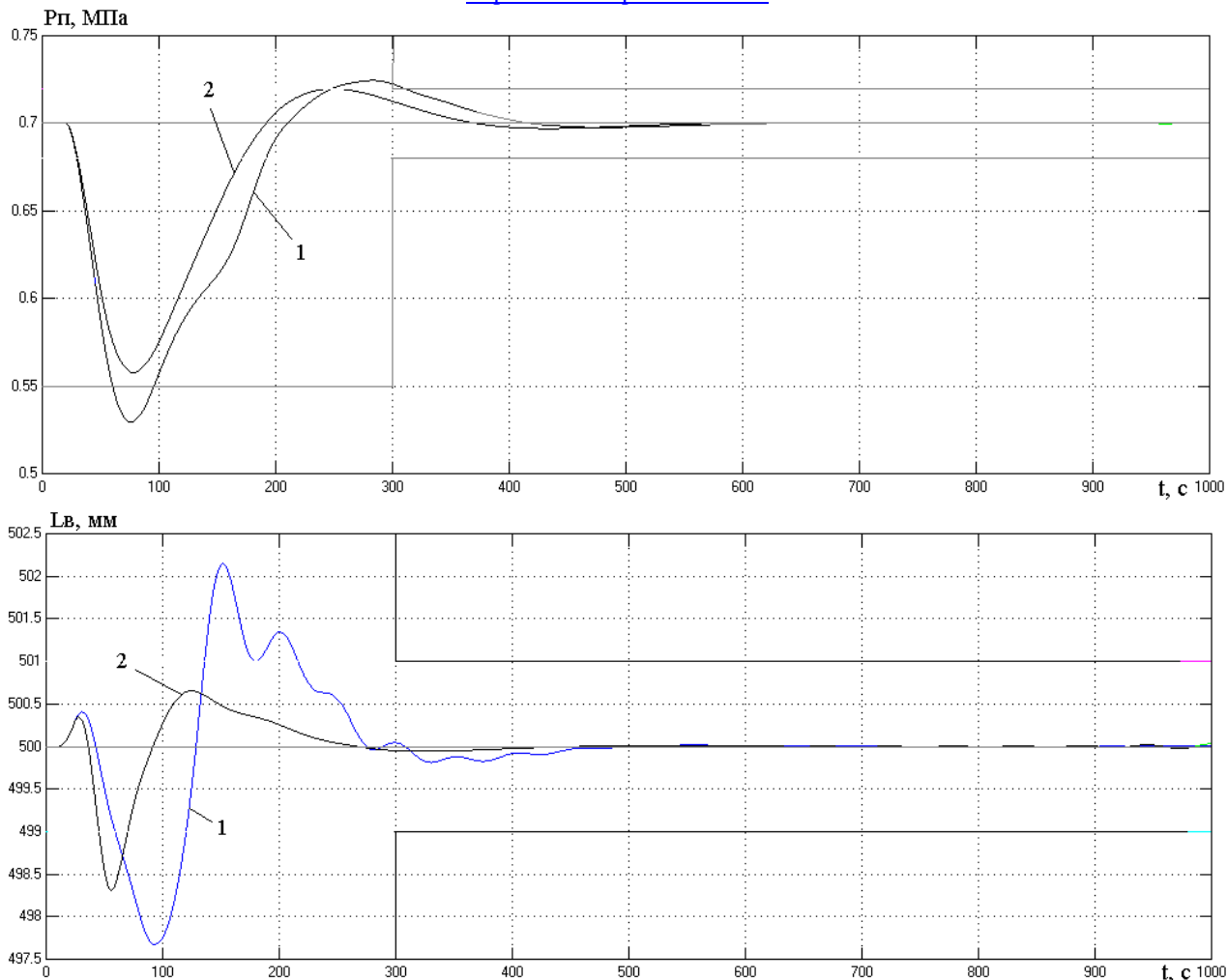


Рис. 5. – Результати моделювання роботи САР базової структури (1) та підвищеної динамічної точності (2) в умовах дії контрольованих та неконтрольованих збурень детермінованого характеру
Fig. 5. – Results of the simulation of the operation of the SAR of the basic structure (1) and increased dynamic accuracy (2) under the conditions of controlled and uncontrolled disturbances of a deterministic nature

Таблиця 1. - Результати порівняння САР базової структури та підвищеної динамічної точності

| Вид САР | $\Delta P_{п, \max}$, МПа | $\Delta L_{в, \max}$, мм | $T_{пп1}$, с | $T_{пп2}$, с | Значення критерію |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| САР базової структури | 0,17 | 2,33 | 310,3 | 215,9 | 635,3 |
| САР підвищеної динамічної точності | 0,14 | 1,69 | 170,9 | 69,8 | 225,5 |

Розроблено алгоритми логічного керування для підсистеми захисту котла від режимів роботи з несприятливими наслідками, для підсистем технологічного пуску та останову.

Обрано технічні засоби збирання інформації про хід технологічного процесу та впливу на нього, збирання інформації про стан обладнання та керування ним, розроблено технічну структуру системи керування котлом, а для цього попередньо визначено характеристики середовища, з яким взаємодіють засоби автоматизації та обслуговуючий персонал. Визначено задачі системи керування котельнею, вивчено розподілення функцій між рівнями керування.

При виборі технічної структури розглянуто альтернативні варіанти на базі засобів збору даних типу Adam-5000/485 та плати ПЗО типу Adam-5050, Adam-5017, Adam-5024, на базі засобів WAGO I/O, на базі засобів Octagon System

Всі розглянуті варіанти однаковою мірою забезпечують реалізацію передбачених завдань та алгоритмів контролю, реєстрації, сигналізації, керування, блокувань та регулювання. Порівняльний аналіз їх вартості за критерієм ціна-якість показує, що мінімальні витрати на комплектацію системи виходять при використанні як бази технічної структури ADAM серії 5000.

Розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні по обслуговуванню котла (рис. 6). Як інструмент для його розробки обрано SCADA-систему Genie. Інтерфейс дозволяє отримувати більш повну інформацію про стан котла у вигляді показання, сигналізації та реєстрації за рахунок збільшення числа параметрів, що відображаються. Значний обсяг сигналізації: кольоровий, текстовий та анімаційний,



дозволяє якісно (а не кількісно) оцінити хід процесу.

Розроблена стратегія дозволяє розширити функції автоматичного керування за рахунок реалізації п'ятиконтурної САР будь-якої складності та реалізації алгоритмів автоматичних пуску та зупинки.

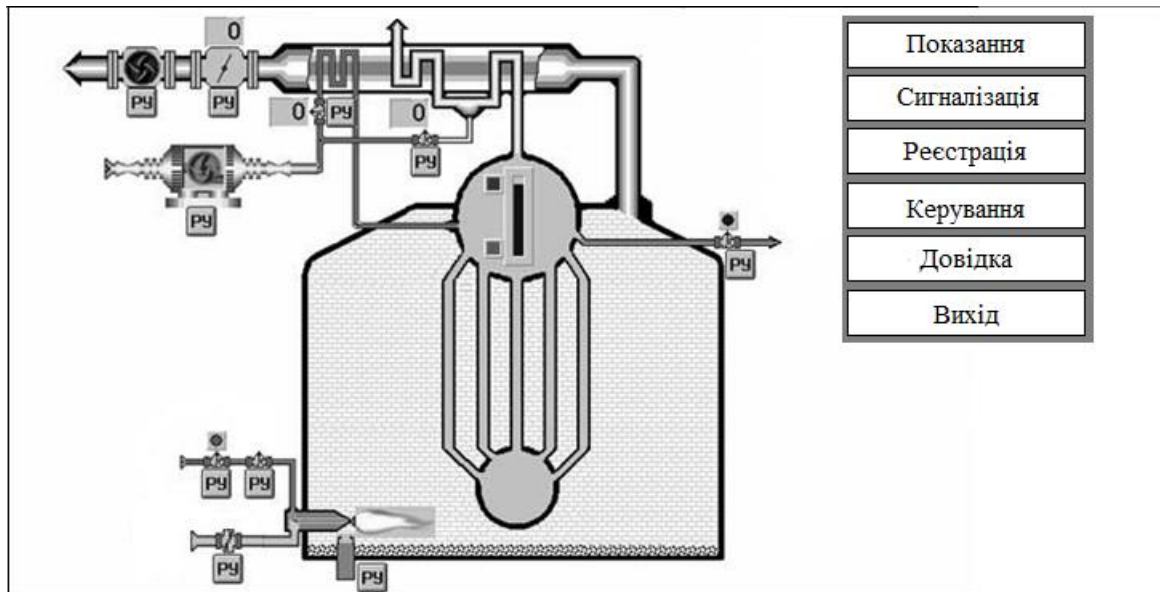


Рис. 6. – Основне вікно стратегії
Fig. 6. – The main strategy window

Розроблено програмне забезпечення для реалізації цифрових алгоритмів керування на функціонально- та вільно- програмованих контролерах ADAM фірми Advantech і робоча станція на базі IBM PC сумісного комп'ютера, на якому встановлена SCADA-система «Genie».

Розроблено комплект проектної документації на систему автоматизації в складі схеми автоматизації та специфікації; схеми принципової електричної стабілізації технологічних параметрів; схеми принципової електричної контролю та керування; схеми принципової електричної живлення; монтажної схеми МПК; схеми зовнішніх з'єднань електричних та трубних проводок.

Проект удосконалення системи автоматичного керування виробленням пари в колі ДКВр-10-13 є інвестиційно привабливим. Розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки.

Висновки

Виробництво продукції на підприємствах харчової промисловості пов'язано з істотним споживанням теплоти, яку одержують у власних парових котельнях підприємств.

Актуальним є вдосконалення САК виробленням пари в котлоагрегатах.

Відомі системи автоматичного керування мають низьку динамічну точність внаслідок неврахування відбору пари споживачами.

Запропоновано та розроблено ефективну систему автоматичного керування виробленням пари в котлоагрегаті ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності.

Проаналізовано процес виробництва пари як об'єкт керування.

Найкращі умови для отримання пари в паровому котлі барабанного типу створюються шляхом стабілізації: рівня води в барабані, тиску пари в паропроводі (барабані), розрідження в топці, дозування палива і повітря.

Основними завданнями автоматизації процесу пароутворення в котлі ДКВр-10-13 є стабілізація навантаження котла по парі, живлення котла водою; стабілізація горіння в топці та підтримання в ній заданого надлишку повітря при спалюванні газу.

Проведено активний і пасивний експеримент, розроблено і реалізовано комплекс математичних моделей технологічного процесу вироблення грючої пари в котлі ДКВр-10-13 в середовищі Matlab, проведено параметричну та структурну ідентифікацію моделей.

Побудована САР тиску пари в барабані котла в умовах дії збурень має недостатню динамічну точність.

Доцільним є підвищення динамічної точності САР шляхом побудови САР, інваріантної до контрольованого збурення.

Обрано технічні засоби автоматизації.

Розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні.

Розроблено програмне забезпечення для реалізації цифрових алгоритмів керування на функціонально- та вільно- програмованих контролерах ADAM фірми Advantech і робоча станція на базі IBM PC сумісного комп'ютера.

Розроблено комплект проектної документації на систему автоматизації.

Проект удосконалення системи автоматичного керування виробленням пари в котлі ДКВр-10-13 є



інвестиційної привабливим.

Список використаних джерел

1. Офіційний сайт СВ Альтера (Електронний ресурс) / Автоматизована система керування котельнею.- URL: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/water_supply/7705.php.
2. Офіційний сайт ПП ПромМонтажНаладка (Електронний ресурс) / Автоматизація парових котельнь.- URL: <https://promnaladka.com.ua/poslugi/36-avtomatizacija-parovih-kotelen-palivo-luzga-sojashnika.html>.
3. UA No36015. Спосіб автоматичного керування, контролю, захисту та сигналізації котлоагрегату / Р.К. Стасевич, О.В. Садовой, В. І. Романенко та ін. МПК F23N1/02; заявл. 12.05.2008 № 200806227. Опубл. 10.10.2008. Бюл.№ 19.
4. Барський В.А. Адаптивна система керування тягодуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3/В.А. Барський, А.Є. Фрішман, А.Ю. Лисенка / Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – № 3. –2012. –С. 199-201.
5. Фам В.Д., Коновалов В.І. Дослідження варіантів побудови САР рівня в барабані парового котла / Збірник праць XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених, 2013. - С. 225-227.
6. Пура А.С., Тарахтій О.С. Аналіз існуючих схем регулювання рівня в барабані парового котла / Молодий вчений, 2019, № 11 (75).- С. 163-166. – URL: <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1398/1366/>
7. Хоптій В.Я. Автоматизація технологічних процесів котельних установок, як підсистеми об'єкту управління / Техніка будівництва ,2002, № 12.- С. 81-84.
8. АС СССР № 1627787 Способ и система автоматического управления подачей воздуха в топку котла. МКІ F23N3/00; опубл.15.02.91. Бюл. № 6.
9. UA No46215 F23N3/00 Спосіб та система (варіанти) автоматичного управління подаванням повітря в топку котла;опубл.15.05.02.Бюл. № 5.
10. USA 5585547, IPC G01N 27/26. Oxygen sensor probe for boiler / Ki S. Kim, Han S. Song, Geun C. Yum, Dae J. Ko (Rep. of Korea) –No 369537; fil. 5.01.1995; publ. 17.12.1996. –8 p.
11. USA 7756591B2, IPC G05B 13/02. System for optimizing oxygen in a boiler / J. Jia, S. Piche, H. Beaver (USA) –No 11/680084; fil. 25.04.2006; publ. 13.07.2010. –22 p.
12. USA 8230825B2, IPC F22B 37/42. Boiler control system / Warren G. Knorr, Jr (USA) – № 12/045,294; fil. 10.03.2008; publ. 31.07.2012. – 14 p.
13. Черняк О.І. Автоматизація котлоагрегату переробного підприємства (рукопис).- Одеса: ОНАХТ, 2011.- 180с.

References

- [1.] Ofitsiyniy sait SV Altera (Elektronnyi resurs) / Avtomatyzovana sistema keruvannia kotelnei.- URL: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/water_supply/7705.php.
- [2.] Ofitsiyniy sait PP PromMontazhNaladka (Elektronnyi resurs) / Avtomatyzatsiia parovykh kotelen.- URL: <https://promnaladka.com.ua/poslugi/36-avtomatizacija-parovih-kotelen-palivo-luzga-sojashnika.html>.
- [3.] UA No36015. Sposib avtomatichnoho keruvannia, kontroliu, zakhystu ta syhnalizatsii kotloahrehatu / R.K. Stasevych, O.V. Sadovoi, V. I. Romanenko ta in. MPK F23N1/02; zaiavl. 12.05.2008 No 200806227. Opubl. 10.10.2008. Biul.No 19.
- [4.] Barskyi V.A. Adaptivna sistema keruvannia tiahoduttovymy mekhanizmany kotelnykh ahrehativ EKO-3/V.A. Barskyi, A.Ie. Frishman, A.Iu. Lysenka // Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. –No 3. –2012. –S. 199-201.
- [5.] Fam V.D., Konovalov V.I. Doslidzhennia variantiv pobudovy SAR rivnia v barabani parovoho kotla / Zbirnyk prats KhI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh, 2013. - S. 225-227.
- [6.] Rura A.S., Tarakhtii O.S. Analiz isnuuiuchykh skhem rehuliuвання rivnia v barabani parovoho kotla / Molodyi vchenyi, 2019, № 11 (75).- S. 163-166. – URL: <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1398/1366/>
- [7.] Khoptii V.Ia. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv kotelnykh ustanovok, yak pidsystemy obiekту upravlinnia / Tekhnika budivnytstva ,2002, № 12.- S. 81-84.
- [8.] AS SSSR № 1627787 Sposob i sistema avtomaticheskogo upravleniya podachey vozduha v topku kotla. MKI F23N3/00; opubl.15.02.91. Byul. № 6.
- [9.] UA No46215 F23N3/00 Sposib ta sistema (varianty) avtomatichnoho upravlinnia podavanniam povitria v topku kotla;opubl.15.05.02.Biul. № 5.
- [10.] USA 5585547, IPC G01N 27/26. Oxygen sensor probe for boiler / Ki S. Kim, Han S. Song, Geun C. Yum, Dae J. Ko (Rep. of Korea) –No 369537; fil. 5.01.1995; publ. 17.12.1996. –8 p.
- [11.] USA 7756591B2, IPC G05B 13/02. System for optimizing oxygen in a boiler / J. Jia, S. Piche, H. Beaver (USA) – No 11/680084; fil. 25.04.2006; publ. 13.07.2010. –22 p.
- [12.] USA8230825B2, IPC F22B 37/42. Boiler control system / Warren G. Knorr, Jr (USA) – № 12/045,294; fil. 10.03.2008; publ. 31.07.2012. – 14 p.
- [13.] Cherniak O.I. Avtomatyzatsiia kotloahrehatu pererobnoho pidpriemstva (rukopys).- Odеса: ONAKhT, 2011.- 180s.

Отримана в редакції 07.05.2024. Прийнята до друку 28.05.2024. Received 07 May 2024. Approved 28 May 2024. Available in Internet 23 July 2024