

**Світлий І.М.**

Одеський національний технологічний університет

**Черняк О.І.**

Одеський національний технологічний університет

## ЩОДО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПАРИ В КОТЛАХ ДКВР-10-13

*Значна частина технологічних процесів на промислових, сільськогосподарських, харчових підприємствах пов'язана з великим споживанням пари, яку виробляють парові котли у власних котельнях підприємств. Виклики сьогодення вимагають підвищення енергоефективності парових котлів, забезпечення ресурсозбереження, зменшення шкідливих викидів у зовнішнє середовище тощо. Вирішити ці складні завдання можливо, зокрема, шляхом підвищення інтелектуального рівня алгоритмів автоматичного керування виробленням пари у котлах. Тому актуальним є вдосконалення існуючих подібних систем автоматичного керування. Відомо чимало досліджень в цьому напрямку, однак існуючі системи керування виробленням пари не забезпечують необхідну динамічну точність керування внаслідок неврахування в контурі регулювання тиску пари в барабані котла істотного збурення – відбору пари споживачами. Авторами запропоновано ефективну систему автоматичного керування виробленням пари в котлі ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності на основі принципу інваріантності до контрольованого збурення. В ході проведеного дослідження було 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; обґрунтовано економічну доцільність та інвестиційну привабливість розробки, розглянуто питання техніки безпеки та охорони праці при експлуатації котла.*

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

**Постановка проблеми.** Значна частина технологічних процесів на промислових, сільськогосподарських, харчових підприємствах пов'язана з великим споживанням пари, яку виробляють встановлені в їх котельнях парові котли.

Виклики сьогодення вимагають підвищення енергоефективності парових котлів, забезпечення ресурсозбереження, зменшення шкідливих викидів у зовнішнє середовище тощо. Вирішення цих завдань традиційними шляхами за рахунок вдосконалення енергетичного обладнання низько ефективно. Необхідно впровадження сучасних систем автоматичного керування (САК). Однак складність котла як 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 експлуата-

ції енергетичного обладнання з одного боку і існуючий рівень розвитку науки і техніки в цій галузі з іншого суперечать один одному. Шляхом усунення цієї суперечності може бути вдосконалення існуючих САК котельним обладнанням.

Серед задач, які стоять перед сучасними САК парогенеруючим обладнанням, основними є 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 різних режимах роботи; оптимальне ведення процесу з метою отримання теплоти заданої якості та кількості тощо.

Серед застосовуваних парових котлів широко розповсюджені агрегати типу ДКВр, в яких використовують традиційні, типові схеми

автоматичного керування, які однак не забезпечують достатню ефективність пароутворення. У зв'язку з цим необхідна розробка ефективних САК процесом виробництва пари. Зокрема актуальним є підвищення ефективності автоматичного керування котлом ДКВр-10-13.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням автоматизації технологічного процесу виробництва пари займалися чимало дослідників. Так у СВ «Альтера» запропонували автоматизовану систему керування котельнею, 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]. У ПП «Пром-МонтажНаладка» розробили САК котельнею, яка містить автоматичне підтримання заданого тиску пари в котлі, зміною подачі палива, автоматичне підтримання заданого рівня води в барабані котла, зміною подачі живильної води в котел, автоматичне підтримання тиску повітря на горіння пропорційно до обертів шнека подачі палива відповідно до співвідношення паливо-повітря зміною обертів двигуна вентилятора, автоматичне підтримання заданого розрідження в топці котла, зміною обертів двигуна димососа [2]. Р.К. Стаевич, 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]. В.А. Барський розробив адаптивну систему керування тяго- дуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3 [4]. Чимало вітчизняних дослідників розглядають рівень води в барабані котла як один з найважливіших його регульованих параметрів, оскільки його істотне зниження або підвищення суттєво знижує ефективність його роботи і може призвести до виходу з строю котла в цілому [5]. Раура А.С., Тарахтій О.С. обґрунтовують, що регулювання живлення котлів невеликої потужності здійснюється одноімпульсними регуляторами за сигналами датчиків рівня води в барабані. У котлах середньої та великої паропродуктивності з малим водяним об'ємом застосовуються двоімпульсні регулятори живлення за рівнем води і витратою пари, а також триім-

пульсні, що регулюють живлення парового котла за сигналами по рівню води, витраті живильної води та витраті пари [6]. В.Я. Хоптій розглядає автоматизоване керування виробництвом пари, яке забезпечує підтримку витрати палива, температури, тиску пари, економію електрики [7]. Компанія Terplolider запропонувала САК 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]. Ще одним відомим рішенням є САК подачею повітря в топку котла, що забезпечує режим оптимального горіння [9]. Серед зарубіжних пропозицій найбільшого поширення набули багатофункціональні пристрої автоматичного контролю якості процесу горіння на базі датчиків  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO_x$  тощо [10–12], однак такі системи можуть бути використанні лише з котлами певного типу.

Усі розглянуті рішення мають спільний недолік, - низьку динамічну точність керування внаслідок неврахування істотного збурення – відбору (споживання) пари споживачами.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз можливості підвищення інтелектуального рівня алгоритмів автоматичного керування виробленням пари у котлі ДКВр-10-13 шляхом розробки ефективної САК підвищеної динамічної точності, інваріантної до контрольованого збурення.

**Викладення основного матеріалу.** На початку дослідження було проаналізовано процес виробництва пари як об'єкт керування, обґрунтовано доцільність модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 в котельнях переробних підприємств [13]. Виробляють пару котельні установки енергетичні, промислові та опалювальні. Промислові котельні харчових підприємств комплектують барабанними котлами малої та середньої потужності.

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/см<sup>2</sup>) з газомазутними топками, двобарабних, вертикально-водотрубних, призначених для вироблення як насиченої так і перегрітої пари для реалізації технологічних процесів підприємств, системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання тощо.

Розглянемо двобарабний котел водотрубний реконструйований ДКВр-10-13, що забезпечує продуктивність вироблення пари 2,78 кг/с (10т/год) тиском 1,3 МПа (13 кг/см<sup>2</sup>). Проаналізуємо його як об'єкт керування (ОК). Основними параметрами, 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 –  $P_r$ , та співвідношення витрати палива  $F_r$  і витрати повітря, що нагнітається  $F_{вз}$ . Ці параметри можна віднести до регламентів – технологічного ( $P_n$ ), експлуатаційного ( $L_b$ ,  $P_r$ ) та техніко-економічного та екологічного ( $F_n$ ,  $F_r$ ). До останнього 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  $F_{вз}$  (рис. 1).

Ці показники залежать від вхідних та проміжних параметрів: температури  $T_b$  та тиску  $P_b$  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 регулюю-

чого органу (% х.р.о.) подачі живильної води  $u_b$ , газу –  $u_r$ , повітря –  $u_{вз}$  у топку, відведення димових газів –  $u_d$ , коефіцієнт теплообміну газів з поверхнею нагрівання котла  $\alpha$  – до механічних.

Барабаний 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, – високі вимоги, що висуваються до точності підтримки вхідних та проміжних параметрів, надійності роботи засобів автоматизації.

Для отримання економічного ефекту від модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 необхідно забезпечити виконання умов експлуатаційного та технологічного регламентів. Вироблення гріючої пари регламентується її тиском  $P_n$  і рівнем води  $L_b$  в барабані котла, – віднесемо їх до регульованих координат. До регулюючих параметрів віднесемо положення регулюючих органів подачі газу на пальник  $u_r$  та подачі живильної води в барабан котла  $u_b$ . 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

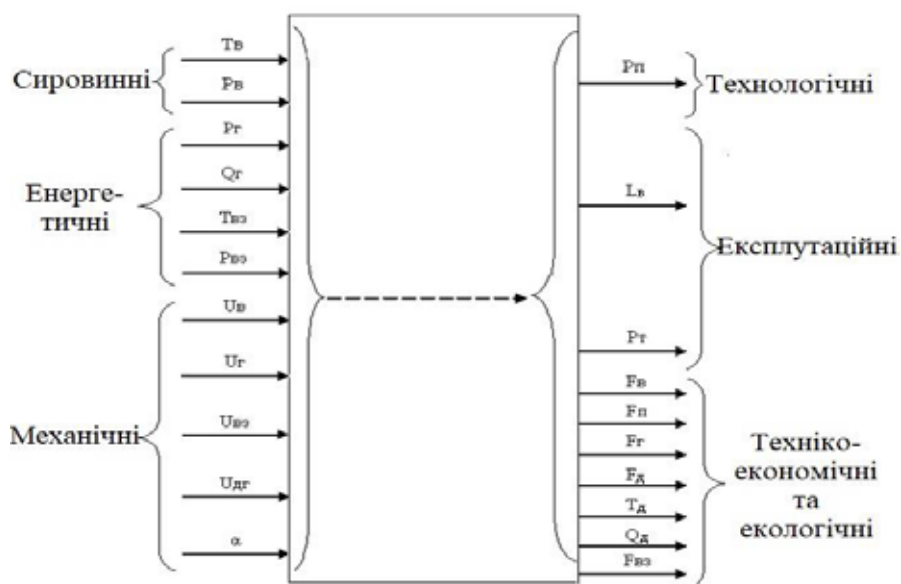


Рис. 1. Параметрична схема вироблення пари в котлі ДКВр-10-13

змінного навантаження, для підвищення якості регулювання доцільно враховувати споживання пари, що характеризує навантаження котла. Тому витрати пари  $F_{\Pi}$  доцільно віднести до контрольованих збурень. Побудовано координатну схему ОК (рис. 2).

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

Як показали проведені дослідження, система автоматичного регулювання (САР) тиску пари в барабані котла в умовах дії збурень має недостатню динамічну точність, на яку впливає канал контрольованого збурення « $F_{\Pi} - P_{\Pi}$ ». 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. 3).

В результаті підвищення динамічної точності САР за рахунок введення в регулятор тиску пари коригуючого зв'язку в умовах дії збурень якості перехідних процесів і за тиском пари, і за рівнем води в барабані покращилася як за інтегральним критерієм, так і за прямими показниками якості (рис. 4, табл. 1).

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.

Розглянуто альтернативні варіанти технічної структури на базі засобів збору даних Adam-5000/485 та плати ПЗО типу Adam-5050, Adam-

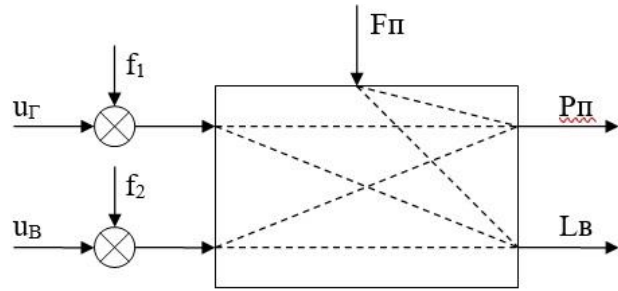


Рис. 2. Координатна схема об'єкта керування

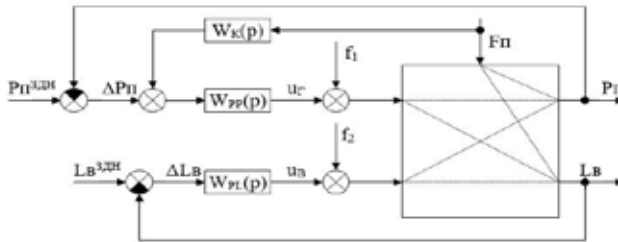


Рис. 3. Структурна схема САР підвищеної динамічної точності  $P_{\Pi}^{зад}$ ,  $L_B^{зад}$  – задані значення тиску гріючої пари та рівня води в барабані котла;  $\Delta P_{\Pi}$ ,  $\Delta L_B$  – помилки регулювання тиску гріючої пари та рівня води в барабані;  $W_{\kappa}(p)$ ,  $W_{рп}(p)$ ,  $W_{пл}(p)$  – передаточні функції корегуючого зв'язку, регулятора тиску гріючої пари, регулятора рівня води в барабані котла відповідно

5017, Adam-5024, WAGO I/O, Octagon System, які однаковою мірою забезпечують реалізацію алгоритмів керування. Порівняльний аналіз їх вартості за критерієм ціна-якість показує, що мінімальні витрати на комплектацію системи забезпечує використання як бази технічної структури ADAM серії 5000.

Розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні (рис. 5) на базі SCADA-системи Genie, який дозволяє отримувати вичерпну кількісну інформацію про стан котла. Кольорова, текстова та анімаційна сигналізація дозволяє якісно оцінити хід процесу.

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.

Проект удосконалення САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 є інвестиційно привабливим; розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки.

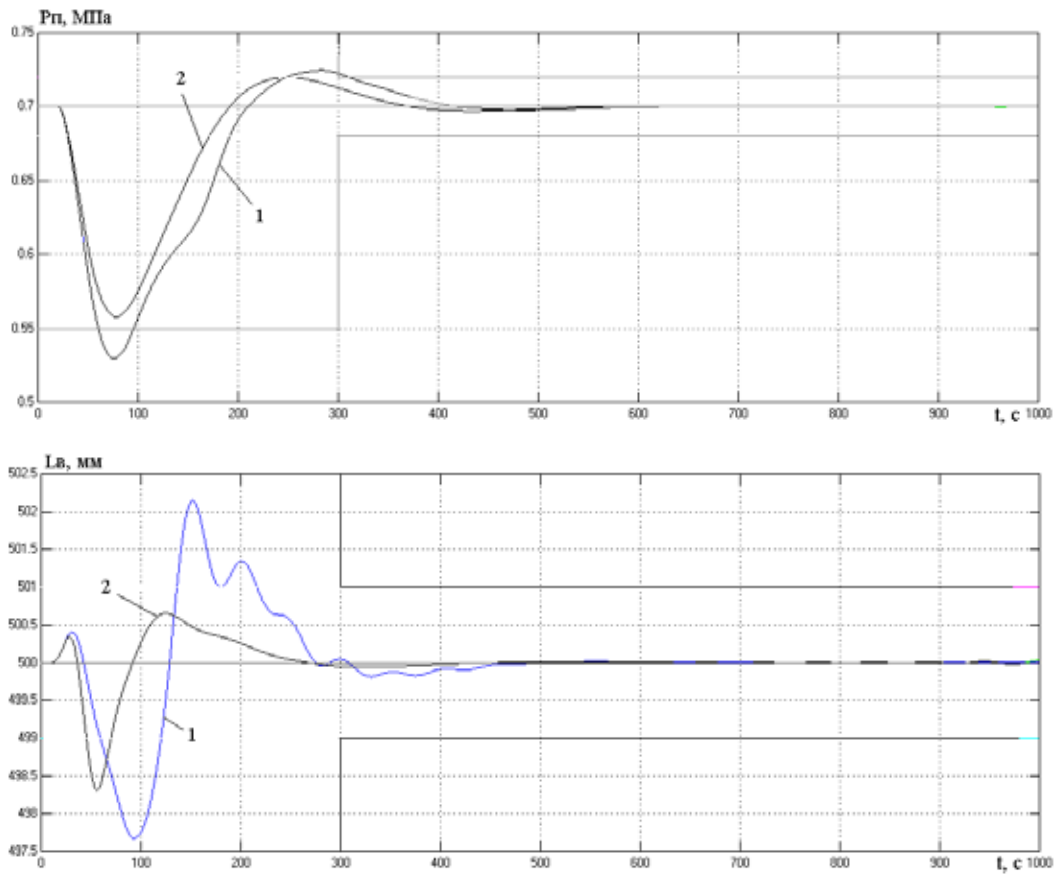


Рис. 4. Результати моделювання роботи САР базової структури (1) та підвищеної динамічної точності (ПДТ) (2) в умовах дії контрольованих та неконтрольованих збурень детермінованого характеру

Таблиця 1

Порівняльний аналіз САР базової структури та ПДТ

| Вид САР                            | $\Delta P_n^{max}$ , МПа | $\Delta L_b^{max}$ , 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             |

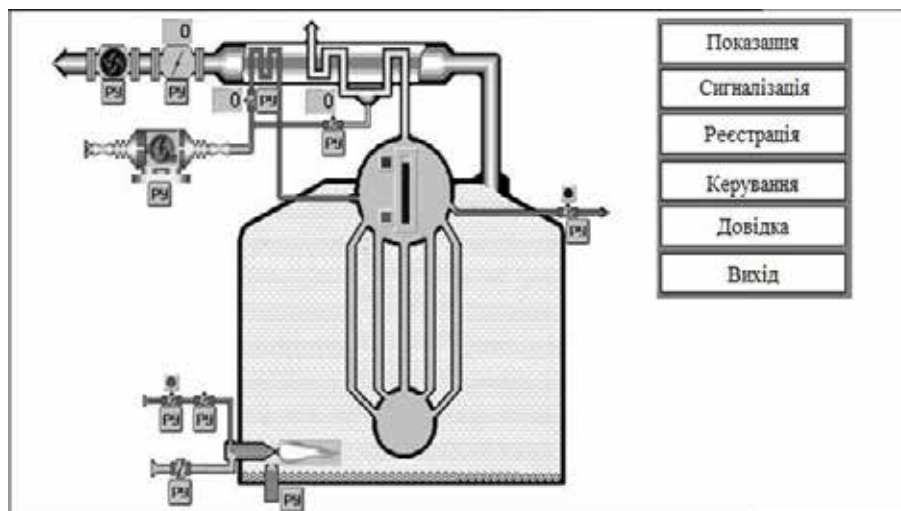


Рис. 5. Основне вікно стратегії

**Висновки.** Актуальним є вдосконалення САК вироблення пари в парових котлах. Відомі САК мають низьку динамічну точність внаслідок неврахування відбору пари споживачами. Запропоновано ефективну САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності, інваріантної до контрольованого збурення. Розроблено комплекс математичних моделей процесу вироблення пари в котлі ДКВр-10-13, проведено їх параметричну та структурну ідентифікацію.

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 САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 є інвестиційної привабливим.

### Список літератури:

1. Офіційний сайт СВ Альтера. URL: [https://www.svaltera.ua/solutions/typi\\_cal/water\\_supply/7705.php](https://www.svaltera.ua/solutions/typi_cal/water_supply/7705.php) (дата звернення: 16.05.2024).
2. Офіційний сайт ПП ПромМонтажНаладка. URL: <https://promnaladka.com.ua/poslugi/36-avtomatizacija-parovih-kotelen-palivo-luz-ga-sojashnika.html> (дата звернення: 16.05.2024).
3. Патент UA № 36015. 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., Фрішман А.Є., Лисенко А.Ю. Адаптивна система керування тягодуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3 / *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2012. № 3. 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. Рура А.С., Тарахтій О.С. Аналіз існуючих схем регулювання рівня в барабані парового котла / *Молодий вчений*, 2019. № 11 (75). С. 163–166.
7. Хоптій В.Я. Автоматизація технологічних процесів котельних установок, як підсистеми об'єкту управління / *Техніка будівництва*, 2002 № 12. С. 81–84.
8. Офіційний сайт компанії Teplolider. URL: <https://teplolider.ua/uk/korysno-znaty/avtomatyka-v-tverdopalynnomu-kotli-serii-kvt-lider.html> (дата звернення: 16.05.2024).
9. Патент UA № 46215 Спосіб та система (варіанти) автоматичного управління подаванням повітря в топку котла / І.В. Шаповал. МПК F23N3/00; заявл. 03.01.2001 № 2001010052; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5/ 2002.
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) – № 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) – № 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. 180 с.

### **Svityi I.M., Cherniak O.I. ABOUT STEAM PRODUCTION AUTOMATIC CONTROL IN BOILERS DKVr-10-13**

*A significant part of the technological processes at industrial, agricultural, and food enterprises is connected with the large consumption of steam produced by steam boilers in the enterprises' own boiler rooms. Today's challenges require increasing the energy efficiency of steam boilers, ensuring resource conservation, reducing harmful emissions into the environment, etc. It is possible to solve these complex tasks, in particular, by increasing the intellectual level of algorithms for automatic control of steam production in boilers. Therefore, it is urgent to improve the existing similar automatic control systems. A lot of research in this direction is known, but the existing control systems do not provide the necessary dynamic accuracy of control due to the failure to take into account in the steam pressure regulation circuit in the boiler drum a significant disturbance – the selection of steam by consumers. The authors proposed an effective system of automatic control of steam production in the DKVr-10-13 boiler of increased dynamic accuracy based on the principle of invariance to a controlled disturbance. In the course of the research, the technological process of steam generation 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 are substantiated, the issue of safety and occupational health and safety during the operation of the boiler is considered.*

**Key words:** *steam generation, boiler, automation, automatic control system, dynamic accuracy improvement.*