

УДК 621.182-5

АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ**ЧАСТИНА 2. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**¹⁾Запорожець А. О., ²⁾Куц Ю. В.¹⁾Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УкраїнаE-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua, y.kuts@ukr.net

Ефективність функціонування котельних установок залежить від наявності достовірної інформації про хід технологічних процесів. Відсутність контрольно-вимірювальних систем складу відхідних газів призводить до низької ефективності роботи котлоагрегату, зокрема, через неякісне спалювання палива. Тому у сучасних умовах експлуатації котельних установок актуальним є розроблення технологічних рішень, орієнтованих на пошук та мінімізацію причин та механізмів утворення шкідливих речовин у відхідних газах.

У зв'язку з тим, що заміна зношених котлоагрегатів на нові потребує значних капіталовкладень, перспективним напрямом є модернізація існуючих котлоагрегатів. Це маловитратний ефективний спосіб раціонального використання палива з одночасним зменшенням рівня шкідливих речовин у відхідних газах. Актуальним залишається забезпечення функціонування систем контролю за складом повітряно-паливної суміші (ППС) із заданою швидкістю та високою достовірністю підтримання коефіцієнта надлишку повітря (КНП) на стехіометричному рівні.

У статті запропоновано алгоритм роботи системи автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах середньої та малої потужності шляхом регулювання співвідношення компонент ППС для пальника зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню. Розглянуто алгоритми функціонування частотного регулятора співвідношення компонент ППС в різних режимах роботи. Розроблені алгоритми дозволили підтримувати стехіометричне співвідношення «повітря-паливо» у топці котла, знизити рівень викидів токсичних речовин в атмосферу та підвищити коефіцієнт корисної дії котла за рахунок оптимізації процесу спалювання палива. Програмувач співвідношення ППС виконаний в середовищі технічного програмування LM Programmer і працює з операційними системами сімейства Windows (XP, Vista, 7, 8, 10) та сенсорами кисню виробництва фірми Bosch. Візуалізація процесу контролю процесом спалювання палива виконана в середовищі технічного програмування LogWorks 3 та функціонує в середовищі операційних систем Windows.

Ключові слова: котлоагрегат; контроль; керування; спалювання палива; алгоритмічне та програмне забезпечення; сенсор кисню.

Вступ

В роботі [1] розглянута загальна проблема підвищення ефективності спалювання палива та зниження викидів в атмосферу шкідливих речовин, запропоновано структуру системи керування та контролю процесу спалювання палива на основі застосування ширококутового сенсора кисню та частотно-регульованого електроприводу вентилятора дугтя.

У цій системі використано переваги режиму керування процесом спалювання палива зі ступінчастим регулюванням складу повітряно-паливної суміші (ППС) за сигналами зворотного зв'язку від сенсора кисню [2, 3].

Також запропоновані технічні рішення та розглянуте апаратне забезпечення орієнтовані на використання у котельнях комунально-побутового сектору та промислових підприємств з котлоагрегата-

ми потужністю до 3,5 МВт. Важливою складовою такої системи є алгоритмічно-програмне забезпечення. Його головним призначенням є підтримання стабільного розрідження в верхній частині топки, що в свою чергу, є необхідною умовою стійкості процесу горіння [4-6]. Збурювальним впливом у цьому процесі є зміна витрати повітря, що викликається зміною технологічного режиму спалювання. До останнього часу єдиним методом регулювання було управління повітряною заслінкою (шибером) [7, 8]. Впровадження енергозберігаючих технологій привело до широкого використання електронних перетворювачів для реалізації частотного управління асинхронним приводом вентилятора [9, 10]. Водночас, спроба відпрацювати швидкозмінювані процеси призводить до увімкнення аварійних режимів в частотному регуляторі (через високий момент інерції). Збільшення продуктивно-

сті вентилятора призводить до небезпеки перевищення критичного моменту асинхронного приводу і, як наслідок, втрати стійкості. Один зі методів усунення цього протиріччя пов'язаний з одночасним використанням в системі як механізмів заслінки для парювання швидкозмінних процесів (з переведення її у відкритий стан при стабільних режимах), так і регулювання частотним приводом для збереження ефекту енергозбереження.

В роботі [1] розглянуто особливості способу керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах, який ґрунтується на вимірюванні концентрації кисню у відхідних газах та ступінчастій корекції складу ППС в зоні спалювання. Метою цієї статті є розроблення алгоритмічно-програмної підтримки роботи такої системи та її окремих частин.

Алгоритмічне забезпечення системи керування процесом спалювання

Алгоритм роботи системи автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах регулюванням співвідношення компонент ППС для пальника зі зворотним зв'язком по сигналам сенсора кисню зображено на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм функціонування КСК на основі частотного регулювання співвідношення компонент ППС для пальника зі зворотним зв'язком по сигналам сенсора кисню

Особливістю алгоритму є застосування частотного регулювання, за допомогою якого плавно змінюється кількість повітря, що подається в зону горіння. За допомогою сенсора вимірюється концентрація кисню у відхідних газах. Отримана вимірювальна інформація опрацьовується системою. Залежно від поточного значення коефіцієнту над-

лишку повітря (КНП, α) формується сигнал керування – зменшується або збільшується частота обертання вентилятора на 0,1 Гц (при $\alpha > X$ чи $\alpha < X$ відповідно, де X – виміряне значення КНП). Після встановлення стаціонарного режиму роботи вентилятора повторно проводиться опитування.

Корекція кількості палива, що подається до пальника дає змогу підтримувати стехіометричне співвідношення «повітря-паливо» у топці котла [11, 12], знизити рівень викидів токсичних речовин в атмосферу та підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) котла внаслідок оптимізації процесу спалювання палива. Теоретичні значення стехіометричного співвідношення «повітря-паливо» для деяких видів палива наведено в роботах [13, 14].

Реалізація алгоритму функціонування КСК

Для реалізації запропонованого алгоритму був застосований регулятор співвідношення частотний (РСЧ) (рис. 2), призначений для регулювання кількості повітря, що подається на пальник типу ПБГМ для підтримки співвідношення «повітря-паливо» за допомогою зміни частоти обертання асинхронного трифазного електродвигуна вентилятора.

Кількість повітря, що подається до паливничного пристрою, залежить від положення регулюючого паливного органу і програмується під час режимного налагоджування для 8 значень (точок) співвідношення «повітря-паливо».



Рис. 2. Регулятор співвідношення частотний виробництва ПРОМЕЛ

Реалізовано алгоритми функціонування регулятора для наступних режимів: робота; встановлення параметрів регулятора; налаштування співвідношення «повітря-паливо»; перегляд; корекція співвідношення «повітря-паливо»; відновлення.

Режим «Робота» є основним експлуатаційним режимом, на який автоматично налаштовується регулятор при включенні напруги живлення. В цьому режимі регулятор запускає електродвигун, проводить «опитування» датчика положення регулюючого органу палива, обчислює за отриманими даними поточне значення його положення. За допомогою запрограмованої залежності у вигляді кусково-лінійної кривої, для 8 значень (точок) ква-

зі оптимальної відповідності частоти обертання електродвигуна до положення регулюючого органу палива (співвідношення «витрата повітря – витрата палива») регулятор обчислює значення частоти обертання електродвигуна вентилятора. Обчислене значення частоти обертання електродвигуна використовується в якості автоматично підтримуваного значення. Таким чином, здійснюється стабілізація співвідношення «повітря-паливо» за принципом «повітря стежить за паливом».

Візуальний контроль за роботою керуючих виходів регулятора здійснюється за допомогою світлодіоду червоного кольору V1. Пульсуюче світіння світлодіоду вказує на зміну частоти на керуючих виходах регулятора. Візуальний контроль за роботою регулятора здійснюється за допомогою цифрового індикатора, на якому відображається поточне значення частоти обертання електродвигуна (рис. 3).

Режим «Встановлення параметрів регулятора» призначений для введення та запису в незалежну пам'ять параметрів роботи регулятора. Цей режим має наступні можливості:

- налаштування швидкості електродвигуна;

- налаштування швидкості зупинки електродвигуна;
- налаштування значення опору потенціометра – датчика положення регулюючого органу палива.

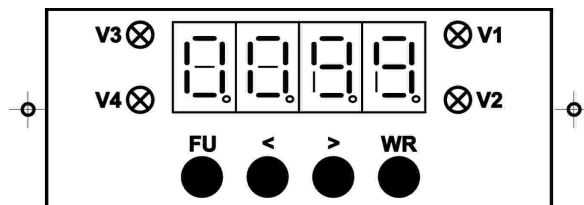


Рис. 3. Передня панель регулятора типу РСЧ

Вхід в режим «Встановлення параметрів регулятора» здійснюється з режиму «Робота» одночасним натисканням і утриманням кнопок керування FU, <, > не більше 3 с. При вході в цей режим відбувається відображення на цифровому індикаторі назви першого розділу режиму «Встановлення параметрів регулятора» у вигляді УС.СР.

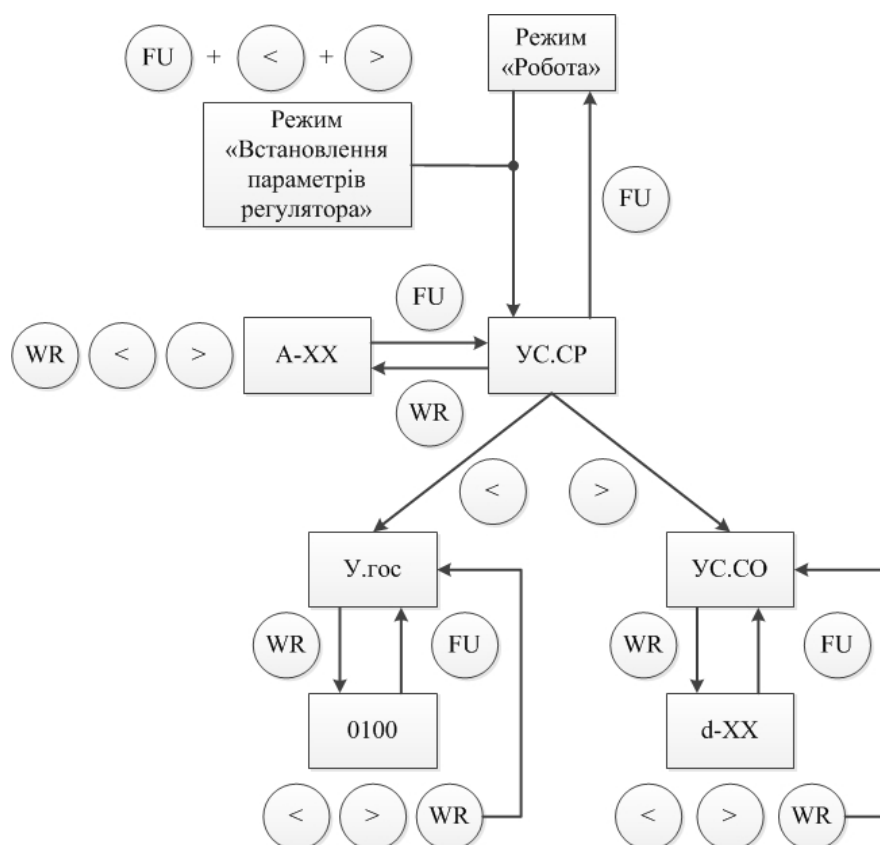


Рис. 4. Алгоритм роботи регулятора типу РСЧ в режимі «Встановлення параметрів регулятора»

За допомогою кнопок керування < та > можна вибрати необхідний розділ. Вибір розділів відбувається по «колу», в прямому і зворотному напрямку.

Водночас, на цифровому індикаторі відображається назва обраного розділу у вигляді:

- УС.СР – встановлення швидкості електродвигуна;

- УС.СО – встановлення швидкості зупинки електродвигуна;
- У.гос – встановлення значення опору потенціометра.

Для входу в обраний розділ необхідно короткочасно натиснути кнопку WR. Алгоритм роботи з регулятором в режимі «Встановлення параметрів регулятора» наведено на рис. 4.

Режим «Налаштування співвідношення «повітря-паливо». Для економічного спалювання палива необхідно оптимально підтримувати витрати повітря по відношенню до витрат палива. Витрата палива пропорційна положенню регулюючого органу на паливопроводі, а частота обертання електродвигуна вентилятора визначає кількість повітря, що подається для спалювання певної кількості палива.

Таким чином, робота регулятора з підтриманням співвідношення «повітря-паливо» базується на вимірюванні положення регулюючого органу, обчисленні по запрограмованій залежності у вигляді кусково-лінійної кривої, відповідного квазі-оптимального значення частоти обертання електродвигуна вентилятора. Отриманий графік залежності витрат повітря від палива в повітря-паливному змішувачі для 8 точок показано на рис. 5.

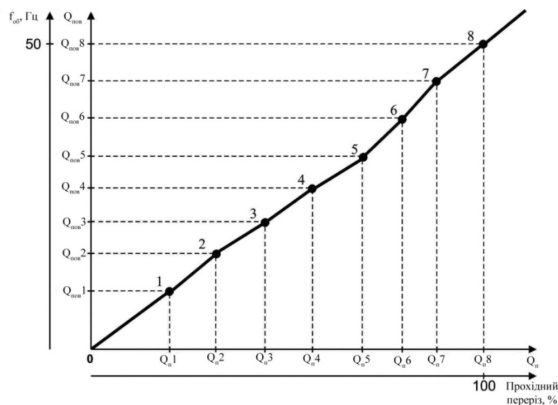


Рис. 5. Графічне зображення залежності витрат повітря від витрат палива в повітря-паливному змішувачі

Ця залежність виглядає як ламана, утворена відрізками, початок і кінець яких є експериментально отримані точки. Регулятор на кожному відрітку ламаної підтримує залежність витрат повітря $Q_{пов}$ (прирівнюється до частоти обертання електродвигуна) від витрат палива $Q_{п}$ (положення регулюючого органу), що описується лінійним рівнянням типу $y=k_i x+b_i$, при цьому коефіцієнти k_i та b_i на кожному із відрізків $i=1...7$ будуть різними. Вхід в режим «Налаштування співвідношення «повітря-паливо» здійснюється одночасного нати-

сканням та утримуванням кнопок управління < та > не менше 3 с.

При вході в режим «Налаштування співвідношення «повітря-паливо» на цифровому індикаторі відображається номер першої точки кривої відношення «повітря-паливо» в наступному форматі: -00-, де 0 – номер першої точки співвідношення «паливо-повітря». Водночас, загорасться постійним світінням світлодіод V4.

Для проведення налаштування співвідношення «повітря-паливо» в першій точці необхідно короткочасно натиснути кнопку управління WR. Водночас, регулятор автоматично визначає по раніше запрограмованому співвідношенню «повітря-паливо» значення частоти обертання електродвигуна для поточного стану регулюючого органу палива і відображає на цифровому індикаторі записане значення в наступному форматі: 0.XX.X, де 0. – номер першої точки співвідношення «повітря-паливо», XX.X – поточне значення частоти, Гц. За допомогою кнопок керування < та > можна змінювати поточне значення частоти обертання електродвигуна для даної точки співвідношення «повітря-паливо» в межах, що зазначені в табл. 1: від f_{min} до f_{max} , де $f_{min}=0$ – мінімальне значення частоти обертання електродвигуна, Гц; $f_{max}=50$ – максимальне значення частоти обертання електродвигуна, Гц.

При натисканні кнопки керування < відбувається зменшення, а при натисканні кнопки керування > – збільшення частоти обертання електродвигуна. На цифровому індикаторі відображається зміна значення частоти обертання електродвигуна, а пульсуюча індикація світлодіода V1 відображає зміну частоти на керуючих виходах регулятора.

Таблиця 1. Діапазон зміни частоти регулятора типу РСЧ

Номер точки	Позначення на цифровому індикаторі	Діапазон зміни частоти f , Гц
1	$0.f_0$	від 0 до 50
2	$1.f_1$	від f_0 до 50
3	$2.f_2$	від f_1 до 50
4	$3.f_3$	від f_2 до 50
5	$4.f_4$	від f_3 до 50
6	$5.f_5$	від f_4 до 50
7	$6.f_6$	від f_5 до 50
8	$7.f_7$	від f_6 до 50

Після розпалу пальника в режимі малого горіння, змінюючи значення частоти обертання електродвигуна і орієнтуючись на показання газоаналізатора чи сенсора кисню з встановленим програмним забезпеченням, необхідно встановити оптимальний режим спалювання палива.

Після встановлення необхідного значення частоти обертання електродвигуна для даної точки

співвідношення «повітря-паливо» необхідно провести запис (збереження) нового значення частоти. Для збереження нового значення частоти обертання електродвигуна для даної точки співвідношення «повітря-паливо» необхідно короткочасно натиснути кнопку керування WR. При цьому відбувається автоматичне збереження нового значення частоти обертання електродвигуна для даної точки співвідношення «повітря-паливо» і здійснюється автоматичний перехід регулятора до наступної точки кривої співвідношення «повітря-паливо».

Режим «Перегляд» призначений для перегляду збережених значень частоти обертання електродвигуна для кожної точки співвідношення «повітря-паливо» без можливості редагування записаних значень. Вхід в режим «Перегляд» здійснюється з режиму «Робота» натисканням і утриманням кнопки FU не менше 3 с. При вході в режим «Перегляд» цифровий індикатор відображає вираз LISt.

Для перегляду записаних значень частот необхідно короткочасно натиснути кнопку керування WR, при цьому регулятор відображає на цифровому індикаторі значення частоти записаної для першої точки в наступному форматі: 0.XX.X – де 0 – номер першої точки співвідношення «повітря-паливо»; XX.X – записане значення частоти в Гц для даної точки.

Перегляд записаних значень частот обертання електродвигуна для всіх точок співвідношення «повітря-паливо» здійснюється за допомогою кнопок керування < та > по «колу», в прямому і зворотному напрямку. Для перегляду наступного значення частоти обертання електродвигуна необхідно короткочасно натиснути кнопку керування >. При цьому на цифровому індикаторі відобразиться записане значення частоти обертання електродвигуна для наступної точки співвідношення «повітря-паливо». Для перегляду попереднього записаного значення частоти обертання електродвигуна необхідно короткочасно натиснути кнопку керування <.

Вихід з режиму «Перегляд» здійснюється в режим «Робота» короткочасним натисканням кнопки управління FU. Алгоритм роботи регулятора в режимі «Перегляд» наведено на рис. 6.

Режим «Корекція співвідношення «повітря-паливо» призначений для корегування частоти обертання електродвигуна для кожної точки залежності «повітря-паливо» з можливістю редагування раніше записаних значень. Вхід в цей режим здійснюється з режиму «Робота» одночасним натисканням і утриманням кнопок керування FU і WR не менше 3 с.

При вході в режим «Корекція співвідношення «повітря-паливо» регулятор автоматично визначає за поточним положенням регулюючого органу палива найближчу точку співвідношення «повітря-паливо» і відображає її значення на цифровому

індикаторі в наступному форматі: -0X-, де X – номер визначеної точки залежності «повітря-паливо». Водночас, світлодіод V3 знаходиться в активному режимі.

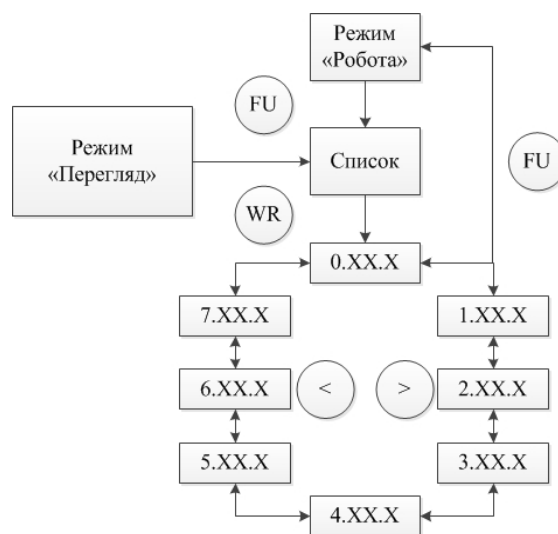


Рис. 6. Алгоритм роботи регулятора типу РСЧ в режимі «Перегляд»

Для корекції частоти обертання електродвигуна в даній точці залежності «повітря-паливо», необхідно короткочасно натиснути кнопку WR. При цьому на цифровому індикаторі відобразиться поточне значення частоти обертання електродвигуна для даного положення регулюючого органу палива в форматі: X.XX.X, де X – номер визначеної регулятором точки співвідношення «повітря-паливо»; XX.X – поточне значення частоти, Гц.

За допомогою кнопок керування < та > можна змінювати поточне значення частоти обертання електродвигуна для даної точки залежності «повітря-паливо» в межах від f_{min} до f_{max} , де f_{min} – збережене значення частоти для даної точки залежності «повітря-паливо»; f_{max} – збережене значення частоти для наступної точки залежності «повітря-паливо».

Алгоритм роботи з регулятором в режимі «Корекція співвідношення «повітря-паливо» наведено на рис. 7.

При натисканні кнопки керування < відбувається зменшення частоти обертання електродвигуна, при натисканні кнопки керування > – її збільшення. Значення частоти обертання електродвигуна відображається на цифровому індикаторі, пульсуюче світіння світлодіода V1 відображає зміну частоти на керуючих виходах регулятора.

Після встановлення необхідного значення частоти обертання електродвигуна необхідно зберегти нове значення частоти, для чого необхідно короткочасно натиснути кнопку керування WR. Разом зі збереженням нового значення частоти здійснюється автоматичний перехід регулятора в режим «Робота».

Для того, щоб вийти з режиму «Корекція співвідношення «повітря-паливо» без збереження зроблених змін необхідно короткочасно натиснути на кнопку керування FU. При виході з режиму «Корекція співвідношення «повітря-паливо» світлодіод V3 згасає.

Режим «Відновлення» призначений для автоматичного відновлення вихідних параметрів робо-

ти регулятора, які встановлені на підприємстві-виробнику.

Значення вихідних параметрів роботи регулятора повинні відповідати наведеним в табл. 2.

Вхід в режим «Відновлення» здійснюється з режиму «Робота» одночасним натисканням і утриманням кнопок керування <, >, WR не менше 3 с, до появи звукового сигналу і відображення на цифровому індикаторі символічного виразу: ===.



Рис. 7. Алгоритм роботи регулятора типу РСЧ в режимі «Корекція співвідношення «повітря-паливо»

Таблиця 2. Заводські параметри налаштування частотного регулятора типу РСЧ

Номер точки залежності «повітря-паливо»	Позначення на цифровому індикаторі	Значення частоти обертання електродвигуна f, Гц
1	0	6,30
2	1	12,50
3	2	18,80
4	3	25,00
5	4	31,30
6	5	37,50
7	6	43,80
8	7	50,00

Для зміни поточних параметрів роботи регулятора на заводські необхідно короткочасно натиснути кнопку керування WR, при цьому відбувається автоматична установка і запис вихідних параметрів

згідно таблиці 2, після чого здійснюється автоматичний перехід регулятора в режим «Робота».

Для виходу з режиму «Відновлення» без збереження змін необхідно короткочасно натиснути на кнопку керування FU, здійснюється автоматичний перехід регулятора в режим «Робота» з поточними параметрами роботи.

Програмне забезпечення системи керування процесом спалювання

Програмувач співвідношення ППС для палика зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню виконаний в середовищі технічного програмування LM Programmer та працює з операційними системами сімейства Windows та сенсорами кисню виробництва Bosch через спеціальний контролер.

Розроблений програмний продукт використовується для оновлення прошивки, зміни виду робочого палива та програмування двох аналогових виходів (на 1 та 5 В).

Для запуску програмного середовища необхідно підключити сенсор кисню через з'єднувальний кабель до СОМ-порту ПК (за відсу-

тності COM-порту можна використати спеціальний адаптер COM-to-USB) та ввімкнути його в електричну мережу. Ярлик запуску програми після інсталяції знаходитиметься в розділі «Програми» панелі «Пуск».

Робоче середовище програмного продукту зображене на рис. 8.

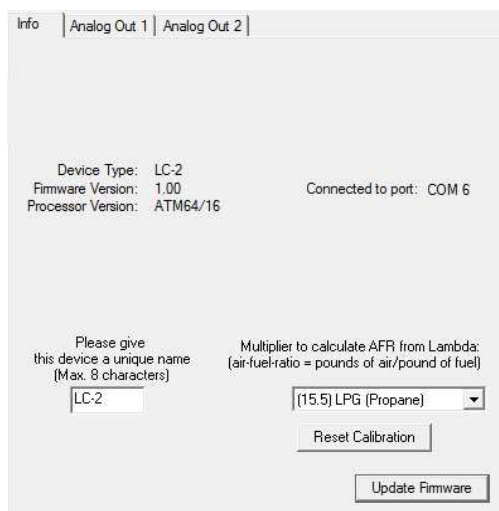


Рис. 8. Робоче середовище програмного продукту LM Programmer

У головному вікні програмного середовища користувач має можливість змінити назву підключеного сенсора та тип палива, для якого потрібно проводити контроль.

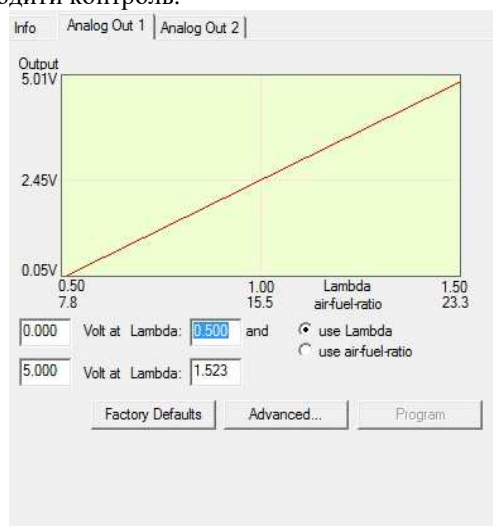


Рис. 9. Робоче середовище програмувача при підключенні до аналогового виходу на 5 В

Робоче середовище програмного забезпечення для підключення через аналоговий вихід на 1 В зображене на рис. 10. У цьому вікні користувач також має можливість відкалібрувати програмний продукт згідно 2 параметрів: значення напруги (в межах від 0 до 1 В) та коефіцієнта α чи необхідного значення стехіометричної кількості повітря (в

Стандартні налаштування передбачують наступні типи палива: пропан; метанол; етанол; стиснений природний газ; дизель; ручне налаштування.

Ручне налаштування передбачає самостійне введення необхідного стехіометричного значення «повітря-паливо».

Програмний продукт має можливість підключення до двох аналогових виходів:

- 1) 5 В (для широкосмугового сенсора кисню);
- 2) 1 В (для звичайного планарного сенсора кисню).

Робоче середовище програмного забезпечення для підключення через аналоговий вихід на 5 В зображене на рис. 9.

У цьому вікні користувач має можливість відкалібрувати програмний продукт згідно власних потреб використовуючи відповідні значення напруги (у межах від 0 до 5 В) та коефіцієнта α чи необхідної стехіометричної кількості повітря (в об'ємному співвідношенні) на одиницю палива. Тип залежності вихідної напруги від коефіцієнта α має лінійний характер.

При натисканні клавіші Advanced можна у відповідному вікні встановити час швидкодії реакції сенсора згідно встановлених значень: 1/12 с, 1/6 с, 1/3 с. Також, за бажанням, можна встановити значення вихідної напруги для прогрівання сенсора та генерування інформації про помилкове функціонування (у діапазоні від 0 до 5 В).

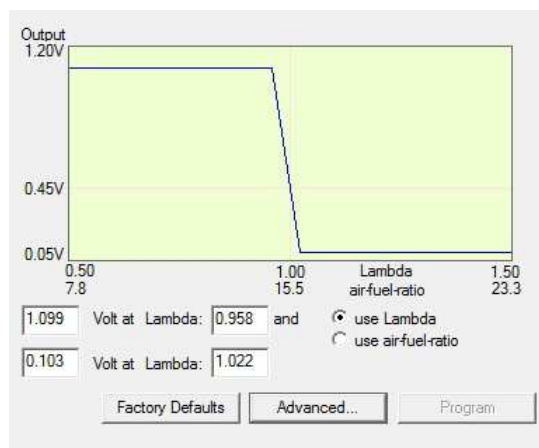


Рис. 10. Робоче середовище програмувача при підключенні до аналогового виходу на 1 В

об'ємному співвідношенні) на одиницю палива. Тип залежності вихідної напруги від коефіцієнту α має ступінчастий характер.

Натискання клавіші Advanced викликає ті ж самі параметри налаштування, що і в режимі роботи з аналоговим виходом на 1 В. Натискання кла-

віші Factory Defaults призводить до скидання робочих параметрів згідно заводських налаштувань.

Візуалізація процесу контролю співвідношення ППС для пальника зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню виконана в середовищі технічного програмування LogWorks 3 (рис. 11) та працює в середовищі сімейства операційних систем Windows з сенсорами кисню виробництва Bosch через спеціальний контролер.

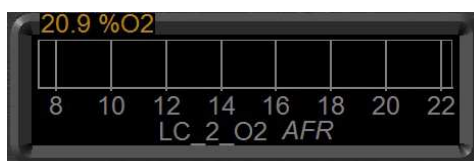
Користувач програмного забезпечення самостійно обирає тип необхідної індикації контролю-

ючого параметру з можливістю використовувати від одного до трьох типів індикації одночасно.

Режим відображення актуальної інформації про вміст залишкового кисню у відхідних газах можливий у трьох режимах індикації: 1) стрілковому; 2) лінійному; 3) стовпчиковому (рис. 11, рис. 12) з відображенням як інформації про співвідношення «повітря-паливо» (рис. 11, рис. 12), так і КНП (рис. 13).



a



б

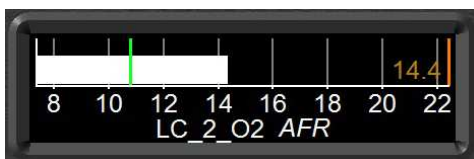


в

Рис. 11. Режими індикації співвідношення «повітря-паливо» у відхідних газах (сенсор кисню не в робочому середовищі): *a* – стрілковий; *б* – лінійний; *в* – стовпчиковий



a



б

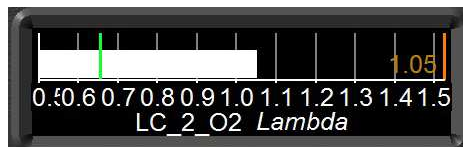


в

Рис. 12. Режими індикації співвідношення «повітря-паливо» у відхідних газах (сенсор кисню в робочому середовищі): *a* – стрілковий; *б* – лінійний; *в* – стовпчиковий



a



б



в

Рис. 13. Режими індикації КНП у відхідних газах (сенсор кисню в робочому середовищі): *a* – стрілковий; *б* – лінійний; *в* – стовпчиковий

В межах програмного продукту користувач може не просто контролювати кількість залишкового кисню у відхідних газах, а й записувати зміни даного параметру за допомогою внутрішнього се-

редовища Real-Time Log. Робоче середовище Real-Time Log зображене на рис. 14.

Програмне забезпечення має пряме з'єднання з розробленим цифровим α -індикатором, що дозволяє

керувати КНП за допомогою частотного регулятора, тобто реалізувати можливість корекції режимів роботи котлоагрегата введенням зворотного зв'язку за сигналами сенсора кисню.

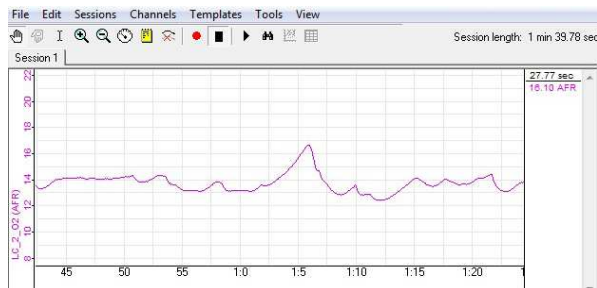


Рис. 14. Робоче середовище Real-Time Log

Адаптація даних програмних засобів дає змогу використовувати їх як безпосередньо у системі автоматичного керування процесом спалювання палива, так і в системі контролю (газоаналізуючому пристрої) складу відхідних газів котлоагрегатів.

Висновки

Алгоритмічно-програмне забезпечення є важливою ланкою системи, яка здійснює автоматичне керування і оптимізацію процесу спалювання палива в котлоагрегатах за рахунок підтримання на належному рівні співвідношення компонент ППС. У статті наведено результати розроблення алгоритму роботи системи автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах середньої потужності для пальника зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню.

Програмувач співвідношення ППС для такого пальника виконаний в середовищі технічного програмування LM Programmer та працює з операційними системами сімейства Windows та сенсорами кисню виробництва Bosch через спеціальний контролер.

Візуалізація процесу контролю співвідношення ППС для пальника зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню виконана в середовищі технічного програмування LogWorks 3 та працює в середовищі операційних систем Windows (XP, 7, Vista, 7, 8, 10).

Розроблене програмне забезпечення системи керування процесом спалювання палива дає змогу підтримувати КНП на рівні 1,1-1,2, що забезпечує функціонування котлоагрегату з ККД близьким до його номінального значення. Проведені на базі котлоагрегату НІСТУ-5 експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність як алгоритмічно-програмної частини, так і системи керування процесом спалювання в цілому.

Література

[1] А. О. Запорожець, Ю. В. Куц, “Апаратно-програмне забезпечення системи автоматичного керування процесом спалювання палива

в котлоагрегатах малої та середньої потужності. Частина 1. Спосіб та апаратне забезпечення”, *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, Вип. 61(1), с. 37-45, 2021.

DOI: 10.20535/1970.61(1).2021.237091

[2] А. Zaporozhets, “Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor”, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 64, №4, pp. 241-248, 2019.

DOI: 10.3311/PPme.12572

[3] В. С. Василенко, В. М. Гончар, В. І. Кривошей, В. Ф. Цокало, “Стационарный циркониевый анализатор кисню у димових газах”, *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, Вип. 28(1), с. 64-70, 2004.

[4] М. В. Кириленко, “Розрахунок оптимальних настроювань регулятора розрідження в топковій камері”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, Том 29(68), Ч. 1, №6, с. 157-160, 2018.

[5] А. О. Zaporozhets, “Research of the Process of Fuel Combustion in Boilers”, *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 287, pp. 35-60, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-46299-4_2

[6] А. Wienese, “Boilers, boiler fuel and boiler efficiency”, *Proc S Afr Sug Technol Ass*, Vol. 75, pp. 275-281, 2001.

[7] М. Сенчук, “Комбінована схема спалювання твердого палива в опалювальних котлах малої потужності”, *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, Т. 35, с. 6-14, 2020. DOI: 10.32347/2409-2606.2020.35.6-14

[8] О. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, О. В. Сенецький, М. Ю. Бабак, “Утилізація теплоти димових газів котельні шляхом використання органічного циклу Ренкіна”, *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, №11(1287), с. 4-11, 2018. DOI: 10.20998/2078-774X.2018.11.01

[9] В. А. Бородай, О. Р. Ковальов, О. Ю. Нестерова, “Параметричне керування ефективністю асинхронного приводу засобами перетворювача з підвищеним коефіцієнтом потужності”, *Електротехніка та електроенергетика*, №2, с. 8-16, 2020. DOI: 10.15588/1607-6761-2020-2-1

[10] В. А. Бородай, Р. О. Боровик, О. Ю. Нестерова, “Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації швидкості”, *Електротехніка та електроенергетика*, №3, с. 16-23, 2019. DOI: 10.15588/1607-6761-2019-3-2

[11] А. О. Zaporozhets, “Methods and Means for the Control of the Fuel Combustion Process”, *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 287, pp. 1-33, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-46299-4_1

[12] J. Blondeau, L. Rijmenans, J. Annendijck, A. Heyer, E. Martensen, I. Popin, A. Wijitongruang,

L. Holub, "Burner air-fuel ratio monitoring in large pulverised-fuel boilers using advanced sensors: Case study of a 660 MW_e coal-fired power plant", *Progress*, Vol. 5, pp. 471-481, 2018. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.02.006

[13] А. Запорожець, "Дослідження стехіометричної суміші «повітря-паливо» органічних сполук. Частина 1. Алкани", *Наукові техно-*

логії, т. 22, №2, с. 163-167, 2014. Doi: 10.18372/2310-5461.22.6803

[14] А. Запорожець, "Дослідження стехіометричної суміші «повітря-паливо» органічних сполук. Частина 2. Алкени, алкіни", *Наукові технології*, т. 24, №4, с. 393-399, 2014. DOI: 10.18372/2310-5461.24.7506

УДК 621.182-5

¹⁾А. А. Запорожець, ²⁾Ю. В. Куц

¹⁾*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина*

²⁾*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина*

АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ. ЧАСТЬ 2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Эффективность функционирования котельных установок зависит от наличия достоверной информации о ходе технологических процессов. Отсутствие контрольно-измерительных систем состава отходящих газов приводит к низкой эффективности работы котлоагрегата, в частности из-за некачественного сжигания топлива. Поэтому в современных условиях эксплуатации котельных установок актуальным является разработка технологических решений, ориентированных на поиск и минимизацию причин и механизмов образования вредных веществ в отходящих газах.

В связи с тем, что замена изношенных котлоагрегатов на новые требует значительных капиталовложений, перспективным направлением является модернизация существующих котлоагрегатов. Это малозатратный и эффективный способ рационального использования топлива с одновременным уменьшением уровня вредных веществ в отходящих газах. Актуальным остается обеспечение функционирования систем контроля состава воздушно-топливной смеси (ВТС) с заданным быстродействием и высокой достоверностью поддержания коэффициента избытка воздуха (КИВ) на стехиометрическом уровне.

В статье предложен высокоэффективный алгоритм работы системы автоматического управления процессом сжигания топлива в котлоагрегатах средней и малой мощности путем регулирования соотношения компонент ВТС для горелки с обратной связью по сигналам датчика кислорода. Рассмотрены алгоритмы функционирования частотного регулятора соотношения компонент ВТС в различных режимах работы. Разработанные алгоритмы позволили поддерживать стехиометрическое соотношение «воздух-топливо» в топке котла, снизить уровень выбросов токсичных веществ в атмосферу и повысить коэффициент полезного действия котла за счет оптимизации процесса сжигания топлива. Программатор соотношения ВТС выполнен в среде технического программирования LM Programmer и работает с операционными системами семейства Windows (XP, Vista, 7, 8, 10) и сенсорами кислорода производства фирмы Bosch. Визуализация процесса контроля процессом сжигания топлива выполнена в среде технического программирования LogWorks 3 и функционирует в среде операционных систем Windows.

Ключевые слова: котлоагрегат; контроль; управление; сжигание топлива; алгоритмы; алгоритмическое и программное обеспечение; сенсор кислорода.

¹⁾А. А. Zaporozhets, ²⁾Y. V. Kuts

¹⁾*Institute of Engineering, Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

²⁾*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

HARDWARE AND SOFTWARE OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF FUEL COMBUSTION PROCESS IN LOW AND MEDIUM POWER BOILERS. PART 2. ALGORITHMIC SOFTWARE

The efficiency of the functioning of boiler units depends on the availability of reliable information on the progress of technological processes. The lack of control and measuring systems for the composition of the exhaust gases leads to low efficiency of the boiler unit, in particular, due to poor-quality fuel combustion. Therefore, in modern operating conditions of boiler units, it is relevant to develop technological solutions focused on finding and minimizing the causes and mechanisms of the formation of harmful substances in exhaust gases.

Due to the fact that replacement of outdated boiler units with new ones requires significant capital investments, a promising direction is the modernization of existing boiler units. It is a low-cost and efficient way of rational use of fuel while simultaneously reducing the level of harmful substances in exhaust gases. It remains relevant to ensure the functioning of the control systems for the composition of the air-fuel mixture (AFM) with a given speed and high reliability of maintaining the excess air ratio (EAR) at the stoichiometric level.

In the article the high-quality algorithm is proposed for the operation of an automatic control system for the combustion of fuel in boilers of medium and low power by regulating the ratio of the components of the AFM for the burner with feedback according to the signals of the oxygen sensor. The algorithms for the operation of the frequency regulator of the ratio of the components of the AFM in various operating modes are considered. The developed algorithms allowed maintaining the stoichiometric air-fuel ratio in the boiler furnace, reducing the level of toxic emissions into the atmosphere and increasing the boiler efficiency by optimizing the fuel combustion process. The AFM ratio programmer is made in the LM Programmer technical programming environment and works with Windows operating systems (XP, Vista, 7, 8, 10) and oxygen sensors manufactured by Bosch. The visualization of the control process of the fuel combustion process is made in the technical programming environment LogWorks 3 and operates in the environment of Windows operating systems.

Keywords: boiler; control; monitoring; fuel combustion; algorithms; software; oxygen sensor.

Надійшла до редакції
25 червня 2021 року

Рецензовано
28 липня 2021 року

УДК 681.121

ПРО ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ ТІЛА ОБТІКАННЯ ВИХРОВОГО ВИТРАТОМІРА

Писарець А. В., Мельник А. М., Драчук О. О.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

E-mail: anna.v@ukr.net, melnik.anastasiya@i.ua, o.drachuk@kpi.ua

Усе більшого поширення у багатьох галузях промисловості набувають вимірювачі витрат і кількості плинних середовищ, що ґрунтуються на застосуванні вихрового методу. Це пов'язано із простотою і надійністю перетворювача витрати; лінійністю шкали; наявністю частотного вимірювального сигналу, низькими вимогами до співвідношення і забезпечення довжини прямих ділянок тощо. Серед засобів вимірювання вихрового класу найбільшого застосування набули прилади, первинний перетворювач яких містить тіло обтікання. Принцип дії таких витратомірів ґрунтується на вимірюванні частоти утворення вихорів за встановленим у потоці тілом обтікання.

Метрологічні характеристики вимірювачів окреслюються формою тіла обтікання, тому пошук оптимальної форми чутливого елемента і конфігурації гідравлічного каналу витратоміра у цілому для забезпечення високих метрологічних показників залишається актуальною проблемою.

У роботі запропоновано алгоритм вирішення зазначеної проблеми за критеріями максимального діапазону вимірюваних витрат, що окреслюється сталістю числа Струхалія, і ефективності взаємодії тіла обтікання з потоком вимірюваного середовища, що ґрунтується на оцінці витрат тиску потоку вимірюваного середовища і похибки вимірювача, із застосуванням імітаційного моделювання у програмному комплексі Ansys Fluent, що реалізовує методи обчислювальної гідродинаміки.

Здійснено моделювання для трьох форм тіла обтікання: циліндр, призма з трикутним перерізом, призма з перерізом у вигляді трапеції, що дозволило обрати чутливий елемент для подальшого розв'язання задачі багатопараметричної оптимізації на підґрунті наявних особливостей конфігурації гідравлічного каналу витратоміра.

Отримані результати підтвердили запропоновану авторами стратегію. Перспективою подальших досліджень є проведення імітаційних досліджень запропонованої конфігурації гідравлічного каналу для різних класів вимірюваних середовищ.

Ключові слова: вихровий витратомір; перетворювач витрати; чутливий елемент; тіло обтікання; імітаційне моделювання; оптимізація.