

НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.182-5

АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ.**ЧАСТИНА 1. СПОСІБ ТА АПАРАТНЕ 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, Україна

E-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua, y.kuts@ukr.net

В Україні на теперішній час налічується більше 6000 котельних установок теплопродуктивністю до 1 Гкал/год з коефіцієнтом корисної дії (ККД) близько 70 %, що потребують заміни чи модернізації, 40 % котлів експлуатуються з ККД менше 82 %, близько 11000 котлоагрегатів потужністю від 100 кВт до 1 МВт знаходяться в експлуатації більше 20 років. Хоча частка цих котлоагрегатів в системі комунальної теплоенергетики України не перевищує 14 %, прогнозована економія природного палива в цих котлах складає більше 130 млн кубометрів на рік. Таким чином підвищення ефективності процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності є актуальною задачею.

У статті представлено результати створення способу та його апаратної реалізації для підвищення швидкодії та достовірності контролю процесу спалювання палива в котлоагрегатах на основі вимірювання концентрацію залишкового кисню у відхідних газах. Розроблений спосіб реалізується ступінчастою корекцією співвідношення повітряно-паливної суміші, що надходить в топку котла для спалювання, за зворотними сигналами від ширококутового кисневого сенсора виробництва Bosch, що знаходиться у відхідному каналі. Регулювання співвідношення «повітря-паливо» з автоматичним налаштуванням частоти обертання дуттєвого вентилятора залежно від кількості природного палива, що надходить для спалювання, забезпечує малотоксичне спалювання палива з незначними викидами оксидів азоту та монооксиду вуглецю, та високий ККД.

Додатково застосування частотно-регульованого електроприводу в системі керування процесом спалювання дає змогу зменшити енергоспоживання на 30-40 %, усунути пускові струми та перевантаження двигуна, зменшити механічний знос устаткування, збільшити термін служби контактної-комутаційної апаратури. В цілому, розроблена система надає змогу оптимізувати режим спалювання палива із врахуванням фактичних умов, режимів роботи котлоагрегату та характеристик палива; знизити питомі витрати палива мінімум на 10%; зменшити рівень викидів оксидів азоту до 40 % та монооксиду вуглецю до 50 %; підвищити ККД мінімум на 5 %; якісно спростити роботу обслуговуючого персоналу котлоагрегату.

Ключові слова: котлоагрегат; контроль; керування; спалювання палива; апаратне забезпечення; сенсор кисню.

Вступ

Проблеми підвищення ефективності спалювання палива та зниження викидів шкідливих речовин особливо актуальні в теперішній час, і в тих галузях промисловості, де спалювання великої кількості палива відбувається з недостатньою повнотою та з порівняно низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД). До цієї групи відносяться котельні комунально-побутового сектору та промислових підприємств з котлоагрегатами потужністю до 3,5 МВт.

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 неповне спалювання палива. Тому у сучасних умовах експлуатації котельних установок актуальним є розроблення технологій орієнтованих на пошук та мінімізацію причин та механізмів утворення шкідливих речовин у відхідних газах.

На даний час існує значна кількість варіантів реалізації автоматичного керування співвідношенням складу повітряно-паливної суміші (ППС). В роботі [1] описана можливість формування інформаційного сигналу для впливу на поворотну заслінку, встановлену на повітроводі після вентилятора

дутьтя шляхом регулювання частоти обертання вентилятора дутьтя у випадку виходу кута відкриття поворотної заслінки за задані межі. Дана схема характеризується відсутністю великих пускових струмів та зниженням енергоспоживання за рахунок зменшення частоти живлення двигуна вентилятора дутьтя. У той же час спосіб реалізується внаслідок повільного керування роботою технологічного електрообладнання, яке не дає змогу швидко реагувати на зміну кількості та якості палива, що надходить до пальника. В роботі [2] наведена схема регулювання режиму спалювання палива в топці котла вимірюванням вмісту окису вуглецю за допомогою датчика в газовому тракті димоходу. Зазначений спосіб формує вихідний сигнал з газоаналізатора, що пропорційний вмісту окису вуглецю у відхідних газах, і спільно з вихідним сигналом задавача створює керуючий сигнал, що подається на блок частотного перетворювача електродвигуна димососа та (або) вентилятора подачі повітря в топку котлоагрегату, постійно підтримуючи концентрацію окису вуглецю у відхідних газах на рівні 0,1-0,2 %.

Недоліком даного способу є неузгодження швидкості подачі газу, повітря та розрідження з інерційністю димососів та вентиляторів, що створює можливість короткочасного виходу тиску повітря і розрідження за допустимі межі, та, як наслідок, призводить до виникнення аварійної ситуації, а аналіз вмісту окису вуглецю у відхідних газах не дозволяє запобігти утворенню продуктів неповного спалювання (H_2 , CH_4 , CO , C) та знизити рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу [3].

Переваги побудови системи керування процесом спалювання палива зі ступінчастим регулюванням складу повітряно-паливної суміші за сигналами зворотного зв'язку від сенсора кисню показані в роботах [4, 5].

Мета роботи – розроблення способу та апаратних засобів для досягнення необхідної швидкодії і достовірності контролю та керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності на основі вимірювання концентрації кисню у відхідних газах та ступінчастої корекції складу ППС, що надходить в зону спалювання, за сигналами зворотного зв'язку від сенсора кисню.

Спосіб та загальна структура системи керування процесом спалювання палива

В основу запропонованого способу поставлена задача вдосконалення способу автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах внаслідок безперервного вимірювання вмісту кисню у відхідних газах за допомогою сенсора кисню, котре контролює процес спалювання горючих матеріалів незалежно від зміни кількості та якості газу, яке надходить до топки котла, що

забезпечує значне енергозбереження системи котельні.

У запропонованій схемі автоматичного керування процесом спалювання газу в котлоагрегатах шляхом вимірювання сигналів фіксують газові витрати, із застосуванням частотно-регульованих вентиляторів дутьтя та димососів вміст кисню у відхідних газах безперервно вимірюється за допомогою сенсора кисню, розміщеного на початку газового тракту димоходу. Далі відбувається фіксація результатів вимірювання зондовим α -індикатором з попередньо заданим стехіометричним співвідношенням «повітря-паливо», а подача палива до пальника коригується сигналами зворотного зв'язку від сенсора кисню, водночас, коефіцієнт надлишку повітря (КНП) у відхідних газах підтримується на постійному рівні ($\alpha=1,1-1,2$).

Типи практичних розробок, що дозволяють на сьогодні визначити КНП відпрацьованих газів для різних типів машин у режимі реального часу наведені в роботах [6 – 8].

Використання сенсора кисню на початку тракту димоходу має низку переваг перед традиційними газоаналізаторами: відсутність систем відбору та підготовки проби, стабільна робота і довгий термін експлуатації, простота заміни деталей без демонтажу, адаптація до установки на різні типи теплових агрегатів.

Застосування цифрового альфа-індикатора дає змогу в режимі реального часу стежити за значенням КНП у відхідних газах, з високою точністю оперативно вносити зміни в режим роботи пальника котлоагрегату, внаслідок чого досягається максимальна ефективність роботи котельної установки.

Корекція подачі палива до пальника за сигналом зворотного зв'язку від сенсора кисню дає змогу підтримувати стехіометричне співвідношення «повітря-паливо» у топці котла [9, 10], знизити рівень викидів токсичних речовин в атмосферу та підвищити ККД котла недопущенням нестачі повітря чи його надлишку у відхідних газах. Теоретичні значення стехіометричного співвідношення «повітря-паливо» для деяких видів палива наведено в роботах [11, 12].

Спосіб автоматичного керування процесом спалювання в котлоагрегатах, що базується на застосуванні сенсора кисню та цифрового зондового α -індикатора, реалізується за допомогою структурно-логічної схеми, зображеної на рис. 1.

Запропонований спосіб реалізується наступним чином. Необхідне співвідношення «повітря-паливо» в процесі експлуатації котлоагрегату задається пультом керування та порівнюється з поточним значенням, отриманим від сенсора кисню. Частотний регулятор за допомогою зміни частоти вихідної силової мережі керує електродвигуном вентилятора дутьтя подачі повітря в топку котлоагрегату.

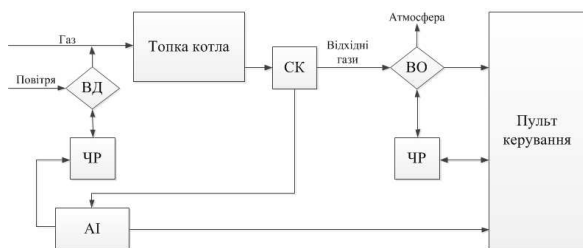


Рис. 1. Структурно-логічна схема автоматичного процесу регулювання співвідношення ППС для пального зі зворотним зв'язком за сигналами сенсора кисню, де: ВД – вентилятор дуття, ЧР – частотний регулятор, АІ – альфа-індикатор, СК – сенсор кисню, ВО – вузол обліку шкідливих речовин

Сенсор кисню, що знаходиться на початку димового тракту, безперервно аналізує та реєструє вміст кисню у відхідних газах, і формує інформаційний сигнал, напруга якого характеризує величину КНП α .

Цифровий зондовий α -індикатор продукує отриманий від широкосмугового сенсора кисню сигнал на лінійці світлодіодів, та разом з попередньо введеними даними про застосоване паливо утворює сигнал, що подається на блок частотного регулятора, який в свою чергу змінює режим роботи вентилятора для корекції подачі повітря на паливник, підтримуючи таким чином КНП $\alpha \approx 1$. Вузол обліку шкідливих речовин призначено для аналізу та корекції за допомогою частотного регулятора вмісту токсичних речовин у відхідних га-

зах. На даний спосіб автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах отримано патент України на винахід [13].

Залежність частоти обертання вентилятора дуття від КНП визначається наступною системою рівнянь

$$f(\alpha) = \begin{cases} f_0 - \Delta f & \text{при } X > \alpha_0, \\ f_0 & \text{при } X = \alpha_0, \\ f_0 + \Delta f & \text{при } X < \alpha_0. \end{cases}$$

де f_0 – робоча частота обертання вентилятора дуття, Δf – крок зміни частоти обертання, X – поточне значення КНП, α_0 – робоче значення КНП.

Особливості розробленої системи дозволяють використовувати її в системі автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності. На рис. 2 наведено структурну схему, що пояснює функціонування такої системи.

Основним призначенням системи керування є регулювання швидкості приводу електродвигуна вентилятора, так щоб в топці котла підтримувати оптимальний режим спалювання, тобто забезпечити найбільш сприятливі умови для повного спалення палива. Для цього система на основі інформації, отриманої від первинних сенсорів (концентрації кисню, температури та розрідження) подає в топку необхідну кількість повітря.

Застосування запропонованої системи автоматичного керування дозволить підтримувати енергозберігаючу роботу котлоагрегату на високому рівні, досягаючи $\sim 95\%$ ККД.

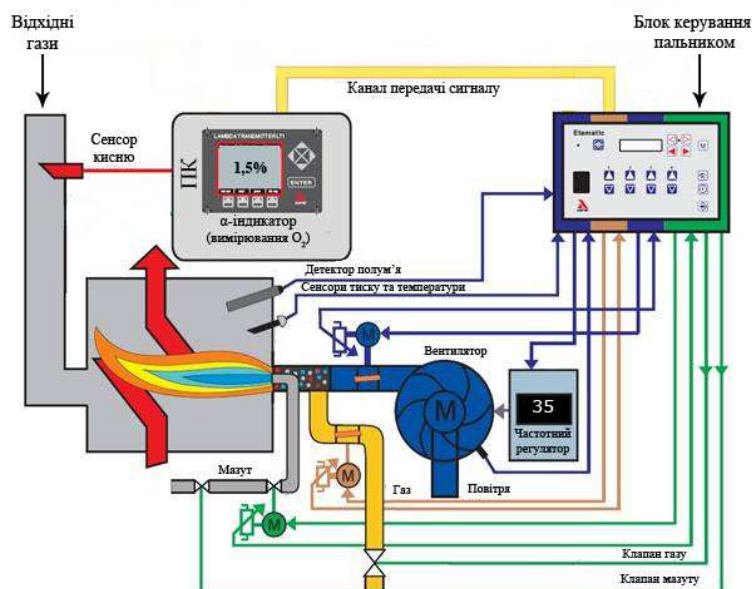


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності з використанням сенсора кисню

Апаратна частина системи керування процесом спалювання палива. Використання регулювання співвідношення «газ-повітря» з ав-

томатичним настроюванням частоти обертання вентилятора залежно від подачі природного газу дає змогу забезпечити малотоксичне спалювання

природного газу з незначним викидом оксидів азоту. Основою для створення експериментального зразка зондового α -індикатора став ширококутовий сенсор кисню (лямбда-зонд) [14] виробництва фірми Bosch (рис. 3, а).

На сьогодні лямбда-зонди є широко розповсюдженими в автомобілебудуванні у зв'язку з постійно зростаючими жорсткими нормами до токсичності відхідних газів, і часто встановлюються разом з каталітичними конвертерами. Один сенсор кисню встановлюється у випускному колекторі безпосередньо перед каталізатором. Засто-

сування другого сенсора безпосередньо після конвертору у вихлопній системі дає змогу максимально підвищити ефективність системи регулювання надлишку повітря у відхідних газах і забезпечити повне та малотоксичне спалювання повітряно-паливної суміші.

Оптимальні показники забезпечуються шляхом використання стехіометричного співвідношення повітря/паливо (визначається залежно від типу палива). Відхилення від оптимального співвідношення ППС призводить до відхилення в рівнях вмісту токсичних газів.

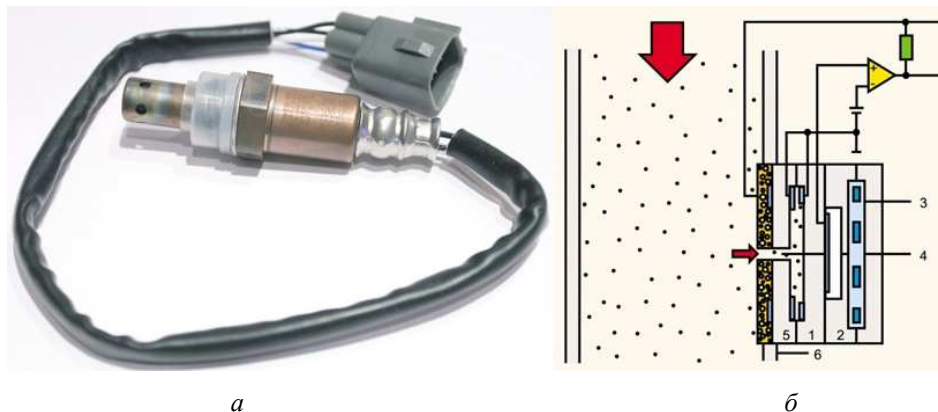


Рис. 3. Ширококутовий сенсор кисню (лямбда-зонд): а – зовнішній вигляд; б – структурна схема (1 – комірка Нернста, 2 – референтна комірка, 3 – підігрівач, 4 – дифузійна щілина, 5 – насосна комірка, 6 – повітряно-паливний тракт)

Надлишок палива призводить до утворення продуктів неповного спалювання і оксиду вуглецю (СО). Надлишок повітря призводить до зростання рівня оксиду азоту (NO_x) та викликає надмірні витрати теплоти на підігрів повітря [15]. Сенсор кисню розрізняє відхилення відношення повітря/паливо від стехіометричного і через систему електронного регулювання змінює кількісний вміст надлишку кисню у відхідних газах.

Для реалізації системи контролю та керування процесом спалювання в котлоагрегатах малої та середньої потужності був застосований сенсор кисню, що працює за принципом комірки Нернста. Суттєвою перевагою таких сенсорів є доокислення СО на поверхні сенсору, що містить у своєму складі ZrO_2 . Це дає можливість отримати інформацію про фактичну концентрацію кисню в продуктах спалення. Недоліком їх застосування є неможливість виявлення хімічного недопалу в зоні $\alpha > 1$. Проте, як підтверджують експериментальні дані, підтримка функціонування котлоагрегату з $\alpha \geq 1,1-1,15$ виключає можливість утворення СО на рівні більше 200 ppm.

Конструкція сенсора передбачає наявність двох камер (комірок): вимірювальної і насосної

(рис. 3, б). Через отвір у стінці насосної комірки відхідні гази потрапляють у вимірювальну камеру (дифузійну щілину) в комірку Нернста. Ця конфігурація відрізняється постійним підтриманням стехіометричного співвідношення «повітря-паливо» в дифузійній камері. Електронна схема модуляції напруги живлення підтримує у вимірювальній камері склад суміші, що відповідає $\alpha = 1$. Для цього насосна комірка при збідненій суміші і надлишку кисню у відхідних газах видаляє кисень з дифузійної щілини в зовнішнє середовище, а при збагаченій суміші та недостатній кількості кисню – перекачує іони кисню з навколишнього середовища в дифузійну щілину. Напрямок струму при перекачуванні кисню в різні боки також відрізняється (табл. 1).

Таким чином, якщо звичайні сенсори використовують напругу комірки Нернста для прямого вимірювання та визначення одного з двох станів ($\alpha > 1$ чи $\alpha < 1$), то ширококутові сенсори кисню використовують спеціальну схему, керуючи струмом «накачки» насосної комірки. Величина цього струму і визначає величину надлишкового повітря у відхідних газах.

Таблиця 1. Залежність сили струму на виході ширококутового сенсора кисню від коефіцієнту α

I, mA	-3	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
α	0,753	0,818	0,818	0,948	1	1,118	1,266	1,456	1,709	2,063	2,592

Оскільки робота сенсора кисню не залежить від ступінчастості в роботі комірки Нернста, то КНП α може вимірюватись в широкому діапазоні від 0,7 до 4. Відповідно, контроль роботи котла за величиною коефіцієнту α може відбуватися у всьому спектрі значень і режимів, а не тільки в околі точки $\alpha=1$.

Застосування широкосмугового сенсора кисню в системі контролю та керування процесом спалювання палива має низку переваг перед традиційними газоаналізуючими пристроями: відсутність системи відбору та підготовки проби, швидке вимірювання концентрації кисню (0,1-0,2 с), безперерйна робота, тривалий термін експлуатації, легка інсталяція на різні види теплових агрегатів.

Загальний вигляд розробленого блоку контролю вмісту кисню у відхідних газах на основі сенсора кисню представлено на рис. 4, а в табл. 2 наведені його основні технічні характеристики.

Зведена похибка вимірювання КНП визначається за формулою:

$$\Delta x_n = \Delta x_{гран} / X_N,$$

де $\Delta x_{гран}$ – гранична похибка, X_N – нормуюче значення.

Гранична похибка визначається з наступних співвідношень:

$$\Delta x_{гран} = \sqrt{(\Delta x_{вин})^2 + (\Delta x_{сист})^2},$$

$$\Delta x_{вин} = t_\alpha(n) \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2},$$

$$\Delta x_{сист} = t_\alpha(n) \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta x \cdot X_N}{3}\right)^2 + \left(\frac{d}{\sqrt{12}}\right)^2},$$

де $\Delta x_{вин}$ – випадкова складова похибки вимірювання, $\Delta x_{сист}$ – систематична складова похибки вимірювання, $t_\alpha(n)$ – коефіцієнт Стьюдента, d – ціна поділки шкали приладу.

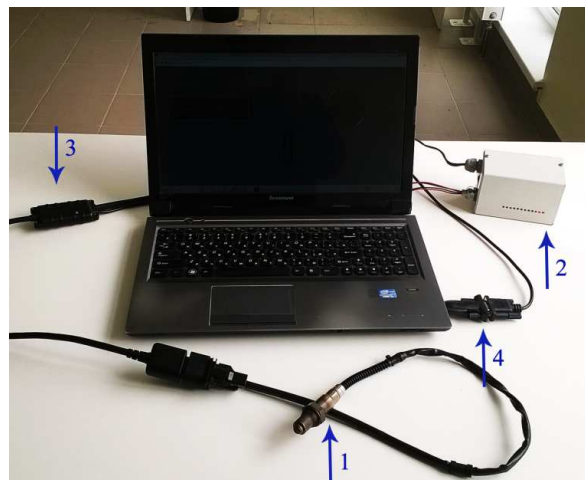


Рис. 4. Фото блоку контролю вмісту кисню у відхідних газах системи контролю процесу спалювання палива в котлоагрегатах: 1 – сенсор кисню, 2 – альфа-індикатор, 3 – контролер, 4 – USB-інтерфейс

Таблиця 2. Основні технічні характеристики системи контролю процесом спалювання палива

Параметр	Значення
Вихідний сигнал вимірювального сенсора, В	+0,1...+5,0
Відгук (затримка часу індикації) для 50 % ступінчатого збурювання, с	0,1...0,3
Початковий час підготовки до вимірів, с	≤30,0
Діапазон вимірювань параметра α	0,5...8
Відносна похибка, %	3
Індикація результатів вимірювань	змішана
Зведена похибка оцінювання параметра α , %	~1
Температура навколишнього середовища при відносній вологості до 80 %:	
блоку індикації, °С	5...50
коробки вимірювального сенсора, °С	5...70
Умови в точці вимірювань:	
температура середовища, °С	50...250
швидкість потоку, м/с	≤15
тиск, Па	≤±500

В цілому, розроблена система контролю дає можливість:

- оптимізувати режим спалювання палива із врахуванням фактичних умов, режимів роботи

котлоагрегату та характеристики палива;

- знизити питомі витрати палива мінімум на 10%;

- зменшити рівень викидів оксидів азоту до 40%;
- зменшити рівень викидів монооксиду вуглецю до 50%;
- підвищити коефіцієнт корисної дії котлоагрегату мінімум на 5%;
- спростити роботу обслуговуючого персоналу.

Особливості формування ППС на базі частотного регулювання

Аналіз структури втрат енергоресурсів у сфері виробництва, розподілу та споживанні електроенергії показує, що головна частина втрат (до 90 %) припадає на сферу енергоспоживання. Враховуючи, що понад 60 % усієї виробленої енергії споживають електроприводи, можна зробити висновок про високу актуальність задач енергозбереження при проектуванні, експлуатації, а також модернізації систем електроприводу.

Великого поширення електроприводи набули на підприємствах житлово-комунального господарства. При цьому впровадження енергозберігаючих технологій у цій області дає можливість отримати не лише економічний, а й соціальний ефект.

Одним з напрямів підвищення ефективності є економія електроенергії під час роботи опалювального котла. У зв'язку з тим, що основним споживачем електроенергії при роботі опалювального котла є димососи і вентилятори, можна виділити актуальну задачу – розробку і впровадження енергозберігаючого способу регулювання продуктивності димососів і вентиляторів [16, 17].

На рис. 5 наведена структурна схема опалювального котла.

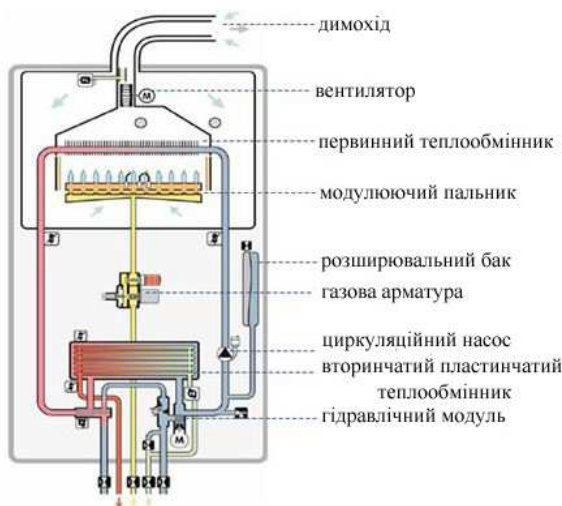


Рис. 5. Структурна схема двоконтурного газового котла

Для того, щоб забезпечити процес повного спалювання палива потрібно підводити достатню кількість повітря, при цьому надлишок повітря в камері згорання також недопустимий.

На практиці приймають орієнтовано наступні значення α для різних палив: для пилоподібного і газоподібного палива – 1,03...1,06, для рідкого палива (мазуту) – 1,2...1,25, для твердого палива – 1,3...1,65 (умова 1).

Для забезпечення умов нормального топкового режиму необхідна наявність невеликого постійного розрідження в верхній частині топки (до 20-30 Па) (умова 2).

У випадках, коли природна тяга для подолання повітряних і газових опорів котлоагрегату недостатня, застосовують спеціальні механізми (вентилятор дуття і димосос), за допомогою яких здійснюється так звана врівноважена штучна тяга.

Недотримання умов 1 та 2 призводить до аварійних ситуацій в роботі котла: проскакування полум'я, відрив полум'я та зниження ефективності спалювання палива.

В той же час температура навколишнього повітря протягом опалювального періоду змінюється в широких межах, тому виникає необхідність регулювання подачі палива з метою забезпечення заданої температури теплоносія.

У зв'язку з вищевикладеним у процесі роботи опалювального котла виникає необхідність регулювання подачі повітря та розрідження. При цьому процес керування повинен забезпечувати необхідні режими відповідно до режимної карти опалювального котла, оскільки навіть короточасний вихід параметра тиску повітря і розрідження за встановлені межі може привести до аварійної ситуації.

Розглянемо основні методи регулювання режимів роботи димососів і вентиляторів:

- а) дроселювання;
- б) зміна конструктивних характеристик вентилятора:
 1. зміна кута атаки лопатей вентиляторів;
 2. зміна кількості лопатей вентиляторів;
- в) переривчасте регулювання;
- г) керування швидкістю обертання ротора електродвигуна вентилятора:
 1. зміни конфігурації магнітного поля;
 2. параметричне регулювання;
- д) варіатори і муфти ковзання;
- е) електродвигуни постійного струму;
- ж) зміна частоти напруги живлення електроприводу вентиляторів і димососів.

Найбільш простим і найпоширенішим способом регулювання вентиляторів є дроселювання. Водночас, вентилятор вхолосту витрачає частину своєї потужності, долаючи опір повітря, що подається. Додаткове обладнання, необхідне в цьому випадку, має низьку надійність, складно регулюється і споживає багато енергії.

Таким чином, технологія дросельного регулювання (за допомогою шибери) неекономічна, вимагає постійного контролю черговим персоналом.

лом, допускає великі коливання, збільшує рівень зносу обладнання.

Найбільш ефективним і економічним способом регулювання продуктивності вентиляторів є плавна зміна їх швидкості обертання, яка досягається застосуванням частотно-регульованого електроприводу. Зміна частоти живильної мережі є задачею, що вирішується за допомогою перетворювачів частоти. Сучасні досягнення електроніки дають змогу здійснювати зміну частоти з похибкою 0,01 %.

Застосування частотно-регульованого електроприводу вентиляторів має наступні переваги порівняно з традиційними методами:

- зменшення енергоспоживання в середньому на 30-40 %;
- підтримка заданих витрат повітря;
- усунення пускових струмів і перевантажень двигуна;
- зменшення механічного зносу устаткування і зниження витрат на його технічне обслуговування та ремонт;
- збільшення терміну роботи контактної комутаційної апаратури і зниження ймовірності виходу з ладу двигунів.

До недоліків можна віднести те, що необхідно враховувати інерційність димососів і вентиляторів з метою забезпечення надійної роботи.

На рис. 6 наведено блок-схему, що реалізує запропонований спосіб для вентилятора опалювального котла.

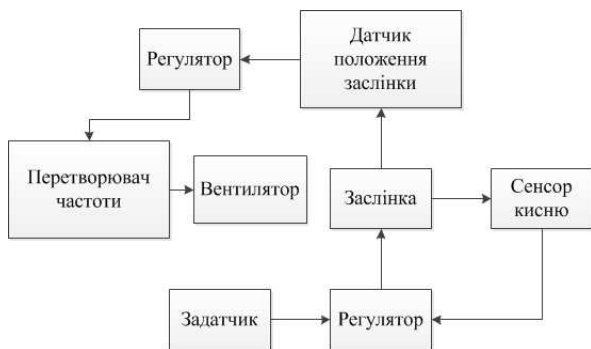


Рис. 6. Блок-схема алгоритму регулювання співвідношення ППС за допомогою вентилятора для пального зі зворотним зв'язком по сигналам сенсора кисню

Наведена конфігурація складається з вентилятора, пов'язаного з частотним перетворювачем, датчика положення заслінки, регулятора, пов'язаного сенсором кисню, що вимірює поточну концентрацію надлишку кисню у відхідних газах, заслінки та задатчика.

Таким чином, система керування дозволяє забезпечити компенсацію швидко змінюваних збурень внаслідок регулювання заслінки, а повільні збурення – зміною частоти обертання робочого колеса вентилятора.

Висновки

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

Підвищення ефективності спалювання палива є важливим завданням, вирішення якого призведе до економії паливних матеріалів внаслідок зниження втрат теплоти з відхідними газами. Розроблення та впровадження методів і засобів контролю складу відхідних газів та автоматичного керування процесом спалювання палива дозволить збільшити енергетичну ефективність котельних агрегатів та покращити екологічну ситуацію за рахунок зменшення шкідливих викидів в атмосферу (CO, NO_x, H₂ та ін.).

Розроблене апаратне забезпечення системи керування процесом спалювання палива дозволяє підтримувати КНП на рівні 1,1-1,2, що наближає роботу котлоагрегату до його номінального ККД. Експериментальні дослідження системи керування процесом спалювання були проведені на базі котлоагрегату НІСТУ-5 та підтвердили її ефективність.

Література

- [1] О. В. Заміцький, І. І. Єфименко, "Модернізація системи автоматичного керування режимами роботи котла", *Вісник Криворізького національного університету*, Вип. 30, с. 177-181, 2012.
- [2] В. А. Барский, А. Е. Фришман, А. Ю. Лысенко, "Адаптивная система управления тягодутьевыми механизмами котельных агрегатов ЭКО-3", *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №3, с. 199-201, 2012.
- [3] A. Quintero-Marquez, C. Bernard, A. Zoulalian, Y. Rogaum, "Improving the operation of an automatic wood chip boiler by optimizing CO emissions", *Energy and Fuels*, vol. 28, pp. 2152-2159, 2014. doi: 10.1021/ef402021c
- [4] A. Zaporozhets, "Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 64, no. 4, pp. 241-248, 2019. doi: 10.3311/PPme.12572
- [5] А. Запорожець, "Експериментальні дослідження системи контролю спалювання палива у котлоагрегатах", *Метрологія та прилади*, №5-1, с. 111-114, 2017.
- [6] Б. І. Тарас, "Вимірювання ККД водогрійного котлоагрегата на газовому паливі у масштабі

- реального часу”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, №677, с. 87-92, 2010.
- [7] І. Б. Абрамська, О. Ф. Єнікєєв, Д. Ю. Захарченко, “Аналіз метрологічних характеристик апаратних засобів для вимірювань параметрів частотно-модульованого сигналу”, *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №2(44), с. 169-174, 2018.
- [8] В. П. Бабак, А. О. Запорожець, “Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності”, *Методи та прилади контролю якості*, №2(33), с. 106-114, 2014.
- [9] J. Blondeau, L. Rijmenans, J. Annendijck, A. Heyer, E. Martensen, I. Popin, A. Wijittongruang, 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”, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 5, pp. 471-481. doi: 10.1016/j.tsep.2018.02.006
- [10] А. О. Zaporozhets, “Research of the process of fuel combustion in boilers”, *Control of Fuel Combustion in Boilers. Studies in Systems, Decision & Control*, vol. 287, pp. 35-60, 2020. doi:10.1007/978-3-030-46299-4_2
- [11] А. Запорожець, “Дослідження стехіометричної суміші «повітря-паливо» органічних сполук. Частина 1. Алкани”, *Наукоємні технології*, т. 22, №2, с. 163-167, 2014. doi: 10.18372/2310-5461.22.6803
- [12] А. Запорожець, “Дослідження стехіометричної суміші «повітря-паливо» органічних сполук. Частина 2. Алкени, алкіни”, *Наукоємні технології*, т. 24, №4, с. 393-399, 2014. doi: 10.18372/2310-5461.24.7506
- [13] Пат. 102512, Україна, МПК F23N5/18. Система контролю якості горіння; заявл. 25.09.2014; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 21.
- [14] C. Oswald, V. Plaček and B. Šulc, "Advanced control with economic - ecological optimization for biomass-fired boilers," Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), Velke Karlovice, Czech Republic, pp. 407-412, 2014. doi: 10.1109/CarpathianCC.2014.6843637.
- [15] B. Bazooyar, A. Shariati, S. H. Hashemabadi, “Characterization and reduction of NO during the combustion of biodiesel in a semi-industrial boiler” *Energy and Fuels*, vol. 29, pp. 6804-6814, 2015. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b01529
- [16] M. Bailera, P. Lisbona, L.M. Romeo, “Power to gas-oxyfuel boiler hybrid systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 10168-10175, 2015. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.074
- [17] J. P. Carroll, J. M. Finnan, F. Biedermann, T. Brunner, I. Obernberger, “Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications”, *Fuel*, vol. 155, pp. 37-43, 2015. doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.008

УДК 621.182-5

¹⁾ А. А. Запорожець, ²⁾ Ю. В. Куц¹⁾ Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна²⁾ Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського”, Київ, Україна

АППАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ОБЕСПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ. ЧАСТЬ 1. СПОСОБ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В Украине сегодня насчитывается более 6000 котельных установок теплопроизводительностью до 1 Гкал/ч с коэффициентом полезного действия (КПД) около 70 %, нуждающихся в замене или модернизации, 40 % котлов эксплуатируются с КПД менее 82 %, около 11000 котлоагрегатов мощностью от 100 кВт до 1 МВт находятся в эксплуатации более 20 лет. Хотя доля этих котлоагрегатов в системе коммунальной теплоэнергетики Украины не превышает 14 %, прогнозируемая экономия природного топлива в этих котлах составляет более 130 млн. кубометров в год. Таким образом, повышение эффективности процесса сжигания топлива в котлоагрегатах малой и средней мощности является актуальной задачей.

В статье представлены результаты создания способа и его аппаратной реализации для повышения быстродействия и достоверности контроля процесса сжигания топлива в котлоагрегатах на основе измерения концентрации остаточного кислорода в отходящих газах. Разработанный способ реализуется путем ступенчатой коррекции соотношения воздушно-топливной смеси, поступающей в топку котла для сжигания, по обратным сигналам от широкополосного кислородного сенсора производства Bosch, размещенного в отходящем канале.

Регулирование соотношения «воздух-топливо» с автоматической настройкой частоты вращения дутьевого вентилятора в зависимости от количества природного топлива, поступающего для сжигания, обеспечивает слаботочное сжигание топлива с незначительными выбросами оксидов азота и оксида углерода, и высокий КПД. Дополнительное применение частотно-регулируемого электропривода в системе управления процессом сжигания

позволяет уменьшить энергопотребление на 30-40 %, устранить пусковые токи и перегрузки двигателя, уменьшить механический износ оборудования, увеличить срок службы контактно-коммутационной аппаратуры.

В целом, разработанная система позволяет оптимизировать режим сжигания топлива с учетом фактических условий, режимов работы котлоагрегата и характеристик топлива; снизить удельные расходы топлива минимум на 10 %; уменьшить уровень выбросов оксидов азота до 40 % и оксида углерода до 50 %; повысить коэффициент полезного действия минимум на 5 %; качественно упростить работу обслуживающего персонала котлоагрегата.

Ключевые слова: котлоагрегат; контроль; управление; сжигание топлива; аппаратное обеспечение; сенсор кислорода.

¹⁾ **A. A. Zaporozhets**, ²⁾ **Y. V. Kuts**

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

²⁾ *National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine*

HARDWARE AND SOFTWARE OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF FUEL COMBUSTION PROCESS IN LOW AND MEDIUM POWER BOILERS. PART 1. METHOD AND HARDWARE

In Ukraine today there are more than 6000 boiler plants with a heating capacity of up to 1 Gcal/h with an efficiency of about 70 %, requiring replacement or modernization, 40 % of boilers are operated with an efficiency of less than 82 %, about 11000 boilers with a capacity of 100 kW to 1 MW have been in operation for over 20 years. Although the part of these boilers in the municipal heat power system of Ukraine does not exceed 14 %, the projected savings in natural fuel in these boilers is more than 130 million cubic meters per year. Thus, increasing the efficiency of the fuel combustion process in small and medium power boilers is an urgent task at the present time.

The article presents the results of creating a method and hardware that implements it, to increase the speed and reliability of monitoring the process of fuel combustion in boiler units based on measuring the concentration of residual oxygen in exhaust gases. The developed method is implemented by stepwise correction of the ratio of the air-fuel mixture entering to the furnace of the boiler for combustion, according to feedback signals from a broadband oxygen sensor manufactured by Bosch, located in the outgoing channel.

The air-fuel ratio control with automatic adjustment of the blower fan speed depending on the amount of fossil fuel supplied for combustion ensures low-toxic combustion of fuel with low emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide, and high efficiency. Additional use of a variable frequency drive in the combustion control system allows to reduce energy consumption by 30-40 %, eliminate starting currents and motor overloads, reduce mechanical wear of equipment, increase the service life of contact switching equipment. In general, the developed fuel combustion control system allows to optimize the fuel combustion mode, taking into account the actual conditions, operating modes of the boiler unit and fuel characteristics; to reduce specific fuel consumption by at least 10%; to reduce the level of emissions of nitrogen oxides up to 40 % and carbon monoxide up to 50 %; to increase the efficiency by at least 5 %; qualitatively to simplify the work of the boiler maintenance personnel.

Keywords: boiler; control; monitoring; fuel combustion; hardware; oxygen sensor.

*Надійшла до редакції
10 березня 2021 року*

*Рецензовано
2 квітня 2021 року*