

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ПАЛИВОПОДАЧІ ПАРОВИХ КОТЛІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

© Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Хоменко В.В., Василюк Т.Ю., Фурсова Т.М.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Канюк Геннадій Іванович: ORCID: 0000-0003-1399-9039; доктор технічних наук; завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мезеря Андрій Юрійович: ORCID: 0000-0003-2946-9593; mezzar@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Хоменко Віктор Віталійович: ORCID: 0000-0001-5355-1250; homenkoviktor1990@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Василюк Тетяна Юхимівна: ORCID: 0000-0002-2148-8645; vasyleczy.t.y@uipa.edu.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Фурсова Тетяна Миколаївна: ORCID: ⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰³⁻¹⁹⁰⁰⁻⁷⁴³²; tatiana2507@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті проведено аналіз та удосконалено систему виміру та контролю (регулювання) параметрів систем спалювання палива в топках парових котлів теплових електростанцій, а саме витрати твердого палива (пило-вугільної суміші) та активаторів горіння, які підвищують ефективність спалювання низькосортних палив без суттєвої модернізації топок та інших елементів парових котлів. Показано метод підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла, заснований на одночасному вимірюванні частоти обертання і обертаючого моменту на валу пилососувальника і дальшому обчисленні фактичного значення витрати палива в мікропроцесорній обчислювальній системі на основі диференціального рівняння динаміки ротора пилососувальника. Показано можливість удосконалення математичної моделі котельного агрегату як об'єкта керування. У модель включені параметри активатора горіння, що покращує процес спалювання низькосортного палива. Наведені недоліки технології використання активаторів горіння, основним з яких є необхідність точного дозування присадок залежно від кількості і якості палива. Визначено можливий діапазон ефективності використання активатора горіння, залежно від його витрати (залежність зміни умовної витрати палива від умовної витрати активатора горіння при спалюванні вугілля). Визначено можливий економічний ефект при використанні активаторів горіння, а саме підвищення коефіцієнту корисної дії при спалюванні низькосортних палив. Наведена функціональна схема системи автоматичного керування процесом подачі палива та активатора горіння в топку котла теплових електростанцій. Система здійснює регулювання з урахуванням кількості та якості палива, що спалюється в топці котельних агрегатів теплових електростанцій.

Ключові слова: вимірювання, паливо, активатор горіння, паровий котел.

Kanjuk G.I., Mezerya A.Yu., Homenko V.V., Vasilets T.Yu., Fursova T.M. «Increasing the accuracy of measuring and controlling the parameters of fuel supply systems of steam boilers at power plants».

The article analyzes and improves the system for measuring and controlling (regulating) the parameters of fuel combustion systems in the furnaces of steam boilers of thermal power plants, namely the consumption of solid fuel (pulverized coal mixture) and combustion activators, which increase the efficiency of burning low-grade fuels without significant modernization of furnaces and other parts steam boilers. A method is shown for improving the accuracy of measuring and regulating the supply of solid fuel to the boiler furnace, based on the simultaneous measurement of the rotational speed and torque on the dust feeder shaft and subsequent calculation of the actual value of dust consumption in a microprocessor computer system based on the differential equation of the dust feeder rotor dynamics. The possibility of improving the mathematical model of the boiler unit as a control object is shown. The model includes the parameters of the combustion activator, which improves the process of burning low-grade fuel. The shortcomings of the technology of using combustion activators are given, the main of which is the need for an accurate dosage of additives depending on the quantity and quality of the fuel. The possible range of efficiency of using the combustion activator depending on its consumption is determined (the dependence of the change in the conditional fuel consumption on the conditional consumption of the combustion activator during coal combustion). The possible economic effect is determined when using combustion activators, namely, the increase in efficiency when burning low-grade fuels. A functional diagram of the automatic control system for the process of supplying fuel and a combustion activator to the boiler furnace of thermal power plants is presented. The system adjusts taking into account the quantity and quality of fuel burned in the furnace of boiler units of thermal power plants.

Keywords: measurement, fuel, combustion activator, steam boiler.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями

Перспективним напрямом підвищення ефективності спалювання низькосортного палива є використання присадок-активаторів, що покращують процес горіння [1]. Випробування активаторів горіння на енергоблоках України показали, що використання присадок-активаторів на основі анаклариду призводить до підвищення ефективності спалювання низькосортних палив (зменшення втрат з механічним та хімічним недопалом) та зменшення витрати дорогого природного газу [1, 2,3]. При випробуваннях енергоблоку №1 Зміївської ТЕС з використанням активатора горіння «анакларид» підвищення ККД енергоблоку склало 3-4 %, що еквівалентно зменшенню витрати палива на 4 т/год при виробленні тієї ж встановленої електричної потужності [1]. Це відкриває широкі можливості для суттєвої економії палива на пилувугільних теплових електростанціях.

Загальна встановлена потужність енергоблоків ТЕС України складає близько 20 тис. МВт. При цьому річний економічний ефект від впровадження технологій спалювання низькосортних палив з використанням присадок-активаторів міг би становити близько 4 млрд. грн. на рік [1].

Основним завданням ефективного використання активаторів горіння є необхідність точного вимірювання витрат палива та присадок та не менш точної підтримки їх у заданих діапазонах залежно від якості палива та потужності енергоблоку. У існуючих системах регулювання ці параметри вимірюються і регулюються мало точно.

Таким чином, виникає необхідність удосконалення системи вимірювання та подачі твердого палива та присадок-активаторів з метою підвищення ефективності їх використання. Також актуальним завданням є удосконалення системи автоматичної подачі активаторів горіння в топку котла, яка максимально враховувала б якість і кількість палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню удосконалення котельного обладнання електростанцій присвячено багато наукових праць. Визначені можливі резерви ефективного керування котельними установками [4, 5]. Економічність котла підвищується за рахунок модернізації та удосконалення систем спалювання палива [6, 7], в тому числі низькосортних [2, 3, 8]. Визначається та враховується вплив якості палива на ефективність роботи котлів [9, 10, 11]. Удосконалюються системи регулювання котельних установок [12, 13]. Використовується сучасні методи математичного моделювання [14, 15, 16, 17] та враховуються обмеження [18]. Отримані наукові та технічні рішення дозволили значно підвищити ефективність роботи котельних агрегатів, але питання використання низькосортних палив з'явилося відносно недавно. Це пов'язано з подорожчанням палива та погіршенням стану паливно-енергетичного комплексу країни, що підвищує актуальність досліджень в цьому напрямку.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою досліджень є підвищення ефективності спалювання низькосортних палив в топках котлів теплових електростанцій шляхом удосконалення системи виміру та контролю витрат твердого палива та активаторів горіння в усьому діапазоні нормальних режимів експлуатації.

Виклад основного матеріалу

В автоматизованій системі керування режимами роботи парового котла (АСК ПК) теплових електростанцій точність вимірювання витрати палива має велике значення, оскільки основна функція АСК ПК полягає в підтримці максимально економічного режиму його роботи. Якщо методи вимірювання витрат рідкого і газоподібного палива є досить точними, то вимірювання витрат твердого палива становить складну технічну задачу. Це пов'язано з тим, що існуючі методи засновані на визначенні витрати палива за вимірюваною швидкістю обертання ротора пиложивильника. Однак витрата палива визначається не тільки частотою обертання ротора, але й щільністю заповнення вугільним пилом міжлопатевого простору, що в існуючій системі ніяк не фіксується, але може істотно змінюватися залежно від випадкових процесів стану і руху пилу в бункерах (неконтрольовані сходи, обвалення тощо) [12, 15].

З метою підвищення точності вимірювання витрати вугільного пилу можна використовувати спосіб вимірювання, заснований на одночасному вимірюванні частоти обертання і обертаючого моменту на валу пиложивильника і дальшому обчисленні фактичного значення витрати пилу в мікропроцесорній обчислювальній системі на основі диференціального рівняння динаміки ротора пиложивильника (рис. 1):

$$M_{об}^{пж} = J_{пж} \frac{d\omega_{пж}}{dt} \quad , (1)$$

де:

$$J_{пж} = J_p + J_{вп} \quad (2)$$

наведений момент інерції пиложивильника, кг·м²;

J_p – момент інерції ротора, кг·м² ;

$J_{вп}$ – момент інерції маси вугільного пилу, що перебуває в просторі між лопатями кг·м²;

$\omega_{пж}$ – кутова швидкість ротора пиложивильника, рад/с;

$M_{об}^{пж}$ – обертаючий момент на валу пиложивильника , Н·м.

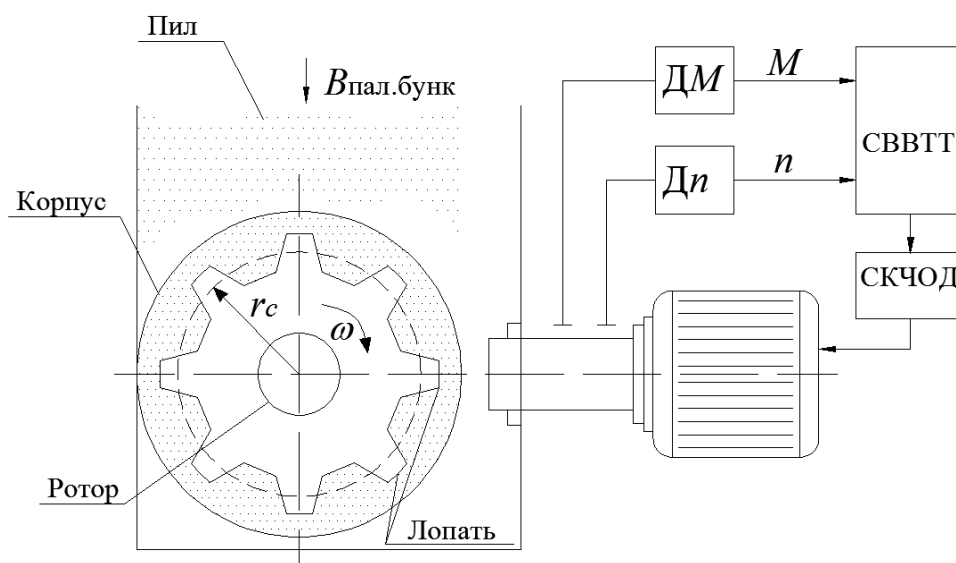


Рис. 1 – Конструктивна схема лопатевого поживильника

За одночасного паралельного вимірювання частоти обертання ротора ω (і диференціюванні в реальному масштабі часу вимірального сигналу з метою визначення кутового прискорення $d\omega/dc$) та обертаючого моменту на валу $M_{об}^{пж}$ (наприклад, за допомогою тензометричного датчик із цифровим виходом) в обчислювальній системі вимірального блока з рівняння (1) може бути визначено реальне поточне значення наведеного моменту інерції:

$$J_{пж} = \frac{M_{об}^{пж}}{(d\omega/dc)} \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (3)$$

Оскільки значення моменту інерції ротора J_p є постійною величиною (конструктивна характеристика ротора), то зі співвідношення (2) може бути визначено реальне поточне значення моменту інерції маси вугільного пилу, що перебуває в цей момент у просторі між лопатями пиложивильника:

$$J_{вп} = J_{пж} - J_p, \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (4)$$

що, у свою чергу, визначається співвідношенням:

$$J_{вп} = m_{вп} \cdot r_c^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (5)$$

де: $m_{вп}$ – маса вугільного пилу, кг; r_c – радіус середньої окружності міжлопатевого простору, м.

За співвідношенням (4) обчислюється поточне значення маси вугільного пилу:

$$m_{вп} = J_{вп} / r_c^2, \text{ кг} \quad (6)$$

і реальне значення витрати пиловугільного палива:

$$B_{пал} = m_{вп} / t_{1об} = m_{вп} \frac{\omega}{2\pi}, \quad (7)$$

де

$$t_{1об} = 2\pi / \omega \quad (8)$$

– час одного оберту ротора пиложивильника.

Структурну схему мікропроцесорного вимірювального блока, що реалізує обчислювальну процедуру (4)-(8) на основі показів датчиків швидкості D_ω та обертаючого моменту D_M , і входить до складу системи автоматичного регулювання (САК) витрати палива, яке подається лопатевим пиложивильником, наведено на рис. 2. А на рис. 3. показано схему регулятора продуктивністю пиложивильника [15].

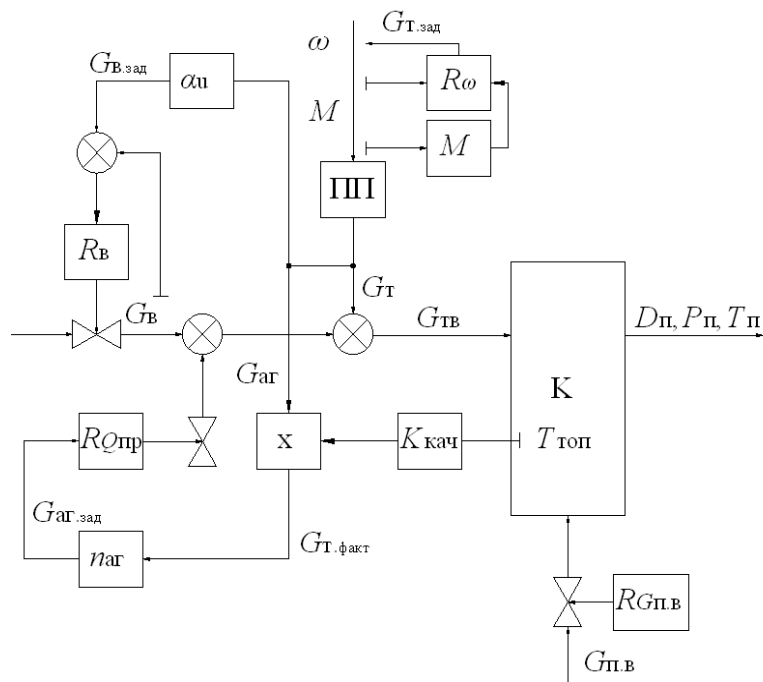


Рис.2 – Схема САК подачі палива та анаклариду

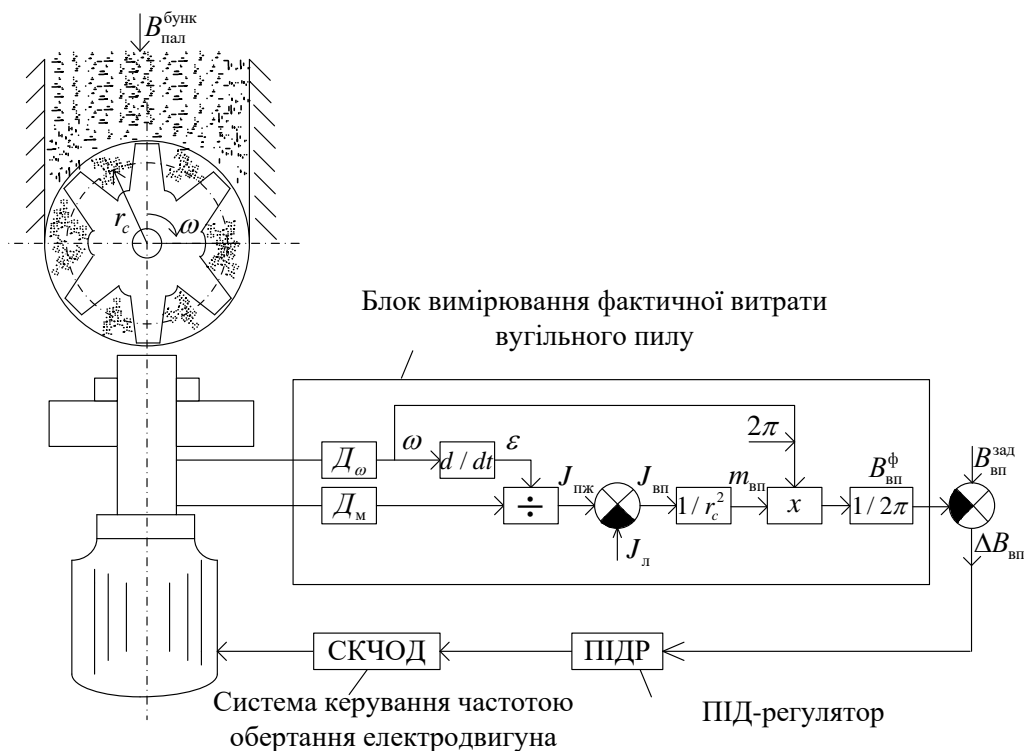


Рис.3 – Регулятор продуктивністю пиложивильника

Такий спосіб визначення поточного значення витрати пилувугільного палива забезпечує широкі можливості для практичної реалізації систем ефективного керування паровими котлами, оскільки без точного вимірювання витрати палива створювати і впроваджувати реальні системи такого класу технічно не можливо.

У попередніх дослідженнях наведено результати випробувань енергоблока №1 Зміївської ТЕС потужністю 200 МВт і витратою вугільного палива 100 т/год із використанням присадок-активаторів на основі анаклариду, які розроблені і виробляються НПП «Адіоз» (м. Київ) [1]. Випробування, опрацювання результатів та експертний висновок про ефективність розроблених присадок виконувалися за особистої участі автора роботи. Під час випробувань встановлено, що використання присадок-активаторів на основі анаклариду приводить до підвищення ефективності спалювання низькосортних палив (зменшення втрат з механічним і хімічним недопалом) і зменшення витрати дорогого природного газу, необхідного для підсвічування смолоскипа. Ефект, приблизно, досягається за рахунок спалювання смолоскипа під дією вмісту в анаклариді спиртоводневих з'єднань, підвищення температури в ядрі горіння і відповідно – ступеня вигорання палива. Під час випробувань енергоблока №1 Зміївської ТЕС із використанням анакларидів підвищення ККД енергоблока склало 3-4%, що еквівалентно зменшенню витрати палива на 4 т/год у процесі вироблення тієї ж установленної електричної потужності. Це відкриває широкі можливості для істотної економії палива на пилувугільних теплових електростанціях.

Однак істотним недоліком розглянутих вище технологій є необхідність точного дозування присадок залежно від кількості і якості палива, які в існуючих системах досить точно обмірювані бути не можуть. І хоча самі присадки подаються в топку рівномірно в часі прецизійними гідравлічними дозаторами, випадкові флуктуації кількості і якості палива, неминучі в реальних існуючих технологічних системах, при цьому ніяк не враховуються. За недостатньої кількості присадок описаного вище ефекту не має, а в разі передозування – процес спалювання може навіть погіршитися (рис. 4). Цей чинник істотно обмежує можливості широкого практичного використання описаних вище технологій [1].

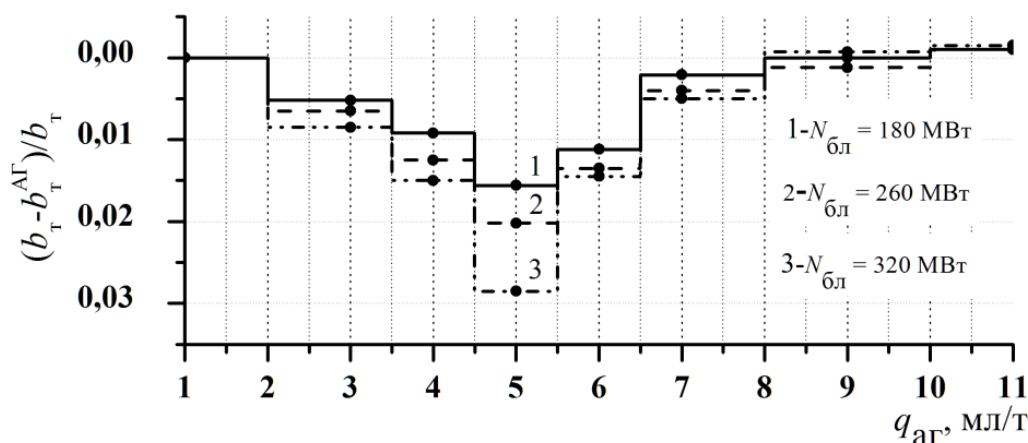


Рис. 4 – Залежність зміни умовної витрати палива від умовної витрати активатора горіння при спалюванні вугілля марки А(Т)

Підвищення точності вимірювання поточного значення витрати пилувугільного палива дозволяє синтезувати енергозберігаючу САК процесом спалювання палива в ПК із використанням присадок-активаторів. Функціональну схему такої САК наведено на рис. 5 [12].

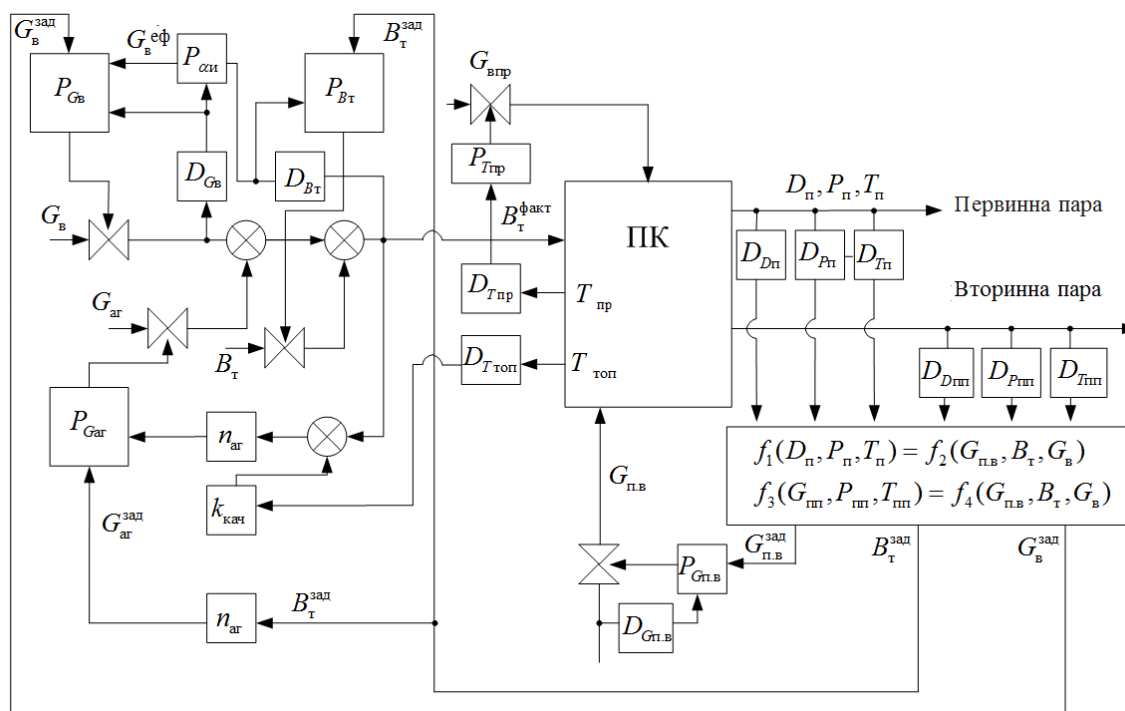


Рис. 5 – Функціональна схема САК процесом спалювання палива з використанням присадок-активаторів

До існуючої АСК, що має регулятори подачі живильної води ($P_{Гж.в}$), палива ($P_{Бпал}$) і повітря ($P_{Гпов}$) (два останніх забезпечують типове регулювання співвідношень «паливо-повітря») і коефіцієнта надлишку повітря (α_n) вводиться система точного вимірювання реального поточного значення витрати вугільного пилу ($D_{Бпал}$), що істотно підвищує ефективність існуючого, типового регулятора співвідношення «паливо-повітря». Крім того, використовується система подачі присадкою-активатором з регульованим прецизійним дозатором. Дозатор керується регулятором витрати активатора ($P_{ар}$), що одержує керуючий сигнал на необхідну $G_{ар}^{зад}$ кількість, і відпрацьовує цей сигнал, відповідним чином регулюючи режим роботи дозатора. Необхідна кількість присадок визначається за фактичною витратою вугільного пилу $B_{пал}$, що вимірюється запропонованим способом, і нормою присадок ($n_{ар}$) з урахуванням корекції за якістю палива (рис. 4). Коефіцієнт якості ($K_{як}$) може бути побічно визначено за вимірюваним значенням температури в топці $T_{топ}$ (чим вища якість палива, тим, за інших рівних умов, вища температура в топці). Таким чином, забезпечується прецизійне регулювання витрати присадок-активаторів відповідно до реальної кількості палива, що подається до пальників, і забезпечуються умови його ефективного спалювання.

Висновки

Запропоновано метод підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла, заснований на одночасному вимірі частоти обертання пилопоживильника та обертаючого моменту на його валу. Удосконалено математичну модель котельного агрегату як об'єкта керування. У модель включені параметри активатора

горіння, що покращують процес спалювання низькосортного палива. Визначено можливий діапазон ефективності використання активатора горіння, залежно від його витрати.

Розроблено систему автоматичного керування процесом подачі палива та активатора горіння в топку котла теплових електростанцій. Регулювання витрати активатора горіння здійснюється з урахуванням кількості та якості палива, що спалюється в топці.

Список використаних джерел:

1. Звіт НДР за темою госпдоговору з ТОВ «НВП «АДІОЗ» (м. Київ) № 11-10 : Обробка та аналіз результатів теплових балансових випробувань котла ТП-100 енергоблоку 200МВт Зміївської ТЕС. – Харків : УПА. – 2012. – 28с.
2. Капустянський А.О. Результати експертних випробувань котла ТПП-210-А Трипільської ТЕС при спалюванні твердого палива з додаванням каталізатора горіння / А.О. Капустянський, Й.С. Мисак // *Енергетика та електрифікація*. – 2012. – № 12 (352). – С. 3–8.
3. Вольчин И. А. Испытания активаторов горения на котлоагрегате ТП–100 / И. А. Вольчин, А. Ю. Провалов // *Енергетика та електрифікація*. – 2012. – № 6 (346). – С. 32–42.
4. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
5. Дуэль М. А. Развитие систем энергосберегающего автоматизированного управления энергопроизводством ТЭС и АЭС Украины / М. А. Дуэль, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря. – Харьков : Точка, 2013. – 388 с.
6. Мисак Й. С. Підвищення економічності роботи котлів за рахунок модернізації РПП / Й. С. Мисак, М. Ф. Заяць // *Современная наука : сб. науч. ст.* – 2012. – № 3 (11). – С. 15–21.
7. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт / В. В. Белый, С. В. Порозов, В. В. Васильев, А. А. Дектерев // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 299–312.
8. Мисак Й. С. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив: навч. посіб / Й. С. Мисак, Я. М. Гнатишин, Я. Ф. Івасик. – Львів : Львівська політехніка, 2002. – 135 с.
9. Капустянский А. А. Метод аналитического определения перерасхода топлива на пылеугольных котлах / А. А. Капустянский // *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. – 2013. – № 6 (112). – С. 8–14.
10. Гольшев Л. В. Влияние качества твердого топлива на ограничение номинальной мощности энергоблока / Л. В. Гольшев // *Теплоэнергетика*. – 2001. – № 7. – С. 19–22.
11. Мисак Й. С. Вплив якості палива на техніко-економічні показники котельних установок ТЕС / Й. С. Мисак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – Львів, 2000. – № 399. – С. 89–96.
12. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.
13. Анисимов М. Т. Автоматизація контролю якості вугілля / М. Т. Анісімов, В. В. Овсяников // *Уголь Украины*. – 2007. – № 11. – С. 23–25.
14. Канюк Г. И. Математическое моделирование парового котла для задач энергосберегающего управления / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук // *Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. наук.-техн. зб.* – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – № 2 (29). – С. 52–66.
15. Пат. 82810 UA, F22B35/00. Энергосберегающая автоматизованная система управления котельным агрегатом тепловых электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, К. В. Лаптінова. – № u 201302030 ; заявл. 19.02.13 ; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.
16. Пономарев А. А. Модель газовоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования / А. А. Пономарев // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2010. – № 3 (61). – С. 19–28.
17. Майданик М. Н. Математическое моделирование точки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива / М. Н. Майданик, Э. Х. Вербовацкий // *Теплоэнергетика*. – 2011. – № 6. – С. 37–42.
18. Ковриго Ю. М. Повышение эффективности регулирования котлов путем учета технологических ограничений / Ю. М. Ковриго, Б. В. Фоменко, А. С. Бунке // *Теплоэнергетика*. – 2012. – № 2. – С. 58–63.

References

1. *Zvit NDR za temoyu gospdogovoru z TOV NVP ADIOZ (Kiyiv) no. 11-10: Obrobka ta analiz rezultativ teplovih balansovih viprobuvan kotla TP-100 energobloku 200MVt Zmiiyivskoyi TES* 2012, *Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia*, Kharkiv.
2. Kapustyanskiy, AO & Misak, JS 2012, 'Rezultati ekspertnih viprobuvan kotla TPP-210-A Tripilskoyi TES pri spalyuvanni tverdogo paliva z dodavanniyam katalizatora gorinnya', *Energetika ta elektrifikaciya*, no. 12 (352), pp. 3-8.

3. Volchin, IA & Provalov, AYu 2012, 'Ispytaniya aktivatorov gorennya na kotloagregate TP-100', *Energetika ta elektrifikaciya*, no. 6 (346), pp. 32-42.
4. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu, Mihajskij, DV, Laptinov, IP & Fokina, AR 2012, *Rezervy energosberegayushchego upravleniya tekhnologicheskimi processami na dejstvuyushchih TES i AES*, Tochka, Harkov.
5. Duel, MA, Kanyuk, GI & Mezerya, AYu 2013, *Razvitie sistem energosberegayushchego avtomatizirovannogo upravleniya energoproizvodstvom TES i AES Ukrainy*, Tochka, Harkov.
6. Misak, JS & Zayac, MF 2012, 'Pidvishchennya ekonomichnosti roboti kotliv za rahunok modernizaciyi RPP', *Sovremennaya nauka*, no. 3 (11), pp. 15–21.
7. Belyj, VV, Porozov, SV, Vasilev, VV & Dekterev, AA 2007, 'Issledovanie teploobmena i modernizaciya topochnoj kamery kotla P-67 bloka 800 MVt', *Teplofizika i aeromekhanika*, vol. 14, no. 2, pp. 299-312.
8. Misak, JS, Gnatishin, YaM & Ivasik, YaF 2002, *Palivni pristroyi dlya spalyvannya nizkosortnih paliv*, Lvivska politehnika, Lviv.
9. Kapustyanskij, AA 2013, 'Metod analiticheskogo opredeleniya pereraskhoda topliva na pyleugolnyh kotlah', *Energoberezhenie, energetika, energoaudit*, no. 6 (112), pp. 8-14.
10. Golyshchev, LV 2001, 'Vliyanie kachestva tverdogo topliva na ogranichenie nominalnoj moshchnosti energobloka', *Teploenergetika*, no. 7, pp. 19-22.
11. Misak, JS 2000, 'Vpliv yakosti paliva na tekhniko-ekonomichni pokazniki kotelnih ustanovok TES', *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Teploenergetika. Inzheneriya dovkillya. Avtomatizaciya*, Lviv, no. 399, pp. 89-96.
12. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Suk, IV 2016, *Metody i modeli energosberegayushchego upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektrostancij*, Tochka, Harkov.
13. Anisimov, MT & Ovsyanikov, VV 2007, 'Avtomatizaciya kontrolyu yakosti vugillya', *Ugol Ukrainy*, no. 11, pp. 23-25.
14. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Suk, IV 2016, 'Matematicheskoe modelirovanie parovogo kotla dlya zadach energosberegayushchego upravleniya', *Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnya*, Kiyiv, no. 2 (29), pp. 52-66.
15. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Laptinova, KV 2013, *Energozberigayucha avtomatizovana sistema upravlinnya kotelnim agregatom teplovyh elektrostancij*, UA Patent 82810, F22B35/00, № u 201302030.
16. Ponomarev, AA 2010, 'Model gazovozdushnogo trakta teploenergeticheskogo kotla kak obekta regulirovaniya', *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 3 (61), pp. 19-28.
17. Majdanik, MN & Verboveckij, EH 2011, 'Matematicheskoe modelirovanie topki i povorotnogo gazohoda kotla P-50R pri sovместnom szhiganiі tverdogo i gazoobraznogo topliva', *Teploenergetika*, no. 6, pp. 37-42.
18. Kovrigo, YuM, Fomenko, BV & Bunke, AC 2012, 'Povyshenie effektivnosti regulirovaniya kotlov putem ucheta tekhnologicheskikh ogranichenij', *Teploenergetika*, no. 2, pp. 58-63.

Стаття надійшла до редакції 04 листопада 2022 року