

П. О. Качанов, М. В. Тарасенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РОЗРІДЖЕННЯ В ТОПЦІ КОТЛА

Анотація. Автоматичне регулювання процесу горіння є ключовим фактором підвищення ефективності, безпеки та екологічності котельних установок. Відхилення від оптимальних параметрів горіння можуть призводити до неповного згорання палива, збільшення викидів шкідливих речовин або аварійних ситуацій. Автоматичні системи управління дозволяють підтримувати стабільний та економічний процес, контролюючи подачу палива і окисника в реальному часі. Одним із критичних аспектів регулювання є підтримка оптимального розрідження в топці. Воно забезпечує стабільність факела та сприяє повному згорянню палива. У роботі розглянуто вплив параметрів розрідження на ефективність процесу, а також методи регулювання димососами та дуттьовими вентиляторами. Застосування сучасних регуляторів, зокрема ПІД-регуляторів, дозволяє оперативно реагувати на зміну теплового навантаження, підтримуючи необхідний баланс між подачею повітря та відведенням продуктів згорання. Отримані результати свідчать про ефективність запропонованої системи автоматичного регулювання розрідження з показником перерегулювання у 15% та часом регулювання 5 секунд. Перспективними напрямками розвитку є застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін у процесі горіння та вдосконалення системи на основі аналізу хімічного складу димових газів.

Ключові слова: автоматичне регулювання, котельні установки, паровий котел, ПІД-регулятор, розрідження в топці.

Вступ

Автоматичне регулювання процесу горіння є важливим фактором забезпечення ефективності, безпеки та екологічності котельних установок. Горіння – це складний фізико-хімічний процес, що залежить від багатьох параметрів. Відхилення від оптимальних умов можуть призвести до неповного згорання палива, підвищеного утворення шкідливих речовин або навіть до аварійних ситуацій, таких як детонація або згасання полум'я. Автоматична система управління дозволяє постійно контролювати ці параметри і підтримувати їх на заданому рівні, забезпечуючи стабільний та економічний процес горіння. Крім підвищення ефективності, автоматичне регулювання мінімізує людський фактор, що знижує ймовірність помилок оператора і забезпечує швидку адаптацію до мінливих умов експлуатації. Система може в режимі реального часу коригувати подачу палива та окисника, оптимізуючи коефіцієнт надлишку повітря для максимального тепловиділення при мінімальних викидах. Це критично важливо не лише для зменшення витрат палива, а й для дотримання екологічних норм та продовження терміну служби котельного обладнання. Автоматичне регулювання процесу горіння включає регулювання подачі палива в топку в залежності від навантаження котла, підтримання оптимального співвідношення палива та повітря для економічного спалювання палива та підтримання необхідного стійкого розрідження в топці. Оптимальне розрідження в топці відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності згорання. Слабке розрідження може призвести до неповного згорання палива через недостатню кількість повітря, а сильне розрідження — до надмірного підсмоктування повітря, збільшення теплових втрат та зниження температури в топці. Крім того, підвищене розрідження сприяє нестабільності факела, що негативно впливає на процес горіння. Різке підвищення розрідження (до 200 кПа) в топці може призвести до зриву факелу.

Під час згорання палива утворюються гарячі димові гази, густина яких є нижчою за густину

навколишнього повітря. Це призводить до виникнення природної тяги, що забезпечує видалення газів через димову трубу. Сила тяги визначається висотою димаря та температурою газів, а також витрачається на подолання опорів газового тракту, включаючи топку, димоходи, борів та шибері.

Таким чином, регулювання розрідження в топці котла є важливим завданням, що потребує врахування динамічних характеристик системи, зовнішніх впливів та технічних параметрів використовуваних димососів і дуттьових вентиляторів.

Огляд існуючих рішень

У статті [1] автори вказують, що розрідження в топці це важливий параметр, який вимірюється та контролюється в котельні. В рамках загального керування котлом, яке моделюється в цій роботі, розрідження регулюється через систему керування потоком димових газів з використанням ПІ-регулятора з негативним зворотнім зв'язком. Однак розрідження згадується як частина загальної схеми управління, але не є центральною темою роботи. Автори [2] розглядають систему управління подачею повітря в котел (forced draft system) і зазначають, що одним з її елементів є система примусової тяги, яка відповідає за підтримку розрідження в топці. Вони вказують, що розрідження в топці залежить від роботи тягового вентилятора, який регулює відведення відпрацьованих газів. Цей процес пов'язаний з балансом подачі первинного та вторинного повітря, а також із кількістю палива. У статті йдеться, що існуючі системи регулювання страждають від обурень та перешкод, що робить керування складним. Для вирішення цих проблем автори пропонують активне управління гасіння збурень (ADRC), яке здатне краще впоратися з нестабільностями та забезпечувати більш точну підтримку розрідження. Загалом стаття розглядає управління розрідженням як частину загального управління повітряним потоком у котлі, і автори пропонують удосконалені методи його регулювання. Стаття [3] присвячена методам виявлення та діагностики несправностей у системі розрідження топки котла. Автори підкреслюють, що стабільне розрідження не-

обхідне для безпечної та ефективної роботи котла, оскільки його відхилення можуть призвести до втрат тепла, нестабільного горіння та зниження ефективності установки. У роботі описується, що для контролю розрідження зазвичай регулюють швидкість димососів чи положення лопаток вентилятора. У статті запропоновано новий метод діагностики несправностей, що базується на аналізі канонічних змінних (CVA) та алгоритмі GA-XGBoost. CVA використовується для зниження надмірності даних та виявлення значних відхилень у динаміці процесу, а XGBoost, оптимізований за допомогою генетичного алгоритму, дозволяє з високою точністю класифікувати нормальні та аномальні стани системи. У роботі [4] вивчається вплив розрідження в топці на стабільність горіння в котлі. Автори розглядають основні фактори, що впливають на флуктуацію розрідження, включаючи роботу системи подачі повітря та димових газів, а також процес горіння. Було проведено спектральний аналіз тиску в топці, який дозволив виявити закономірності коливань за різних режимів роботи котла. Для оцінки стабільності горіння автори запропонували двопараметричну модель, засновану на частоті коливань розрідження та змінах навантаження. Аналіз показав, що у стійкому режимі різниця між позитивними та негативними флуктуаціями тиску мінімальна, тоді як за нестабільності ця різниця значно збільшується. Запропонований метод діагностики на основі даних про розрідження може бути використаний для оптимізації процесів горіння та запобігання можливим порушенням у роботі котла.

Метою даної статті є розробка та синтез системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегата. Автоматичний регулятор повинен забезпечувати сталість показника розрідження в топці незалежно від навантаження котлоагрегата та інших збурюючих впливів, таких як зміна витрати палива або повітря.

Властивості котла, як об'єкта регулювання розрідження в топці

Для ефективного відведення продуктів згоряння використовується димова труба, однак за наявності теплоутилізаційних пристроїв (економайзерів, повітропідігрівачів, рекуператорів) опір газового тракту зростає. У таких випадках природної тяги стає недостатньо, і застосовується штучна тяга, що створюється дуттьовими вентиляторами або димососами. Димососи можуть бути прямої та непрямої дії, проте найбільш поширені пристрої прямої дії, що вирізняються високою економічністю. Конструкція димососа включає обертовий ротор з лопатками та нерухомий корпус, що виконує функцію направляючого апарата. Регулювання потоку димових газів здійснюється шляхом зміни кута повороту лопаток, що дозволяє керувати витратою та підтримувати задане розрідження.

Робочі умови димососів значно складніші, ніж у вентиляторів, оскільки вони працюють із газами високої температури. Для підвищення надійності конструкція передбачає термостійкі матеріали, посилені лопатки, а в деяких випадках – систему водяного охолодження підшипників.

Наявність невеликого (до 20-30 Па) постійного розрідження у верхній частині топки необхідно за умов нормального топкового режиму. Це перешкоджає вибиванню газів з топки, сприяє стійкості факела і служить непрямим показником матеріального балансу між повітрям, що подається в топку, і газами, що йдуть. Об'єкт регулювання по розрідженню – топкова камера з включеними послідовно з нею газоходами від поворотної камери до всмоктувальних патрубків димососів. Вхідним регулюючим впливом цієї ділянки служить витрата димових газів, що визначається подачею димососів.

До зовнішніх збурюючих впливів відносять зміну витрати повітря в залежності від теплового навантаження агрегату, до внутрішніх – порушення газоповітряного режиму, пов'язані з роботою систем пилоприготування, операціями з видалення шлаку і т.п. На рівень розрідження впливають атмосферний тиск, температура навколишнього повітря та витоки в газоходах. Узимку розрідження збільшується через більшу різницю температур між димовими газами та зовнішнім повітрям. Вітер також має вплив: за несприятливих умов у невеликих установках можливий ефект перекидання тяги, що може призвести до потрапляння газів у приміщення. Температура газів, що відсмоктуються, при штучній тязі повинна бути не нижче 100 °C і не вище 250 °C, так як при температурі нижче 100 °C відбувається іржавіння димососів, виділення конденсату в трубі, а температура вище 250 °C негативно впливає на їх міцність. Якщо температура відпрацьованих газів вище 250 °C, слід підмішувати холодне повітря.

Регулювання напрямним апаратом широко застосовується на теплових електростанціях через свою простоту, надійність, безпеку і можливість автоматизації процесу управління. Для підвищення ефективності регулювання направляючі апарати слід розташовувати у безпосередній близькості від входу до робочого колеса. Діапазон регулювання за допомогою цих пристроїв зазвичай не перевищує 30% від номінальної подачі, тому цей спосіб зазвичай застосовують спільно з дросельним регулюванням або іншими способами регулювання. Ділянка по розрідженню не має запізнення, має малу інерційність і значне самовирівнювання. Негативною властивістю ділянки є коливання регульованої величини близько середнього значення з амплітудою до 30-50 Па (3-5 мм вод. ст.) і частотою до декількох герц. Такі коливання (пульсації) залежить від великої кількості чинників, зокрема від пульсацій витрат палива і повітря. Вони ускладнюють роботу регулюючих приладів, особливо сильно вони впливають на релейні елементи, викликаючи їх занадто часті спрацьовування.

Для згладжування пульсацій перед первинними вимірювальними приладами встановлюють спеціальні демпфуючі пристрої: дросельні трубки та шайби, імпульсні труби підвищеного діаметра або проміжні балони (ємності). Для цього використовують також електричний демпфер, що є в електричних схемах вимірювальних блоків регулюючих приладів.

Регулювання розрідження зазвичай здійснюють за допомогою зміни кількості газів, що відсмоктують-

ся димососами. Найбільшого поширення набула схема регулювання розрідження з одноімпульсним ПІД-регулятором, що реалізує принцип регулювання по відхиленню. Під час роботи котла в регульованому режимі часто відбуваються зміни теплового навантаження і, отже, зміни витрати повітря. Робота регулятора повітря призводить до тимчасового порушення матеріального балансу між повітрям, що надходить, і газами, що йдуть. Для попередження цього порушення та збільшення швидкості регулятора розрідження рекомендують ввести на його вхід додаткову дію від регулятора повітря через пристрій динамічного зв'язку. Як пристрій динамічного зв'язку використовують аперіодичну ланку, вихідний сигнал якої надходить на вхід регулятора розрідження лише в моменти переміщення виконавчого механізму регулятора повітря.

Синтез САР

Топка котла може бути описана, як об'єкт регулювання, що має високий рівень самовирівнювання та низький час запізнення. Експериментальним методом отримано криву розгону по розрідженню в топці котла вона зображена на рис. 1.

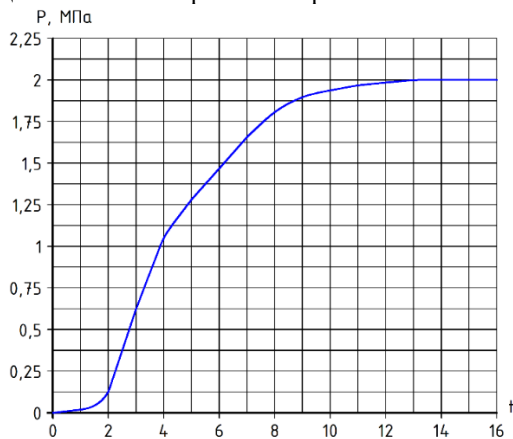


Рис. 1. Крива розгону топки по розрідженню

Приймемо постійну часу об'єкта регулювання $T = 4,3\text{с}$, а час запізнення $\tau_{зан} = 1,4\text{с}$. Коефіцієнт передачі $K_{об} = 0,2\text{кгс/м}^2 \cdot \Delta\text{У}^{-1}$. Топка котла, як об'єкт регулювання розрідження може бути представлена у вигляді інерційної ланки першого порядку з запізненням. Передавальна функція ланки:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об} e^{-p\tau_{зан}}}{T_{об} p + 1} = \frac{0,2e^{-1,4p}}{4,3 p + 1}.$$

Повна структурна схема системи регулювання розрідження в топці приведена на рис. 2.

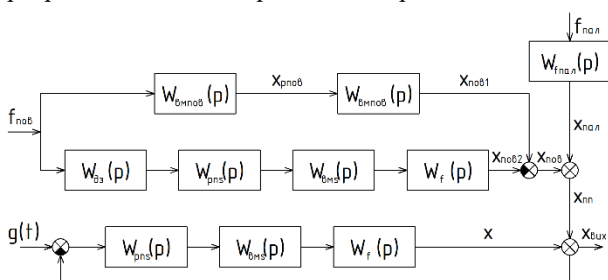


Рис. 2. Повна структурна схема САР

Передавальні функції об'єкта по каналам збурення виглядають наступним чином:

При збуренні повітрям: $W_{f_{нов}} = \frac{x_{нов}(p)}{F_{нов}(p)}$, де $x_{нов}$ – витрата повітря; $F_{нов}$ – збурювальний вплив повітрям.

При збуренні паливом $W_{f_{пал}} = \frac{x_{пал}(p)}{F_{пал}(p)}$, де $x_{пал}$ – витрата палива; $F_{пал}$ – збурювальний вплив паливом.

Оскільки витрата палива змінюється одночасно з витратою повітря, то можемо виключити величину збурення $f_{нов}$ з подальшого розгляду в схемі САР. Для подальших розрахунків введемо фільтр $W_\phi(p)$, вхідною величиною якого є збурення $f_{нов}$, а вихідною — зміна регулюючого параметру $x_{нов}$. Отже,

$$W_\phi(p) = \frac{x_{нов}}{F_{нов}(p)} = \frac{W_{вмпов}(p) * W_{f_{нов}}(p)}{W_{дз}(p) * W_{пнс}(p) * W_{вмс}(p) * W_f(p)}.$$

Підібравши відповідну передавальну функцію пристрою динамічного зв'язку можна досягти максимальної фільтруючої здатності фільтру, тобто досягти значення $W_\phi(p) = 0$. В такому випадку:

$$W_{дз}(p) = \frac{W_{вмпов}(p) * W_{f_{нов}}(p)}{W_{пнс}(p) * W_{вмс}(p) * W_f(p)} = \frac{1}{T_{вмпов} p} * \frac{K_{f_{нов}}}{T_{f_{нов}} p + 1} e^{-p\tau_{зан}} = \frac{1}{T_{вмс} p} * \frac{K_f * e^{-p\tau_{зан}}}{T_f p + 1} * K_{пнс} * (Tp + 1)$$

Зазвичай динамічні характеристики виконавчих механізмів по повітря (дугтеві вентилятори) та димовим газам (димососи) є майже однаковими, а постійні часу та запізнення об'єкта при збурення витратою повітря та тягою приблизно рівні. Звідси отримуємо:

$$W_{дз}(p) = \frac{K_{f_{нов}}}{K_f * K_{пнс} * (Tp + 1)} = \frac{K_\delta}{T_\delta p + 1}.$$

де K_δ – коефіцієнт підсилення пристрою динамічного зв'язку; T_δ – постійна часу пристрою динамічного зворотного зв'язку.

Отже, пристрій динамічного зв'язку має бути виконаний у вигляді інерційної ланки першого порядку з настроюваними параметрами K_δ і T_δ . Підібравши параметри динамічної настройки можна досягти компенсації зовнішніх збурень, що з'являються під впливом регулятора витрати повітря. Після здійснення компенсації зовнішніх збурень, розрахунок параметрів настройки регулюючого пристрою САР розрідження проводиться виходячи з величини керуючого впливу, згідно до структурної схеми. Отже, наведену вище структурну схему (рис. 2) можна спростити до схеми, що зображена на рис. 3.

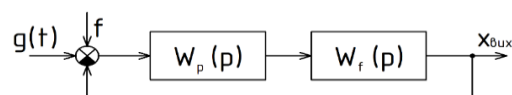


Рис. 3. Спрощена структурна схема САР

Передавальна функція САР розрідження по керуючому впливу буде виглядати наступним чином:

$$W(p) = \frac{x_{вих}(p)}{G(p)} = \frac{W_f(p) * W_p(p)}{1 + W_f(p) * W_p(p)},$$

де $W_p(p)$ – передавальна функція регулятора.

Моделювання перехідного процесу було проведено у середовищі Matlab. Отримані такі показники якості перехідного процесу: час регулювання – 5 секунд; перерегулювання – 15 %.

Висновки

Отримана САР з показником перерегулювання у 15% та часом регулювання 5 секунд. Одержані результати задовольняють вимогам до САР розрідження в топці котла та забезпечують необхідну

швидкістю перехідного процесу та точність регулювання. Серед майбутніх напрямків досліджень у сфері САР слід виділити технології машинного навчання. Сучасні котли оснащені датчиками, які записують інформацію про численні робочі параметри, включаючи температуру, тиск і витрати. Після цього ці дані можуть бути відправлені на платформу обробки та аналізу в реальному часі. Оператори можуть передбачати такі проблеми та вживати запобіжних заходів, використовуючи алгоритми машинного навчання для виявлення тенденцій і відхилень у даних. Для систем регулювання процесів горіння та зокрема САР розрідження в топці актуальним є регулювання за хімічним складом димових газів. Дана тема потребує подальших досліджень та вдосконалення вже існуючих методів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang J., Ji C., Cao L., Jin Q. "Design and realization of automatic control system for boiler based on model free adaptive control," Proc. of 2011 CCDC, Mianyang, China, 2011, pp. 1881-1886, DOI: 10.1109/CCDC.2011.5968507.
2. Wang Q., Xu H., Pan L., Sun L. "Active disturbance rejection control of boiler forced draft system: a data-driven practice." *Sustainability* 12(10): 4171, 2020. DOI:10.3390/su12104171
3. Ling D., Li C., Wang Y., Zhang P. "Fault detection and identification of furnace negative pressure system with CVA and GA-XGBoost." *Energies* 15(17): 6355, 2022. DOI:10.3390/en15176355
4. Chen Z., Niu Y., Xiao C., Li E. "Analysis of Combustion Stability Based on the Negative Pressure Characteristic of Furnace." *Journal of Physics*. Vol. 1087. No. 4. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1087/4/042082
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування – К.: Либідь. 2007. – 655 с.
6. Zak S. H. *Systems and Control*. Oxford University Press, 2003. – 770 p. ISBN: 978-019-51-5011-7
7. Gilman G.F. (Jerry), Gilman J. "Boiler control systems engineering." – ISA Publ., 2010. – 198 p. ISBN: 978-193-60-0720-2
8. Kristinsson H. Lang S. "Boiler control improving efficiency of boiler systems." CODEN: LUTEDX/TEIE (2011). URL: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3632662>
9. Александров С. С., Голуб О. П., Костенко Ю. Т. Теорія автоматичного керування. Т1. – Харків: ХДПУ, 2000. – 154 с.
10. Александров С. С., Козлов С. П., Кузнецов Б. І. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Підручник у 3-х томах. Т.1 Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2002. – 490 с.

Received (Надійшла) 23.01.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Качанов Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Petro Kachanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: petro.kachanov@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7532-5913>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190405644>.

Тарасенко Микола Валерійович – аспірант кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Mykola Tarasenko – PhD student, Department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: porolah2008@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-6877-0173>.

Automatic draft control system in a boiler furnace

Petro Kachanov, Mykola Tarasenko

Abstract. Automatic combustion control is a key factor in improving the efficiency, safety, and environmental sustainability of boiler installations. Deviations from optimal combustion parameters can lead to incomplete fuel combustion, increased emissions of harmful substances, or even emergency situations. Automatic control systems enable a stable and economical process by regulating the fuel and oxidizer supply in real time. One of the critical aspects of regulation is maintaining optimal draft pressure in the furnace, which ensures flame stability and promotes complete fuel combustion. This study examines the impact of draft pressure parameters on combustion efficiency, as well as methods for regulating draft using induced draft fans and forced draft fans. The application of modern controllers, particularly PID controllers, allows for rapid adaptation to changes in thermal load while maintaining the necessary balance between air supply and flue gas removal. The results confirm the effectiveness of the proposed automatic draft control system, achieving a 15% overshoot and a regulation time of 5 seconds. Promising areas for further development include the use of machine learning algorithms to predict combustion process changes and the enhancement of control systems based on flue gas composition analysis.

Keywords: automatic control, boiler installations, steam boiler, PID controller, furnace draft.