



Nowoczesne metody monitoringu i sterowania procesem spalania paliw stałych w celu zmniejszenia jego oddziaływania na środowisko naturalne

*Waldemar Wójcik, Andrzej Kotyra,
Andrzej Smolarz, Konrad Gromaszek
Politechnika Lubelska*

1. Wstęp

Polska energetyka zawodowa, stoi przed problemem efektywnego prowadzenia procesu spalania w blokach, które w dużej mierze pochodzą sprzed 50 lat. Z drugiej strony należy zaznaczyć, że pojęcie efektywności takiego procesu należy rozumieć nie tylko w sensie parametrów techniczno-ekonomicznych, ale również ekologicznych. Jest tak za sprawą wytycznych Komisji Europejskiej, ograniczających graniczne wartości emisji (ELV) NO_x , CO oraz SO_2 do atmosfery, ustawicznie zaostrzanych w ramach dyrektyw IIPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*) oraz LCP (*Large Combustion Plants*).

Dla przykładu, bloki o mocy powyżej 500 MW_{th}, używające paliw stałych mają od roku 2008 ograniczoną wartość stężenia emisji tlen-

ków azotu w wysokości 500 mg/Nm^3 , która po roku 2016 ma wynosić 200 mg/Nm^3 .

Przy wytwarzaniu energii opartym głównie na spalaniu węgla kamiennego, brunatnego oraz współspalaniu biomasy, dużo uwagi poświęca się metodom pierwotnym. Szacunki mówią, że innowacyjne technologie oparte na metodach pierwotnych pozwolą spełnić rygory ELV przy połowie kosztów odpowiadających metodom redukcji katalitycznej [4].

Do istotnego aspektu ekologicznego, przeciwwagę stanowią obciążenia związane z kosztami oraz trudności i opóźnienia w uzyskiwaniu pozwoleń również w kontekście nowych inwestycji. Zatem istotnym zagadnieniem w obliczu zaistniałej sytuacji jest tania redukcja tlenków azotu (NO_x). Liczne publikacje, np. [2÷4], jak i konferencje i sympozja naukowe, poruszają problemy niskoemisyjnych technik spalania.

Złożoność, nieliniowość procesu spalania, występujące opóźnienia i zakłócenia oraz kwestie bezpieczeństwa powodują, że większość dyskutowanych i wdrażanych rozwiązań ma przeważnie charakter modernizacyjny. Zgodnie z [2] podstawowe środki jakie ma do dyspozycji konstruktor niskoemisyjnych systemów spalania ograniczają się do: obniżania temperatury spalania, rozdziału powietrza, stopniowanie paliwa (aerodynamika spalania i reburning) oraz uwzględnienie redukujących właściwości bogatego płomienia.

Systemy łączące technologie oraz różnego rodzaju procesy technologiczne stwarzają korzystne warunki, wynikające ze zmniejszonej emisji CO_2 , odpowiedzialnej za globalne ocieplenie klimatu. Wszystkie paliwa kopalne, w procesie spalania emitują emisję CO_2 . W celu ograniczenia niepożądanych emisji stosowane są również nowoczesne technologie takiej, jak:

- spalanie wysokotemperaturowe,
- spalanie w obecności tlenu,
- odzysk ciepła (kaskady ciepła i wykorzystanie ciepła niskotemperaturowego),
- spalanie katalityczne.

Metody te jednak są możliwe do realizacji praktycznie wyłącznie w nowych, specjalnie projektowanych obiektach i instalacjach.

W pracujących obiektach, dotychczasowe modernizacje, wykorzystują zaawansowane technologie, związane z zastosowaniem nowej generacji palników niskoemisyjnych oraz stopniowaniem powietrza w ramach systemów OFA. Alternatywą, lub uzupełnieniem niniejszych usprawnień technologicznych mogą być technologie wspierające (optymalizujące) sterowanie procesem.

2. Proekologiczne sterowanie procesem spalania pyłu węglowego

Możliwość oceny jakości spalania jest niezwykle istotna dla właściwej pracy kotła energetycznego [3]. W przypadku spalania w warstwach przepływowych przekłada się ona na szybkość przebiegu reakcji chemicznych, efektywność przekazywania ciepła, stabilność płomienia oraz generację NO_x i CO. Źródła literaturowe, np. [2, 3, 7] podają, że największy wpływ na formowanie aerodynamiki spalania mają palniki oraz rodzaj i sposób podawania paliwa.

Niskoemisyjne palniki pyłowe wykorzystują redukcyjne właściwości bogatego płomienia pyłowego przez organizację stref spalania podstechiometrycznego z wykorzystaniem stopniowania powietrza lub stopniowanie paliwa. Z kolei stopniowanie powietrza lub paliwa w warunkach pyłowych może pogorszyć stabilność spalania i zwiększyć stratę niedopału.

Uwzględniając te czynniki oraz istotne aspekty ekologiczne, zarysowuje się potrzeba opracowania systemu sterowania procesem spalania, który będzie dokonywał optymalizacji pracy kotła na podstawie informacji uzyskanych z konwencjonalnego oprzyrządowania oraz uwzględnienie innowacyjnych technik pozwalających na ocenę jakości procesu.

Od strony technologicznej, istotnym parametrem jest zapewnienie stabilności płomienia oraz wykrywania stanów awaryjnych. Zatem układ sterowania powinien być uzupełniony o informację diagnostyczną o płomieniu z wykorzystaniem technologii wizyjnych lub sond światłowodowych. Równie istotne znaczenie mają ilościowe informacje odnośnie stężeń tlenków azotu, tlenków węgla oraz dwutlenku siarki w celu zapewnienia ograniczeń normatywnych.

Trudny w określeniu, ale przynoszący cenną informację o parametrach wejściowych procesu jest ciągły pomiar ilości pyłu w pyłoprzewodach. Podobnie, ale na wyjściu procesu, niezwykle cenne byłoby po-

zyskanie informacji w trybie on-line na temat zawartości części palnych w popiele (zwłaszcza zawartości węgla organicznego).

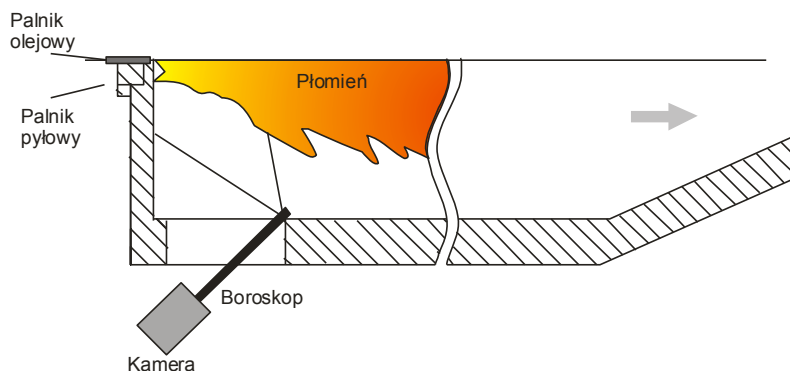
Niewątpliwie pozyskanie tego rodzaju informacji wymaga przeprowadzenia pomiarów na rzeczywistym obiekcie, co jest związane z wykorzystaniem kosztownej aparatury pomiarowej.

3. Wykorzystanie przetwarzania obrazu w procesie spalania pyłu węglowego

Emitowane przez płomień promieniowanie jest odbiciem zachodzących w procesie spalania reakcji chemicznych i procesów fizycznych. Optyczne metody diagnostyczne, oprócz akustycznych, [8÷10] należą do najważniejszych metod, które w bezinwazyjny sposób pozwalają na otrzymanie praktycznie nieopóźnionej i dodatkowo selektywnej przestrzennie informacji o zachodzącym procesie spalania. Na podstawie widma emisyjnego płomieni, w zakresie promieniowania widzialnego, możliwe jest m.in. określenie zawartości stosunku powietrze-paliwo, ilości wydzielanego ciepła i temperatury [11÷13].

Wśród metod optycznych, szczególnego znaczenia nabierają metody wykorzystujące przetwarzanie obrazu. Pozorne nieruchome położenie płomienia jest wynikiem równowagi dynamicznej pomiędzy lokalną prędkością propagacji płomienia a prędkością napływającej mieszanki paliwowej [14]. Zmiana położenia frontu płomienia w przestrzeni, postrzegana jako zmiana kształtu płomienia, jest wynikiem zakłócenia tej równowagi. Pozwala to przyjąć, że kształt płomienia może być wskaźnikiem stanu procesu spalania, zachodzącego w określonych warunkach [15, 17, 18].

Testy spalania mieszany pyłu węglowego i biomasy zostały przeprowadzone na stanowisku pomiarowym, którego głównym elementem jest cylindryczna komora spalania o długości 2,5 m i średnicy ok. 0,7 m. Wewnątrz komory znajduje się wykonany w skali 1:10 model wirowego palnika pyłowego, wraz z palnikiem olejowym oraz zapalarką gazową. Stanowisko wyposażone jest w instalacje powierza pierwotnego, wtórnego oraz olejową. Obraz płomienia z wnętrza komory spalania przekazywany był na zewnątrz dzięki boroskopowi wyposażonego w odpowiedni system chłodzenia. Boroskop umieszczono pod kątem 45 stopni względem osi palnika w taki sposób, aby analizowany obraz obejmował obszar płomienia w bezpośrednim sąsiedztwie palnika, jak pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Sposób usytuowania boroskopu w komorze spalania

Fig. 1. Borescope positioning in the combustion chamber

Podczas testów zmieniano warunki stechiometryczne, w jakich zachodził proces spalania dzięki regulacji wydatku powietrza wtórnego. Powodowało to dodatkowo zmiany prędkość wylotu mieszanki pyłowo-powietrznej doprowadzając do stanu bliskiego zanikowi płomienia.

W zarejestrowanych w 256 odcieniach szarości obrazach, wyodrębniono obszar płomienia na podstawie amplitudy poszczególnych pikseli. Założono arbitralnie, że rozpatrywany piksel w obrazie należy do obszaru płomienia, jeżeli jego amplituda jest nie mniejsza od 64. Przykładowe obrazy zarejestrowane w trakcie przeprowadzanych testów pokazano na rysunku 2.

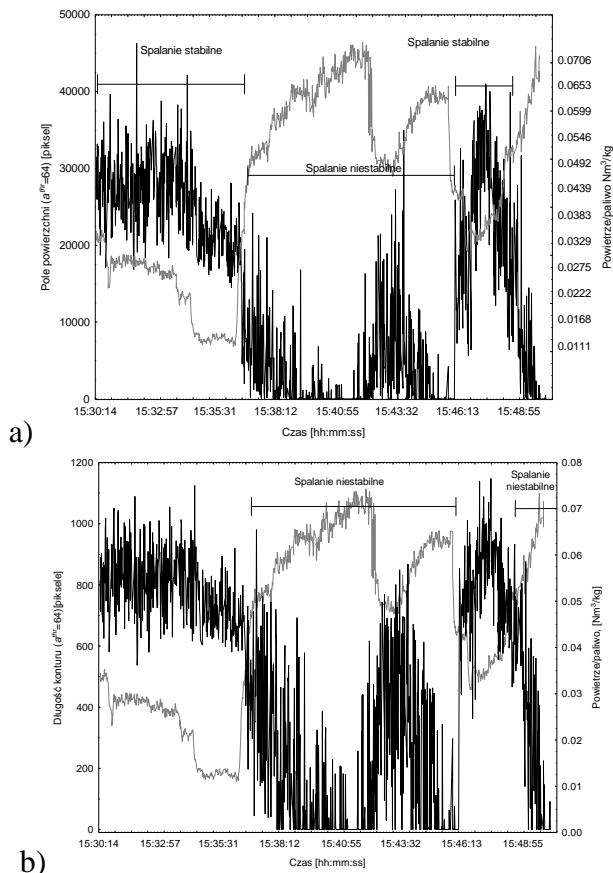


Rys. 2. Obrazy zarejestrowane podczas testów spalania

Fig. 2. Images recorded during the combustion tests

Analiza obrazu polegała na wyznaczeniu prostych wskaźników geometrycznych, które mogą być wyznaczone w czasie rzeczywistym z prędkością rzędu 50 obrazów/s. Rozpatrywano pole powierzchni płomienia rozumianego jako suma wszystkich pikseli należących do obszaru

plomienia oraz długość konturu tak wyznaczonego obszaru. Zmiany omawianych parametrów przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3a i 3b.



Rys. 3. Zmiany pola powierzchni płomienia a) oraz długości konturu płomienia, b) dla stabilnego i niestabilnego przebiegu procesu spalania

Fig. 3. Changes in the surface area of the flame a) and contour length of the flame b) for the stable and unstable combustion process

W pierwszej fazie testu, proces spalania przebiegał stabilnie, a pole powierzchni płomienia ulegało wahaniom wokół wartości średniej, która przy założonej wartości progowej obszaru i warunkach akwizycji obrazu, wynosiła ok. 30000 pikseli. Zmniejszenie stosunku powietrze-paliwo powoduje zmniejszenie wartości średniej pola powierzchni pło-

mienia. W drugiej fazie testu, zwiększenie wydatku powietrza wtórnego powoduje pojawienie się stanu spalania niestabilnego, objawiającego się spadkiem jasności płomienia i wzrostem jego pulsacji. Towarzyszy temu spadek średniej wartości pola powierzchni płomienia, nawet do zera (obszar płomienia nie istnieje). Jednocześnie można stwierdzić zwiększenie rozrzutu pola płomienia wokół jej wartości średniej.

Charakter zmian tego parametru jest bardzo podobny jak w przypadku dyskusowanego wcześniej pola powierzchni płomienia. Wzrost stosunku powietrze-paliwo wiąże się ze spadkiem długości konturu płomienia.

3. Diagnostyka procesu z użyciem metod optycznych i sztucznej inteligencji

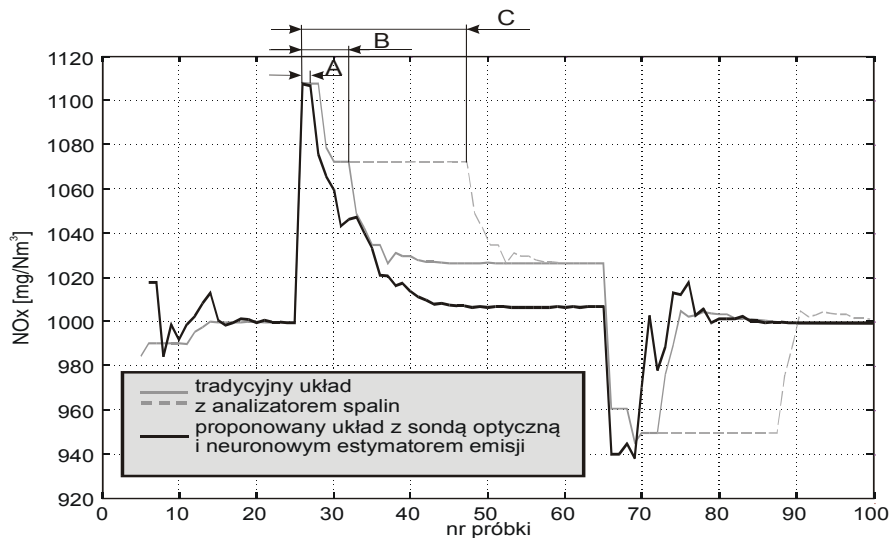
Najpopularniejsza obecnie metoda ograniczenia emisji NO_x poprzez zmianę organizacji procesu spalania, pociąga za sobą negatywne skutki dla eksploatacji kotła. Najważniejsze z nich to: zwiększona emisja CO, większe straty niedopału, korozja parownika, zwiększenie zużycia a także niestabilność płomienia. Zjawiska te są niepożądane lub wręcz niebezpieczne dla kotła i ograniczają możliwość do osiągnięcia redukcję NO_x . Aby zminimalizować te zjawiska niezbędny jest odpowiedni system monitoringu i sterowania. Najbardziej zaawansowane systemy automatycznej regulacji pracy paleniskowych kotłów pyłowych obejmują zamkniętą pętlą większą ilość parametrów, np. oddzielnie przepływy powietrza do poszczególnych palników i dysz OFA, obciążenia młynów czy sygnały z dodatkowych analizatorów gazów spalinowych takich jak NO_x , CO, czy SO_2 . Jednak, ponieważ to indywidualny nadmiar powietrza decyduje o ilości NO_x generowanych w węglowym kotle energetycznym [1, 3], najkorzystniejsza byłaby regulacja procesu spalania w pojedynczym palniku. Brak jest jednakże dotychczas metody, która umożliwiałaby pomiar parametrów wyjściowych, np. emisji tlenków azotu czy tlenku węgla, pojedynczego palnika pracującego w kotle, lub chociaż obiektywną ocenę jakości jego pracy. Skłoniło to autorów do poszukiwania metody, która umożliwiałaby przynajmniej estymację tych parametrów. Umożliwia to światłowodowy układ monitorowania płomienia opracowany w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej.

Pierwsze prace miały na celu opracowanie systemu umożliwiającego parametryczną ocenę jakości pracy palnika pyłowego. Jako parametr wybrano zawartość tlenków azotu w spalinach ponieważ jest głównym parametrem oceny ilości emitowanych zanieczyszczeń. Na podstawie badań korelacji pomiędzy sygnałem optycznym z układu monitorowania płomienia a wybranym parametrem procesu spalania określono strefę płomienia, z której informacja jest najbardziej wrażliwa na zmiany proporcji mieszanki. Sygnał z tej strefy następnie poddany został analizie w celu otrzymania dwóch wielkości: miary intensywności płomienia oraz miary częstotliwości migotania płomienia. Ze względu na silnie nieliniowy charakter zależności i brak analitycznego modelu płomienia turbulentnego do estymacji zostały użyte sieci neuronowe. W trakcie badań błąd neuronowego estymatora emisji tlenków azotu na podstawie pomiarów optycznych dla żadnej z próbek nie przekracza 10%, a jego wartość średnia wynosi około 3%.

Optyczno-neuronowy system do estymacji parametrów spalania zastosowano w układzie regulacji stabilizującym emisję tlenków azotu z pojedynczego palnika. Na rys. 4 pokazano wyniki badań symulacyjnych – porównanie odpowiedzi układu regulacji pracującego na podstawie sygnału z analizatora gazów (linia cienka) i na podstawie sygnałów z sondy optycznej (linia gruba). Aby umożliwić porównanie sygnały wyjściowe zostały zsynchronizowane tak, aby zlikwidować opóźnienie wnoszone przez analizator gazów.

Warto zaznaczyć, że przy odpowiednich wartościach parametrów regulatora w układzie z sondą światłowodową i neuronowym estymatorem emisji, można osiągnąć czas ustalania się odpowiedzi rzędu 20 okresów próbkowania. Jest to wartość porównywalna z możliwą do osiągnięcia w układzie z analizatorem gazowym. Zaletą nowego rozwiązania jest możliwość objęcia pętlą sterowania pojedynczego palnika, a także o wiele krótszy czas reakcji układu na zakłócenie, czyli krótszy czas utrzymywania się pełnej wartości zakłócenia na wyjściu, co oznacza mniejszą ilość wyemitowanych zanieczyszczeń. Czas opóźnienia układu regulacji z sondą optyczną (zaznaczony na rysunku jako „A”) jest nie większy od 2 okresów próbkowania. Czas ten w przypadku tradycyjnego rozwiązania (zaznaczony na rysunku jako „B”) zależy głównie od opóźnienia układu pomiarowego. W przypadku dużych obiektów, np. kotłów energetycznych w elektrowniach, w zależności od zastosowanych analizatorów

opóźnienie może dochodzić nawet do kilkuset sekund. W takim przypadku układ z analizatorem gazowym w ciągu czasu opóźnienia nie będzie zdolny wykryć zwiększonej emisji. Spowoduje to bardzo długi czas utrzymywania się zwiększonej emisji, co zostało pokazane na rys. 4 linią przerywaną; „C” oznacza czas opóźnienia pomiędzy powstaniem zwiększonej emisji a jej wykryciem przez analizatory gazów.



Rys. 4. Porównanie odpowiedzi obiektu dla NPC przy różnym sposobie uzyskiwania zwrotnej informacji o wielkości emisji tlenków azotu

Fig. 4. Comparison of object responses for the NPC using various methods of obtaining feedback about the emissions of nitrogen oxides

Podobne podejście można zastosować również w przypadku spalania w turbinach gazowych [15]. Testy laboratoryjne wykonane dla palnika gazowego wykazały, że optyczny estymator parametrów spalania w połączeniu z regulatorem rozmytym wykazuje dobre właściwości adaptowania się do zmiennych warunków pracy i paliw utrzymując emisje NO_x i CO poniżej wymaganych poziomów, pomimo znacznej złożoności rozpatrywanego zadania.

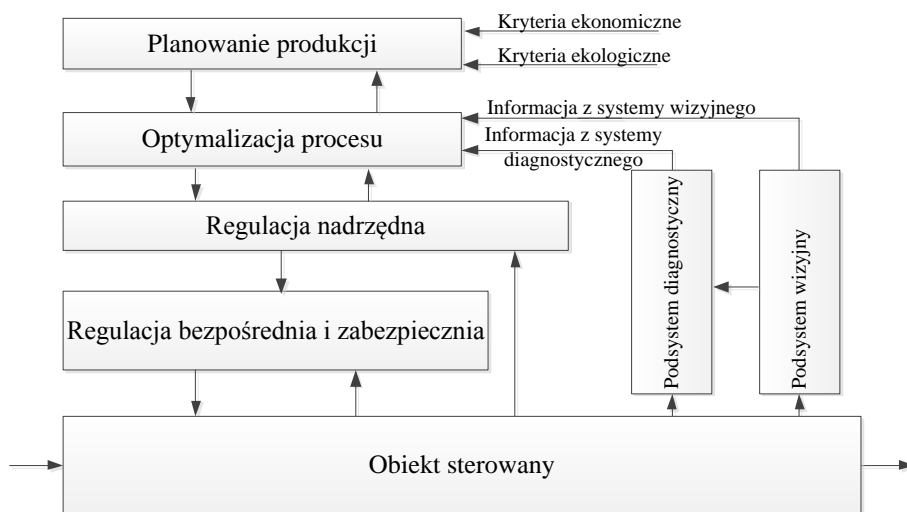
Obecnie wykonywane są badania nad możliwością wykorzystania opisywanych technologii w warunkach zmiennego składu paliwa, ze względu na obowiązujący trend stosowania współspalania z paliwami od-

nawialnymi lub alternatywnymi. Wstępne rezultaty wykazują, że jest możliwa estymacja parametrów spalania jedynie na podstawie pomiaru parametrów optycznych płomienia, bez znajomości składu spalanych gazów.

Podsumowując należy stwierdzić, że nowoczesne metody użytkowania informacji o jakości spalania (np. wielkości emisji CO i NO_x) w połączeniu z nowoczesnymi metodami regulacji pozwalają na zmniejszenie emisji szkodliwych gazów do atmosfery a także na efektywne wykorzystanie paliw zaliczanych do grupy odnawialnych źródeł energii.

4. Model przykładowego rozwiązania

Na rysunku 5 przedstawiono model proponowanego systemu sterowania procesem spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem informacji z dwóch podsystemów: diagnostycznego oraz wizyjnego.



Rys. 5. Schemat blokowy proponowanego układu sterowania procesem spalania pyłu węglowego

Fig. 5. Block diagram of the proposed control system of pulverized coal combustion process

Opracowanie nadrzędnego układu sterowania, z algorytmem uwzględniającym informacje pochodzące z systemu przetwarzania obrazu, oraz informacji diagnostycznej wymaga przeprowadzenia identyfikacji procesu spalania dla pojedynczego palnika niskoemisyjnego.

W celu opracowania modelu matematycznego pojedynczego palnika niskoemisyjnego, przeprowadzono szereg pomiarów na stanowisku badawczym o mocy 0,5 MW_{th} w Instytucie Energetyki w Warszawie, w skali póltechnicznej, zilustrowanym na rys. 2. Eksperymenty obejmowały stabilizację pracy komory spalania przy zróżnicowanych mocach, zróżnicowanych typach paliwa (uwzględniających węgiel oraz biomasę) oraz wymiennych trzech typach palników niskoemisyjnych (o odmiennych kształtach łopatek).

Dane były próbkowane z rozdzielczością co sekundę. Do zarejestrowanych wielkości należą wielopunktowe pomiary stężeń gazów spalin (NO_x , O_2 , CO , CO_2), pomiary temperatur, ciśnień i przepływów oraz poziomy wystawienia wentylatorów powietrza.

Wstępny etap prac obejmował analizę wybranych, zarejestrowanych wielkości wejściowych i wyjściowych. Na potrzeby syntezy modeli wielowymiarowych (MIMO) określono wektory sygnałów wejściowych, opisujących ilościowo odpowiednio przepływ powietrza wtórnego, wydatek paliwa oraz wektory sygnałów wyjściowych opisujących odpowiednio stężenia NO_x , CO oraz temperaturę spalin w komorze, rejestrowane w pierwszym punkcie pomiarowym.

Podzielono dane na zbiory robocze oraz testowe. Korzystając z pakietu System Identification Toolbox przeprowadzono identyfikację parametrów dla modeli parametrycznych w przestrzeni stanu danych układem:

$$\begin{aligned} (t + Ts) &= \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t) + \mathbf{K} e(t) \\ y(t) &= \mathbf{C} x(t) + \mathbf{D} u(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1)$$

w określonych punktach pracy (trzy wartości mocy, stabilizacja temperatur, jednorodne paliwo). Dobór rzędu modelu miał charakter empiryczny. W większości przypadków przyjmował on wartość z przedziału $\langle 3, 11 \rangle$. Rezultaty dopasowania (w sensie MSE, wyrażonej procentowo) zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Rezultaty dopasowania poszczególnych modeli parametrycznych dla pierwszego i drugiego stopnia identyfikacji

Table 1. Results of the individual parametric models fit, for primary and secondary identification

		Modele 1					
		P1		P2		P3	
Zb. testowy		D1M1_4s11	D1M1_4s6	D2M1_4s6	D2M1_4s5	D3M1_4s3	D3M1_4s4
D1		64,77	59,89	58,51	57,98	56,92	58,65
D2		47,28	57,48	60,25	59,42	55,51	56,49
D3		62,65	64,84	63,41	64,12	66,81	70,25
		Modele 2					
		P1		P2		P3	
Zb. testowy		D1M2_4s10	D1M2_4s3	D2M2_4s4	D2M2_4s10	D3M2_4s10	D3M2_4s6
D1		64,58	62,62	61,67	59,77	54,33	54,96
D2		67,23	66,22	71,14	73,33	59,12	58,65
D3		53,06	55,39	53,74	53,14	54,47	52,35

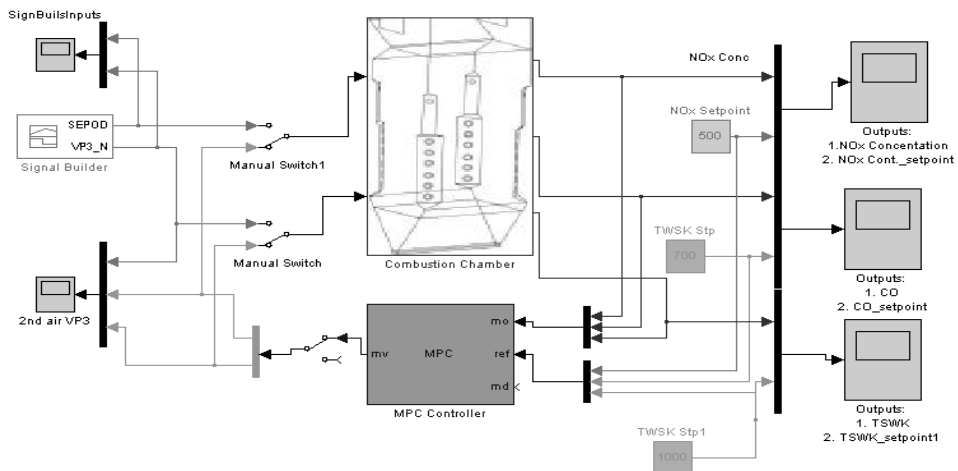
Badany obiekt złożony potraktowano jako układ o strukturze szeregowej. Zatem wyjścia modeli na pierwszym poziomie stanowią wejścia dla modeli drugiego poziomu (określonych w tabeli 1 jako Modele 2) i opisują zależności pomiędzy stężeniami NO_x , CO, temperaturą spalin w komorze oraz analogicznymi wielkościami w odpowiednim punkcie pomiarowym.

Do dalszych analiz wybrano modele na poziomie 60% dopasowania w sensie MSE.

5. Symulacyjna weryfikacja modeli palników

W celu przetestowania wiarygodności uzyskanych modeli, wykorzystując narzędzia z platformy Matlab/Simulink zaprojektowano kontroler MPC. Pozwala on na wprowadzenie ograniczeń na sygnały wyjściowe i sterujące, sygnałów zakłóceń oraz ustalenie horyzontów predykcji i sterowania. Zatem oferuje możliwość sprawdzenia modeli w kontekście ograniczeń normatywnych (np. co do emisji NO_x).

Widoczny na rys. 6 diagram Simulink'a, z opracowanym modelem systemu sterowania procesem uwzględnia możliwość przełączania w tryb pracy ręcznej oraz automatycznej.



Rys. 6. Diagram Simulink badanego układu sterowania

Fig. 6. Simulink diagram of the test control system

Kontroler MPC minimalizuje różnice pomiędzy wartościami wielkości regulowanych $y(k+p|k)$ przewidywanymi w chwili k na przyszłą chwilę $k+p$ (in. przyszłe wartości w chwili $k+p$ są wyznaczone na podstawie wartości w chwili k), a wartościami zadanymi dla tych wyjść $y_{zad}(k+p|k)$ na horyzoncie predykcji N ($p=1,2,\dots,N$). Minimalizacja różnic jest rozumiana w sensie określonego kryterium jakości. W kolejnej chwili $k+1$ następuje nowy pomiar sygnału wyjściowego obiektu i cała procedura jest powtarzana z takim samym horyzontem predykcji N . Stosowana jest więc zasada przesuwającego horyzontu (określana także mianem sterowania repetycyjnego).

W algorytmie predykcyjnym zakłada się również, że po upływie tzw. horyzontu sterowania Nu (zwykle $Nu < N$) przyrost sygnału sterującego wynosi 0.

Funkcja kryterialna, w ogólnym przypadku dana jest zależnością:

$$J(k) = \sum_{p=N_1}^N \|y^{zad}(k+p|k) - y(k+p|k)\|_{\Psi(p)}^2 + \sum_{p=0}^{N-1} \|\Delta u(k+p|k)\|_{\Lambda(p)}^2, \quad (2)$$

$\Delta u(k+p|k)$ – wektor przyrostów sterowań, $\Psi(p) \geq 0$ – macierz współczynników wagowych składowych wektora uchybów prognozowanych na chwilę $k+p$. (najczęściej m. diagonalna) oraz $\Lambda(p) \geq 0$ – macierz gdzie: $y_{zad}(k+p|k)$ – wektor wartości zadanych, $y(k+p|k)$ – wektor wielkości regulowanych, współczynników wagowych, składowych wektora przyrostów sterowania prognozowanych na chwilę $k+p$. Gdy $\Lambda(p) = \lambda I$ to, $\lambda \geq 0$ określa wagę tłumienia zmienności sterowania w stosunku do redukcji uchybów regulacji [6].

W ramach przeprowadzonych testów, uwzględniających ograniczenia co do norm emisji NO_x (300 ppm) najlepsze rezultaty uzyskano dla modeli niskoemisyjnego palnika pierwszego (D1M1_4s6) oraz trzeciego (D3M1_4s3). W przypadku modeli P2 spełnienie ograniczeń emisji było osiągnięte przy występujących oscylacjach (D2M1_4s5), a przypadku (D2M1_4s6) – zakończone niepowodzeniem. Konfiguracja szeregową przyniosła najlepsze rezultaty w połączeniu strukturami modeli (D2M2_4s4 oraz D2M2_4s10).

6. Podsumowanie

Wymogi normatywne co do emisji NO_x , CO i SO_2 stają się coraz bardziej restrykcyjne. W związku z tym zarysowuje się potrzeba optymalnego sterowania procesem spalania z użyciem technik niskoemisyjnych. Ze względu na złożony charakter procesów spalania stosunkowo rzadko stosuje się rozwiązania optymalizujące proces w kontekście sterowania ze względu na brak szczegółowego opisu zachodzących tu zjawisk fizyko-chemicznych. W pracy omówiono warunki opracowania systemu sterowania procesem spalania oraz stworzenia algorytmu optymalizacji pracy kotła na podstawie informacji uzyskanych z konwencjonalnego oprzyrządowania oraz uwzględnienie innowacyjnych technik pozwalających na ocenę jakości procesu.

Literatura

1. **Janiszowski K.:** *Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach*. EXIT. Warszawa 2002.
2. **Kordylewski W.:** *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*. OWPW. Wrocław 2000.
3. **Kordylewski W.:** *Spalanie i paliwa*. OWPW. Wrocław 2008.
4. **Savolainen K., Heinolainen E., Dernjatin P.:** *Metody pierwotne redukcji NO_x w kotłach energetycznych. Zaawansowane technologie spalania pozwalające zredukować emisję NO_x poniżej 200 mg/Nm³ metodami pierwotnymi*. TECH-EXPO 2009. pp.45÷52.
5. **Świątek J.:** *Wybrane zagadnienia identyfikacji statycznych systemów złożonych*. OWPW, Wrocław 2009.
6. **Tatjewski P.:** *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. EXIT. Warszawa 2001.
7. **Wojcik W., Kotyra A.:** *Wykorzystanie obrazu płomienia do oceny stabilności spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy*. Pomiar Automatyka Kontrola Nr 3/2005. pp. 34÷36.
8. **Strahle W.C.:** *Combustion noise*. Progress in Energy and Combustion Science, no. 4, pp. 157÷176, 1978.
9. **Vaezi V., Aldredge R.C.:** *Influences of acoustic instabilities on turbulent-flame propagation*. Experimental Thermal and Fluid Science, no. 20, pp. 162÷169, 2000.
10. **Hii N.C., Tan C.K., Alex Z., S. Chong, Wilcox J.:** *The Measurement of Pulverised Fuel Flows by High Frequency Acoustic Emission Techniques*. 7th INFUB, pp. 326÷338, Porto, 2006.

11. **Romero C., Li X., Keyvan S., Rossow R.:** *Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control*. Applied Thermal Engineering, no. 25, p. 659–676, 2005
12. **Lu G., Yan Y., Cornwell S., Riley G.:** *Temperature Profiling of Pulverised Coal Flames Using Multi-Colour Pyrometric and Digital Umaging Techniques*. IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa 2005. pp. 1658÷1662.
13. **Kauranen P., Anderson-Engels S., Svanberg S.:** *Spatial mapping of flame radical emission using a spectroscopic multi-colour imaging system*. Applied Physics, vol. 53, no. 4, pp. 260÷264. 1991.
14. **Jarosiński J.:** *Techniki czystego spalania*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1996.
15. **Huang Y.P. Yan Y.:** *Transient two-dimensional temperature measurement of open flames by dual spectral image analysis*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 22, no. 5, pp. 371÷384. 2000.
16. **Ballester J., Hernández R., Sanz A., Smolarz A., Barroso J., Pina A.:** *Chemiluminescence monitoring in premixed flames of natural gas and its blends with hydrogen*. Proceedings of the Combustion Institute, Volume 32, Issue 2, pp. 2983÷2991. 2009.
17. **Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Gromaszek K.:** *Vision based monitoring of coal flames*. Przegląd Elektrotechniczny. No. 3, pp. 241÷243. 2008.
18. **Wójcik W., Kotyra A., Ławicki T.:** *Zastosowanie obrazowowodu do oceny stabilności pracy palnika*. Elektronika, nr 6, s. 130÷134, 2008.

Modern Methods of Monitoring and Controlling Combustion of Solid Fuels in Order to Reduce its Environmental Impact

Abstract

Polish power industry, faces the challenge of efficient management of the combustion process in power units, built largely 50 years ago. The concept of the effectiveness of such a process should be understood not only in terms of technical and economic parameters, but also environmental, due to the directives of the European Commission, continually tightening emissions limits. For example, solid fuel power units with a capacity above 500 MW_{th}, had to reduce the nitrogen oxide emissions to 500 mg/Nm³ since 2008, which after the year 2016 is expected to be only 200 mg/Nm³.

In power generation, mainly based on the combustion of coal, lignite, and co-combustion with biomass, much attention is drawn to the primary methods. It is estimated that innovative technologies based on primary methods will meet the rigours of the directives at half the costs of the catalytic reduction methods. In addition, new investments are burdened with additional costs as well as difficulties and delays in obtaining permits. Thus, in the face of this situation, relatively cheap reduction of nitrogen oxides (NO_x) is an important issue,

The complexity, nonlinearity of the combustion process, delays and disturbances as well as security issues makes that the nature of most discussed and implemented solutions is usually of modernization. The basic measures available to the engineer of low-emission combustion systems are limited to: reducing the combustion temperature, air re-distribution, fuel staging (combustion aerodynamics and reburning), and the reducing properties of the rich flame. Assistive technologies like process control optimization may be complementary to these technological improvements.

Controlling the combustion process is a very complex issue. The difficulty of operation of such process consists in the mutual interference effects of chemical, physical (mainly energy and mechanical) on one hand and risks existing if its course becomes unpredictable. In addition, there are restrictions on the control due to the unavailability of certain process signals (input or output) and incomplete knowledge about them. Current availability of high-speed measuring and computing devices allows to extract the hidden relationships between the elements of such complex process and the use them in control. The paper presents the technologies being developed in the Department of Electronics Lublin University of Technology. They use optical diagnostic methods, modern methods of control and artificial intelligence methods.

Among optical methods, those based on image processing become particularly important. They are shown in the first part of this article. Apparent motionlessness of a flame is the result of dynamic balance between the local flame propagation speed and the speed of the incoming fuel-oxidizer mixture. Change the flame front location in space, perceived as a change in the shape of a flame, is the result of disruption of this balance. This allows to assume that the flame shape can be an indicator of the status of a combustion process taking place in certain conditions. It was shown that even on the basis of simple geometrical indicators, such as the flame surface area and contour length of the flame area, one can determine the changes of important parameters such as change in the flame of air-fuel ratio. They can be determined in real time at a speed of 50 images per second.

The second part of the article is devoted to the diagnosis of an individual burner with the use of optical methods and artificial intelligence. Research is aimed to develop a system allowing a parametric evaluation of the quality of pulverized coal burner operation. It is based on an analysis of local variability of the brightness of the flame. Due to the highly nonlinear nature of dependency and lack of an analytical model, parameter neural networks were used to estimate the selected parameter. For example, the neuronal estimator error of nitric oxide emissions on the basis of optical measurements does not exceed 10% and its average value is about 3%. Opto-neural system for estimation of combustion process parameters was used in the control system stabilizing emissions of nitrogen oxides from a single burner. Studies have shown that using such system can significantly reduce the disturbance response time, which reduce the total amount of pollutants emitted.

The third part describes the combustion chamber identification with three different types of low-emission burners. The achieved models were used for Model Predictive Controller design, which allows to implement appropriate borders for input, output and control signals. Achieved models and controllers were verified regarding to normative limitations of NO_x emission. Performed activities allowed for conclusions formulation in reference to pollution control policy.