

DOI: 10.5604/20830157.1109258

## OPTOELEKTRONICZNE SYSTEMY W ZASTOSOWANIACH DIAGNOSTYCZNYCH I POMIAROWYCH

**Andrzej Kotyra**

Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych

**Streszczenie.** W artykule dokonano krótkiego przeglądu optycznych metod diagnostyki procesów przemysłowych ze szczególnym uwzględnieniem procesu spalania pyłu węglowego oraz mieszanin z udziałem biomasy. Zaprezentowane rozwiązania są wynikiem szeregu badań prowadzonych w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Lubelskiej. Szczególną uwagę poświęcono rozwijającym metodom, które mogą być stosowane także w warunkach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, optoelektronika

### OPTOELECTRONIC SYSTEMS IN DIAGNOSTIC AND MEASUREMENT APPLICATIONS

**Abstract.** The article presents brief survey of optical diagnostic methods used especially in the case of pulverized coal combustion process as well as coal – biomass blends, that was developed in Institute of Electronic and Information Technology. Lublin University of Technology. Special attention was paid to the methods that can be applied in harsh conditions.

**Keywords:** technical diagnosis, optoelectronics

### Wstęp

Efektywny sposób prowadzenia wielu procesów przemysłowych, biorąc pod uwagę koszty, jak również potencjalnie niekorzystny wpływ na środowisko, wymaga stosowania rozwiązań, które pozwoliłyby na ich utrzymywanie w optymalnych warunkach. Powstaje zatem potrzeba pozyskania informacji o stanie w jakim znajduje się dany proces na podstawie właściwie wybranych, sygnałów diagnostycznych. Często preferowane są metody nieinwazyjne, zapewniające poprawne działanie często w warunkach wysokiej temperatury oraz zapylenia i wibracji a przy tym charakteryzujące się brakiem opóźnień i dobrą rozdzielczością przestrzenną.

Powyższe wymagania spełniają metody optyczne, które w przypadku diagnozowania procesów spalania są powszechnie stosowane, pomimo problemów w ich praktycznym stosowaniu związane niebezpieczeństwem zanieczyszczenia układu optycznego. Diagnostyka procesu spalania powinna obejmować zbieranie i następnie przetwarzanie wybranych informacji procesowych w czasie rzeczywistym w celu rozpoznania jego nieprawidłowych stanów, np. spalania niestabilnego. Dotyczy to tak informacji, których źródłem informacji jest płomień, jak i optycznych metod analizy składu atmosfery wewnątrz komory spalania [8], pozwalających m.in. na wykrycie zagrożenia tzw. korozją niskotlenową [9].

### 1. Wykorzystanie płomienia jako źródła informacji o procesie spalania

Istotnym elementem wchodzącym w skład optycznych układów diagnostycznych jest głowica umieszczona wewnątrz komory spalania, od którego w dużej mierze zależy niezawodne działanie całego systemu [12]. Stosowane rozwiązania obejmują jeden lub wiele torów optycznych, przy czym fotodetektor umieszczany jest często poza komorą spalania dzięki zastosowaniu włókien światłowodowych. Głowice jednokanałowe wyposażone są w układ optyczny o stosunkowo szerokim kącie akceptacji oraz pojedynczy fotodetektor. Rozwiązanie wielokanałowe, pozwala na selektywną i niezależną detekcję promieniowania w kilku strefach płomienia, przy czym kąt akceptacji w takim przypadku jest mniejszy niż w rozwiązaniu jednokanałowym. W takim przypadku możliwy jest wybór strefy najbardziej wrażliwej na zmiany warunków procesu spalania, spowodowany np. zmianą ilości powietrza wtórnego [12].

W przypadku diagnozowania procesu spalania pyłu węglowego bądź mieszanin węgla i biomasy źródłem informacji jest płomień pyłowy, a w szczególności [1, 2, 7]:

- promieniowanie, którego źródłem są rozgrzane cząstki stałe, znajdujące się w płomieniu: węgiel, koks, popiół i sadza, a ich koncentracja w przestrzeni płomienia nie jest jednakowa,
- promieniowanie emitowane przez gorące gazy znajdujące się w płomieniu pyłowym na skutek wzbudzenia termicznego, które tworzą przede wszystkim widma emisyjne rotacyjne głównych gazów występujących w płomieniu – H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO,
- promieniowanie emitowane na skutek chemiluminescencji, związane z występowaniem wolnych rodników (m.in. OH\*, CH\*, C<sub>2</sub>\*, HCN\*, NH\*, NH<sub>2</sub>\*), których nie można traktować tak samo jak gazów gorących o podobnej zawartości składników głównych.

W widmie promieniowania emitowanego przez płomień pyłowy dominuje składowa ciągła pochodząca od rozgrzanych cząstek stałych ze stosunkowo niewielkim udziałem linii widmowych, pochodzących od składników gazowych, na które składają się gazowe produkty pirolizy węgla oraz produkty spalania, przede wszystkim para wodna i CO<sub>2</sub>, ale także: NO, SO<sub>2</sub>, CO oraz węglowodory. Całkowity udział w emisji promieniowania płomienia pyłowego gazów innych niż para wodna i CO<sub>2</sub> jest niewielki i zazwyczaj może zostać pominięty [6]. W przypadku płomieni pyłowych, do konwersji sygnałów optycznych na elektryczne, najczęściej wykorzystuje się detektory krzemowe.

Kluczowym elementem optoelektronicznego systemu diagnostyki procesu spalania jest głowica pomiarowa transmitująca promieniowanie emitowane przez płomień do detektorów, usytuowanych na zewnątrz komory spalania. Opracowana w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych głowica światłowodowa pozwala na długotrwałą pracę (rzędu 4-7 tygodni) bez konieczności czyszczenia w warunkach wysokiego zapylenia i wibracji przy temperaturze czoła głowicy dochodzącej do 400°C [12]. Dzięki odpowiedniemu rozłożeniu światłowodów względem płaszczyzny czoła głowicy, możliwa jest selektywna transmisja promieniowania z określonych obszarów płomienia.



Rys. 1. Światłowodowa głowica pomiarowa

Wiązka światłowodów umożliwia umieszczenie fotodetektorów w stosunkowo niskiej, jak na warunki panującej w pobliżu pracującego palnika, temperaturze. Dodatkowo użycie światłowodów ułatwia montaż układu diagnostycznego. Ponieważ długość stosowanych światłowodów jest rzędu kilku metrów, w zakresie widma optycznego płomieni paliw pyłowych, tłumienie wnoszone przez światłowód jest do pominięcia. Ze względu na małą sprawność sprzężenia ze światłowodem, w układach monitorowania stosowane są grubordzeniowe światłowody PCS lub ze względu na możliwość pracy w wyższych temperaturach, światłowody HCS.

Rozszerzeniem możliwości sondy wielokanałowej jest zastosowanie obrazowodu zamiast wiązki światłowodowej oraz przetwornika obrazu w miejscu fotodiody. Takie rozwiązanie równoważne jest wielokanałowemu układowi monitorowania o bardzo dużej liczbie kanałów, którą ogranicza ilość pikseli matrycy obrazowej lub ilość włókien obrazowodu. Przewaga wizyjnych systemów przeznaczonych do diagnostyki procesu spalania uwidacznia się przede wszystkim w możliwości wyznaczania znacznie większej ilości parametrów płomienia, niż byłoby to możliwe z użyciem pojedynczego, czy też kilku fotodetektorów. Spośród nich należy wymienić np. parametry geometryczne kształtu płomienia (np. pole powierzchni, położenie środka ciężkości, momenty geometryczne, deskryptory Fouriera, itp.) oraz zmiany tych parametrów w czasie [10, 11]. Z drugiej strony bardzo duża ilość danych generowana przez system wizyjny wymaga stosowania metod redukcji wymiarowości analizowanych danych, np. analizy składowych głównych [4].

Wymienione wcześniej parametry geometryczne mogą zostać użyte do charakteryzowania procesu spalania, pozwalając w prosty sposób wykrywać stany awaryjne. Stabilność płomienia nie jest pojęciem jednoznaczny, dlatego trudno jest wskazać jeden wskaźnik, na podstawie którego jednoznacznie można byłoby stwierdzić wystąpienie takiej sytuacji [10, 11]. Należy rozpatrywać wiele wskaźników kształtu jednocześnie, tworząc wektor cech obszaru płomienia. W trakcie eksperymentów stwierdzono możliwość ich wyznaczania w czasie rzeczywistym, przy rozdzielczościach rzędu 800x800 pikseli i szybkości 25 fps. Pozwala to na wykorzystanie względnie tanich przetworników obrazowych.

Sygnaly pochodzące z wielokanałowej sondy światłowodowej jak również obraz płomienia, dzięki odpowiednim modelom regresyjnym (np. k-NN, sieci neuronowe) mogą zostać wykorzystane do wyznaczania kluczowych wielkości wejściowych palników pyłowych, których określenie jest w praktyce trudne, jak np. wydatek paliwa lub stosunek nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ). Zadawanie tych wielkości w kotłach energetycznych dotyczy grupy palników, zakładając równy rozdział strumienia paliwa oraz taką samą wartość  $\lambda$ , co nie zawsze ma miejsce w rzeczywistych warunkach.

## 2. Pomiar stężenia CO w komorze spalania

Innym przykładem wykorzystania metody optycznych w praktyce przemysłowej jest pasywny pomiar tlenu węgla w warstwie przyściennej kotłów energetycznych, którego zbyt duże stężenie powoduje przyspieszoną korozję ścian komory spalania [5].

Pomiar stężenia CO mimo istnienia wielu rodzajów analizatorów jest wciąż problemem bardzo aktualnym. Zastosowanie metod wykorzystujących przestrajalne lasery półprzewodnikowe (TDLAS - Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) pozwala na uzyskanie wyników w stosunkowo krótkim czasie, co jest ich przewagą nad innymi metodami absorpcyjnymi. Zdecydowana większość rozwiązań czujników optoelektronicznych wykorzystuje w swoim działaniu spektroskopię absorpcyjną, czyli opiera się pomiarach transmisji światła o określonym widmie. W chwili obecnej największe zainteresowanie budzą czujniki pracujące w zakresach długości fal

wykorzystywanych przez telekomunikację światłowodową. W tym zakresie widma optycznego substancje wykazują stosunkowo niewielkie pochłanianie światła, jednak wysoka jakość i przystępna cena dostępnych elementów optoelektronicznych przemawiają na ich korzyść. Wykorzystanie słabych linii absorpcyjnych wymaga stosowania specjalnych technik pomiarowych.

Istota pomiaru TDLAS polega na analizie kształtu linii pochłaniania wyznaczanej za pomocą lasera o zmiennej długości fali. Ponieważ kształt linii zależy nie tylko od stężenia danego czynnika ale również od temperatury i ciśnienia mieszaniny, z reguły konieczna jest analiza tych parametrów [3]. TDLAS charakteryzuje się optymalnymi z punktu widzenia przemysłu cechami: pozwala na uzyskanie wyników o akceptowalnym w przemyśle błędzie pomiarowym jednocześnie wykazując niewielką wrażliwość na straty wynikające z zabrudzenia toru optycznego, nie występują przy tym opóźnienia transportowe i na kondycjonowanie próbki [3].

## 3. Podsumowanie

Przemysłowe wykorzystanie optoelektronicznych systemów diagnostycznych w dużej mierze ograniczone jest przez zabrudzenie części optycznych. Z drugiej jednak oferowana przez nie szybkość i rozdzielczość przestrzenna czyni je atrakcyjną alternatywą.

## Literatura

- [1] Gaydon A.G.: The spectroscopy of flames. Chapman and Hall, London, 1974.
- [2] Kojima J., Ikeda Y., Nakajima T.: Spatially resolved measurement of OH\*, CH\*, and C2\* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 28, no. 2, 2000, s. 1757-1764.
- [3] Komada P., Cięszczyk S.: Application of multiple line integrated spectroscopy on CO concentration measurement, Elektronika i Elektrotechnika, nr 9, vol 12, 2013, s. 46-49.
- [4] Kotyra A.: Analiza składowych głównych sygnałów wielokanałowego układu monitorowania płomienia. Przegląd Elektrotechniczny 10/2010, s. 57-60.
- [5] Kruczek H.: Przydatność pomiaru warstwy przyściennej do oceny stopnia zagrożenia korozją wysokotemperaturową (niskotlenową), Energetyka, nr 6, 2002, s. 419-427.
- [6] Sarofim A. Hottel H.: Radiative Transfer in Combustion Chambers: Influence of Alternative Fuels. Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference, vol. 6, Washington, 1978, s. 199-217.
- [7] Tabanfar S., Modest M.: Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting, Nongray Gas-Particulate Tube Flow, Journal of Heat Transfer, vol. 109, no. 2, 1987, s. 478-485.
- [8] Wilk R.: Energetyka a ochrona środowiska. Materiały konferencyjne „Spalanie węgla '99”, 1999, s. 77-89.
- [9] Wójcik W., Komada P., Cięszczyk S., Manak I., Golec T.: Optoelectronic CO Concentration Analyser – Wavelength Selection. Journal Electronics and Electrical Engineering, No 1 (50), 2004, s. 5-8.
- [10] Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Gromaszek K.: Vision based monitoring of coal flames. Przegląd Elektrotechniczny, nr 3/2008, s. 241-243.
- [11] Wójcik W., Kotyra A.: Wykorzystanie obrazu płomienia do oceny stabilności spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy. Pomiar Automatyka Kontrola wydanie specjalne Nr 3, 2005, s. 34-36.
- [12] Wójcik W.: Application of fibre-optic flame monitoring systems to diagnostics of combustion process in power boilers. Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 56(2), 2008, s.177-95.

Dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. PL  
e-mail: a.kotyra@pollub.pl

Dr hab. inż. Andrzej Kotyra jest zatrudniony w Instytucie Elektroniki i Techniki Informatycznych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1991 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym. Pracę doktorską obronił w 2002, a habilitacyjną w 2011. W swojej pracy naukowej zajmuje się analizą danych pomiarowych oraz diagnostyką spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem analizy obrazu.



otrzymano/received: 17.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 29.05.2014