

**Waldemar WÓJCIK, Andrzej SMOLARZ**

POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, KATEDRA ELEKTRONIKI

## Stabilizacja emisji NOx z pojedynczego palnika pyłowego z wykorzystaniem NPC i neuronowej metody estymacji parametrów spalania

Dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

Ukończył studia na Politechnice Wrocławskiej - Wydział Elektroniki (1975), doktorat obronił w Politechnice Lubelskiej (1985), a habilitację w Politechnice Lwowskiej (2001). W pracy badawczej zajmuje się optoelektroniką, automatyką, telekomunikacją i informatyką. W swoim dorobku ma 14 monografii, ponad 100 prac naukowych, 3 patenty. Obecnie pełni funkcję Dziekana Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Dr inż. Andrzej SMOLARZ

Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1989 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym. Pracę doktorską obronił w 2003. W swojej pracy naukowej zajmuje się metodami sztucznej inteligencji oraz diagnostyką spalania pyłu węglowego.



e-mail: smolan@elektron.pol.lublin.pl

### Streszczenie

W kotłach energetycznych pracuje od kilkunastu do kilkudziesięciu palników Sterowanie na podstawie pomiarów uśrednionych lub opóźnionych (np. z analizatorów gazowych umieszczonych na kominie), jest często za mało efektywne. Wady tej nie miałyby regulacja pracy pojedynczego palnika, ale brak jest metody pomiaru jego parametrów spalania. W artykule opisana jest próba konstrukcji układu regulacyjnego stabilizującego emisję NOx z pojedynczego palnika pyłowego z wykorzystaniem regulatora predykcyjnego z neuronowym modelem procesu (NPC). Do estymacji emisji zostały użyte sieci neuronowe i sygnał ze światłowodowego układu monitorującego wybrane strefy płomienia w pojedynczym palniku opracowanego w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej. W artykule zawarte są wyniki symulacji takiego układu regulacji.

**Słowa kluczowe:** palnik niskoemisyjny, spalanie, sterowanie, sieci neuronowe.

### Individual burner NOx emission stabilization with the use of NPC and neural method for estimation of combustion parameters

#### Abstract

There are even several tens of burners operating in a power boiler so control based on averaged and delayed measurements (e.g. from gas analyzers located in flue gas duct) often results ineffective. Control of individual burner would not have such disadvantage but there is a lack of method of measurement of its combustion parameters. The article describes attempt to build a control system stabilizing NOx emission of individual pulverized coal burner using the predictive controller with neural internal process model (NPC). In order to estimate the emission neural networks and signal from fiber optic system for flame monitoring, developed in Department of Electronics of Lublin University of Technology were used. The article includes the results of simulation tests of such control system.

**Keywords:** low-emission burner, combustion, process control, neural network.

### 1. Wstęp

Spalanie paliw kopalnych jest największym źródłem zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. Niestety, obecnie i w najbliższej przyszłości nie da się uniknąć ich spalania, ponieważ są one najważniejszymi nośnikami energii pierwotnej. Znaczący udział w zanieczyszczeniu powietrza ma energetyka węglowa. Do lat 70 najważniejszym celem rozwoju konstrukcji palników pyłowych było zwiększenie mocy, stabilności, niezawodności i żywotności palników. Wymogi ochrony środowiska, dotyczące przede wszystkim emisji NOx [1], spowodowały całkowitą zmianę zasad konstrukcji palników. W celu zmniejszenia ilości emitowanych substancji toksycznych, które powstają

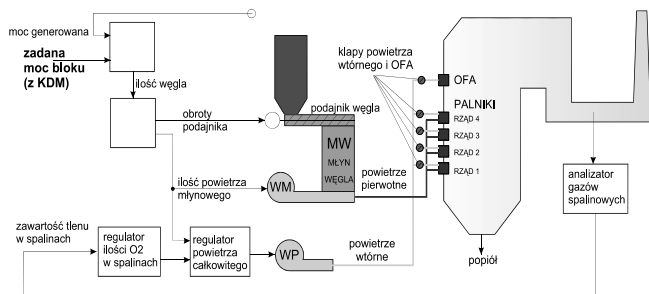
w trakcie procesów spalania, wprowadzona została, tzw. niskoemisyjna technika spalania. Polega ona na zmianie organizacji procesu w taki sposób, aby emisja zanieczyszczeń, głównie NOx, była znacznie ograniczona. Najważniejszą zaletą tych zmian jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń do poziomu określonego przez normy, przy względnie niskich nakładach inwestycyjnych. Palnik niskoemisyjny powinien zapewniać jednak nie tylko ograniczenie emisji NOx poniżej dopuszczalnego poziomu, ale również powinien umożliwić stabilne spalanie w zakresie 50–100% wydajności kotła, zapewnić emisję tlenu węgla – CO poniżej 100ppm oraz straty niedopału nie większe niż 5% zawartości części palnych w popiele.

Niestety ograniczenie emisji NOx przez 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 żużlowania a także niestabilność płomienia. Zjawiska te są niepożądane lub wręcz niebezpieczne dla kotła i ograniczają możliwą do osiągnięcia redukcję NOx.

### 2. System regulacji automatycznej procesu spalania

Węgiel do palników pyłowych zainstalowanych w kotle energetycznym dostarczany jest pyłoprzewodami w postaci mieszanki pyłu węglowego i powietrza jako tzw. powietrze pierwotne. Pozostała część powietrza niezbędnego do prawidłowego spalania dostarczana jest do palnika jako tzw. powietrze wtórne. W palniku może nastąpić dalszy rozdział powietrza wtórnego na drugie i trzecie (w zależności od konstrukcji palnika). Oprócz tego w systemach spalania niskoemisyjnego montowane są tzw. dysze OFA służące do dostarczenia dodatkowego powietrza niezbędnego do dopalania węgla w skali całego paleniska, ponieważ proces w początkowej jego fazie prowadzony jest z niedomiarem powietrza.

System paliwo-powietrze jest częścią systemu regulacji mocy bloku. W powszechnie stosowanym rozwiązaniu składa się on z dwóch torów: nadrzędnego toru regulacji paliwa i podporządkowanej pętli regulacji powietrza (Rys.1). Na podstawie mocy zapotrzebowanej przez Krajową Dyspozycję Mocy (KDM) obliczana jest ilość węgla. Wielkościami regulowanymi są obroty podajnika węgla oraz przepływ powietrza młynowego określany na podstawie obciążenia młyna węglowego. Pętla regulacji powietrza stabilizuje zawartość tlenu w gazach spalinowych. Regulacja powietrza wtórnego do każdego rzędu palników i powietrza OFA przeprowadzana jest w pętli otwartej. Rozdział powietrza wtórnego na drugie i trzecie następuje w palniku. Stosunek podziału ustawiany jest ręcznie podczas pierwszego uruchomienia bloku i nie zmienia się przez cały okres między remontami głównymi [2].



Rys. 1. Automatyka systemu paliwo-powietrze  
Fig. 1. Fuel-air system control

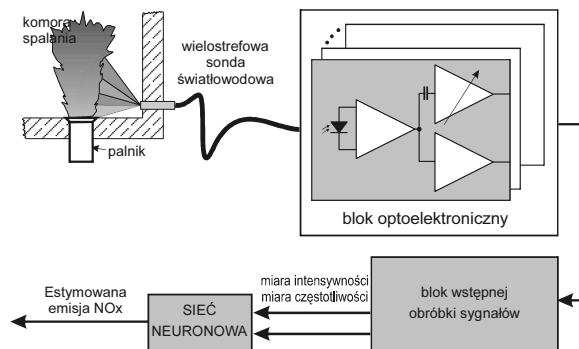
Najbardziej zaawansowane systemy automatycznej regulacji pracy paleniskowych kotłów pyłowych obejmują zamkniętą pętlą większą ilość parametrów, np. oddzielnie przepływy powietrza do poszczególnych palników i dysz OFA, obciążenia młynów czy sygnały z dodatkowych analizatorów gazów spalinyowych takich jak NO<sub>x</sub>, CO, czy SO<sub>2</sub>. Ponieważ to indywidualny nadmiar powietrza decyduje o ilości NO<sub>x</sub> generowanych w węglowym kotle energetycznym [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. Skłoniło to autorów do poszukiwania metody, która umożliwiałaby przynajmniej estymację tych parametrów. Ponieważ zawartość tlenków azotu w spalinach jest głównym parametrem oceny ilości emitowanych zanieczyszczeń, a udział tlenku węgla niesie informację o sprawności procesu spalania, do badań wybrano właśnie te gazy. Światłowodowy układ monitorowania płomienia opracowany w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej daje informację o jakości spalania. Na podstawie sygnałów z tego układu możliwe jest również uzyskanie informacji ilościowej. Ze względu na silnie nieliniowy charakter zależności i brak analitycznego modelu płomienia turbulentnego do estymacji zostały użyte sieci neuronowe.

### 3. Światłowodowy układ monitorowania płomienia

W palnikach przemysłowych prędkość wypływu paliwa oraz powietrza są na tyle duże, że spalanie w kotłach energetycznych odbywa się w płomieniach turbulentnych. Daje to pośrednią informację o stanie pracy palnika. Turbulencje płomienia uzewnętrzniają się między innymi jako migotanie płomienia, więc pomiar parametrów migotania daje informację o przebiegu spalania. Światłowodowa sonda służy do wielostrefowego monitorowania pracy pojedynczego palnika [4, 5, 6, 7]. Przeprowadzona szczegółowa analiza teoretyczna procesu spalania umożliwiła wybór parametrów możliwych do pomiarów w warunkach przemysłowych. To z kolei pozwoliło na konstrukcję światłowodowego systemu do ich pomiarów. Jako parametry pomiarowe przyjęto:

- miarę intensywności płomienia – średnią intensywność w okresie próbkowania,
- miarę częstotliwości migotania płomienia – liczbę zmian znaku pochodnej w ciągu sekundy dla danego okresu próbkowania dalej nazywana pulsacją płomienia.

Druga wielkość została dodana ponieważ z poprzednich badań wynikało, że informacja zawarta jest również w widmie obserwowanego sygnału chwilowej intensywności płomienia, a sieci neuronowe nie są zdolne do bezpośredniego przetwarzania informacji o widmie sygnału. Sygnały wyjściowe systemu są praktycznie natychmiastowe czyli nie są uśrednione. Schemat systemu estymacji emisji tlenków azotu oraz tlenku węgla z użyciem opisywanego systemu monitorowania płomienia oraz sieci neuronowych przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Schemat proponowanego systemu estymacji emisji NO<sub>x</sub>  
Fig. 2. Schematic diagram of the proposed system for NO<sub>x</sub> emission estimation

Współczynniki korelacji pomiędzy wyjściem i wejściem konstruowanych modeli nie są zbyt wysokie. Dla modelu emisji NO<sub>x</sub> wynoszą one  $-0.09$  dla miary intensywności i  $0.34$  dla miary częstotliwości. Wynika stąd, że żadna z miar nie może być użyta samodzielnie.

Na podstawie serii doświadczeń zbudowany został neuronowy estymator emisji. Ustalono, że wystarczający jest model, w którym sygnałami są jedynie intensywność i pulsacja płomienia pochodzące z jednej jego strefy, najbardziej wrażliwej na zmiany stosunku powietrze/paliwo. Zastosowany został model NNFIR( $n_b, n_k$ ) (Neural Network Finite Impulse Response) [8] o postaci:

$$y(t) = g[\varphi(t), \theta] + e(t), \quad (1)$$

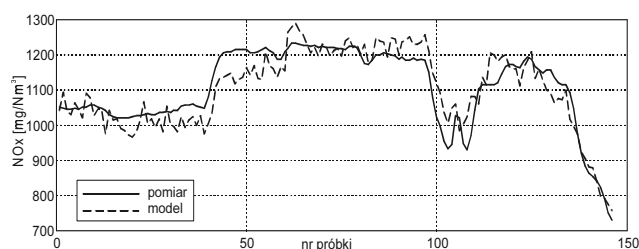
gdzie:  $t$  oznacza czas,  $y(t)$  wyjście modelu,  $\theta$  oznacza wektor zawierający wagi sieci,  $g$  jest nieliniową funkcją realizowaną przez sieć neuronową, a  $e(t)$  oznacza biały szum. Wektor regresji  $\varphi(t)$  dla modelu NNFIR ma postać:

$$\varphi(t) = [u(t - n_k), \dots, u(t - n_b - n_k + 1)], \quad (2)$$

gdzie  $u$  oznacza wejście modelu a  $n_b$  i  $n_k$  są jego parametrami.

Model ten zaimplementowany został w formie sieci typu perceptron trzywarstwowy MLP(10,4,1). Wcześniejsze badania wykazały, że właśnie ta struktura sieci najlepiej nadaje się do modelowania emisji gazów [9].

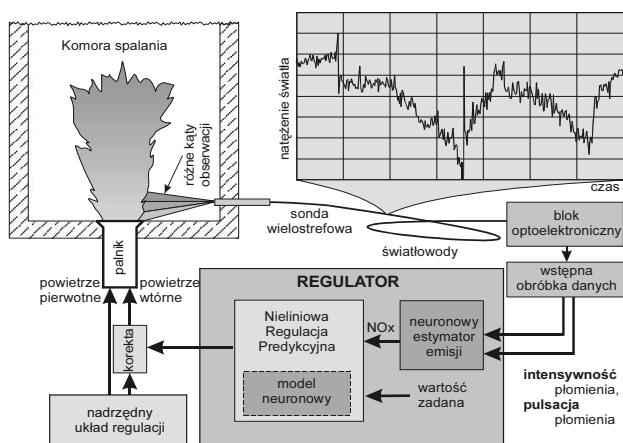
W przypadku modelowania emisji tlenków azotu najlepsze wyniki dała struktura NNFIR(5,0). Błąd neuronowego estymatora emisji tlenków azotu na podstawie pomiarów optycznych dla żadnej z próbek nie przekracza 10%, a jego wartość średnia wynosi około 3%. Na rysunku 3 pokazane są przebiegi poziomu emisji NO<sub>x</sub> zmierzzonego podczas jednego z eksperymentów oraz wartości uzyskiwanej z neuronowego estymatora. Sygnały te zostały zsynchronizowane tak, aby zlikwidować opóźnienie wnoszone przez analizator gazów.



Rys. 3. Zmierzony przebieg emisji NO<sub>x</sub> (linia ciągła) i przebieg estymowany na podstawie pomiarów sondą optyczną (linia przerywana)  
Fig. 3. NO<sub>x</sub> emission – measured (continuous) and estimated using the optical probe measurements (dashed)

#### 4. Układ regulacji

Koncepcję układu regulacyjnego stabilizującego emisję tlenków azotu z pojedynczego palnika przedstawiono na rys. 4. Informacja o wielkości emisji tlenków azotu jest w nim uzyskiwana z neuronalnego estymatora emisji NO<sub>x</sub> na podstawie sygnałów ze światłowodowego układu monitorowania płomienia zamiast z analizatora gazów, jak w obecnie stosowanych rozwiązaniach. Z analizy dotychczasowego sposobu sterowania wynika, że regulator pracy pojedynczego palnika powinien pracować w wewnętrznej pętli regulacji powietrza wtórnego, korygując wartości zadane przez układ nadrzędny, a wartość zadana emisji NO<sub>x</sub> powinna być uzyskiwana z warstwy optymalizacji.



Rys. 4. Układ regulacji palnika pyłowego  
Fig. 4. Control system for pulverized coal burner

Przyjęty został kwadratowy wskaźnik jakości regulacji o postaci:

$$J(t, U(t)) = \sum_{i=N_1}^{N_2} [r(t+i) - \hat{y}(t+i)]^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_u} [\Delta u(t+i-1)]^2, \quad (3)$$

gdzie  $U(t)$  oznacza wektor sterowania,  $r$  wartość zadaną sterowania,  $N_1$  i  $N_2$  odpowiednio początek i koniec horyzontu predykcji,  $N_u$  długość horyzontu sterowania,  $\hat{y}$  wartość wyjściową modelu,  $\rho$  wagę tłumienia zmienności sterowań w stosunku do uchybu regulacji, a  $\Delta u$  przyrost wartości sygnału sterowania.

Wskaźnik ten minimalizowany jest w strukturze nieliniowego regulatora predykcyjnego (NPC) z neuronalnym modelem procesu. Pośrednia metoda regulacji zastosowana została ze względu na łatwość modyfikacji kryterium regulacji, bardzo przydatną szczególnie na etapie doświadczalnym. W metodach bezpośrednich wiąże się to z koniecznością czasochłonnego treningu sieci lub zmianą jej struktury. Poza tym niektóre postaci kryterium nie dają się w prosty sposób zaimplementować w metodach bezpośrednich. Ponieważ na etapie identyfikacji zaobserwowano silne nieliniowości odrzucone zostały algorytmy oparte na miejscowej linearyzacji: minimalnej wariancji (MV1) i przybliżonej regulacji predykcyjnej (APC).

Na podstawie pomiarów wykonany został symulator wybranych parametrów palnika. Posłużył on do wstępnych badań układu regulacji. Badania symulacyjne dotyczyły możliwości stabilizacji emisji tlenków azotu.

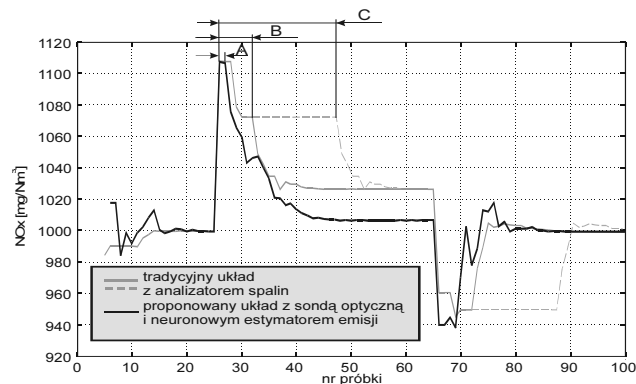
Nieliniowy regulator predykcyjny (NPC) wymaga ustalenia trzech parametrów: horyzontu predykcji, horyzontu sterowania i współczynnika wagi tłumienia zmienności sterowań w stosunku do uchybu regulacji. Ponieważ spodziewana jest bardzo mała wartość opóźnienia, została przyjęta najmniejsza wartość początkowa horyzontu predykcji  $N_1=1$ . Wartość końcowa horyzontu predykcji  $N_2$  została ustalona doświadczalnie. Badany był wpływ długości horyzontu predykcji na odpowiedź układu na skokowe zakłócenie oddziałujące na wejście obiektu, jego wartość była

zwiększana aż do momentu osiągnięcia ograniczenia technologicznego lub do utraty stabilności. Pozostałe parametry zostały przyjęte tak, aby uzyskać wyraźne tłumienie sygnału sterowania. Dla osiągnięcia stabilizacji układu zaleca się [8], aby wartość końcowa horyzontu predykcji  $N_2$  była równa przynajmniej rzędowi modelu wewnętrznego. Dla opisywanego układu wartość ta (równa 9) okazała się zbyt mała. Stabilność osiągnięta została dla  $N_2=11$ . Stosowanie długiego horyzontu predykcji prowadzi do wzrostu jej błędów a także do niepotrzebnego zwiększenia czasu obliczeń. W przypadku badanego układu przyjęcie  $N_2=12$  powodowało duży wzrost oscylacji, dalsze zwiększanie tego parametru sprawia, że układ jest niestabilny już dla niewielkich wartości zakłócenia.

W przypadku układów liniowych horyzont sterowania  $N_u$  przyjmuje się tak, by miał wartość większą niż liczba niestabilnych lub słabo tłumionych biegunów. Dla układów nieliniowych pozostaje jedynie dobór empiryczny. Długi horyzont sterowania oznacza dużą liczbę zmiennych decyzyjnych przy minimalizacji wskaźnika jakości sterowania  $J$ , czyli dłuższy czas wykonywania algorytmu sterowania i może być przez to praktycznie nieużyteczny, a w ekstremalnych przypadkach może prowadzić do niestabilności, np. gdy rozwiązanie zadania optymalizacji nie zostało osiągnięte w wymaganym czasie. Poza tym przy rosnącej wartości  $N_u$  przebieg wyjściowy staje się coraz bardziej oscylacyjny.

Oscylacje można ograniczyć poprzez zwiększenie współczynnika wagowego  $\rho$  dla funkcji kary, powodując jej wzrost, co prowadzi do ograniczenia oscylacji. Nadmierna wartość tego współczynnika powoduje jednakże wydłużenie czasu ustalania się odpowiedzi.

Na rys. 5 pokazano 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.



Rys. 5. Porównanie odpowiedzi obiektu dla NPC przy różnym sposobie uzyskiwania zwrotnej informacji o wielkości emisji tlenków azotu  
Fig. 5. Comparison of object response for NPC at various feedback about NO<sub>x</sub> emission

Jak widać, przy odpowiednich wartościach parametrów regulatora w układzie z sondą światłowodową i neuronalnym 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. Komora spalania znajdująca się w Instytucie Energetyki, gdzie wykonywane były doświadczenia, nie jest

dużym obiektem i opóźnienie wnoszone przez analizatory gazów jest niewielkie. W przypadku dużych obiektów, np. kotłów energetycznych w elektrowniach, opóźnienie może dochodzić do kilkuset sekund. W takim przypadku układ z analizatorem gazowym w ciągu czasu opóźnienia nie będzie zdolny wykryć zwiększonej emisji. Powoduje to bardzo długi czas utrzymywania się zwiększonej emisji, co zostało pokazane na rys. 5 linią przerywaną; „C” oznacza czas opóźnienia pomiędzy powstaniem zwiększonej emisji a jej wykryciem przez analizatory gazów.

## 5. Wnioski

Sygnal optyczny jest obecnie najszybszym i selektywnym sposobem uzyskania informacji o jakości spalania w pojedynczym palniku.

Wyniki identyfikacji modelu emisji tlenków azotu pozwalają stwierdzić, że do uzyskania informacji o jej wielkości, zamiast opóźnionych sygnałów z analizatorów gazowych można używać estymat obliczonych na podstawie natychmiastowych sygnałów z sondy optycznej.

Wykorzystanie sygnału optycznego umożliwia konstrukcję układu regulacji pojedynczego palnika. Układ neuronowej regulacji pojedynczego palnika energetycznego poprawia stabilizację emisji tlenków azotu.

Dalsze prace będą się koncentrowały na następujących zagadnieniach:

- badanie możliwości użycia sygnału optycznego i sieci neuronowych do estymacji innych parametrów procesu spalania w pojedynczym palniku, np. emisji tlenku węgla, czy też wielkości niedopału.
- badanie możliwości wykorzystania innych metod wstępnej obróbki danych z sondy optycznej w celu zwiększenia dokładności estymatora i poprawy jakości regulacji; brane są pod uwagę metody statystyczne, przekształcenie fouriera, przekształcenie falkowe,
- zastosowanie algorytmów genetycznych, zarówno do wspomaganie uczenia sieci neuronowych, jak też do regulacji,
- rozszerzenie układu na system wielopalnikowy,
- zastosowanie logiki rozmytej.

Ten ostatni kierunek rozwoju przyjęty został ponieważ spalanie jest procesem, który nie daje się dobrze opisać w sposób anali-

tyczny. W takim przypadku wydaje się uzasadnione użycie pojęć jakościowych w miejsce ilościowych.

## 6. Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w sprawie ochrony powietrza przed zanieczyszczeniem, z dnia 12.02.1990 r., Dz.U. nr 15, poz. 92, 1990.
- [2] Instrukcja eksploatacji kota OP-650k-040 wraz z urządzeniami i instalacjami pomocniczymi (materiał niepublikowany), 2001.
- [3] P.Mróz: Optymalizacja spalania z wykorzystaniem sieci neuronowych – projekt realizowany przez CNPAE, Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo – Technicznej „Diagnostyka jakości spalania w energetyce”, s. 333 – 348, Ustroń-Zawodzie, 1998.
- [4] W.Wójcik: Światłowody w zastosowaniu do kontroli pracy palnika pyłowego, Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo – Technicznej „Diagnostyka jakości spalania w energetyce”, s.333– 348, Ustroń – Zawodzie, 1998.
- [5] W.Wójcik: The utilisation of flame flicker in the fibre – optic system for combustion quality evaluation in industrial energetic boilers, Conference Proceedings EUROSENSORS XI, vol.3, pp. 997 – 1000, Warsaw, 1997
- [6] A.Smolarz, W.Wójcik, A.Kotyra, C.Wojciechowski, P.Komada: Fibre optic monitoring system, "Lightguides and their applications", Proceedings of SPIE, vol. 4239, pp.129–132
- [7] W.Wójcik, W.Surtel, A.Smolarz, A.Kotyra P.Komada: Optical fiber system for combustion quality analysis in power boilers, Optoelectronic Information Technologies, Proceedings of SPIE vol.4425, 2001, pp.517–522.
- [8] M.Nørgaard, O.Ravn, N.K.Poulsen, L.K.Hansen (2000): Neural networks for Modelling and Control of Dynamic Systems, Springer-Verlag, London, UK, 2000.
- [9] W.Wójcik, A.Kotyra, A.Smolarz, P.Komada: Optical fibre system for combustion quality analysis in power boilers, Proceedings on International Conference on Optoelectronic Information Technologies, „PHOTONICS-ODS 2000”, 2 – 5 October, pp. 181 – 187, Vinnytsa, Ukraine, 2000

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Cennik publikacji reklam w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

Reklama	Czarno-biała	Kolorowa
I okładka	-	<b>1 800,00 PLN netto</b>
II okładka	-	<b>1 600,00 PLN netto</b>
III okładka	-	<b>1 500,00 PLN netto</b>
IV okładka	-	<b>1 700,00 PLN netto</b>
1 strona (175x250 mm)	<b>900,00 PLN netto</b>	<b>1 100,00 PLN netto</b>
½ strony (175x125mm) - pozioma	<b>500,00 PLN netto</b>	<b>700,00 PLN netto</b>
½ strony (85x250 mm)- pionowa	<b>500,00 PLN netto</b>	<b>700,00 PLN netto</b>
1/3 strony (175x85 mm)	<b>400,00 PLN netto</b>	-
¼ strony (85x125 mm)	<b>300,00 PLN netto</b>	-

Do podanych cen należy doliczyć podatek VAT w wysokości 22%.