

Waldemar WÓJCIK, Andrzej SMOLARZ

POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, KATEDRA ELEKTRONIKI

Wykorzystanie neuronowej metody estymacji parametrów spalania do regulacji pracy palnika pyłowego**Dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK, prof. PL**

pracuje w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1975 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, doktorat obronił w Politechnice Lubelskiej w 1985r, a habilitację w Politechnice Lwowskiej (2001). W swojej pracy naukowej zajmuje się procesami cieplnymi, fizyką ciała stałego, sterowaniem procesów technologicznych, optoelektroniką, zastosowaniami algorytmów do analizy danych. Szczególnie dużo uwagi poświęca zastosowaniu techniki światłowodowej do monitorowania procesów cieplnych.

e-mail: wwojci@elektron.pol.lublin.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 i sterowanie na podstawie pomiarów uśrednionych lub opóźnionych (np. z analizatorów gazowych umieszczonych na kominie), jest często za mało efektywne. Wady tej nie miałaby regulacja pracy pojedynczego palnika ale brak jest metody pomiaru jego parametrów spalania. W artykule opisane są próby pozyskiwania informacji o emisji tlenków azotu i tlenku węgla na podstawie, opracowanego w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej, światłowodowego układu monitorującego wybrane strefy płomienia w pojedynczym palniku. Do estymacji emisji zostały użyte sieci neuronowe. Sygnały z systemu estymacji emisji zostały wykorzystane do budowy regulatora pojedynczego palnika stabilizującego wielkość emisji NOx. W artykule zawarte są wyniki symulacji takiego układu regulacji.

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 analysers 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 attempts to acquire information about emission of nitrogen oxides and carbon monoxide from fiberoptic system for flame monitoring, developed in Department of Electronics of Lublin University of Technology. Artificial neural networks have been used for estimation of emission. Signals from estimation system have been used to build the controller stabilising emission of NOx from a single burner. Results of simulation tests are included.

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 zanieczyszczaniu 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 zapewnić jednak nie tylko ograniczenie emisji NOx poniżej dopuszczalnego poziomu, ale również powinien umożliwić stabilne spalanie w zakresie 50-100% wydajności kotła, zapewnić emisję tlenku węgla - CO poniżej 100ppm oraz straty niedopału nie większe niż 5% zawartości części palnych w popiele.

Niestety ograniczenie emisji NOx przez zmianę 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 możliwą do osiągnięcia redukcję NOx.

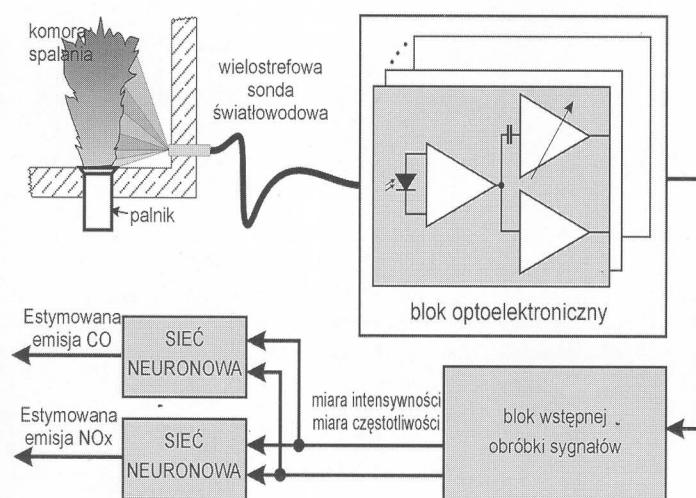
Dla minimalizacji wspomnianych problemów stosowane są coraz bardziej złożone układy regulacji klasycznej, podejmowane są również próby zastosowania regulatora neuronowego [2]. W układach tych wykorzystywane są wielkości procesowe takie jak przepływy powietrza, obciążenia młynów czy sygnały z analizatorów gazów spalinowych. Wszystkie te rozwiązania mają jedną podstawową wadę: do sterowania wykorzystywane są pomiary uśrednione i opóźnione. W kotłach energetycznych pracuje od kilkunastu do kilkudziesięciu palników a pomiar składu chemicznego gazów najczęściej dokonywany jest za pomocą analizatorów gazowych umieszczonych za obrotowymi podgrzewaczami powietrza. Opóźnienie, zależnie od warunków może dochodzić nawet do kilku minut co powoduje, że sterowanie jest często za mało efektywne.

Ponieważ to indywidualny nadmiar powietrza decyduje o ilości NOx 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.

2. 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 po-

miar 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 pulsację płomienia będącą pewną miarą turbulencji oraz jego intensywność, która jest miarą temperatury płomienia [3]. System został wdrożony w Elektrowni Kozienice S.A. Na obecnym etapie rozwoju systemu wstępne przetwarzanie sygnałów dokonywana jest za pomocą komputera klasy PC, w przyszłości planuje się użycie DSP. Sygnały wyjściowe systemu są praktycznie natychmiastowe i nie są uśrednione. Schemat systemu estymacji emisji tlenków azotu oraz tlenku węgla z użyciem opisanego systemu monitorowania płomienia oraz sieci neuronowych przedstawiony jest na rys. 1.



Rys.1. Schemat proponowanego systemu estymacji emisji NOx i CO.

3. Badania eksperymentalne

Badania wykonywane były na stanowisku znajdującym się w Instytucie Energetyki w Warszawie. Obiekt ten został wybrany ze względu na możliwość wykonywania doświadczeń na pojedynczym palniku, a także pomiaru ważniejszych wielkości procesowych. Jest to komora spalania z pojedynczym pyłowym palnikiem wirowym będącym modelem w skali 1:10 niskiemisyjnego palnika przemysłowego z rozdziałem powietrza wtórnego. Mierzone są przepływy powietrza młynowego i wtórnego, przepływ węgla, emisja NOx oraz intensywność i pulsacja płomienia. Czas próbkowania wynosi 10s. Do eksperymentów wybrany został sygnał z włókna, z którego informacja była najbardziej wrażliwa na zmiany proporcji mieszanki. Badana była korelacja pomiędzy sygnałem optycznym a wybranym parametrem procesu spalania. Jest możliwe, że dalsze badania wykazą potrzebę użycia sygnałów z większej liczby włókien. Sygnały ze światłowodowego systemu monitorowania płomienia były przetwarzane na postać cyfrową z prędkością 1000 próbek na sekundę. Następnie były one poddawane analizie w celu otrzymania dwóch wielkości:

- miary intensywności płomienia - będącej średnią intensywnością w okresie próbkowania całego układu (10s),
- miary częstotliwości migotania płomienia - określonej jako liczba zmian znaku pochodnej w ciągu sekundy dla danego okresu próbkowania dalej nazywana pulsacją płomienia.

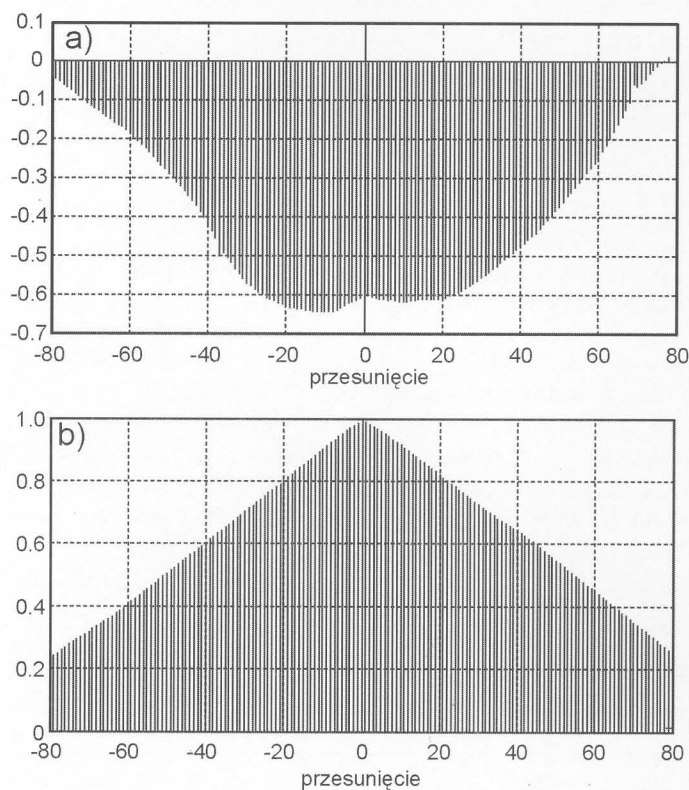
Druga wielkość została dodana ponieważ z poprzednich badań wynika, że informacja zawarta jest również w widmie obserwowanego sygnału chwilowej intensywności płomienia, a sieci neuronowe

we nie są zdolne do bezpośredniego przetwarzania informacji o widmie sygnału.

4. Estymacja emisji tlenków azotu i tlenku węgla

Współczynniki korelacji pomiędzy wyjściem i wejściem konstruowanych modeli nie są zbyt wysokie. Dla modelu emisji NOx wynoszą one -0.09 dla miary intensywności i 0.34 dla miary częstotliwości, a dla modelu emisji CO odpowiednio 0.56 i 0.38. Wynika stąd, że żadna z miar nie może być użyta samodzielnie. Więcej informacji na temat zależności można uzyskać analizując wykresy korelacji pomiędzy każdą z wielkości wejściowych a wyjściem, pokazanych na rys. 2 i 3. Zostały one znormalizowane tak, aby autokorelacje przy zerowym przesunięciu wynosiły 1. Widać, że zarówno w przypadku emisji NO, jak i CO, korelacja z miarą częstotliwościową jest znacznie bardziej regularna, co oznacza większą przydatność i jeszcze raz potwierdza słuszność wybranej metody przetwarzania.

Na podstawie serii doświadczeń zbudowany został neuronowy



Rys. 2. Korelacja zmierzonej emisji tlenków azotu z: a) miarą intensywności płomienia i b) miarą częstotliwości płomienia.

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:

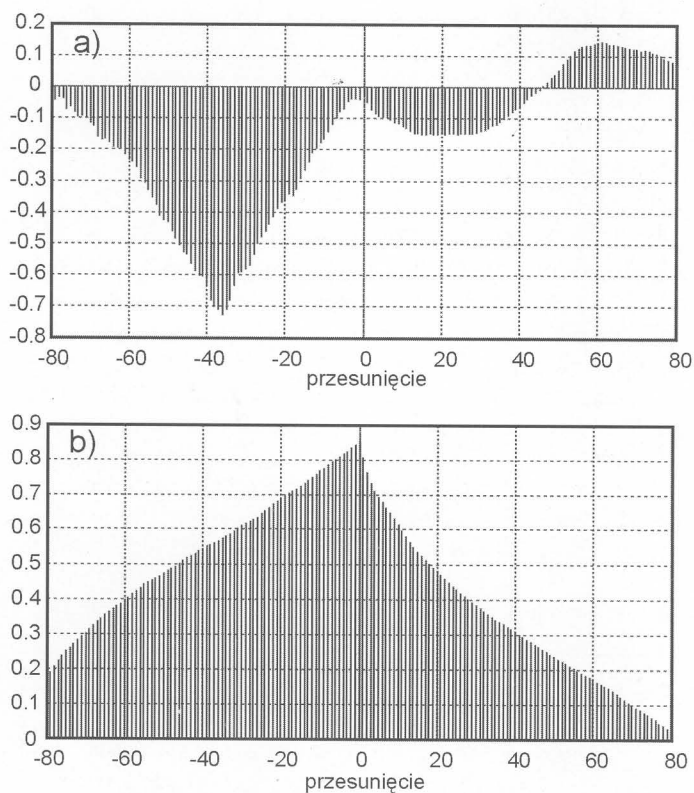
$$y(t) = g[\varphi(t), \theta] + e(t)$$

gdzie:

t oznacza czas, $y(t)$ wyjście modelu, θ 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:

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

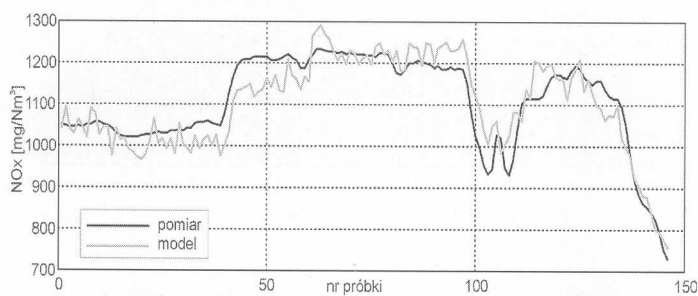
gdzie u oznacza wejście modelu a n_b i n_k są jego parametrami.



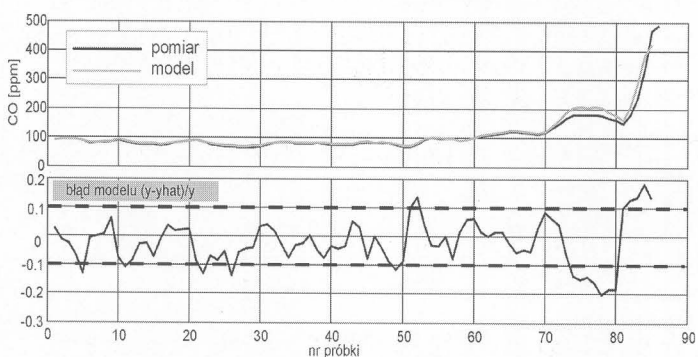
Rys. 3. Korelacja zmierzonej emisji tlenku węgla z: a) miarą intensywności płomienia i b) miarą częstotliwości płomienia.

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 2 pokazane są przebiegi poziomu emisji



Rys. 4. Zmierzony przebieg emisji NOx (czarny) i przebieg estymowany na podstawie pomiarów sondą optyczną (szary).



Rys. 5. Zmierzony przebieg emisji CO (czarny) i przebieg estymowany na podstawie pomiarów sondą optyczną (szary) oraz błąd modelu z zaznaczonymi granicami dopuszczalności.

NOx zmierzonego podczas jednego z eksperymentów oraz wartości uzyskiwanej z neuronowego estymatora. Sygnały te zostały zsynchronizowane tak, aby zlikwidować opóźnienie wnoszone przez analizator gazów.

Do modelowania emisji tlenku węgla również wykorzystano strukturę NNFIR. Na obecnym etapie badań najdokładniejsze okazał się model NNFIR(5,1) zaimplementowany w postaci MLP(10,3,1). Rezultaty przedstawione są na rysunku 5. Błąd neuronowego estymatora emisji tlenków węgla jest jak widać znacznie większy i znacznie przekracza założoną dopuszczalną wartość (na wykresie błędów zaznaczoną linią przerywaną), zwłaszcza w obszarze dużych emisji.

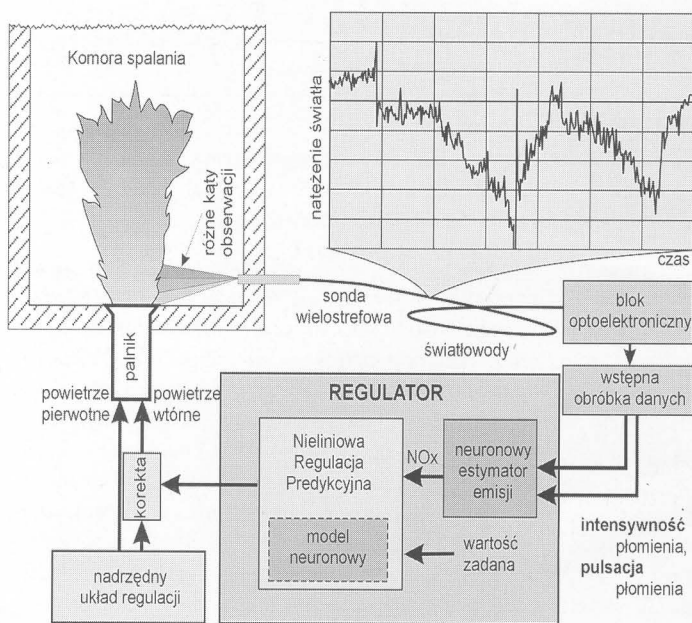
5. Układ regulacji

Wykorzystując opisany powyżej optoelektroniczny estymator emisji zbudowano układ regulacyjny stabilizujący emisję tlenków azotu z pojedynczego palnika. Wyniki testów symulacyjnych zamieszczone są poniżej. Docelowo regulator będzie pracował w wewnętrznej pętli regulacji, korygując wartości powietrza wtórnego zadane przez system nadrzędny. Konceptcję układu regulacji pokazano na rys. 6.

Przyjęty został kwadratowy wskaźnik jakości regulacji o postaci:

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

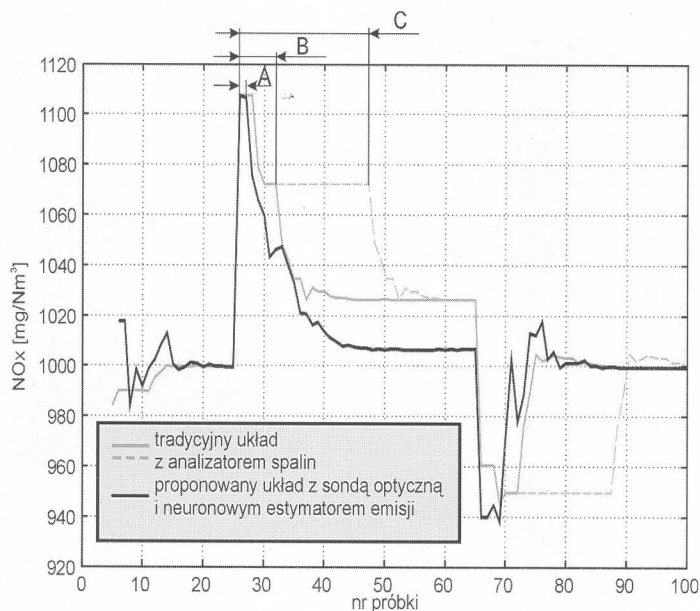
gdzie $U(t)$ oznacza wektor sterowania, r wartość zadaną sterowania, N_1 i N_2 odpowiednio początek i koniec horyzontu predykcji, N_u długość horyzontu sterowania, \hat{y} wartość wyjściową modelu, ρ wagę tłumienia zmienności sterowań w stosunku do uchybu regulacji, a Δu przyrost wartości sygnału sterowania.



Rys. 6. Układ regulacji wirowego palnika pyłowego.

Wskaźnik ten minimalizowany jest w strukturze nieliniowego regulatora predykcyjnego (NPC) z neuronowym 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.

Na podstawie pomiarów wykonany został również symulator wybranych parametrów palnika. Posłużył on do wstępnych badań układu regulacji. Badania symulacyjne dotyczyły możliwości stabi-



Rys. 7. Porównanie odpowiedzi obiektu dla NPC przy różnym sposobie uzyskiwania zwrotnej informacji o wielkości emisji tlenków azotu.

lizacji emisji tlenków azotu. Na rys. 7 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.

Jak widać, 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 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 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 20 okresów próbkowania nawet nie będzie zdolny wykryć zwiększonej emisji. Sytuacja taka została zaznaczona na rysunku linią przerywaną, „C” to czas opóźnienia.

6. Wnioski

Sygnał 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.

Błąd neuronowego estymatora emisji tlenków węgla nie pozwala jeszcze na praktyczne jego wykorzystanie. Jest to najprawdopodobniej spowodowane o wiele większym zakresem zmian poziomu CO (ponad rząd wielkości). Nadal trwają prace i autorzy mają nadzieję, że przy lepszym doborze modelu i zbioru uczącego dokładność zostanie znacznie poprawiona - początko-

we wyniki estymacji dla tlenków azotu również nie były zbyt dokładne.

Wykorzystanie sygnału optycznego w układzie neuronowej regulacji pojedynczego palnika energetycznego poprawia stabilizację emisji tlenków azotu.

Dalsze prace będą się koncentrowały na następujących zagadnieniach:

- zbadanie możliwości wykorzystania innych metod preprocessingu danych z sondy optycznej, np. filtracji, przekształceń fouriera lub falkowego, w celu zwiększenia dokładności modelu estymatora i poprawy jakości regulacji,
- zbadanie możliwości użycia sygnału optycznego i sieci neuronowych do estymacji innych parametrów procesu spalania w pojedynczym palniku, np. wielkości niedopału.
- rozszerzenie układu na system wielopalnikowy,
- zastosowanie algorytmów genetycznych zarówno do wspomagania sieci neuronowych, jak też do regulacji,
- zastosowanie logiki rozmytej ponieważ spalanie jest procesem, który nie daje się opisać w sposób analityczny. W takim przypadku wydaje się uzasadnione użycie pojęć jakościowych w miejsce ilościowych.

7. 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] J. Arabas, L. Białobrzeski, L. ChomiakP, T. Domański, K. Świrski, R. Neelakantan: Pulverized Coal Fired Boiler Optimization and NOx Control using Neural Networks and Fuzzy Logic, proceedings of AspenWorld'97, Boston, Massachusetts, 1997.
- [3] W. Kordylewski: Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- [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. Norgaard, 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

Title: Application of neural network method of estimation of combustion parameters for control of pulverised coal burner