

Andrzej SMOLARZ¹, Waldemar WÓJCIK¹, Andrzej KOTYRA¹, Javier BALLESTER², Krzysztof JAGIEŁŁO³

¹ POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin

² CENTRO POLITECNICO SUPERIOR, Maria de Luna 3, Campus Rio Ebro, 50018 Zaragoza, Hiszpania

³ INSTYTUT ENERGETYKI, ZAKŁAD PROCESÓW CIEPLNYCH, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa

Pomiar wybranych parametrów spalania biogazu

Dr inż. Andrzej SMOLARZ

Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1989 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym PL. Pracę doktorską obronił w 2003. W swojej pracy naukowej zajmuje się metodami sztucznej inteligencji, diagnostyką spalania pyłu węglowego i gazów, a także sterowaniem procesów technologicznych, optoelektroniką oraz elementami rekonfigurowalnych pasywnych sieci światłowodowych. W jego dorobku znajduje się ponad 100 publikacji naukowych.

e-mail: a.smolarz@pollub.pl



Prof. dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

Jest kierownikiem Katedry Elektroniki, dziekanem 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 roku 2009 otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. W swojej pracy naukowej zajmuje się procesami cieplnymi, fizyką ciała stałego, sterowaniem procesów technologicznych, optoelektroniką, cyfrową analizą danych oraz kryptografią.

e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl



Dr inż. Andrzej KOTYRA

Dr inż. Andrzej Kotyra jest adiunktem w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1991 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym. Pracę doktorską obronił w 2002. W swojej pracy naukowej zajmuje się analizą danych pomiarowych oraz diagnostyką spalania pyłu węglowego, biomasy z wykorzystaniem metod optycznych i przetwarzania obrazu.

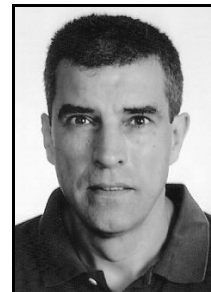
e-mail: a.kotyra@pollub.pl



Prof. Javier BALLESTER

Javier Ballester jest profesorem tytularnym Mechaniki Płynów w Centro Politécnico Superior na Uniwersytecie w Saragossie od 2008. Uzyskał stopień inżyniera przemysłowego w Centro Politécnico Superior Uniwersytetu w Saragossie, gdzie również uzyskał stopień doktora. Jego działalność badawcza obejmuje różnorodne tematy związane ze spalaniem, energią i stosową mechaniką płynów. Obecnie jest koordynatorem Laboratorium Badawczego Technologii Spalania LITEC.

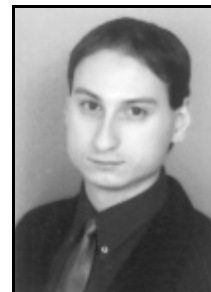
e-mail: ballester@unizar.es



Mgr inż. Krzysztof JAGIEŁŁO

W 2003r. ukończył Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Od 2004r. jest pracownikiem Zakładu Procesów Ciepłych Instytutu Energetyki na stanowisku asystenta naukowego. Brał udział w pracach badawczych nad sondą do zbierania osadów w kotle w ramach projektów dofinansowanych przez UE (FP6). Od roku 2008 uczestniczy w realizacji projektu dofinansowanego przez UE (RFCS) dotyczącego opracowania systemu diagnostyki procesu spalania w palniku pyłowym.

e-mail: krzysztof.jagiello@jen.com.pl



Streszczenie

Wydaje się, że pomimo wzrostu udziału nowych rodzajów źródeł energii, przez następne dekady spalanie różnego rodzaju paliw pozostanie głównym źródłem energii. Niestety, pozostanie ono również największym źródłem zanieczyszczenia atmosfery. Efektywne i czyste spalanie paliw uzyskanych ze zgazowania biomasy lub metanowej fermentacji odpadów napotyka na szereg problemów technicznych. Jednym z nich jest opracowanie nowych konstrukcji palników dla paliw, których właściwości fizykochemiczne mogą istotnie odbiegać od właściwości gazu ziemnego. Jednakże, nawet jeżeli turbina została zaprojektowana do pewnego rodzaju paliwa alternatywnego, konieczny jest stały nadzór, diagnostyka i optymalizacja systemu dla zapewnienia niezawodności jego działania. W artykule opisano jedno z możliwych rozwiązań diagnostyki w czasie rzeczywistym procesu spalania gazowego paliwa alternatywnego polegające na zastosowaniu optycznego monitorowania płomienia i wyznaczaniu emisji NOx i CO za pomocą modeli rozmytych.

Słowa kluczowe: modelowanie rozmyte, spalanie biomasy, metody optyczne.

Measurement of selected biogas combustion parameters

Abstract

It seems that in spite of growing share of other types of energy sources, burning various types of fuels will remain the main source of energy during the next decades. Unfortunately, it also remains the greatest source of atmospheric pollution. On 23 January 2008 the European Commission

put forward a far-reaching package of proposals aiming at reducing the overall emissions to at least 20% below 1990 levels by the year 2020, and is ready to scale up this reduction to as much as 30% under a new global climate change agreement when other developed countries make comparable efforts. It has also set itself the target of increasing the share of renewables in energy use to 20% by the year 2020. The latter commitment results in search of new technologies that partially or entirely make use of renewable energy sources. This is also a case of combustion technologies where alternative fuels obtained from renewable sources are used. For example, waste co-combustion can be applied in case of pulverized coal burners, while thermal processing of biomass or waste methanisation can be used in case of gas turbines. The efficient and clean combustion of those fuels requires solving many technical problems. One of them is development of new designs, suitable for these new fuels, whose physical and chemical properties can be very different from those of, e.g., natural gas. In general, alternative fuels are characterised by low to very-low calorific values and by fluctuating properties (among different batches, or along the time in a continuous process). The variability of this type of fuels, can bring the system to off-design operation and cause increased pollutant emissions, lower efficiency or flame stability problems, especially in lean-premixed combustors. Therefore, even after an engine has been adapted for a particular alternative fuel, its permanent supervision and optimisation becomes an issue that should be addressed in order to guarantee the reliability of a practical system. Another reason for pursuit of new methods of combustion process diagnostics are difficulties met in implementation of the lean combustion technology in order to decrease NOx levels. The process operates close to the lean flammability limit what can result in a steep rise of CO, flame instabilities and, eventually, flame blow-out. Although most of the information required (O₂, NOx and CO in flue gases) can be readily obtained with gas analysers, extractive sampling involves long response times and does not allow distinguishing among different flames in multi-burner chambers. Hence, techniques for the monitoring of premixed combustors should have a fast response and inform about the state of individual flames. The aim of the work presented is to evaluate one of the possible approaches for the real-time diagnostics of actual state of the combustion process, using optical signals from flame with the use of artificial neural networks and fuzzy logic. The lean-premixed flames were studied, using natural gas and blends that represent arbitrarily selected syngas.

Keywords: neuro-fuzzy systems, biomass combustion, optical methods.

1. Wstęp

Wydaje się, że pomimo wzrostu udziału nowych rodzajów źródeł energii, przez następne dekady spalanie różnego rodzaju paliw pozostanie głównym źródłem energii.

Niestety, pozostanie ono również największym źródłem zanieczyszczenia atmosfery. 23 stycznia 2008 Komisja Europejska przedstawiła pakiet daleko idących propozycji, gdzie zobowiązuje się do zredukowania całkowitej emisji zanieczyszczeń w 2020 roku o 20% w stosunku do 1990r. Gotowa jest również do redukcji nawet o 30% jeżeli inne kraje rozwinięte poczynią podobne kroki. Wyzaczyła sobie również cel zwiększenia udziału źródeł odnawialnych do 20% w 2020 roku. To ostatnie zobowiązanie powoduje poszukiwanie nowych technologii całkowicie lub częściowo wykorzystujących odnawialne źródła energii. Dzieje się tak również w przypadku technologii spalania, gdzie zastosowanie znajdują alternatywne paliwa uzyskane ze źródeł odnawialnych. Na przykład, w przypadku węglowych palników pyłowych można stosować współspalanie z biomasą a w przypadku turbin gazowych stosowane jest zgazowanie biomasy lub metanowa fermentacja odpadów.

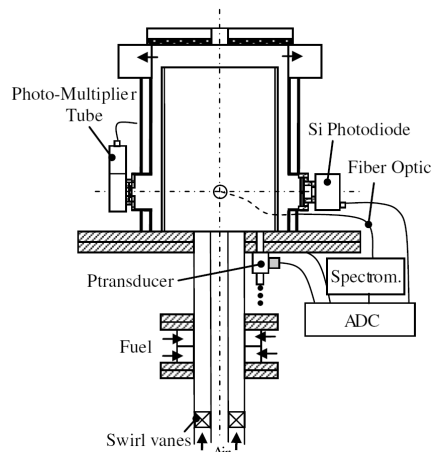
Efektywne i czyste spalanie takich paliw napotyka na szereg problemów technicznych. Jednym z nich jest opracowanie nowych konstrukcji palników dla paliw, których właściwości fizykochemiczne mogą istotnie odbiegać od właściwości gazu ziemnego. Generalnie paliwa alternatywne charakteryzują się niską lub bardzo niską kalorycznością oraz zmiennością właściwości (pomiędzy wsadami lub w czasie procesu ciągłego). Zmienność parametrów tego typu paliw może doprowadzić do nieprawidłowej pracy systemu, zwiększonej emisji zanieczyszczeń, zmniejszonej sprawności lub problemów ze stabilnością płomienia, szczególnie przy spalaniu mieszanki ubogiej. Dlatego też, nawet jeżeli turbina została zaprojektowana do pewnego rodzaju paliwa alternatywnego, konieczny jest stały nadzór, diagnostyka i optymalizacja aby zapewnić niezawodność systemu.

Następną przesłanką do poszukiwań nowych metod diagnostyki procesu spalania są trudności napotykane podczas wdrażania techniki spalania mieszanki ubogiej przy jednoczesnym obniżeniu emisji NOx. Proces spalania jest wtedy prowadzony bardzo blisko granicy palności paliwa, co może powodować gwałtowny wzrost emisji CO, niestabilne spalanie lub w końcu zgaśnięcie płomienia. Większość parametrów spalania (emisje CO, NOx, czy zawartość tlenu w spalinach) może być łatwo wykonana za pomocą analizatorów spalin, jednakże wyniki pomiarów uzyskane w ten sposób będą znacznie opóźnione oraz uśrednione w przypadkach systemów wielopłomieniowych lub wielokomorowych.

W dalszej części artykułu zostanie przedstawione jedno z możliwych rozwiązań diagnostyki procesu spalania w czasie rzeczywistym polegające na zastosowaniu optycznego monitorowania płomienia.

2. Stanowisko pomiarowe

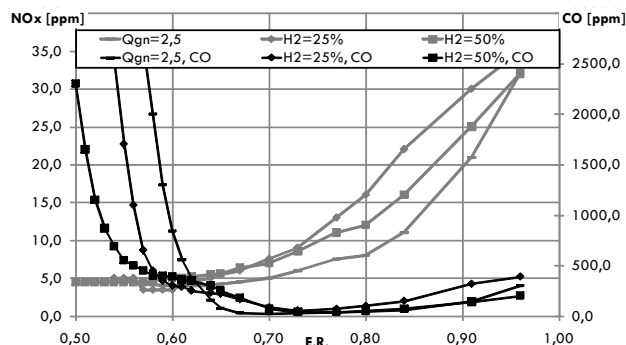
Badania wykonano na stanowisku znajdującym się na Uniwersytecie w Saragossie. Jest to palnik atmosferyczny z cylindryczną pionową komorą spalania wykonaną ze szkła kwarcowego (rys. 1). Mieszanka paliwowo-powietrzna formowana jest przez zaworowy pierścieniowy i podawana do komory przez otwory o małych wymiarach tak, aby zapewnić brak sprzężenia akustycznego pomiędzy komorą spalania i systemem mieszania. Całość osłonięta jest płaszczem wodnym z otworami do mocowania urządzeń optycznych. W opisywanych doświadczeniach wykorzystywano fotonowielki z filtrem interferencyjnym 310nm (FWHM=10nm) mierzący głównie chemiluminescencję OH* oraz fotodiode krzemową (190–1100nm) mierzącą głównie widmo CO₂*. Mierzony był również skład gazów spalinowych (O₂, CO, CO₂ i NOx) [1].



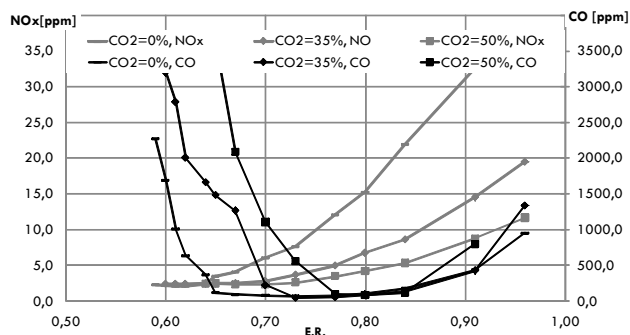
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 1. Combustion rig and instrumentation

3. Pomiary

Istnieją dwie podstawowe technologie uzyskiwania gazu z biomasy: fermentacja metanowa i zgazowanie pirolityczne. W pierwszym przypadku otrzymuje się głównie metan (około 60%) z domieszką dwutlenku węgla (około 30%) oraz małe ilości wody, azotu i innych gazów. W przypadku zgazowania pirolitycznego produktami palnymi są głównie tlenek węgla i wodór (po około 20%) przy znacznym udziale dwutlenku węgla i azotu. W celu określenia właściwości procesu spalania tych gazów badano dwa rodzaje syntetycznych mieszanin: gaz ziemny z wodorem oraz gaz ziemny z dwutlenkiem węgla. Na rysunkach 2 i 3 pokazano wykresy emisji NOx i CO przy różnych współczynnikach nadmiaru paliwa E.R. ($E.R.=1/\lambda$) dla powyższych mieszanin.



Rys. 2. Emisje CO i NOx w funkcji ER i XH2
Fig. 2. CO and NOx emissions as a function of ER and XH2



Rys. 3. Emisje CO i NOx w funkcji ER i udziału CO₂ w paliwie
Fig. 3. CO and NOx emissions as a function of ER and CO₂

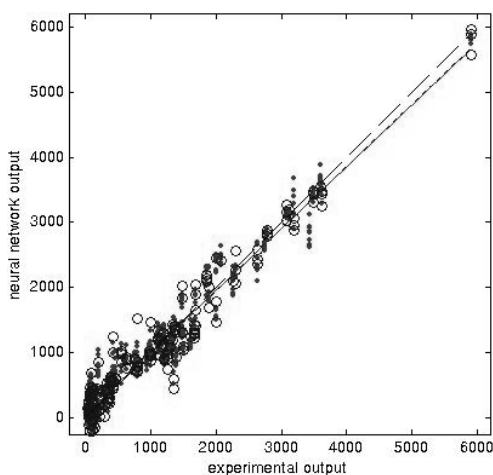
Pomiary wykonywane były przy stałym przepływie paliwa, tak aby obliczeniowa moc cieplna palnika była utrzymywana na stałym poziomie. Regulowana była ilość dopływającego powietrza. Pomiaru dokonywano w warunkach quasistacjonarnych po ustaleniu się wskazań analizatorów gazów (największe opóźnienie pomiaru).

4. Wyznaczanie parametrów spalania z użyciem sygnałów optycznych i sieci neuronowych

Na podstawie poprzednich doświadczeń (np. [2, 3]) do dalszej obróbki wybrano dwa parametry: wartość średnią oraz wariancję sygnału z obydwu czujników w okresie jednej sekundy. Tak otrzymane sygnały podawane były na wejścia sieci neuronowych, służących do obliczenia emisji NO_x i CO oraz współczynnika nadmiaru paliwa. Sieci uczone były na podstawie emisji zmierzonych za pomocą analizatorów gazów. Testowano sieci typu perceptron trójwarstwowy i różne wielkości warstwy wewnętrznej.

Dla najlepszej sieci, przy spalaniu czystego metanu średniokwadratowy względny błąd wyznaczania wartości wyniósł odpowiednio: 0,62% dla współczynnika nadmiaru paliwa, 6,8% dla emisji tlenków azotu i 15,4% dla emisji tlenku węgla [1]. Jak widać, dobrą dokładność osiągnięto dla estymacji współczynnika nadmiaru paliwa, dla emisji tlenków azotu zadowalającą, natomiast wyznaczanie emisji tlenku węgla charakteryzuje się dosyć dużym błędem. Na rys. 4 widać, że w obszarze niskich wartości emisji błąd może nawet dochodzić do 100%.

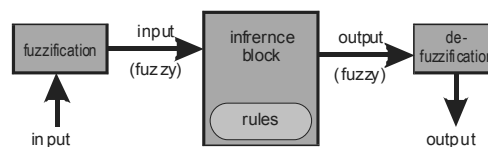
Dla spalania mieszanin metanu z wodorem i z dwutlenkiem węgla otrzymane wyniki średniokwadratowego względnego błędu wyznaczania parametrów spalania są znacznie większe [1].



Rys. 4 Porównanie zmierzonej wielkości emisji tlenku węgla z wartościami obliczonymi przez sieci neuronowe na podstawie sygnałów optycznych
Fig. 4 Comparison of CO emission measured and calculated by neural network on basis of optical signals

5. Wyznaczanie parametrów spalania z użyciem sygnałów optycznych i sieci rozmytego

Stosunkowo duży błąd wyznaczania parametrów spalania z użyciem sygnałów optycznych i sieci neuronowych w przypadku mieszanin gazów skłonił autorów do poszukiwania innych metod. Do dalszych badań wybrano modelowanie rozmyte.



Rys. 5. Ogólna idea modelowania rozmytego
Fig. 5. General idea of fuzzy modelling

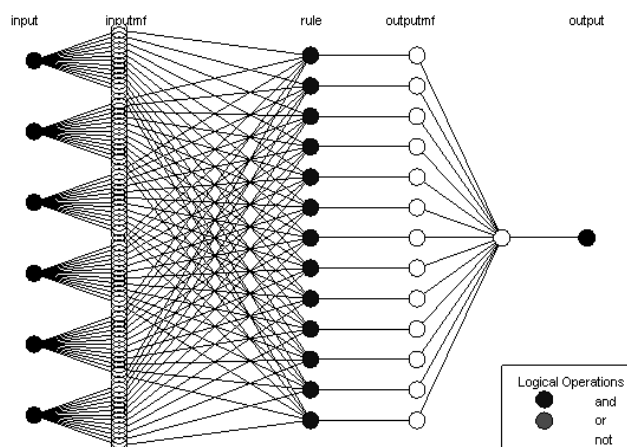
Metody modelowania rozmytego, którego ogólną ideę przedstawiono na rys. 5, można podzielić na trzy grupy [4]

- 1) tworzenie modeli rozmytych na podstawie wiedzy eksperta,
- 2) tworzenie samonastrajających się modeli rozmytych na podstawie danych pomiarowych we/wy systemu,
- 3) tworzenie samoorganizujących i samonastrajających się modeli rozmytych na podstawie danych pomiarowych.

W modelach budowanych na podstawie danych pomiarowych struktura systemu jest znana (stała baza reguł i zbiorów rozmytych) i nie podlega zmianom. Strojenie (optymalizacja) modelu polega na określeniu takich parametrów przynależności, które minimalizują błąd modelu względem modelowanego systemu. Określeniu podlega również rodzaj operatora agregacji, metody wnioskowania i metody defuzyfikacji, a także rodzaj funkcji przynależności. Strojenie modelu będzie odbywało się za pomocą rozmytych sieci neuronowych.

W badaniach użyto narzędzia ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) znajdującego się w pakiecie Matlab fuzzy logic toolbox. Pozwala ono na konstrukcję i uczenie modeli neuronowo-rozmytych typu Sugeno metodami uczenia stosowanymi w sieciach neuronowych. W tym celu model rozmyty jest przekształcany w równoważną wielowarstwową sieć neuronową typu perceptron wielowarstwowy [5].

Jako pierwsze testowane były modele dla spalania czystego metanu oraz jego mieszaniny z dwutlenkiem węgla. Użyto bardzo prostej sieci, której strukturę pokazano na rys. 6. Została ona wygenerowana z użyciem procedury klasteryzacji różnicowej (subtractive clustering) danych wejściowych, a następnie była uczona za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędu.



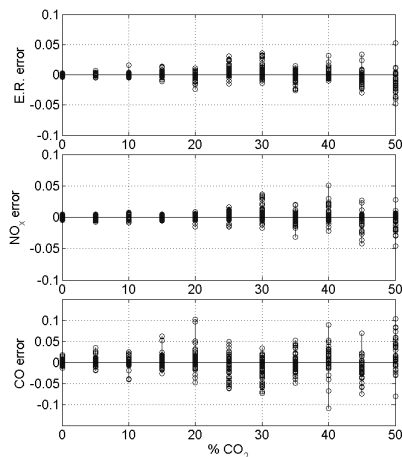
Rys. 6. Struktura sieci użytej do modelowania parametrów spalania
Fig. 6. Structure of network used for modelling combustion parameters

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie błędów wyznaczania parametrów spalania z użyciem modeli rozmytych na podstawie pomiarów optycznych. Jak widać, nawet dla tak prostych modeli, błędy dla spalania mieszaniny są niższe niż dla modeli neuronowych dla spalania czystego metanu.

Na rysunku 7 pokazano zależność błędu wyznaczania parametrów spalania od zawartości CO₂ w spalanej mieszaninie. Można zauważyć, że błąd ten jest najmniejszy dla czystego metanu i rośnie wraz z rosnącą zawartością dwutlenku węgla.

Tab. 1. Błędy wyznaczania parametrów spalania z użyciem modeli rozmytych
 Tab. 1. Errors of determining combustion parameters with use of neuro-fuzzy modelling

| parametr | błąd względny | | Odchylenie standardowe |
|------------------------------|---------------|-----------|------------------------|
| | maksymalny | minimalny | |
| współczynnik nadmiaru paliwa | 5,31% | -4,74% | 0,95% |
| NO _x | 5,08% | -4,57% | 0,88% |
| CO | 10,33% | -10,92% | 2,45% |



Rys. 7. Zależność błędu wyznaczania parametrów spalania od zawartości CO₂ w spalanej mieszance

Fig. 7. Combustion parameters' error vs. CO₂ share in mixture

6. Wnioski

Sygnal optyczny jest obecnie najszybszym i selektywnym sposobem uzyskania informacji o jakości spalania w pojedynczym palniku. Jego interpretacja następcza jednak dużo trudniejsza. Opisane w artykule badania pozwalają stwierdzić, że do uzyskania informacji o emisjach CO i NO_x z palnika spalającego biogaz o dużej zawartości dwutlenku węgla, zamiast opóźnionych sygnałów z analizatorów gazowych można używać estymat obliczonych na podstawie natychmiastowych sygnałów optycznych.

Modele neuronowe dają zadowalające rezultaty w przypadku emisji tlenków azotu, natomiast model emisji tlenku węgla jest obciążony dużym błędem. Zastosowanie prostych modeli rozmytych zdecydowanie zwiększa dokładność wyznaczania emisji.

Zarówno w przypadku wcześniej rozpatrywanych palników pyłowych, jak i w przypadku turbin gazowych, problem stanowi szybki i selektywny pomiar parametrów spalania. Badania wykazały przydatność metody optycznej w połączeniu z modelem rozmytym do oceny emisji NO_x i CO przy spalaniu metanu z domieszką CO₂.

Wyniki zastosowania nowoczesnych metod uzyskiwania informacji o jakości spalania (np. wielkości emisji CO i NO_x) wydają się być obiecujące, jednakże wciąż potencjalnym problemem wymagającym dalszych badań jest dokładność i powtarzalność pomiarów za pomocą metod optycznych.

Wyniki badań wskazują, że przy zwiększającej się ilości CO₂ maleje dokładność wyznaczania emisji. Nie wiadomo jaki efekt może powodować obecność innych gazów w paliwie, zwłaszcza palnych. Aby to określić konieczne są dalsze badania.

Równolegle prowadzone są prace nad wykorzystaniem algorytmów genetycznych [6] jako metody wspomagającej opisywane algorytmy lub też metody alternatywne.

7. Literatura

- [1] Ballester J., Hernandez 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 32, Elsevier Inc., 2009.
- [2] Wójcik W., Kalita M., Smolarz A.: Fiber-optic system for combustion process monitoring, PAK 11/2007, Gliwice 2007.
- [3] Wójcik W., Smolarz A., Ballester J., Kotyra A., Kalita M., Sanz A., Hernandez R.: Neural methods of interpretation of data obtained from optical sensor for flame monitoring, Proceedings of SPIE Optical Fibers: Applications, Volume 5952, Bellingham 2005.
- [4] Piegat A. „Modelowanie i sterowanie rozmyte”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [5] Mrozek B.: Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB-Simulink, Pomiary Automatyka Robotyka 11/2006, Warszawa 2006.
- [6] Wójcik W., Kalita M., Smolarz A.: The influence of evolutionary niche occurrence on genetic controller operation in the power boiler, Przegląd Elektrotechniczny Vol.2008, No 3, Warszawa 2008.

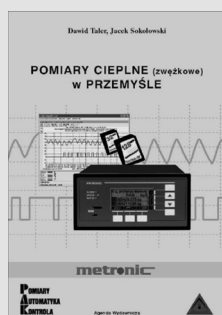
otrzymano / received: 02.03.2010

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książka Wydawnictwa PAK



Książka „Pomiary cieplne (zwezkowe) w przemyśle” przedstawia problematykę pomiarów strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwojek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami ciepło-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwozkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
 tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja PAK
 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
 tel./fax: 32 237 19 45
 e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl