

Marcin Kacprowicz

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa we Włocławku

Adam Niewiadomski

Politechnika Łódzka

PRZEDZIAŁOWE STEROWNIKI ROZMYTE W ZARZĄDZANIU INFORMACJĄ O ZANIECZYSZCZENIACH POWIETRZA

Wprowadzenie

Artykuł ten jest kontynuacją prac badawczych nad możliwościami zastosowania systemów logiki rozmytej i logiki rozmytej wyższego rzędu do sterowania filtrami powietrza w celu redukcji emisji tlenków azotu¹. Proces sterowania filtrem jest nieliniowy, zasadne zatem jest użycie sterowników innych niż opartych na logice klasycznej (dwuwartościowej). Opisany w tej pracy sterownik rozmyty wyższego rzędu (typu Mamdaniego) stosuje przedziałowe zbiory rozmyte. Opisują one przy użyciu terminów lingwistycznych poziom tlenków azotu na wejściu systemu oraz stopień otwarcia zaworu dozującego amoniak w filtrze, na podstawie danych uzyskanych od eksperta. Przy użyciu reguł IF-THEN przedziałowy sterownik rozmyty oblicza wartość nastawy filtra na wyjściu na podstawie analizy danych wejściowych. Uzyskane wyniki są w bardzo wysokim stopniu zgodne z danymi przekazanymi przez eksperta oraz lepsze w stosunku do tych otrzymanych z zastosowaniem tradycyjnego sterownika rozmytego, którego zastosowanie zostało przedstawione w artykułach².

1. Przetwarzanie danych o emisji tlenków azotu

W procesach chemicznych zachodzących podczas spalania różnych paliw często jako produkt uboczny są emitowane tlenki azotu. Są to związki chemicz-

¹ M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick, *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*, Newnes, Oxford, Woburn 2002.

² M. Kacprowicz, A. Niewiadomski, *Managing Data on Air Pollution Using Fuzzy Controller* [w:] *Computer Methods in Practice*, eds. A. Cader, M. Yatsymirskyy, K. Przybyszewski, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2012, s. 46-57; K. Tomsovic, *Fuzzy Systems Applications to Power Systems*, 2000.

ne bardzo niebezpieczne dla życia i zdrowia. Jednym ze sposobów redukcji tych niebezpiecznych gazów jest SCR (selektywna redukcja katalityczna, Selective Catalytic Reduction). Proces SCR polega na dozowaniu odpowiedniej ilości amoniaku (NH_3) do spalin w celu wywołania reakcji redukcji ($\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$). Proces nie jest liniowy, dlatego korzystanie z tradycyjnych sterowników może sprawiać problemy, głównie dotyczące odpowiedniego modelowania danych wejściowych. Jako rozwiązanie tego problemu autorzy zaproponowali najpierw użycie sterownika rozmytego, zaś w niniejszej pracy zostanie opisane zastosowanie przedziałowego sterownika rozmytego, co ma zapewnić lepsze pozyskiwanie wiedzy od eksperta. Także wyniki obliczone przez przedziałowy sterownik rozmyty są w większym stopniu zgodne z opiniami eksperckimi.

1.1. Prace o podobnej tematyce

Publikacja Kacprowicza i Niewiadomskiego³ przedstawia typy niepewności informacji, którą przetwarza się w systemach energetycznych. Autorzy pokazują liczne problemy napotkane podczas prób wykorzystania metod optymalizacji emisji NO i NO_2 w filtrach DeNOx. Pomimo wielkiego zainteresowania świata nauki, częściej widoczne są rozwiązania oparte na wiedzy ekspertów i na jej modelowaniu metodami inteligencji obliczeniowej niż na algorytmach optymalizacyjnych. Tradycyjne rozwiązania stanowią kompromis pozwalający uzyskać akceptowalne wyniki. Kolejną publikacją na temat sterowników rozmytych wykorzystywanych w przemyśle oraz ochronie środowiska jest praca z 2008 r., autorstwa Christiana, Lada, Deshpande'a i Desai'a⁴. Jej główną treścią jest opisanie możliwości metod opartych na logice rozmytej, zaś autorzy postulują ich wykorzystanie w indeksowaniu branż pod względem poziomu zanieczyszczenia powietrza i wód. Publikacje dotyczące podstaw, zaawansowanych metod i zastosowań logiki rozmytej i sterowania rozmytego można znaleźć także wśród polskich autorów⁵.

³ Ibid.

⁴ R.A. Christian, R.K. Lad, A.W. Deshpande, N.G. Desai, *Fuzzy MCDM Approach for Addressing Composite Index of Water and Air Pollution Potential of Industries*, „International Journal of Digital Content Technology and its Applications” 2008, Vol. 2, No. 2.

⁵ S.T. Wierchoń, *Elementy teorii zbiorów rozmytych*, www.ipipan.waw.pl/stw/esi/sterowniki.pdf; D. Rutkowska, M. Piliński, L. Rutkowski, *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Lódź 1997.

2. Filtr oraz struktura regulatora opartego na przedziałowym sterowniku rozmytym

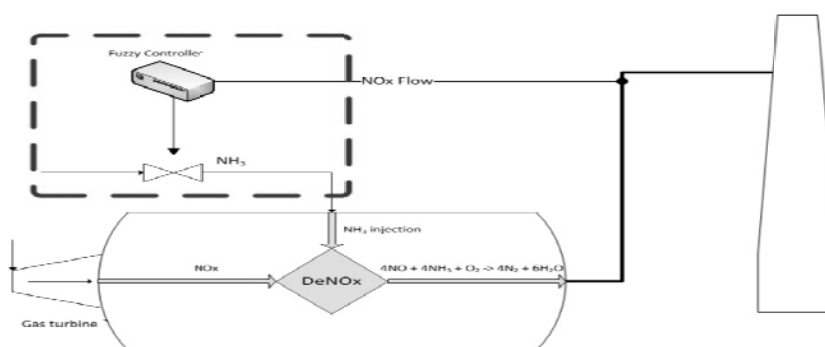
2.1. Filtr oraz struktura przedziałowego sterownika rozmytego

Celem przedziałowego sterownika rozmytego (typu Mamdaniego) jest kontrolowanie ilości dozowanego amoniaku (NH_3) w komorze reakcyjnej (zob. rys. 1). Decyzja o ilości amoniaku wprowadzanego do komory jest podejmowana na podstawie danych o poziomie NO i NO_2 . Dane wejściowe są poddawane rozmyciu, po czym następuje wnioskowanie opierające się na regułach IF-THEN, a dane wyjściowe są wyostrzane w celu otrzymania wartości liczbowej określającej poziom (wyrażony w procentach) otwarcia zaworu, którym amoniak przedostaje się do komory reakcyjnej.

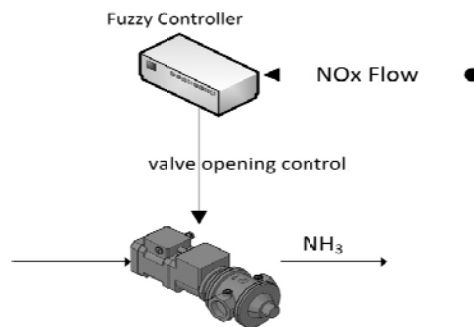
2.2. Struktura systemu filtrującego i sygnały sterujące

System filtracji DeNOx wykorzystuje reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy tlenkami azotu (NO_x) i amoniaku (NH_3). W wyniku reakcji tych dwóch związków otrzymuje się azot i wodę. Gazy spalinowe zawierające tlenki azotu są wprowadzane do reaktora. Ciekły amoniak jest pobierany ze zbiornika, a następnie pod wpływem podgrzania w postaci gazowej włączany do reaktora. Amoniak w postaci gazowej jest reduktorem, który umożliwia rozdzielanie cząsteczek NO_x do azotu i tlenu. Amoniak jest jednocześnie bardzo szkodliwym związkiem oraz stosunkowo drogim, dlatego odpowiednie dawkowanie ma kluczowe znaczenie zarówno pod względem ekologicznym, jak i finansowym. Ilość amoniaku wprowadzanego do reaktora ustala się poprzez otwarcie zaworu w rurociągu doprowadzającego go do reaktora w postaci gazowej.

Nowością w prezentowanej pracy (jak również w pracy z CMBTS³) jest zastąpienie ręcznego sterowania zaworem dostarczającym amoniak do komory reakcyjnej sterowaniem automatycznym na podstawie wartości wyjściowych przedziałowego sterownika rozmytego. System SCR został przedstawiony na rys. 1-2.



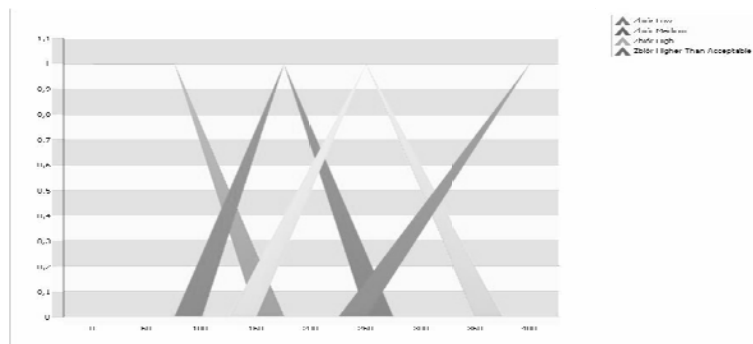
Rys. 1. Ogólny schemat układu filtrującego Selektywnej Redukcji Katalitycznej (SCR)



Rys. 2. Ogólny schemat układu filtrującego Selektywnej Redukcji Katalitycznej (SCR). Element kontrolowany przez sterownik rozmyty

2.3. Dane wejściowe dla przedziałowego sterownika rozmytego

Wartości wejściowe to stężenia NO i NO₂ pochodzące z czujników umieszczonych na wyjściu układu filtrującego. Częstotliwość pomiarów stężenia gazów wynosi 2 sekundy. Czas ten został określony na tym poziomie z powodu ograniczeń emisji tlenków azotu oraz z powodu możliwości technicznych sterowania zaworem. Według aktualnego limitu zgodnie z regulacjami prawnymi⁶ całkowite stężenie tlenków azotu wynosi 400 mg/m³. Lingwistycznie reprezentowane wartości stężeń NO i NO₂ to: Low, Medium, High, Higer than acceptable. Przedziałowe zbiory rozmyte reprezentujące te wartości w dziedzinie 0-400 przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Przedziałowe zbiory rozmyte przedstawiające reprezentację lingwistyczną danych wejściowych stężeń NO oraz NO₂ (mg/Nm³)

⁶ Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Dz.U.1998.121.793,Warszawa, 8 września 1998.

2.4. Reguły IF-THEN oraz implikacje rozmyte

W celu określenia lingwistycznych wartości wyjścia zostało stworzonych szesnaście reguł IF-THEN:

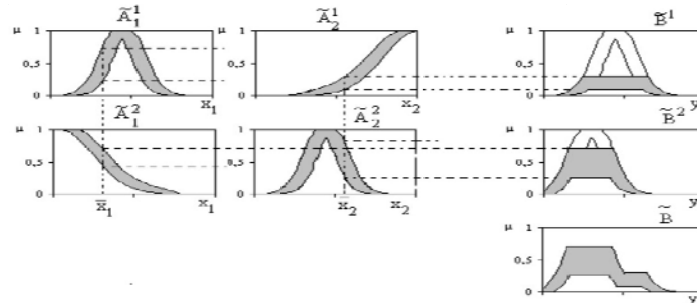
IF (NO IS Low) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS Low
IF (NO IS Low) AND (NO₂ IS Medium) THEN Valve opening percentage IS Low
IF (NO IS Low) AND (NO₂ IS High) THEN Valve opening percentage IS Medium
IF (NO IS Low) AND (NO₂ IS Higher Than Acceptable) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS Medium) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS Low
IF (NO IS Medium) AND (NO₂ IS Medium) THEN Valve opening percentage IS Medium
IF (NO IS Medium) AND (NO₂ IS High) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS Medium) AND (NO₂ IS Higher Than Acceptable) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS High) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS Medium
IF (NO IS High) AND (NO₂ IS Medium) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS High) AND (NO₂ IS High) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS High) AND (NO₂ IS Higher Than Acceptable) THEN Valve opening percentage IS Very High
IF (NO IS Higher Than Acceptable) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS High
IF (NO IS Higher Than Acceptable) AND (NO₂ IS Medium) THEN Valve opening percentage IS Very High
IF (NO IS Higher Than Acceptable) AND (NO₂ IS High) THEN Valve opening percentage IS Very High
IF (NO IS Higher Than Acceptable) AND (NO₂ IS Higher Than Acceptable) THEN Valve opening percentage IS Very High

Wnioskowanie jest oparte na t-normie minimum. Rozpatrzono dwie przykładowe reguły "IF (NO IS Low) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS Low" oraz "IF (NO IS High) AND (NO₂ IS Low) THEN Valve opening percentage IS Medium", których implikacja została przedstawiona na rys. 4. W wyniku wnioskowania opierającego się na przesłankach na próbie wejściowej, jest otrzymywana funkcja przynależności przedziałowego zbioru rozmytego, która musi zostać wyostrzona.

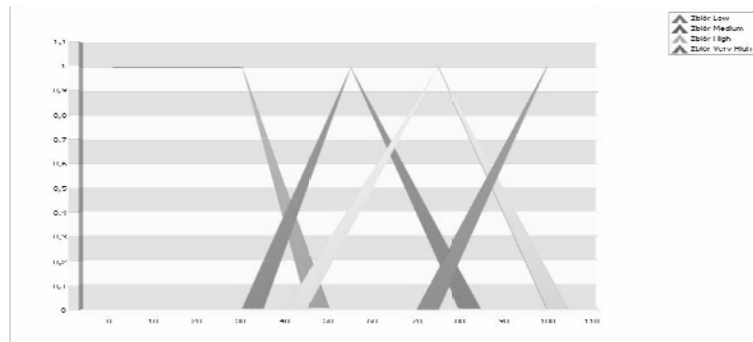
2.5. Wyjście i wyostrzenie

Wyjściem sterownika jest procent otwarcia zaworu dozującego amoniak do systemu filtrującego. Ekspert zaproponował cztery zbiory reprezentujące dane lingwistyczne. IVFS są przedstawione na rys. 5. Pomimo zastosowania sterownika Mam-

danego, warto zastanowić się nad przeprowadzeniem testów przy użyciu przedziałowego sterownika rozmytego wzorowanego na architekturze Takani-Sugeno.



Rys. 4. Implikacja rozmyta dwóch reguł przykładowych dla wartości NO i NO₂. Jako wynik otrzymano funkcję przynależności przedziałowego zbioru rozmytego, która jest sumą mnogościową poszczególnych funkcji przynależności



Rys. 5. Przedziałowe zbiory rozmyte reprezentujące stopień otwarcia zaworu sterującego ilością dozowanego amoniaku do układu filtrującego

3. Eksperymenty

Ze względu na zastosowanie przedziałowych zbiorów rozmytych, a co za tym idzie – przedziałowych funkcji przynależności, należy określić dodatkowe działania na wartościach tych funkcji. W szczególności dotyczy to porównywania (częściowego porządkowania) przedziałów w \mathbf{R} , co następuje na etapie wyboru uruchamianych reguł. Opierając się na pracy Sengupta, Pała i Chakraborty⁷, zaproponowano trzy następujące metody porządkowania przedziałów:

⁷ A. Sengupta, T.K. Pal, D. Chakraborty, *Interpretation of Inequality Constraints Involving Interval Coefficients and a Solution to Interval Linear Programming*, „Fuzzy Sets and Systems” 2001, 119, s. 129-138.

$$(1) \mathbf{a} < \mathbf{b} \Leftrightarrow \underline{\mathbf{a}} \leq \underline{\mathbf{b}}$$

$$(2) \mathbf{a} \leq_0 \mathbf{b} \Leftrightarrow \underline{\mathbf{a}} \leq \underline{\mathbf{b}} \quad \bar{\mathbf{a}} \leq \bar{\mathbf{b}}$$

$$(3) \text{ gdzie } \mathbf{m}(\mathbf{a}) \text{ zgodnie z Niewiadomskim}^8 \text{ jest } \text{środkiem } \mathbf{a}, \mathbf{m}(\mathbf{a}) = \frac{\bar{\mathbf{a}} + \underline{\mathbf{a}}}{2} \text{ oraz}$$

$$\mathbf{w}(\mathbf{a}) = \frac{\bar{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{a}}}{2}$$

Eksperyment przeprowadzono dla 1000 próbek. Po przeprowadzeniu rozmycia danych wejściowych reprezentujących stężenie NO oraz NO₂, została zastosowana implikacja przy pomocy minimum. Zostały wykorzystane trzy sposoby wyboru reguł odpalanych dla każdej pary danych wejściowych. Metody wyboru zasad przedstawiają wzory (1), (2) i (3). Dla każdej z zaproponowanych metod wyboru reguł zostały przeprowadzone testy z oraz bez bloku redukcji typu. Redukcja typu została przeprowadzona zgodnie ze wzorem (4)⁹.

$$(4) D_p(A) = \{(x, \mu(x) + p \cdot (\bar{\mu}_A(x) - \underline{\mu}_A(x))) : x \in X\}$$

gdzie p jest wartością z przedziału $[0;1]$, a wartość przyjęta w eksperymencie to 0,5.

W celu porównania otrzymanych danych z zaproponowanymi przez eksperta została wykorzystana miara podobieństwa zbiorów min-max dana wzorem (5):

$$(5) r_{mm}(V_1, V_2) = \frac{\sum_{i=1}^n \min\{v_{1i}, v_{2i}\}}{\sum_{i=1}^n \max\{v_{1i}, v_{2i}\}}$$

gdzie: $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}\}, V_2 = \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}\}$ są wektorami w $R^n, n \in N$

W mierze tej wynik mieści się w przedziale $[0;1]$, gdzie wartość 1 oznacza identyczność zbiorów, a 0 całkowitą ich rozbieżność. Zbiór danych wynikowych obliczonych przez sterownik został oznaczony jako v_1 , a zbiór wartości zaproponowanych przez eksperta jako v_2 .

Tabela 1

Wartości obliczonych podobieństw obliczonych oraz zaproponowanych przez eksperta zbiorów metodą min-max

Nr	Wartość podobieństwa zbiorów v_1 i v_2	Zastosowana wersja sterownika rozmytego
1	2	3
1	0,9205	Tradycyjny sterownik rozmyty

⁸ A. Niewiadomski, op. cit.

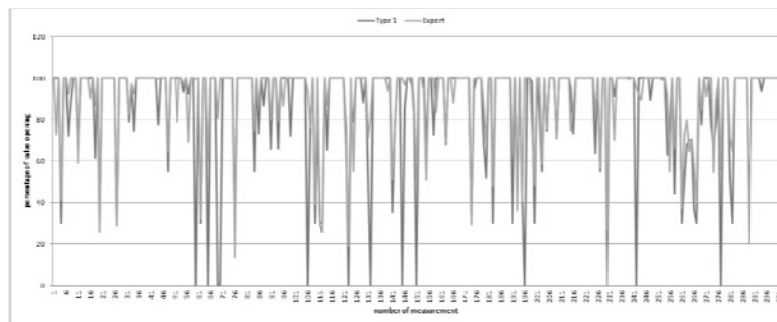
⁹ K.T. Atanassov, G. Gargov, *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets*, „Fuzzy sets and Systems” 1989, 31, s. 343-349.

cd. tabeli 1

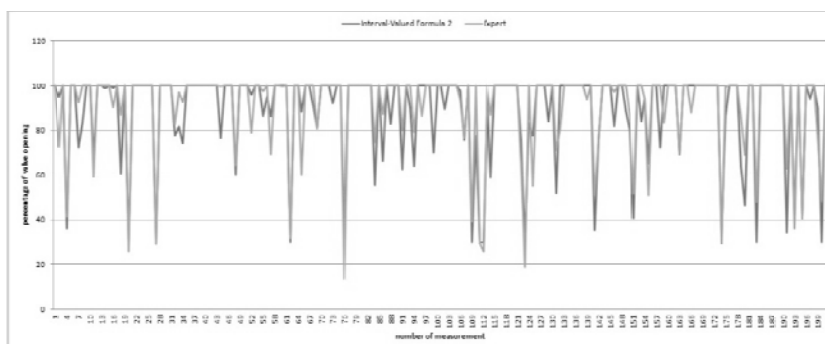
1	2	3
2	0,9443	Przedziałowy sterownik rozmyty z wyborem reguł na podst. (1)
3	0,9445	Przedziałowy sterownik rozmyty z wyborem reguł na podst. (2)
4	0,9441	Przedziałowy sterownik rozmyty z wyborem reguł na podst. (3)
5	[0,9413;0,9468]	Bez redukcji typu

Jak można zaobserwować w tab. 1, dzięki zastosowaniu przedziałowego sterownika rozmytego podobieństwo wyników to 0,024. Jeżeli weźmie się pod uwagę średniej wielkości zakład produkcyjny, który rocznie emituje około 8100 Mg tlenków azotu przy wykorzystaniu sterownika rozmytego typu 1, wówczas wykorzystanie przedziałowego sterownika rozmytego pozwoli w praktyce na zmniejszenie emisji o około 2450 t rocznie.

Przedstawiony eksperyment oraz wyniki nasuwają kilka wniosków w odniesieniu do danych, które zostały przetestowane. Pierwszy wniosek jest taki, że przy użyciu przedziałowych zbiorów rozmytych w sterowniku rozmytym otrzymuje się lepsze dopasowanie danych do oczekiwań eksperta niż w przypadku sterownika rozmytego typu 1. Z drugiego wniosku wynika, że w przypadku danych testowych wykorzystanych w eksperymencie użycie wzorów (1), (2) i (3) nie miało ewidentnego wpływu na wynik końcowy. Różnice w wartościach podobieństwa otrzymanych przy użyciu metod wyboru reguł (patrz wiersze 2-4 tab. 1) różnią się od siebie dopiero na czwartym miejscu dziesiętnym. Trzeci wniosek można wyciągnąć porównując dane wynikowe systemu przy wykorzystaniu bloku redukcji i bez niego. Kiedy dokona się redukcji typu obliczonych wartości (zbiorów rozmytych) mieszczą się one w przedziale danych obliczonych bez redukcji typu. Dlatego w przypadku wartości $p = 1$ (patrz wzór (1)) otrzymano lepsze dopasowanie wartości wyjściowej do danych określonych przez eksperta (patrz tab. 1). Zaprezentowane operacje i obliczenia pozwalają na wyciągnięcie końcowego wniosku, na podstawie którego można stwierdzić, że dalsze badania nad zastosowaniem sterowników rozmytych wyższych rzędów do zarządzania danymi o zanieczyszczeniu środowiska są warte kontynuowania.



Rys. 6. Wartości wyjścia sterownika rozmytego typu 1 oraz wartości oczekiwane określone przez eksperta



Rys. 7. Wartości wyjścia przedziałowego sterownika rozmytego z wyborem reguł na podstawie (2) oraz wartości oczekiwane określone przez eksperta

Podsumowanie i przyszła praca

Artykuł ten jest kontynuacją poprzedniej pracy Autorów na temat wykorzystania systemów logiki rozmytej do zarządzania danymi o zanieczyszczeniu powietrza¹⁰. Idea zastosowania tradycyjnych systemów logiki rozmytej została rozszerzona do zastosowania sterowników wyższych rzędów. Wyniki porównania wydajności systemu (proponowanych parametrów regulacji filtra) do danych podanych przez eksperta są lepsze niż w przypadku tradycyjnego sterownika rozmytego (tab. 1). W najbliższej przyszłości są planowane badania nad jeszcze dwoma zagadnieniami zastosowania logiki rozmytej w zarządzaniu danymi o zanieczyszczeniu powietrza. Pierwsze to zastosowanie sterownika rozmytego typu 2 z redukcją typu w rozumieniu Mendla. Drugą kwestią jest rozszerzenie funkcjonalności zaproponowanego kontrolera IVFS o wnioskowanie metodami implikacji rozmytych opartych na normach trójkątnych dla zbiorów rozmytych typu 2.

Literatura

- Christian R.A., Lad R.K., Deshpande A.W., Desai N.G., *Fuzzy MCDM Approach for Addressing Composite Index of Water and Air Pollution Potential of Industries*, „International Journal of Digital Content Technology and its Applications” 2008, Vol. 2, No. 2.
- Cirstea M.N., Dimu A., Khor J.G., McCormick M., *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*, Newnes, Oxford, Woburn 2002.
- Kacprowicz M., Niewiadomski A., *Managing Data on Air Pollution Using Fuzzy Controller* [in:] *Computer Methods in Practice*, eds. A. Cader, M. Yatsymirskyy, K. Przybyszewski, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2012.

¹⁰ M. Kacprowicz, A. Niewiadomski, op. cit.

- Niewiadomski A., *Methods for the Linguistic Summarization of Data: Applications of Fuzzy Sets and Their Extensions*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2008.
- Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Dz.U.1998.121.793, Warszawa, 8 września 1998.
- Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Łódź 1997.
- Sengupta A., Pal T.K., Chakraborty D., *Interpretation of Inequality Constraints Involving Interval Coefficients and a Solution to Interval Linear Programming*, „Fuzzy Sets and Systems” 2001, 119, s. 129-138.
- Tomsovic K., *Fuzzy Systems Applications to Power Systems*, 2000.
- Wierzchoń S.T., *Elementy teorii zbiorów rozmytych*, www.ipipan.waw.pl/stw/esi/sterowniki.pdf, 2009.

INTERVAL-VALUED FUZZY CONTROLLERS IN THE MANAGEMENT OF INFORMATION ON AIR POLLUTION

Summary

This article is a continuation of research on the possibilities of the use of fuzzy logic systems and higher-order fuzzy logic to control the air filters to reduce emissions of nitrogen oxides. The control process is non-linear, therefore, it is reasonable to use the fuzzy controllers. Described in this paper an interval-valued fuzzy controller (in sense Mamdani) uses interval-valued fuzzy sets compartments. They describe the use of terms of linguistic levels of nitrogen oxides at the input of the system and the degree of opening of the metering valve in the filter ammonia, based on data obtained from an expert. Using IF-THEN rules interval-valued fuzzy controller calculates the value of the output of the filter set on the basis of the analysis of data-input. The results obtained are very highly consistent with the data provided by the expert and better compared to those obtained with the traditional fuzzy controller, the use of which is presented in the articles.