

## PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA WNIOSKOWANIA TAKAGI-SUGENO W DIAGNOSTYCE NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

### THE EXAMPLE OF TAKAGI-SUGENO INFERENCE IN MACHINE TOOLS DIAGNOSTIC

*W artykule przedstawiono podstawowe założenia systemów logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno FL(TS). Następnie opisano wyniki badań systemów logiki rozmytej (systemów wnioskowania rozmytego) skonstruowanych w celu diagnozowania narzędzia skrawającego. Celem tych badań było porównanie sprawności systemów FL(TS) ze sprawnościami sieci neuronowych (FFBP) oraz systemami logiki rozmytej z wnioskowaniem Mamdani FL(MD).*

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, diagnostyka, obrabiarki

*The paper deals with some aspects of implementation of fuzzy logic system with Takagi – Sugeno inference FL(TS). In the first part of the paper, the basics of fuzzy logic inference are presented. Then, an example of Takagi-Sugeno inference application is depicted. The problem of cutting tool diagnostics is considered in this case. In order to generally assess the analysed fuzzy logic system, the performance comparison of Takagi-Sugeno fuzzy logic inference with Mamdani inference FL(MD) and performance of artificial neural network (FFBF) is discussed.*

**Keywords:** fuzzy logic, diagnostics, machine tool

#### 1 Wstęp

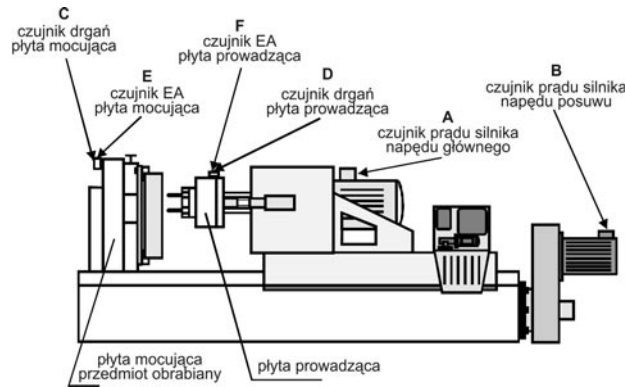
Postęp w automatyzacji procesów technologicznych a tym samym ograniczenie nadzoru operatora powoduje, że niezbędne staje się wyposażanie maszyn oraz centrów obróbkowych w układy diagnozujące. Układy diagnozujące narzędzie i proces skrawaniem (DNiPS) umożliwia między innymi poprawę dokładności wymiarowo kształtowej przedmiotu obrabianego. Na poprawność działania układów DNiPS wpływa wykorzystanie czujników przystosowanych do pracy w warunkach przemysłowych, rozwój metod przetwarzania danych oraz rozwój technik wspomaganie wnioskowania. Jednym ze sposobów wspomaganie wnioskowania jest zastosowanie systemów logiki rozmytej (systemów FL). Systemy te mogą być konstruowane jako systemy o strukturze Mamdaniego [3] oraz Takagi – Sugeno [3]. W artykule skoncentrowano się na systemach FL o strukturze Takagi – Sugeno. Wysokie sprawności tych systemów w zadaniach testowych [2] spowodowały, że postanowiono sprawdzić jak systemy FL(TS) będą klasyfikować stan zużycia wiertła. Badania przeprowadzono na wiertarce wielorzecionowej (10 wrzecion) do obróbki korpusów silników samochodowych [4]. Stanowisko do badań pokazano na Rys. 1, natomiast konfigurację torów pomiarowych oraz parametry obróbki w [4]. Przetwarzanie wstępne

oraz ekstrakcję cech każdego z zarejestrowanych sygnałów pomiarowych przeprowadzono w analogiczny sposób. W pierwszym kroku wybrano podrealizacje (części) zarejestrowanych sygnałów odpowiadających zasadniczej fazie wiercenia, tj. odrzucono części odpowiadające wejściu wiertła w materiał obrabiany oraz wycofaniu wiertła. W kolejnym kroku dokonano ekstrakcji 4 cech każdej z podrealizacji (wartość średnia; odchylenie standardowe; współczynnik kierunkowy trendu liniowego; odchylenie standardowe podrealizacji sygnału z usuniętym trendem liniowym).

W rezultacie przeprowadzonej ekstrakcji każdy z pomiarów był reprezentowany przez 24 cechy sygnałów pomiarowych oraz posuw ( $f$ ) i gatunek materiału (M). W ramach badań przeprowadzono 160 pomiarów. Pomiary przeprowadzono w 2 seriach (powtórzeniach) stanowiących podstawę utworzenia zbioru uczącego i zbioru testującego [4].

Ze wszystkich dostępnych danych (26 danych) wybrano wejścia o największej istotności według metod opisanych w [4]. W artykule skoncentrowano się jedynie na wejściach wyselekcjonowanych z zastosowaniem metody pruningu wag [4].

Zastosowane systemy FL mają za zadanie klasyfikować stan wiertła do jednego z trzech poziomów zużycia narzędzia, tj. narzędzie dobre, częściowo



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego  
Fig. 1. Schematics of the measuring set - up

zużyte oraz zużyte. Jeśli wartość wyjścia z systemu jest mniejsza od 0.3 przyjmuje się że wiertło jest dobre, jeśli wartość wyjścia mieści się w granicach  $0.3 \div 0.7$  narzędzie uważa się za częściowo zużyte, wiertło uważa się za zużyte jeśli wartość wyjścia jest większa od 0.7.

## 2. System logiki rozmytej o strukturze Takagi – Sugeno

System FL(TS) posiada warstwę wejściową i warstwę wejściowych funkcji przynależności oraz warstwę reguł analogiczną jak w klasycznym systemie logiki rozmytej (wnioskowanie Mamdani) [3]. Zasadnicza różnica widoczna jest w warstwie wyjściowych funkcji przynależności oraz w warstwie wyjściowej. W bazie reguł w konkluzjach stosowana jest zależność funkcyjna (1), co powoduje, że w strukturze Takagi-Sugeno nie występują jawnie wyjściowe funkcje przynależności oraz wyostrzanie.

Jeżeli  $x_1$  jest  $T_{x_1}^1$  i  $x_2$  jest  $T_{x_2}^2$  i ..... to

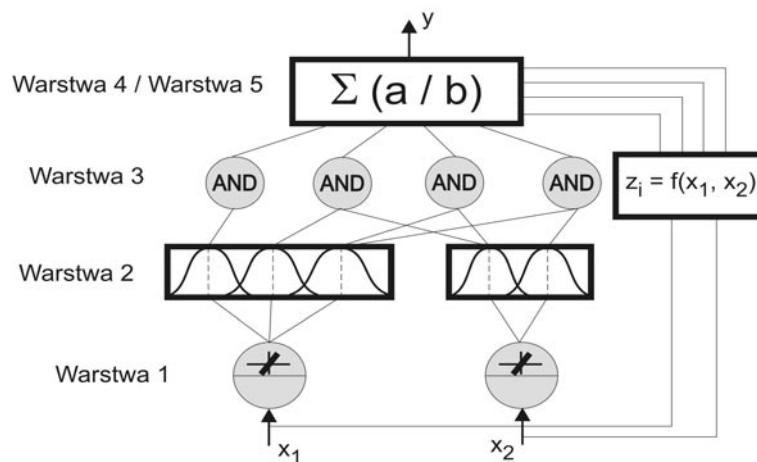
$$z = f(x_1, x_2, \dots) \quad (1)$$

Najczęściej zależność funkcyjna ma postać funkcji liniowej zgodnie z (2).

Jeżeli  $x_1$  jest  $T_{x_1}^1$  i  $x_2$  jest  $T_{x_2}^2$  i ..... to

$$z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + b \quad (2)$$

Funkcje wyższych rzędów nie wpływają w istotny sposób na dokładność obliczeń, a powodują jedynie utrudnienia w konstruowaniu systemu ze względu na zwiększenie liczby wyznaczanych współczynników  $a_i$ . W szczególnym przypadku kiedy współczynniki  $a_1 = a_2 = \dots = 0$ , konkluzja reguły przyjmuje wartość stałą  $b$ . W celu obliczenia wartości wyjściowej z systemu należy w pierwszym kroku wyznaczyć stopień aktywności reguł  $\alpha_i$ . Wyjście z systemu Takagi-Sugeno jest znormalizowaną sumą ważoną wyrażoną zależnością



Rys. 2 Struktura systemu FL(TS)  
Fig. 2 Structure of the system FL(TS)

(3) lub stosując znormalizowany stopień aktywności reguły, wyjście opisuje zależność (4).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad \text{oraz} \quad z_i = \sum_{k=1}^K a_k^i x_k + b \quad (3)$$

gdzie:  $N, K$  – odpowiednio, liczba reguł i liczba wejść do systemu;  $i$  – indeks reguły;

$$y = \sum_{i=1}^N \alpha_i z_i \quad \text{oraz} \quad \alpha_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (4)$$

### 3. Testy systemów logiki rozmytej o strukturze Takagi-Sugeno

Systemy logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno konstruowano w programie Matlab [1]. W tym pakiecie dostępny jest interfejs graficzny, który umożliwia konstruowanie systemów na dwa sposoby. Pierwszy sposób FL(TS) polega na konstruowaniu systemu z kompletną bazą reguł. Liczba reguł jest zależna od liczby arbitralnie przypisanych funkcji przynależności do wejść. Drugi sposób FL(TS-G) wykorzystuje metodę wstępnego grupowania danych wejściowych (subclustering) umożliwiającą określe-

nie liczby funkcji przynależności przypisanych do wejść. System FL(TS-G) wyznacza minimalną liczbę reguł.

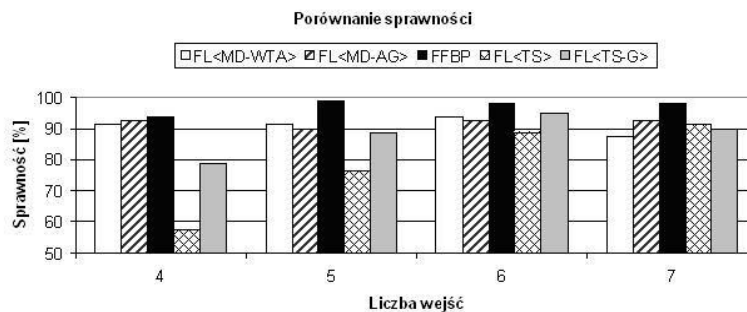
Sprawność systemu jest głównym kryterium porównania systemów. Sprawność wyznaczono zgodnie z zależnością (5).

$$\eta = \frac{(L - L_B)}{L} \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie:  $L$  – liczba wektorów testujących,  $L_B$  – liczba błędnie sklasyfikowanych wektorów testujących.

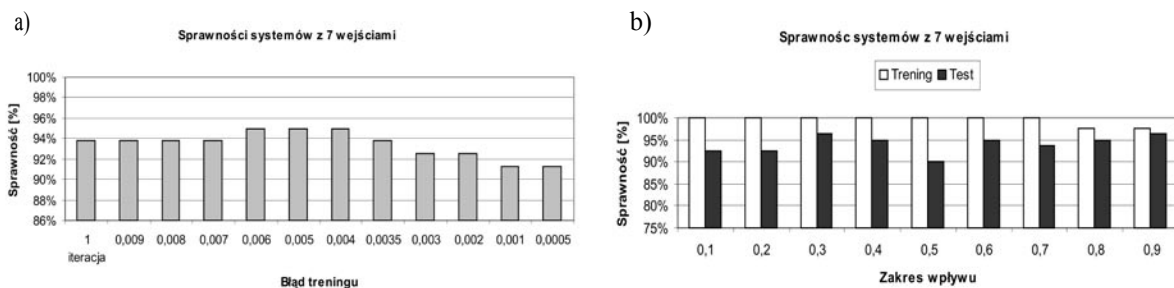
Testowano systemy o liczbie wejść 4, 5, 6 oraz 7. Trening systemu kończono, gdy błąd treningu nie ulegał zmniejszeniu w kilkunastu kolejnych iteracjach. Błąd treningu jest to odchylenie standardowe różnicy wartości wzorcowej oraz wyjściowej z systemu. Grupowanie danych dokonano ze standardowymi, programowymi ustawieniami parametrów określających otoczenie środka grupy [1]. Porównano sprawność systemów FL(TS), FL(TS-G) ze sprawnościami systemów FL(MD-WTA) [4], FL(MD-AG) [4], oraz sieci neuronowej FFBP dla każdej analizowanej liczby wejść (rys. 3).

Dla każdej liczby wejść w systemach FL(TS) analizowano jak na sprawność klasyfikacji wpływa warunek zakończenia treningu (rys. 4a). W pierwszym kroku trenowano system przez 1 iterację i sprawdzano sprawność systemu. W kolejnych krokach zmniejsza-



Rys. 3. Porównanie sprawności systemów

Fig. 3. Comparative of performance systems



Rys. 4. Sprawności systemów z 7 wejściami a) FL(TS) b) FL(TS-G)

Fig. 4. Performance of the system with 7 inputs a) FL(TS) b) FL(TS-G)

no założony błąd treningu i ponownie sprawdzano sprawność. Zmniejszanie błędu kontynuowano do momentu aż błąd treningu nie ulegał zmniejszeniu. Dla systemu FL(TS-G) sprawdzono jak na sprawność klasyfikacji wpływa zmiana parametru zasięg wpływu (range of influence) (rys. 4b). Jak widać z rys. 4 warunek zakończenia treningu jak również parametry grupowania danych w istotny sposób wpływają na sprawność systemów.

#### 4. Podsumowanie

Systemy logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno, dla kompletnych baz reguł bardzo dobrze klasyfikuje wektory trenujące (100% sprawności podczas treningu). Zwiększanie liczby funkcji przynależności przypisanych do wejść zwiększa znacząco liczbę reguł i nie prowadzi do zwiększenia sprawności. Podczas konstruowania systemu logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno FL(TS) system obliczał relatywnie dużo parametrów w stosunku do liczby wektorów trenujących, dlatego wyniki z przeprowadzonych prób mogą być jedynie wstępem do kolejnych badań. Bardzo duża liczba reguł wynika

z faktu, że nie dokonywano łączenia reguł oraz usuwania reguł, które nie były reprezentowane przez żaden z wektorów trenujących. Podejście z zastosowaniem wstępnego grupowania danych, umożliwia przyśpieszenie wnioskowania rozmytego oraz znacząco zmniejsza liczby reguł. Warunek zakończenia treningu oraz dobór współczynników grupowania danych jest dość problematyczny, dlatego uzasadnione wydaje się stosowanie trzech zbiorów danych: trenujących, weryfikujących oraz testujących. Na podstawie zbioru weryfikującego można wyznaczyć optymalne parametry niezbędne podczas treningu. Zaletą wnioskowania opartego na logice rozmytej jest wyrazistość i czytelność reguł. Baza reguł może być uzupełniana oraz modyfikowana przez operatora. Wiedza zapisana w bazie reguł może być w bardzo łatwy sposób odzyskiwana w postaci zrozumiałej dla człowieka postaci.

#### 5. Literatura

- [1] Fuzzy Logic Toolbox for Use with Matlab- User's Guide, The MathWorks, 2002.
- [2] Czyszpak T.: Praca dyplomowa magisterska: *Analiza systemów logiki rozmytej stosowanych w diagnostyce obrabiarki i procesie skrawaniem*, Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice 2003.
- [3] Sokołowski A., Czyszpak T.: *Systemy logiki rozmytej – struktura i konstruowanie*. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn nr 1/2003, Gliwice 2003.
- [4] Sokołowski A.: *Wybrane zagadnienia projektowania układów diagnostycznych obrabiarki i procesu skrawania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Mechanika, z. 142/1575, Gliwice 2003.

---

**Mgr inż. Tomasz CZYSZPAK**

*Politechnika Śląska*

*Katedra Budowy Maszyn*

*ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice*

*e-mail: czyszpak@kbn.mt.polsl.gliwice.pl*

---