

Wojciech KACALAK, Dariusz LIPIŃSKI, Robert TOMKOWSKI
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNEJ

Podstawy jakościowej oceny stanu powierzchni kształtowanych z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych

Prof. dr hab. inż. Wojciech KACALAK

Autor kieruje Katedrą Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w technologii maszyn, diagnostyce, optymalizacji i automatyzacji procesów technologicznych, budowie i eksploatacji precyzyjnych urządzeń technologicznych, mikro i nanoinżynierii oraz zastosowaniach sztucznej inteligencji. Jest vice przewodniczącym Komitetu Budowy Maszyn PAN.



e-mail: wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl

Dr inż. Dariusz LIPIŃSKI

W latach 1999 – 2005 asystent a od roku 2005 adiunkt w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do optymalizacji i oceny jakości procesów obróbki.



e-mail: dariusz.lipinski@tu.koszalin.pl

Mgr inż. Robert TOMKOWSKI

Od roku 2005 doktorant, a od roku 2008 pracownik na stanowisku Samodzielny Technik w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się modelowaniem i symulacją procesów obróbki oraz metrologią powierzchni technicznych.



e-mail: robert.tomkowski@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych pozwala na jakościową ocenę powierzchni na podstawie parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Zwiększa to komunikatywność oceny struktury geometrycznej powierzchni, która nie jest opisana wyłącznie przez szereg często złożonych, wielu parametrów. W pracy przedstawiono ocenę cech stereometrycznych powierzchni na przykładzie parametrów amplitudowych SGP. Zastosowanie metod wnioskowania rozmytego umożliwiło modelowanie lingwistyczne ujmujące stopień wpływu poszczególnych parametrów opisujących SGP na charakterystyczne cechy analizowanych powierzchni.

Słowa kluczowe: ocena stanu powierzchni, parametry SGP, logika rozmyta.

Foundations of qualitative evaluation of the state of surfaces shaped with use of the theory of fuzzy sets

Abstract

The application of the theory of fuzzy sets lets on the qualitative evaluation of the surface on the basis of parameters of the geometrical structure of surface. Enlarges this the communicability of the evaluation of the structure of the geometrical surface which is not described exclusively by the series often confounding of many parameters. This paper is introduced to evaluation the guild of surface stereometry on the example of amplitude parameters. The using of fuzzy logic methods makes possible the creation of the linguistic model which contains influence of each parameters describing the surface stereometry on the correct classification.

Keywords: evaluation of the state of the surface, parameters of the surface geometrical structure, fuzzy logic.

1. Wprowadzenie

Podstawowym celem procesów obróbki jest zapewnienie wytwarzanym elementom wymaganych cech eksploatacyjnych, zgodnie z ich przeznaczeniem użytkowym. Procesy obróbkowe, powodujące w swym następstwie zmiany struktury geometrycznej powierzchni wytwarzanych elementów, są procesami o pewnym stopniu losowości i zmienności.

Struktura geometryczna obrobionej powierzchni jest wynikiem nakładania się i kumulacji wielu elementarnych zmian w jej topografii. Zmienność i złożoność struktury stereometrycznej jest czynnikiem, który znacznie utrudnia jej ocenę i powoduje, że wynik oceny jest skutkiem przetwarzania informacji niepełnej, niepewnej i, w pewnym zakresie, również nieścisłej. To wszystko powoduje, że dotąd nie opracowano wystarczająco dokładnych podstaw doboru takich zbiorów parametrów oceny, które byłyby zbiorami parametrów wystarczająco komplementarnych i zapewniających kompromis między licznością zbioru, a wymaganą jakością oceny powierzchni określonego typu.

Dąży się do tego, aby podstawą oceny struktury geometrycznej powierzchni był dobór parametrów pozwalający w sposób jednoznaczny ocenić jej cechy eksploatacyjne. Lepsze powiązanie wartości zbioru parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni z odpowiadającymi im cechami eksploatacyjnymi wymaga jeszcze wielu pracochłonnych badań, a warto zauważyć, iż różnorodność i zmienność warunków eksploatacji powierzchni nie jest ograniczona.

Już prosta analiza zakresów parametrów struktury geometrycznej powierzchni, możliwych do uzyskania w wyniku kształtowania powierzchni w określonych procesach obróbki, wskazuje na różnorodną przydatność poszczególnych parametrów do identyfikacji powierzchni o odmiennych cechach i różnych warunkach planowanego ich użytkowania.

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych ułatwia przeprowadzenie jakościowej klasyfikacji powierzchni na podstawie parametrów oceny jej struktury geometrycznej. W klasyfikacji tego typu poszczególne klasy powierzchni mogą być opisane symbolicznie lub słownie. Zwiększa to komunikatywność oceny struktury geometrycznej powierzchni, która nie jest opisana wyłącznie przez szereg często uwikłanych parametrów. Taka ocena może być następnie podstawą do określenia syntetycznego wskaźnika zgodności z wymaganiami i oceny stopnia przydatności do planowanego zastosowania powierzchni.

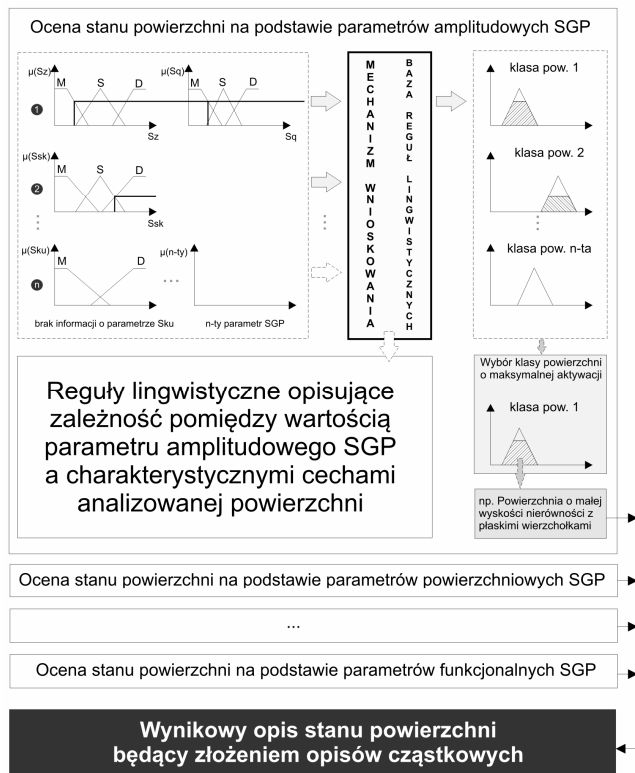
2. Założenia jakościowej oceny stanu powierzchni z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych

Do jakościowej oceny stanu powierzchni wykorzystano teorię zbiorów rozmytych [1, 2]. Pozwala ona na ocenę w warunkach, gdy elementarne składowe oceny są skutkiem niepewności i nieścisłości opisu różnych cech powierzchni i może być oceniony stopień ich przynależności do kategorii określonego typu.

Innym powodem zastosowania wnioskowania rozmytego jest potrzeba normalizacji wartości różnych parametrów, które charakteryzują się znacznie różniącymi się wartościami miar położenia i rozproszenia wyników pomiaru. Zwykła normalizacja, poprzez wyznaczenie wartości względnych, nie spełnia postulatów dokona-

nia takiej oceny, która uwzględniałaby skutki przekroczenia granicznych wartości przez choćby jeden z parametrów.

Modele rozmyte można stosować w procedurach sekwencyjnych. W przypadku, gdy nie mamy informacji o wartościach niektórych parametrów, to w wyniku działania modelu otrzymamy jedynie informację przybliżoną, a w miarę podawania na wejście systemu dodatkowych parametrów wynikowy opis charakteryzujący stan powierzchni będzie coraz pełniejszy.



Rys. 1. Schemat ogólny jakościowej oceny stanu powierzchni
Fig. 1. The general schema of the qualitative evaluation of the surface state

Zastosowanie zbiorów rozmytych pozwala na wprowadzenie do systemu klasyfikacji nie tylko wiedzy eksperymentalnej, ale również wiedzy eksperckiej. Wiedza ta przedstawiona jest w sposób jawny, w postaci reguł: JEŻELI ... TO. W konsekwencji działania takiego systemu na podstawie jakościowej oceny parametrów struktury geometrycznej powierzchni otrzymuje się zorientowany lingwistycznie opis stanu analizowanej powierzchni.

3. Podstawy jakościowej klasyfikacji z wykorzystaniem zbiorów rozmytych

3.1. Analiza zawartości informacyjnej parametrów SGP

Ocenę stanu struktury geometrycznej powierzchni (3D) przeprowadzać można obecnie z wykorzystaniem kilkudziesięciu parametrów [3, 4]. Parametry ujmujące w sposób ogólny stan powierzchni są ze sobą często silnie skorelowane. Parametry charakteryzujące określone szczegółowe cechy powierzchni wykazują wysoką korelację z wieloma ogólnymi, a niską z niektórymi innymi parametrami szczegółowymi.

Podstawowe parametry struktury geometrycznej powierzchni przedstawiono poniżej [5]:

- parametry amplitudowe:
 - średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości Sa ,
 - średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni Sq ,
 - maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni Sp ,
 - maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni Sv ,

- wysokość nierówności St ,
- współczynnik skośności rozkładu rzędnych Ssk ,
- współczynnik skupienia rozkładu rzędnych Sku ,
- dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni Sz ,
- parametry przestrzenne:
 - gęstość wzniesień między określonymi przekrojami Spc ,
 - gęstość wierzchołków nierówności powierzchni Sds ,
 - wskaźnik tekstury powierzchni Str ,
 - długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji Sal ,
 - kierunek tekstury powierzchni Std ,
- parametry powierzchniowe i objętościowe,
 - udział nośny na zadanej wysokości $SHTp$,
 - wysokość obszaru nośności $SHTp$,
 - średnia objętość materiału $Smmr$,
 - średnia objętość pustek $Smvr$,
- parametry hybrydowe,
- parametry funkcjonalne,
- parametry krzywej nośności.

W dalszej analizie skupiono się głównie na parametrach amplitudowych, przestrzennych, powierzchniowych i objętościowych z uwagi na ich ogólny charakter, pozwalający na klasyfikację całego szeregu powierzchni, a nie tylko pewnych ich szczególnych cech. Jako przykład do analizy przyjęto dane zawarte w obszernym opracowaniu [5] dla liczego zbioru powierzchni kształtowanych w różnych metodach obróbki.

Zawartość informacyjna poszczególnych parametrów SGP jest wyraźnie zróżnicowana. Wiele parametrów w danej grupie jak również między grupami jest silnie skorelowana. Korelację analizowanych parametrów dla 60 powierzchni przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Współczynniki korelacji parametrów SGP (kolorem szarym wyróżniono współczynniki o istotnej korelacji ≥ 0.9)

Tab. 1. Coefficients of correlation of surface parameters (with the grey color one favored coefficients about the essential correlation ≥ 0.9)

| | parametry amplitudowe | | | | | | | parametry przestrzenne | | | | | parametry powierzchniowe i objętościowe | | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|---|--------|--------|--------|
| | Sa | Sq | Sp | Sv | St | Ssk | Sku | Sz | Spc | Sds | Str | Sal | Std | $SHTp$ | $Smmr$ | $Smvr$ |
| Sa | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sq | 0.99 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sp | 0.93 | 0.94 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| Sv | 0.89 | 0.90 | 0.97 | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| St | 0.92 | 0.93 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| Ssk | 0.07 | 0.08 | 0.10 | -0.01 | 0.05 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| Sku | -0.12 | -0.12 | -0.11 | -0.05 | -0.08 | -0.57 | 1.00 | | | | | | | | | |
| Sz | 0.94 | 0.95 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.06 | -0.09 | 1.00 | | | | | | | | |
| Spc | 0.37 | 0.36 | 0.52 | 0.58 | 0.55 | -0.15 | 0.00 | 0.51 | 1.00 | | | | | | | |
| Sds | -0.20 | -0.20 | -0.19 | -0.14 | -0.17 | -0.45 | 0.55 | -0.17 | -0.05 | 1.00 | | | | | | |
| Str | -0.02 | -0.01 | 0.06 | 0.11 | 0.08 | -0.31 | 0.38 | 0.06 | 0.27 | 0.04 | 1.00 | | | | | |
| Sal | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | -0.15 | 0.03 | -0.07 | -0.24 | 0.04 | 1.00 | | | | |
| Std | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.07 | 0.05 | 0.00 | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0.33 | 0.24 | 1.00 | | | |
| $SHTp$ | 1.00 | 0.99 | 0.91 | 0.87 | 0.90 | 0.08 | -0.12 | 0.92 | 0.31 | -0.20 | -0.05 | 0.01 | -0.02 | 1.00 | | |
| $Smmr$ | 0.88 | 0.89 | 0.95 | 0.98 | 0.97 | -0.01 | -0.06 | 0.97 | 0.57 | -0.13 | 0.08 | 0.01 | 0.06 | 0.85 | 1.00 | |
| $Smvr$ | 0.92 | 0.93 | 0.99 | 0.96 | 0.99 | 0.10 | -0.10 | 0.98 | 0.51 | -0.18 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.90 | 0.95 | 1.00 |

Analiza korelacji poszczególnych parametrów prowadzi do stwierdzenia wyraźnej zależności parametrów wewnątrz grupy parametrów amplitudowych (z wyłączeniem parametrów Ssk i Sku) i grupy parametrów powierzchniowych i objętościowych, jak również między poszczególnymi parametrami z tych grup.

Korelacja między parametrami z grupy parametrów amplitudowych wynika w głównej mierze z samej definicji tych parametrów (np. parametry Sp , Sv i St , parametry Sa i Sq). Wyraźna korelacja parametrów z grupy parametrów amplitudowych z parametrami z grupy parametrów powierzchniowych i objętościowych wynika natomiast z podobnego charakteru obu grup.

Do klasyfikacji powierzchni z grupy parametrów amplitudowych wybrano parametry: Ssk , Sku i Sz . Parametry Ssk i Sku przyjęto z uwagi na ich małą korelację z pozostałymi parametrami w tej grupie. Natomiast parametr Sz uwzględniono ze względu na wyraźne powiązanie informacyjne z pozostałymi parametrami. Parametr Sz informuje pośrednio o wysokości nierówności, a nie jest wrażliwy na wpływ pojedynczych przypadkowych wzniesień i wgłębień. Wykazuje również wyraźną korelację wynikającą z charakteru rozkładu rzędnych powierzchni z parametrami Sa i Sq . Parametr Sz ma wysokie zdolności uogólniające (jest wysoko skorelowany również z parametrami z grupy parametrów powierzchniowych i objętościowych) natomiast parametry Ssk i Sku , wrażliwe na charakterystyczne wzniesienia i wgłębienia pozwalają na uszczegółowienie informacji o kształcie powierzchni.

3.2. Jakościowa ocena stanu powierzchni z wykorzystaniem zbiorów rozmytych na przykładzie parametrów amplitudowych SGP

Zasada działania rozmytego systemu jakościowej oceny stanu powierzchni przedstawia się następująco:

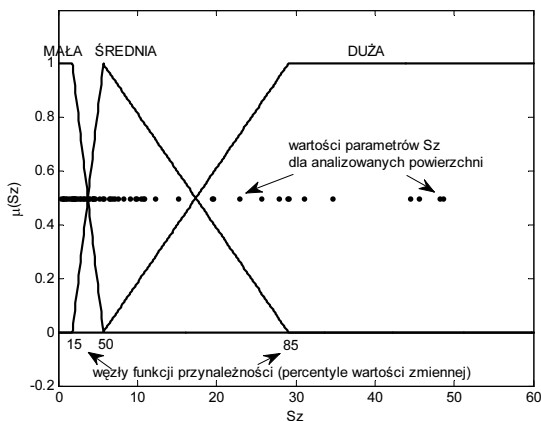
- wprowadzenie do systemu wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni (nie wszystkie wartości parametrów muszą być określone),
- rozmycie wartości parametrów i ocena ich stopnia przynależności do poszczególnych kategorii,
- wnioskowanie na podstawie zbioru reguł, określenie stopnia aktywacji poszczególnych klas powierzchni,
- wybór klasy powierzchni o najwyższym stopniu aktywacji, wygenerowanie odpowiedzi w postaci słownego opisu charakterystycznych cech powierzchni.

Rozmycie ostrych wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzane jest z wykorzystaniem zbiorów rozmytych opisujących stopień przynależności określonej wartości parametru do poszczególnych zbiorów określonych w jej przestrzeni lingwistycznej.

Z uwagi na znaczny zakres wartości parametru Sz oraz z uwagi na jego dużą zawartość informacyjną założono, że przestrzeń lingwistyczna zmiennej Sz opisana będzie zbiorem:

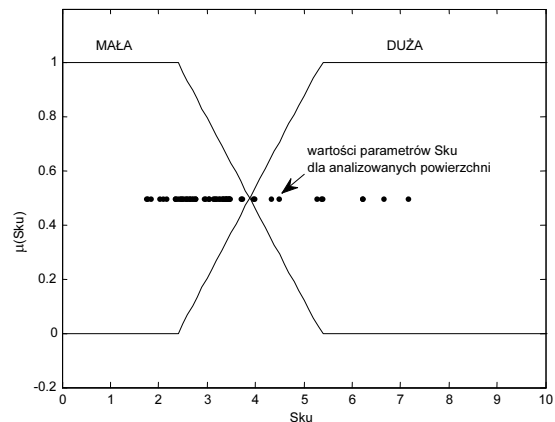
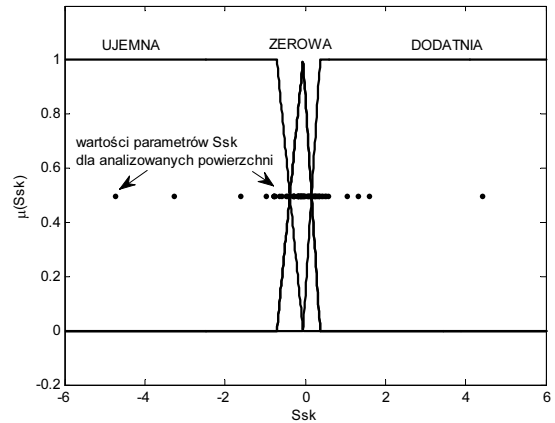
$$Sz = \{\text{mała, średnia, duża}\} \quad (1)$$

Parametry wielokątnych funkcji rozmytych określających stopień przynależności wartości parametru Sz do poszczególnych zbiorów rozmytych określono wyliczając odpowiednie percentyle (15-ty, 50-ty, 85-ty) wartości zmiennej (rys. 2).



Rys. 2. Funkcje przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych parametru Sz
 Fig. 2. Functions of belongings to particular fuzzy sets of the parameter Sz

Podobne założenia przyjęto przy określaniu zbiorów rozmytych dla zmiennych Ssk i Sku . Zbiory rozmyte służące do jakościowej analizy tych parametrów przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Funkcje przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych parametru Ssk i Sku

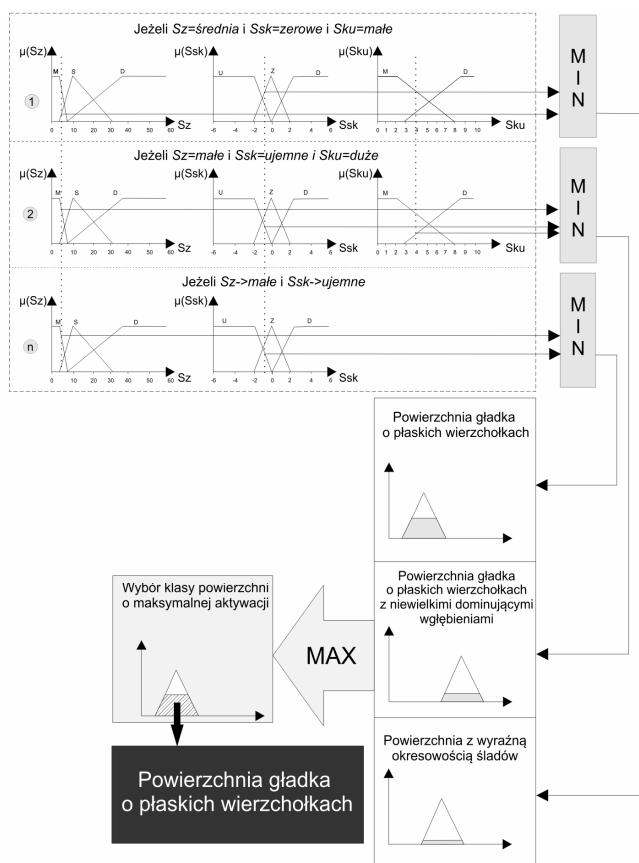
Fig. 3. Functions of belongings to particular fuzzy sets of the parameter Ssk and Sku

Kolejnym krokiem jest wnioskowanie na podstawie bazy reguł zawierających reguły logiczne określające zależności pomiędzy stanem analizowanej powierzchni a wartościami opisujących ją parametrów. Dla powyżej zdefiniowanych zbiorów rozmytych umożliwiających jakościową ocenę analizowanych parametrów stworzono zbiór 28 reguł opisujących stan powierzchni określony zbiorem wybranych parametrów amplitudowych.

Tab. 2. Wybrane reguły oceny stanu powierzchni
 Tab. 2. Chosen rules of the evaluation state of the surface

| | Wartość parametru (przesłanka) | | | | Klasa powierzchni (konkluzja) |
|--------|--------------------------------|----------|-------|----|--|
| | Sz | Ssk | Sku | | |
| Jeżeli | mała | ujemna | - | to | powierzchnia gładka o płaskich wierzchołkach |
| Jeżeli | mała | ujemna | duża | to | powierzchnia gładka o płaskich wierzchołkach z niewielkimi dominującymi wgłębieniami |
| Jeżeli | mała | dodatnia | - | to | powierzchnia gładka o ostrych wzniesieniach |
| Jeżeli | mała | dodatnia | duża | to | powierzchnia gładka z nielicznymi dominującymi ostrymi wierzchołkami |
| ... | | | | | |
| Jeżeli | średnia | zerowa | mała | to | powierzchnia z wyraźną okresowością śladów |
| Jeżeli | duża | dodatnia | mała | to | powierzchnia chropowata o ostrych wierzchołkach |

Mechanizm wnioskujący na podstawie opracowanego zbioru reguł ocenia stopień aktywacji konkluzji poszczególnych reguł. Następnie wybierana jest konkluzja o najwyższej aktywacji i to ona stanowi o wynikowej ocenie stanu powierzchni. Przykładową zasadę działania mechanizmu wnioskującego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykład mechanizmu wnioskowania
Fig. 4. Example of fuzzy logic inference

4. Podsumowanie

W rezultacie działania przedstawionego systemu wnioskowania otrzymuje się opisową charakterystykę stanu powierzchni. Powyższy przykład dotyczy jedynie oceny na podstawie wybranego zbioru parametrów amplitudowych (mało liczny ze względu na dążenie do przejrzystości prezentacji problemu). Rozszerzenie systemu wnioskowania o reguły analizujące cechy powierzchni opisane przez inne grupy parametrów lub kombinacje parametrów z różnych grup, a nawet relacje między różnymi parametrami, pozwala wzbogacać opisową charakterystykę stanu powierzchni.

Opisana metoda pozwala również na wprowadzenie do systemu wnioskowania reguł informujących nie tylko o cechach analizowanych powierzchni. Możliwe jest wprowadzenie do systemu szczegółowych informacji o znanym wpływie parametrów struktury geometrycznej powierzchni na cechy eksploatacyjne powierzchni.

Z kolei opracowanie szerokiego zbioru reguł wnioskowania pozwala na wzbogacenie informacji o stanie powierzchni i zapewnia ocenę stopnia zgodności jej topografii z wymaganiami topografii wzorcowej lub oczekiwanej.

5. Literatura

- [1] A. Piegat: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
- [2] L. Rutkowski: Metody i Techniki Sztucznej Inteligencji. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [3] P. Pawlus: Topografia powierzchni. Pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
- [4] D.J. Whitehouse: Handbook of Surface and Nanometrology. Institute of Physics Publishing Bristol in Philadelphia, 1994.
- [5] K.E. Oczkoś, V. Liubimov: Struktura Geometryczna Powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [6] W. Kacalak, W. Śmiałek, P. Stępień: Wpływ parametrów polerowania ściernicami elastycznymi na topografię wygładzanej powierzchni. Postępy w Technice Wytwarzania. Kolobrzeg 1978, str. 305-311.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do prenumeraty czasopisma PAK w 2008 roku

Cena prenumeraty rocznej: 192,00 zł netto/1 egz.

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa, tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b, tel./fax: 032 237 19 45,
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl, www.pak.info.pl