

Włodzimierz MAKIEŁA, Damian GOGOLEWSKI

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA W KIELCACH, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN

## Badania wpływu transformaty falkowej na parametry stereometrii powierzchni

Dr hab. inż. Włodzimierz MAKIEŁA

Jest profesorem nadzwyczajnym w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami inżynierii jakości oraz podstaw metrologii i pomiarów wielkości geometrycznych, a w szczególności analizą amplitudowo-częstotliwościową zarysów chropowatości, prostoliniowości i okrągłości. Posiada ponad 20-letnią praktykę pracy w przemyśle w zapleczu naukowym branży armatury przemysłowej.



e-mail: [wmakiela@tu.kielce.pl](mailto:wmakiela@tu.kielce.pl)

Mgr inż. Damian GOGOLEWSKI

Jest absolwentem Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Od 2012 roku doktorant w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się zagadnieniami metrologii SGP, a w szczególności analizą falkową zarysów trójwymiarowych.



e-mail: [dgogolewski@tu.kielce.pl](mailto:dgogolewski@tu.kielce.pl)

### Streszczenie

Autorzy podjęli próbę oceny maksymalnego poziomu dekompozycji zmierzonego zarysu, na którym nie następuje istotna utrata charakteru powierzchni zmierzonej oraz próbę określenia, która falka bazowa w największym stopniu nadaje się do analizy danej powierzchni. Opracowano procedury komputerowe wykorzystane do badania wybranych parametrów chropowatości powierzchni 3D pod kątem względnej zmiany ich wartości, na kolejnych poziomach dekompozycji, za pomocą różnych falek bazowych. W artykule pokazano wyniki tych obliczeń.

**Słowa kluczowe:** transformata falkowa, chropowatość powierzchni, dekompozycja, aproksymacja.

### A study of the effect of wavelet transform on surface stereometry parameters

#### Abstract

A wavelet transform uses a wide range of mother wavelets. Each group has different properties of wavelets so the appropriate wavelet choice is important for further signal analysis. Various mother wavelets can be successfully used for the surface analysis. However, the results obtained for particular mother wavelets at subsequent levels of decomposition are significantly different from each other. The literature related to the wavelet analysis does not explicitly determine until which level of decomposition the analyzed signal does not differ significantly from the original image. The authors have attempted to assess the maximum level of decomposition of the original image for which the signal does not lose its characteristics and to determine which mother wavelet is most suitable for analysis of this surface. To do it, the authors have written computer procedures coded in MATLAB. These procedures analyze the selected roughness parameters of a 3D surface by considering the relative change of their values at subsequent levels of decomposition for different mother wavelets. Section 1 contains the introduction related to the surface roughness parameters [1, 2, 3, 6]. Section 2 provides the information about a discrete wavelet transform [4, 5]. In Section 3 there are presented the results for relative changes of selected surface roughness parameters in an analytical (Tab. 1-4) and graphical way (Fig. 2-5), at subsequent levels of decomposition using different mother wavelets. Section 4 provides the summary and conclusions.

**Keywords:** wavelet transform, surface roughness, decomposition, approximation.

### 1. Wstęp

Warstwa wierzchnia powierzchni części maszyn, uzyskana w wyniku obróbki skrawaniem charakteryzuje się dość dużą nieregularnością. Nierówności występujące na powierzchni elementów maszyn mają istotne znaczenie podczas późniejszej pracy całej maszyny. Mogą one powodować wiele niekorzystnych zjawisk m.in. powstawanie drgań, szumów czy nadmiernego tarcia między współpracującymi elementami maszyny. Aby je zminimalizować współpracujące ze sobą powierzchnie muszą być wykonane w taki sposób, by wszystkie składowe struktury geometrycznej

powierzchni tj. zarys kształtu, falistość i chropowatość powierzchni zawierały się w granicach tolerancji przyjętych w trakcie procesu technologicznego [1, 2, 3].

Chropowatość powierzchni jest to zbiór punktów znajdujących się na powierzchni przedmiotu, charakteryzująca się relatywnie małym stosunkiem między średnimi odległościami pomiędzy wierzchołkami, a ich średnią wysokością [1]. Przyjmuje się, dla chropowatości iż stosunek tych wartości jest mniejszy od 40. Chropowatość powierzchni wpływa na własności eksploatacyjne przedmiotu takie jak współczynnik tarcia, zużycie powierzchni trących, wytrzymałość zmęczeniową itp. Chropowatość zależy m.in. od rodzaju materiału obrabianego, warunków obróbki, nierówności powierzchni ostrza skrawającego oraz jego promienia zaokrąglenia, narostu na ostrzu, statycznej i dynamicznej sztywności układu obrabiarka-przedmiot-narzędzie, czy też od użytej cieczy smarująco-chłodzącej.

Stosowanych jest wiele parametrów chropowatości opisujących stereometrię powierzchni. Parametry stosowane w ocenie powierzchni opisano w normie PN-EN ISO 25178-2:2012 [6]. Zgodnie z tą normą parametry dzieli się na: wysokościowe, przestrzenne, hybrydowe, funkcyjne oraz mieszane.

Do parametrów wysokościowych zaliczono:

- średnie kwadratowe odchylenie powierzchni –  $Sq$
- współczynnik skośności powierzchni –  $Ssk$
- współczynnik nachylenia powierzchni –  $Sku$
- średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni –  $Sa$
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni –  $Sa$
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni –  $Sv$
- wysokość nierówności powierzchni –  $Sz$

Parametry przestrzenne obejmują:

- długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji –  $Sal$
- wskaźnik tekstury powierzchni –  $Str$

Parametry hybrydowe dzieli się na:

- średnie kwadratowe pochylenie nierówności powierzchni –  $Sdq$
- wskaźnik względnego przyrostu powierzchni –  $Sdr$

Kolejną grupą są funkcje i parametry z nimi związane:

- wartość udziału materiałowego na określonej głębokości –  $Smr(c)$
- odwrotny powierzchniowy udział materiałowy powierzchni –  $Smc(mr)$
- współczynniki materiałowe –  $Smr1, Smr2$
- chropowatość rdzenia –  $Sk$
- głębokość chropowatości wierzchołków –  $Spk$
- głębokość chropowatości dolin –  $Svk$
- Stosunek materiałowy na przejściu płaskowyż – dolina –  $Smq$
- Średnia kwadratowa nierówność płaskowyżu –  $Spq$
- Średnia kwadratowa nierówność dolin –  $Svq$
- funkcja objętość – skala –  $Svs(s)$
- funkcja przestrzeń – skala –  $Srel(s)$

- złożoność objętości fraktalnej -  $Svfc$
- przestrzeń objętości fraktalnej -  $Safc$
- skala podziału gładki – szorstki -  $fSRC$
- próg -  $Th$
- objętość pustek dolin -  $Vvv$
- objętość pustek rdzenia -  $Vvc$
- objętość materiału wierzchołków -  $Vmp$
- objętość materiału rdzenia -  $Vmc$
- skrajna wysokość szczytu -  $Sxp$

Ostatnią grupę stanowią parametry mieszane:

- kierunek tekstury powierzchni -  $Std$

Istotną kwestią jest zatem konieczność monitorowania zmian parametrów chropowatości powierzchni, co pozwala na podjęcie odpowiednich działań w przypadku przekroczenia założonych tolerancji.

Metody pomiaru chropowatości powierzchni, uwzględniając sposób kontaktu urządzenia pomiarowego z badaną powierzchnią, dzielimy na dwie grupy: stykowe oraz bezstykowe. Do pomiarów bezstykowych zaliczamy wszelkie metody, w których badana powierzchnia nie ma bezpośredniego kontaktu z głowicą pomiarową podczas wykonywania pomiaru. Podczas pomiaru struktury geometrycznej powierzchni metodą stykową ostrze odwzorowujące przesuwają się po badanej powierzchni ze stałą prędkością. Końcówka pomiarowa dzięki naciskowi styka się z badaną powierzchnią, odwzorowując wszelkie nierówności występujące na powierzchni.

## 2. Analiza falkowa

Rozwój techniki wymusza stosowanie coraz dokładniejszych metod analizy sygnałów pomiarowych. Jedną z najnowocześniejszych jest transformata falkowa. Dokonując kompresji sygnałów z wykorzystaniem transformaty falkowej zakładamy, że analizowany sygnał można przedstawić z pewną, wystarczającą dokładnością przez zmniejszoną liczbę współczynników. Jest to matematyczna metoda wyodrębnienia z sygnału tego, co jest najbardziej istotne oraz usunięcie zbędnych szumów [4, 5].

Transformata falkowa stosowana jest do analizy sygnałów niestacjonarnych. W procesie obróbki ubytkowej nie jest możliwe spełnienie warunku, aby powierzchnia po obróbce była idealnie gładka. Niezależnie od stosowanej metody obróbki na powierzchni występują nieregularności zatem profil chropowatości powierzchni ma charakter niestacjonarny.

Dyskretna transformata falkowa sygnału  $x(t)$  dla danej falki  $\Psi(t)$  po przyjęciu założenia dyskretyzacji sygnału  $x(t)$  oraz warunków mówiących, że parametry można zapisać w postaci systemu dwójkowego:

$$\sigma = 2^{-s} \quad \tau = 2^{-s} \cdot l \quad (1)$$

gdzie:

- $\tau$  – przesunięcie w czasie
  - $\sigma$  – częstotliwość
  - $l$  – współczynnik przesunięcia
  - $s$  – współczynnik skali
- definiuje się jako:

$$W(\tau, \sigma) = 2^{s/2} \sum_n x(n) \Psi(2^s \cdot n - l) \quad (2)$$

Sygnał podczas analizy za pomocą transformaty falkowej jest filtrowany za pomocą dwóch filtrów: jeden niskoczęstotliwościowy, drugi natomiast wysokoczęstotliwościowy. Oryginalny sygnał, zatem jest podzielony na dwa inne sygnały: aproksymację ( $A_i$ ) oraz detale ( $d_i$ ). Aproksymacje to elementy o wysokiej skali i niskiej częstotliwości, natomiast detale to elementy o niskiej skali oraz wysokiej częstotliwości. Na każdym poziomie dekompozycji sygnał poddawany jest operacji polegającej na zmniejszeniu liczby współczynników poprzez uśrednienie wartości współczynników z sobą sąsiadujących. Operacja ta powoduje,

że sygnał nie zmienia swojej długości na kolejnych poziomach dekompozycji.

Transformata falkowa jest transformatą bezstratną, na dowolnym i-tym poziomie dekompozycji można dokonać rekonstrukcji sygnału, by otrzymać sygnał identyczny z oryginalnym.

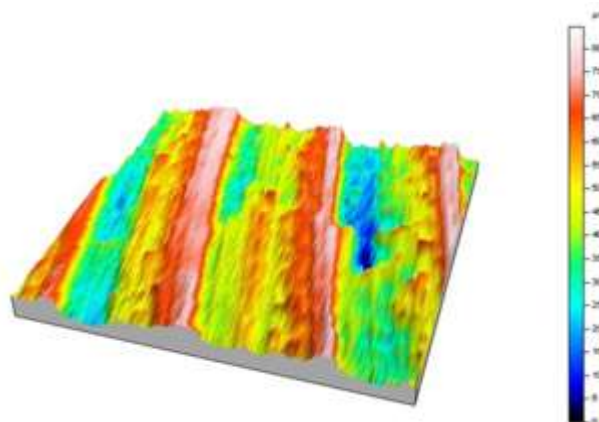
$$x(t) = A_i + \sum_i d_i \quad (3)$$

Transformata falkowa umożliwia analizowanie zarówno sygnałów 2D jak i 3D. Podczas filtrowania obrazów analiza najpierw jest wykonywana na wierszach, a następnie na kolumnach macierzy. Oryginalny sygnał, jest zatem podzielony na sygnał będący zgrubnym przybliżeniem oryginalnego sygnału - aproksymacje oraz trzy sygnały detali. Detale zliczane są w kierunku pionowym ( $V_i$ ), poziomym ( $H_i$ ) oraz po przekątnej ( $D_i$ ).

## 3. Proces dekompozycji dla wybranej próbki

Analizie została poddana powierzchnia próbki frezowanej. Pomiar został wykonany na profilometrze stykowym Form Talysurf PGI 1200 firmy Taylor Hobson. Powierzchnia próbki została zmierzona wzdłuż 40 równoległych linii uzyskując 160 000 punktów pomiarowych profilu.

Na rysunku 1 przedstawiono obraz izometryczny powierzchni badanej próbki.



Rys. 1. Obraz izometryczny powierzchni  
Fig. 1. Isometric view of the surface

Do analizy powierzchni można z powodzeniem stosować różne falki bazowe. Jednak otrzymane wyniki dla poszczególnych falek na kolejnych poziomach dekompozycji w istotny sposób różnią się od siebie. Aby zoptymalizować dobór falki bazowej został napisany autorski program komputerowy, który jest kompatybilny ze środowiskiem MATLAB. Za pomocą tego programu są obliczane wybrane parametry chropowatości na kolejnych poziomach dekompozycji, dla wskazanej przez użytkownika falki bazowej. Program realizuje proces usuwania szumów oraz rekonstrukcję zarysów.

W procesie aproksymacji następuje wygładzenie zmierzonego sygnału, co powoduje zmianę wartości parametrów go opisujących. Przeprowadzone badania miały na celu określenie maksymalnego poziomu aproksymacji sygnału, bez istotnej utraty charakteru powierzchni zmierzonej.

Do oceny zmienności geometrii dekomponowanego zarysu wybrano następujące parametry:

- średnie kwadratowe odchylenie powierzchni -  $Sq$
- współczynnik skośności powierzchni -  $Ssk$
- współczynnik nachylenia powierzchni -  $Sku$
- średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni -  $Sa$

Każdy z wymienionych parametrów był badany pod kątem względnej zmiany wartości na kolejnych poziomach dekompozycji za pomocą siedmiu falek bazowych:  $db1$ ,  $db5$ ,  $db12$ ,  $coif1$ ,

coif3, sym4, bior2.4. Wielkość tej zmiany określona jest wg. wzoru:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (4)$$

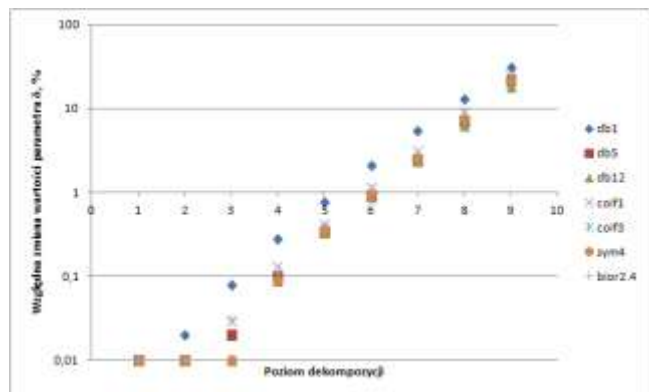
$\Delta x$  - bezwzględna wartość różnicy wartości rzeczywistej i otrzymanej wartości na danym poziomie dekompozycji, liczona dla każdego parametru,  
 $x$  - wartość rzeczywista, obliczona dla obrazu wejściowego.

Wyniki obliczeń względnej zmiany parametru średniego kwadratowego odchylenia powierzchni  $Sq$  w funkcji rodzaju falki bazowej oraz poziomu dekompozycji przedstawiono w tabeli 1. W celu graficznej prezentacji tych zmian sporządzono rysunek 2.

Tab. 1. Wyniki obliczeń względnej zmiany  $\delta[\%]$  parametru  $Sq$  w procesie aproksymacji falkowej

Tab. 1. The results of calculations of the relative change  $\delta[\%]$  of the parameter  $Sq$  in the wavelet approximation process

	db1	db5	db12	coif1	coif3	sym4	bior2.4
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,08	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03
4	0,28	0,10	0,09	0,13	0,09	0,09	0,11
5	0,78	0,34	0,33	0,41	0,37	0,36	0,39
6	2,13	0,93	0,89	1,14	0,94	0,98	1,06
7	5,45	2,50	2,40	3,08	2,46	2,61	2,85
8	13,22	6,98	6,42	9,02	7,00	7,47	8,52
9	31,39	21,73	18,45	25,01	20,08	21,79	24,83



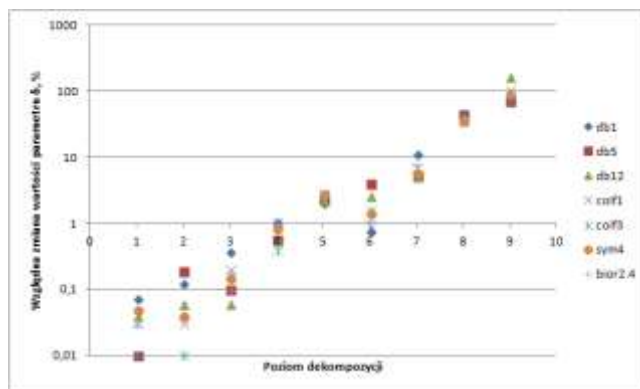
Rys. 2. Zależność względnej zmiany parametru  $Sq$  w procesie aproksymacji falkowej

Fig. 2. The relative change of the parameter  $Sq$  in the wavelet approximation process

Tab. 2. Wyniki obliczeń względnej zmiany  $\delta[\%]$  parametru  $Ssk$  w procesie aproksymacji falkowej

Tab. 2. The results of calculations of the relative change  $\delta[\%]$  of the parameter  $Ssk$  in the wavelet approximation process

	db1	db5	db12	coif1	coif3	sym4	bior2.4
1	0,07	0,01	0,04	0,03	0,01	0,05	0,03
2	0,12	0,19	0,06	0,03	0,01	0,04	0,05
3	0,36	0,10	0,06	0,20	0,16	0,15	0,10
4	1,02	0,56	0,55	1,08	0,39	0,85	0,97
5	1,99	2,28	2,23	2,74	2,77	2,83	2,72
6	0,74	4,05	2,63	0,89	1,58	1,42	1,11
7	11,09	5,31	5,17	6,93	5,23	5,64	7,76
8	46,26	44,90	35,87	40,70	38,82	36,76	41,48
9	81,72	70,01	163,29	102,35	71,25	89,86	94,17



Rys. 3. Zależność względnej zmiany parametru  $Ssk$  w procesie aproksymacji falkowej

Fig. 3. The relative change of the parameter  $Ssk$  in the wavelet approximation process

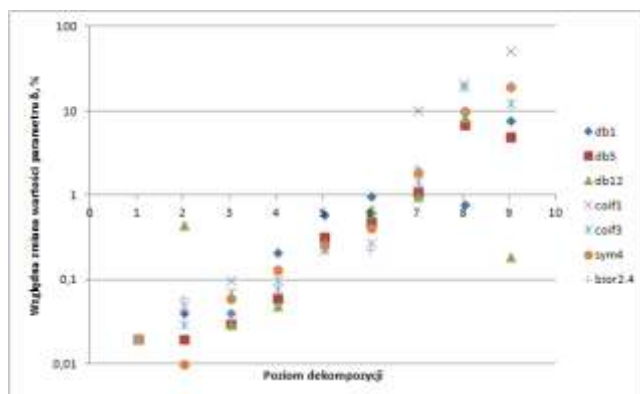
Wyniki obliczeń względnej zmiany parametru współczynnika skośności powierzchni  $Ssk$  w funkcji rodzaju falki bazowej oraz poziomu dekompozycji przedstawiono w tabeli 2. W celu graficznej prezentacji tych zmian sporządzono rysunek 3.

Wyniki obliczeń względnej zmiany parametru współczynnika nachylenia powierzchni  $Sku$  w funkcji rodzaju falki bazowej oraz poziomu dekompozycji przedstawiono w tabeli 3. W celu graficznej prezentacji tych zmian sporządzono rysunek 4.

Tab. 3. Wyniki obliczeń względnej zmiany  $\delta[\%]$  parametru  $Sku$  w procesie aproksymacji falkowej

Tab. 3. The results of calculations of the relative change  $\delta[\%]$  of the parameter  $Sku$  in the wavelet approximation process

	db1	db5	db12	coif1	coif3	sym4	bior2.4
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2	0,04	0,02	0,45	0,05	0,03	0,01	0,06
3	0,04	0,03	0,03	0,00	0,07	0,06	0,04
4	0,21	0,06	0,05	0,10	0,08	0,13	0,10
5	0,59	0,32	0,27	0,23	0,23	0,26	0,24
6	0,96	0,49	0,69	0,28	0,56	0,41	0,23
7	0,98	1,11	0,98	10,18	1,44	1,85	2,10
8	0,78	6,87	8,38	20,98	19,17	10,08	10,08
9	7,54	4,96	0,19	51,12	12,39	19,24	20,44



Rys. 4. Zależność względnej zmiany parametru  $Sku$  w procesie aproksymacji falkowej

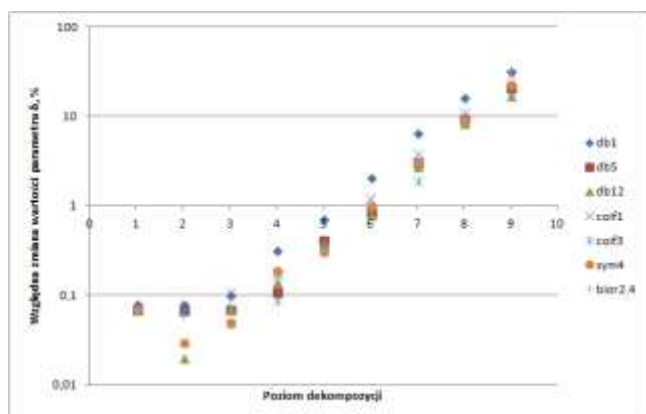
Fig. 4. The relative change of the parameter  $Sku$  in the wavelet approximation process

Wyniki obliczeń względnej zmiany parametru średniego arytmetycznego odchylenia powierzchni  $Sa$  w funkcji rodzaju falki bazowej oraz poziomu dekompozycji przedstawiono w tabeli 4. W celu graficznej prezentacji tych zmian sporządzono rysunek 5.

Tab. 4. Wyniki obliczeń względnej zmiany  $\delta[\%]$  parametru  $Sa$  w procesie aproksymacji falkowej

Tab. 4. The results of calculations of the relative change  $\delta[\%]$  of the parameter  $Sa$  in the wavelet approximation process

	db1	db5	db12	coif1	coif3	sym4	bior2.4
1	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2	0,08	0,07	0,02	0,07	0,07	0,03	0,06
3	0,10	0,07	0,07	0,11	0,05	0,05	0,08
4	0,32	0,11	0,14	0,18	0,09	0,19	0,16
5	0,72	0,42	0,38	0,37	0,34	0,31	0,32
6	2,08	0,88	0,79	1,23	0,91	1,00	1,09
7	6,49	3,12	2,78	3,84	1,96	3,11	3,36
8	16,18	9,62	8,46	11,30	8,84	9,20	10,00
9	32,22	21,63	17,20	29,11	20,11	23,10	33,71



Rys. 5. Zależność względnej zmiany parametru  $Sa$  w procesie aproksymacji falkowej

Fig. 5. The relative change of the parameter  $Sa$  in the wavelet approximation process

#### 4. Wnioski

Wykonane obliczenia potwierdziły, iż istotną kwestią jest dobór falki bazowej, którą będzie filtrowany sygnał. Zastosowany w pracy autorski program obliczeniowy pozwala na analizowanie powierzchni za pomocą różnych falek bazowych i określenie względnej zmiany danego parametru chropowatości powierzchni,

w zależności od użytej falki bazowej na danym poziomie aproksymacji.

Sygnał traci swoje oryginalne właściwości na różnych poziomach dekompozycji. Analizując skalę zmienności wybranych parametrów zarysu chropowatości, należy stwierdzić, że proces dekompozycji można prowadzić do szóstego poziomu. Charakter obrazu aproksymowanego nie zmienia się w znaczący sposób w stosunku do obrazu pierwotnego.

Przeprowadzone obliczenia wykazały również, że najsilniejsze zmiany występują dla współczynników asymetrii powierzchni  $Ssk$ , które od siódmego poziomu dekompozycji zmieniają się powyżej 5%. Dla pozostałych parametrów zmiany zachodzą na podobnym poziomie.

Analizując otrzymane wartości względnej zmiany wartości parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni na kolejnych poziomach dekompozycji można stwierdzić, iż dla badanej powierzchni, falką bazową która powinna być użyta w analizie jest falka Daubechies12. Wyniki obliczeń względnej zmiany wartości parametrów na kolejnych poziomach dekompozycji dla tej falki osiągnęły najniższe wartości.

#### 5. Literatura

- [1] Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni, Warszawa, 2008, WNT.
- [2] Humienny Z. i inni: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS), Warszawa, 2004, WNT.
- [3] Janecki D.: Problemy pomiaru i oceny geometrii powierzchni obrotowych części maszyn, Kielce, 2012, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- [4] Makiela W., Stępień K.: Ocena wpływu metodyki doboru falki bazowej na analizę falkową zarysów nierówności powierzchni, Pomiary Automatyka Kontrola, 2010/1, s. 32-34.
- [5] Wieczorowski M.: Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni, Poznań, 2009, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [6] Norma PN-EN ISO 25178-2:2012: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) –Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

otrzymano / received: 25.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper

#### INFORMACJE

### Wersja elektroniczna miesięcznika PAK

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK ([www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów z poprzednich lat i streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów z bieżącego roku można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).

Redakcja