

Radomir MAJCHROWSKI, Andrzej CELLARY, Michał WIECZOROWSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Wpływ próbkowania spiralnego na parametry 3D w pomiarach topografii powierzchni**Mgr inż. Radomir MAJCHROWSKI**

W 2002 roku ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej na specjalizacji Mechatronika. Po ukończeniu studiów inżynierskich pracował przez okres trzech lat w Fabryce Silników Okrętowych HCP Cegielskiego, na stanowisku: technolog - programista obrabiarek CNC. Od 2002 roku jest doktorantem w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Współpracuje z The University of North Carolina at Charlotte USA, gdzie odbył trzymiesięczny staż pod kierunkiem prof. Jay Raja.



e-mail: radomir.majchrowski@interia.pl

Dr inż. Michał WIECZOROWSKI

Absolwent Politechniki Poznańskiej. Uzyskał stopień doktora nauk technicznych w 1996. Laureat m.in. konkursu „Prymus Intern Pares” oraz Konkursu na Najlepszego Studenta Miasta Poznania. Absolwent Studium „Kontrola Jakości i Metrologia Techniczna” Politechniki Warszawskiej. Stypendysta fundacji Fulbright’a w Northwestern University w Evanston w USA. Współpracownik m.in. Ecole Centrale de Lyon (Francja) i The University of North Carolina at Charlotte USA.



e-mail: michal.wieczoro@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej CELLARY

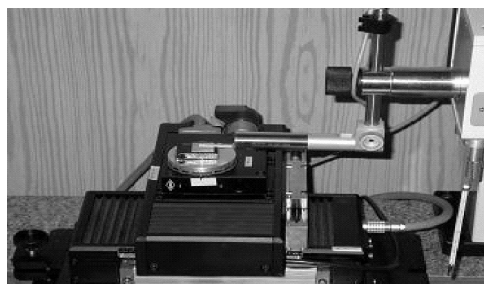
Absolwent Politechniki Poznańskiej. Uzyskał stopień doktora nauk technicznych ze specjalności Metrologia Techniczna w roku 1987. Absolwent Matematycznego Studium Teorii Niezawodności. Uczestniczy w pracach normalizacyjnych PKN oraz jest członkiem Sekcji Metrologii w Inżynierii Jakości i Diagnostyce Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.



e-mail: andrzej.cellary@put.poznan.pl

1. Wprowadzenie

Większość spotykanych w praktyce systemów topograficznej analizy powierzchni pracuje na zasadzie zbliżonych profili równoległych do siebie. Pomiar stereometrii chropowatości powierzchni należą do pomiarów czasochłonnych, zajmują znacznie więcej czasu niż profilu chropowatości metodą 2D. W Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej opracowany przez dr inż. A. Cellarego i dr M. Wieczorowskiego nowy przyrząd (rys. 1) do pomiaru stereometrii powierzchni wykorzystujący tzw. próbkowanie spiralnego [1,2,3,4].



Rys. 1. Profilometr wykorzystujący siatkę spiralną

Fig. 1. Measurement instrument that use the spiral sampling

Streszczenie

W artykule przedstawiono algorytm do symulacji pomiaru topografii powierzchni metodą próbkowania spiralnego z zastosowaniem pakietu Matlab. Większość profilometrów stykowych opartych jest na zasadzie próbkowania prostokątnego, dlatego parametry przestrzenne charakteryzujące topografię powierzchni też obliczane są z siatki prostokątnej. Jest to powodem zastosowania interpolacji siatki spiralnej do siatki prostokątnej. Między innymi procedura ta wprowadza różnicę pomiędzy parametrami 3D uzyskanymi z próbkowania prostokątnego, a próbkowania spiralnego. Przedstawiony algorytm został opracowany w celu zdeterminowania różnic pomiędzy parametrami uzyskanymi z siatki prostokątnej, a siatki spiralnej.

Słowa kluczowe: topografia powierzchni, próbkowanie spiralne, pomiary, spirala Archimedesesa

The influence of spiral sampling on surface topography parameters**Abstract**

In this paper, the authors present the result of simulating for surface measurement based on spiral grid using Matlab software. Most of the topography surface measurement instruments work using the parallel profiles to obtain surface texture. The novel stylus based measurement instrument that use the spiral sampling is the answer of the question of faster surface topography measurements method. The presented results of comparing three-dimensional surface parameters obtaining from simulating measurement surface based on a rectangular grid and based on a spiral grid is the first step to determine and characterize the influence of spiral sampling on surface topography parameters. It can make further possible to take this method into industry as fast surface topography measurement method based on stylus profilometer

Keywords: spiral sampling, surface topography measurement

W celu określenia różnic pomiędzy parametrami 3D uzyskanymi metodą próbkowania spiralnego, a parametrami uzyskanymi metodą próbkowanie prostokątne, okazało się niezbędne stworzenia algorytmu do symulacji pomiaru metodą próbkowania spiralnego. Pomiar topografii powierzchni są bardzo czasochłonne, również trudno jest powtórzyć pomiar w tym samym obszarze – zasadne, więc okazało się rozpoczęcie badań symulacyjnych. Oczywiście kolejnym etapem będzie potwierdzenie wyciągniętych wniosków z takich badań w sposób eksperymentalny. Aplikacja została stworzona przy pomocy i wykorzystaniu pakietu Matlab [5].

1.1. Algorytm symulacji pomiaru metodą próbkowania spiralnego**I – krok pierwszy:**

Stworzenie siatki spiralnej (rys. 2) w biegunowym układzie współrzędnych (1):

$$\varphi = r \cdot \phi \quad (1)$$

gdzie: r – promień (max $r = a/2$)
 ϕ – kąt (max $\phi = \pi \cdot \text{max}$ liczba zwojów spirali)
 a – długość boku kwadratu analizowanej powierzchni

Tak utworzona siatka spiralna zostaje przetransformowana do układu kartezjańskiego (2),(3):

$$x = [r \cdot \cos(\phi)] + (a/2) \quad (2)$$

$$y = [r \cdot \sin(\phi)] + (a/2) \quad (3)$$

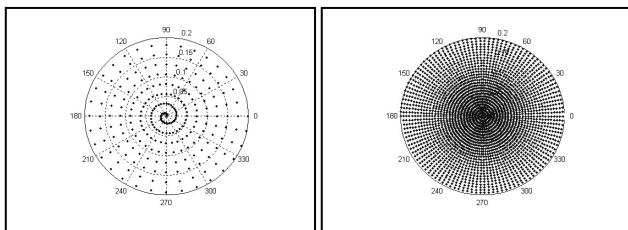
wyrażenie: ‘ $(a/2)$ ’ dodano w celu przesunięcia początku siatki do punktu (0,0) – w układzie biegunowym zakres zmian promienia wynosi $\pm a/2$ [mm].

II – krok drugi:

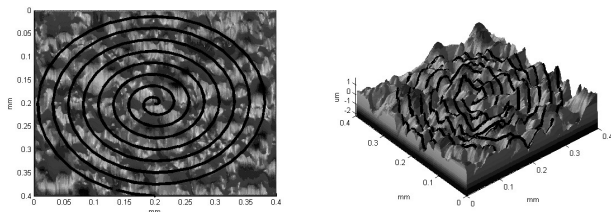
Rozłożenie na badanej powierzchni siatki spiralnej (rys. 3).

III – krok trzeci:

Interpolacja siatki spiralnej do siatki prostokątnej. Wykorzystano funkcje interpolacji przestrzennej dostępne w pakiecie Matlab (możliwe interpolacje: linear interpolation, nearest, cubic; w symulacji wykorzystano metodę interpolacji sześcienną).



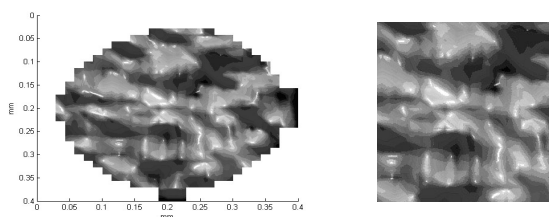
Rys. 2. Stworzenie siatki spiralnej w biegunowym układzie współrzędnych
 Fig. 2. Creating the spiral grid in polar coordinates



Rys. 3. Rozłożenie na badanej powierzchni siatki spiralnej
 Fig. 3. The spiral grid is spread on the surfaces

IV – krok czwarty:

Po interpolacji siatki spiralnej do siatki prostokątnej, obszar powierzchni, na której badamy topografię jest zbliżony do koła o promieniu $a/2$ [mm]. Do dalszej analizy wycięto kwadratowy obszar powierzchni – kwadrat (rys. 4), na którym opisano okrąg o promieniu $a/2$ [mm].



Rys. 4. Uzyskana powierzchnia z próbkowania spiralnego oraz kwadratowy obszar powierzchni używany do obliczania parametrów
 Fig. 4. The obtained surface topography and the square area of surface

V – krok piąty:

Obliczenie parametrów przestrzennych topografii powierzchni.

Użyto parametrów, które charakteryzują powierzchnię w trzech aspektach [6,7]:

PARAMETRY AMPLITUDOWE:

S_a – średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni od powierzchni średniej (4):

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z(i, j)| \quad (4)$$

S_q – średnie kwadratowe odchylenie powierzchni od powierzchni średniej (5):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(i, j)} \quad (5)$$

S_{ku} – eksces miara gęstości prawdopodobieństwa wysokości powierzchni (6):

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(i, j) \quad (6)$$

PARAMETRY PRZESTRZENNE

S_{ds} – gęstość szczytów powierzchni (7):

$$S_{ds} = \frac{\text{liczba szczytów}}{(M-1) \cdot (N-1) \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \quad (7)$$

PARAMETRY HYBRYDOWE

(kombinacja aspektu amplitudowego i przestrzennego)

$S_{\Delta q}$ – średniokwadratowe pochylenie nierówności powierzchni (8):

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \left[\left(\frac{\eta(x_i, y_i) - \eta(x_{i-1}, y_i)}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\eta(x_i, y_i) - \eta(x_i, y_{i-1})}{\Delta y} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

VI – krok szósty:

Procedura zapisywania – wszystkie otrzymane parametry są zapisywane do tablic, do dalszej analizy.

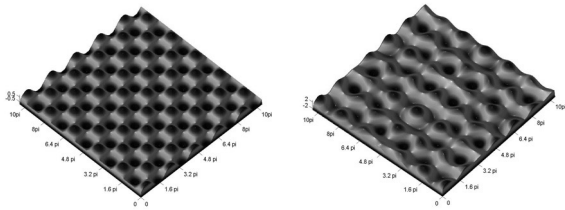
VII – krok siódmy:

Powtarzanie wszystkich sześciu kroków dla określonego przedziału liczby zwojów spirali.

1.2. Sprawdzenie poprawności algorytmu

Algorytm symulacji pomiaru topografii powierzchni metodą próbkowania spiralnego oraz poprawność obliczania parametrów został sprawdzony dla dwóch powierzchni analitycznych.

Pierwsza powierzchnia (rys. 5) wyraża się zależnością: $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$, natomiast druga: $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$. Dla tak uzyskanych powierzchni przeliczono analitycznie parametry Sq, Sa, Ssk i Sku. Obszar powierzchni ograniczono do zakresu (0, 10 π).



Rys. 5. Obraz powierzchni $z(x,y)=\sin(x)*\cos(y)$ oraz (rys. 3.3) $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$
 Fig. 5. Picture of surfaces $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$ oraz (rys. 3.3) $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$

Przykładowo parametr Sq (9) dla powierzchni $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$, został wyznaczony z następującej zależności:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint z^2(x, y) dx dy} \quad (9)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{(10\pi)^2} \int_0^{10\pi} \int_0^{10\pi} (\sin(x) * \cos(y))^2 dx dy}$$

Wyznaczenie całki:

$$\int_0^{10\pi} \int_0^{10\pi} (\sin(x) * \cos(y))^2 dx dy =$$

$$\int_0^{10\pi} \left[\cos(y)^2 * \left(-\frac{1}{2} \cos(x) * \sin(x) + \frac{1}{2} x \right) \right]_0^{10\pi} dy =$$

$$\int_0^{10\pi} 5\pi * \cos(y)^2 dy = \left[5\pi \left(\frac{1}{2} \cos(y) * \sin(y) + \frac{1}{2} y \right) \right]_0^{10\pi} =$$

$$= 25\pi^2$$

Podstawiając uzyskaną wartość całkową do głównego wzoru uzyskujemy wartość parametru Sq (10):

$$S_q = \sqrt{\frac{25\pi^2}{100\pi^2}} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

Porównanie uzyskanych parametrów analitycznie, numerycznie oraz z algorytmu symulacyjnego przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Tab. 1. Wyniki sprawdzenia algorytmu dla powierzchni: $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$
 Tab. 1. The results of algorithm checking for surfaces: $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$

Powierzchnia: $z(x,y) = \sin(x)*\cos(y)$			
Parametr	Analitycznie	Numerycznie	Symulacja spirali
Sq	0.500	0.500	0.498
Sa	0.405	0.404	0.401
Ssk	0.000	0.000	0.001
Sku	2.250	2.257	2.216

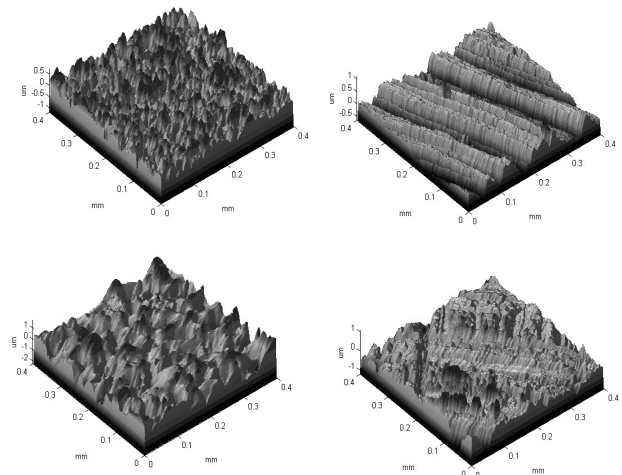
Tab. 2. Wyniki sprawdzenia algorytmu dla powierzchni: $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$
 Tab. 2. The results of algorithm checking for surfaces: $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$

Powierzchnia: $z(x,y) = (\sin(x)*\cos(y))+\cos(1.2*y)+\sin(1.3*x)$			
Parametr	Analitycznie	Numerycznie	Symulacja spirali
Sq	1.118	1.118	1.113
Sa	0.911	0.917	0.916
Ssk	0.121	0.130	0.141
Sku	2.490	2.494	2.441

2. Uzyskane wyniki

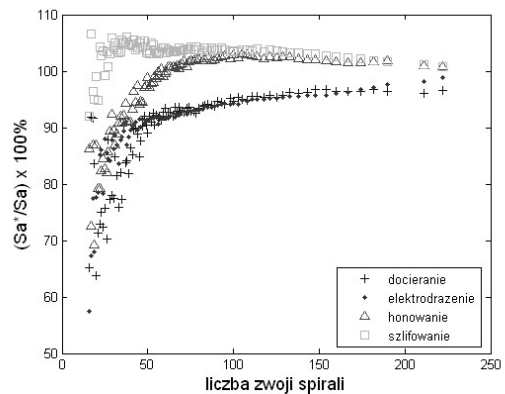
Metoda próbkowania spiralnego do pomiarów topografii powierzchni jest bardzo szybką metodą oceny stereometrii powierzchni przy wykorzystaniu profilometru stykowego. We wszystkich tego typu urządzeniach stosowanych obecnie próbkowanie odbywa się na podstawie siatki prostokątnej, co jest łatwe do wykonania, ale bardzo czasochłonne. Próbkowanie spiralne pozwala znaleźć rozwiązanie tego problemu.

W celu porównywania danych pomiarowych uzyskanych tą metodą z metodą próbkowanie prostokątnego, wykorzystano zmierzone powierzchnie metodą próbkowania prostokątnego na profilometrze Pherten. Powierzchni zmierzono na obszarze 0.4 x 0.4 [mm]. W eksperymencie wykorzystano cztery rodzaje powierzchni (rys. 6): (pow. honowaną, pow. piaskowaną, pow. elektrodrażoną, pow. szlifowaną). Na powierzchniach tych rozkładano siatkę spiralną zmieniając odległość pomiędzy zwojami spirali od 25 μ m to 1.8 μ m (od 16 do 222 zwoi spirali). Dla każdej spirali wyznaczano parametry 3D i porównywano z parametrami uzyskanymi z siatki prostokątnej.

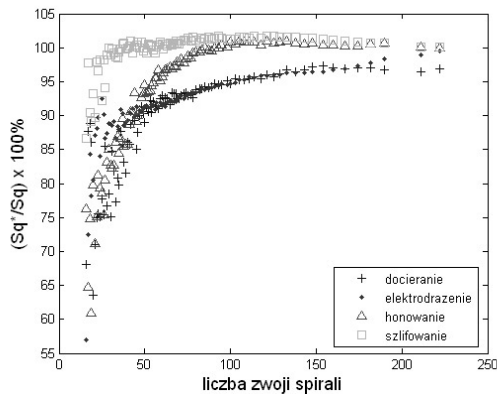


Rys. 6. Cztery rodzaje powierzchni po obróbce: piaskowania, szlifowania, elektrodrażenia i honowania.
 Fig. 6. Four kind of surface machined by: lapping, grinding, abrasive blasting and honing

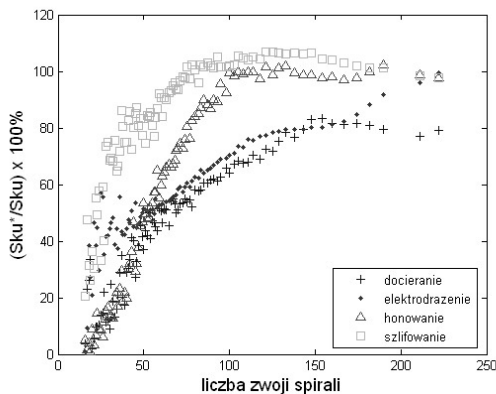
Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach poniżej. Na osi poziomej pokazano liczbę zwojów spirali, na osi pionowej zaznaczono wyrażenie $(S_x*/S_x) \times 100\%$, które obrazuje różnice pomiędzy parametrami uzyskanymi z siatki prostokątnej, a siatki spiralnej. Rys. 7 dotyczy parametru Sa, rys 8 dotyczy parametru Sq, rys. 9 dotyczy parametru Sku, kolejny rys. 10 dotyczy parametru Sds i rys. 11 dotyczy parametru Δ Sq.



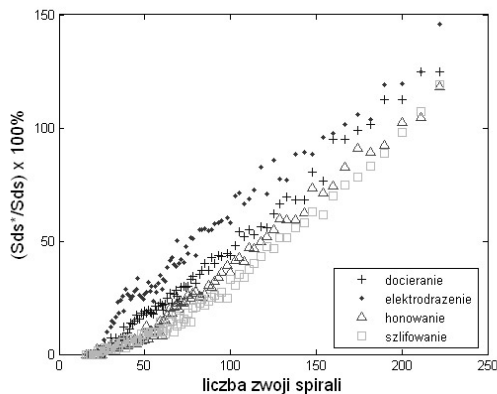
Rys. 7. Wyniki testu – parametr amplitudowy Sa
 Fig. 7. The result of the test – amplitude parameter Sa



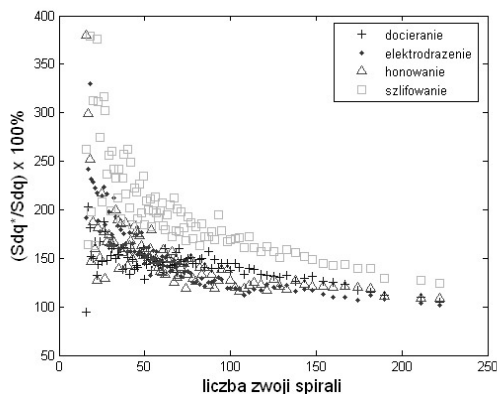
Rys. 8. Wyniki testu – parametr amplitudowy Sq
Fig. 8. The result of the test – amplitude parameter Sq



Rys. 9. Wyniki testu – parametr amplitudowy Sku
Fig. 9. The result of the test – amplitude parameter Sku



Rys. 10. Wyniki testu – parametr amplitudowy Sds
Fig. 10. The result of the test – amplitude parameter Sds



Rys. 11. Wyniki testu – parametr amplitudowy SΔq
Fig. 11. The result of the test – amplitude parameter SΔq

3. Wnioski

Bazując na uzyskanych rezultatach można wysunąć następujące wnioski:

- dla każdej z badanych powierzchni można zaobserwować punkt stabilizacji lub trend (najprawdopodobniej liniowy)
- parametry przestrzenne topografii powierzchni uzyskane z siatki spiralnej różnią się wartościami od parametrów uzyskanych z siatki prostokątnej, być może niektóre różnice będzie można uznać za stałe
- w dalszych badaniach należy większą uwagę poświęcić parametrom o aspekcie przestrzennym i hybrydowym
- w przyszłości będzie możliwe zwiększenie dokładności metody próbkowania spiralnego, poprzez wprowadzenie tablicy korekcji dla parametrów 3D (dzięki określeniu różnicy parametrów uzyskanych z siatki prostokątnej i spiralnej)
- tablice korekcji należy określić osobno dla każdego rodzaju z badanych powierzchni

4. Podsumowanie

Próbkowanie spiralne rozwiązuje problem czasochłonności pomiarów przestrzennych powierzchni. Jednakże, jak pokazały badania wstępne, istnieją różnice w wartościach parametrów 3D uzyskanych metodą próbkowania spiralnego i metodą siatki prostokątnej. Nie jest również znana zależność opisująca wpływ parametrów siatki spiralnej (skok spirali, odstępów punktów spirali) na wartości parametrów przestrzennych.

Kolejnym etapem zrozumienia i określenia różnic pomiędzy parametrami wyznaczonymi z pomiarów metodą siatki spiralnej, a metodą siatki prostokątnej, będzie powtórzenie symulacji dla więcej niż jednej powierzchni wybranych obróbek. Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych należy wyniki potwierdzić doświadczalnie.

Jeżeli różnice pomiędzy pomiarem metodą siatki spiralnej, a siatki prostokątnej zostaną dobrze zdefiniowane i określone, umożliwi to szersze wprowadzenie pomiarów stykowych topografii powierzchni do przemysłu. Próbkowanie spiralne pozwoli bowiem na szybką identyfikację powierzchni.

5. Literatura

- [1] Cellary A., Wieczorowski M., Siatki próbkowania w pomiarach topografii powierzchni, Materiały Krajowego Kongresu Metrologii: „Nowe Wyzwania i Wizje Metrologii”. Gdańsk, 1998, vol. 4, pp. 71-76.
- [2] Wieczorowski M., Sampling on a spiral for surface topography, Metrology and measurement systems. PWN, 2001, Volume IX, pp.195-208.
- [3] Wieczorowski M., Spiral sampling as a fast way of data acquisition in surface topography, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 2001, pp. 2017-2022.
- [4] Majchrowski R., Pomiar topografii powierzchni metodą próbkowania spiralnego, V International Scientific – Technical Conference for PhD Students, Automation and CA Systems in Technology Planning and in Manufacturing, Giewartów, 2004, pp. 139-143.
- [5] Zalewski A., Cegła R., Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1997.
- [6] Mathia T., Zahouani H., The development of methods for characterisation of roughness in three dimensions, ECSC-EEC-EAEC, Brussels-Luxembourg and Authors, 1993.
- [7] Thomas. T.R., Rough Surfaces. Imperial College Press. 1999, Second Edition.

Praca realizowana w ramach grantu promotorskiego finansowanego ze środków na naukę w latach 2006 - 2008.