

Robert CINCIO, Wojciech KACALAK
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA,

System do analizy i oceny topografii powierzchni technicznych

mgr inż. Robert CINCIO

Doktorant Katedry Mechaniki Precyzyjnej.
Specjalność naukowa:
modelowanie, analiza i ocena powierzchni
technicznych, sztuczne sieci neuronowe.



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

prof. dr hab. inż. Wojciech KACALAK

Kierownik Katedry Mechaniki Precyzyjnej.
Specjalność naukowa:
Mechatronika, diagnostyka, optymalizacja
i automatyzacja procesów mikroobróbki oraz
procesów bardzo dokładnej obróbki ścierniej, w tym
zwłaszcza materiałów trudno obrabialnych, a także
budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń
technologicznych.



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

Streszczenie

Właściwości eksploatacyjne powierzchni w znacznym stopniu zależą od jej cech stereometrycznych. Parametry charakteryzujące właściwości stereometryczne powierzchni technicznych różnią się, i to często znacznie, od parametrów wyznaczanych dla zarysu danej powierzchni. Pomijanie tych różnic lub opisywanie cech powierzchni na podstawie cech (parametrów) zarysu należy do częstych błędów oceny powierzchni. W artykule przedstawiono opis opracowywanego systemu przetwarzania danych z profilografometru, który wykorzystując wyniki z jednego lub dwóch pomiarów (zarysów w jednym przekroju o długości określonej przez system, dwóch pomiarów w przekrojach do siebie prostopadłych lub też zarys pomiaru po torze spiralnym wg nowych koncepcji realizacji pomiarów profilografometrycznych opracowanych w polskich ośrodkach badawczych) oraz wykorzystując wiedzę zgromadzoną w formie reguł wnioskowania i w module sztucznych sieci neuronowych, pozwalałby na wyznaczenie licznego, komplementarnego zbioru parametrów stereometrycznych powierzchni. Możliwe jest ponadto wyznaczenie obrazu powierzchni o cechach statystycznych zgodnych z powierzchnią, na której przeprowadzono pomiar. System składa się z baz wiedzy zawierających relacje między parametrami 2D i 3D, baz danych, baz reguł wnioskowania, modułów analiz i wizualizacji, dokumentacji zespołów pomocniczych (akwizycji obrazów 2D) i modułów komunikacji z użytkownikiem. Opracowany system jest szczególnie przydatny w pomiarach topografii powierzchni dużych elementów. W pomiarach, tych wykorzystuje się przenośne profilografometry, które umożliwiają realizację tylko prostych strategii pomiaru.

Słowa kluczowe: parametry powierzchni, sieci neuronowe

Analysis and assessment system of technical surface topography

Abstract

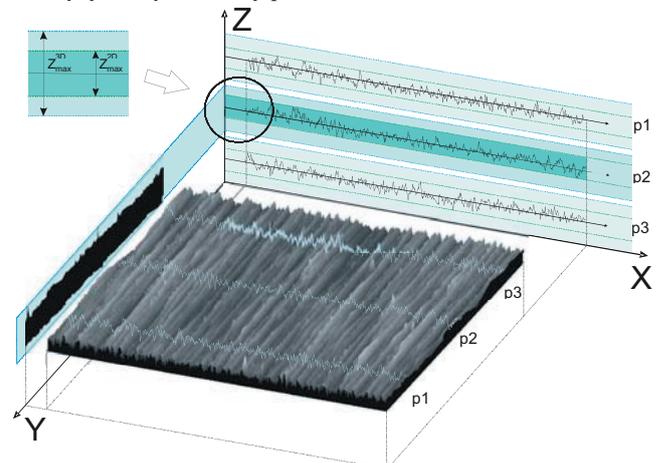
Operating features of surface topography relative depends on stereometric characteristics. Parameters characterizing stereometric properties of technical surface topography have much more different from parameters determine for the profile of surface topography. Skipping of these differences or describing characteristic of surface topography on the basis of characteristic (parameters) of profile belong to frequent errors of estimation surface topography. This article presents description elaborated profilographometer data processing system which using results from one or two measurement (profiles in one section in length choose by the system, two measurement in sections to himself normals, in section which is created by circular track or measurement in section which is created by spiral track (according to new ideas realization of profilographometric measurements elaborated in Polish research centers) and using collected knowledge form: inferring rules and modules of neural networks, would let on determine collect numberful set of stereometric surfaces parameters topography. Moreover possible is determine image of surface topography which features statistical compatible with a surface which worked the measurement. The system is consisted of: knowledge base including relations between parameters 2D and 3D, database of inferring rules,

modules analyses and visualization, documentations of auxiliary units (canvassing images 2D) and modules of communication with user. This worked out system is especially useful in measurement of large surface elements topography. In measurement like this large elements uses mobile profilographometers which make only simple realization of strategies of measurement.

Keywords: surface parameters, neural networks

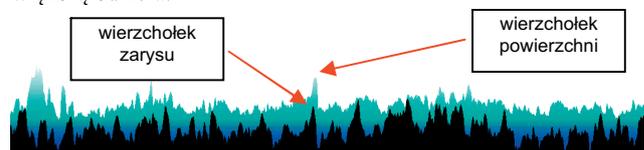
1. Wstęp

Właściwości eksploatacyjne powierzchni w znacznym stopniu zależą od jej cech stereometrycznych [1]. Parametry charakteryzujące właściwości stereometryczne powierzchni różnią się, i to często znacznie, od parametrów wyznaczanych dla zarysu powierzchni (rys.1). Pomijanie tych różnic lub opisywanie cech powierzchni na podstawie cech (parametrów) zarysu należy do częstych błędów oceny powierzchni.



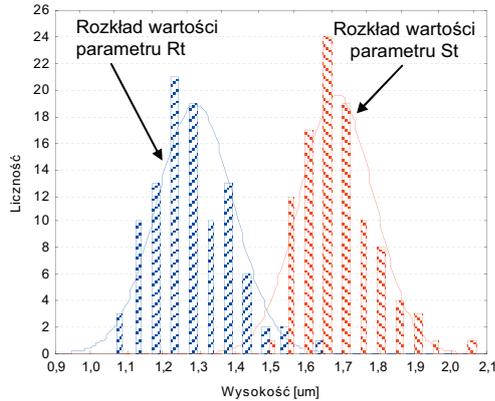
Rys. 1. Powierzchnia i jej przykładowe zarysy do analizy problemu
Fig. 1. Surface and example profile to problem analysis

Trzeba zauważyć, iż prawdopodobieństwo tego, że w rozpatrywanym przekroju (rys.2) wierzchołek zarysu będzie wierzchołkiem powierzchni jest niezwykle małe, teoretycznie jest równe zero, a jeśli wierzchołek jest płaski, to jest niewielką liczbą większą od zera.

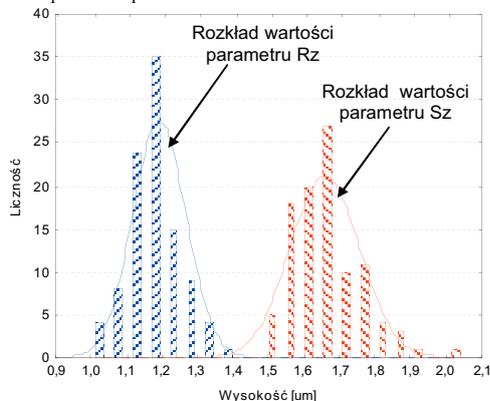


Rys. 2. Fragment powierzchni i jej przykładowy zarys do analizy problemu
Fig. 2. Surface and example profile to problem analysis

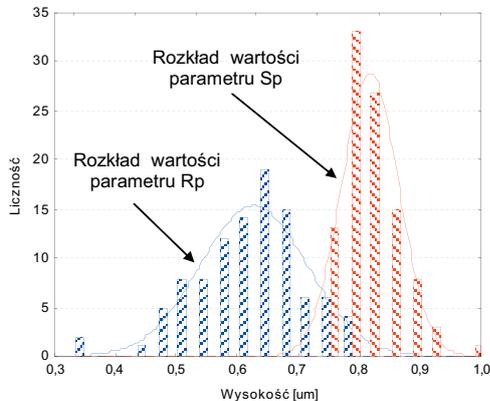
W pracach własnych wykazano, że różnice między parametrami zarysów i parametrami powierzchni są znaczne, co przedstawiono na rys. 3, 4, 5, 6 z wykorzystaniem danych z 50 powierzchni o określonych charakterystykach.



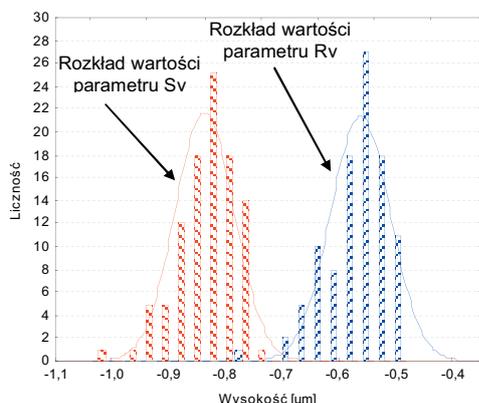
Rys. 3. Porównanie rozkładów wartości parametrów Rt i St
Fig. 3. Comparison of parameters distribution Rt and St



Rys. 4. Porównanie rozkładów wartości parametrów Rz i Sz
Fig. 4. Comparison of parameters distribution Rz and Sz



Rys. 5. Porównanie rozkładów wartości parametrów Rp i Sp
Fig. 5. Comparison of parameters distribution Rp and Sp



Rys. 6. Porównanie rozkładów wartości parametrów Rv i Sv
Fig. 6. Comparison of parameters distribution Rv and Sv

Jak wynika z przeprowadzonych porównań wartość oczekiwana poszczególnych parametrów wyznaczonych dla zarysu i dla całej powierzchni różni się w istotny sposób (tab.1).

Tab. 1. Porównanie wartości analizowanych parametrów
Tab. 1. Comparison of parameters

Parametry wyznaczone dla zarysu P^{2D} [μm]	Parametry wyznaczone dla zarysu P^{3D} [μm]	P^{2D} / P^{3D}
R_t	S_t	$R_t:S_t$ 0,77
R_z	S_z	$R_z:S_z$ 0,72
R_p	S_p	$R_p:S_p$ 0,75
R_v	S_v	$R_v:S_v$ 0,66

W rozpatrywanym przypadku wartości ocenianych parametrów powierzchni są o 23-34% większe od wartości odpowiednich parametrów dla zarysu. **Oznacza to, iż na podstawie typowego postępowania, polegającego na analizie zarysów powierzchni, nie można wnioskować o cechach statystycznych całej powierzchni bez opracowania odpowiedniego systemu wnioskowania.**

2. Cel budowy systemu

Wyznaczanie parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne powierzchni poprzez profilografowanie z wierszowaniem (często stosuje się wierszowanie pozwalające na wyznaczenie ok. stu równoległych przekrojów), jest operacją kosztowną i pracochłonną oraz wymagającą stolików umożliwiających takie pomiary.

Aby rozwiązać przedstawione problemy zespół badawczy Katedry Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej opracuje i dynamicznie rozwija system (o nazwie „**Realsurface**”) przetwarzania danych z profilografometru, który wykorzystując wyniki z jednego lub dwóch pomiarów (pomiarów zarysów w jednym przekroju o długości określanej przez system lub dwóch pomiarów w przekrojach do siebie prostopadłych), oraz wykorzystując wiedzę zgromadzoną w formie reguł wnioskowania oraz w module sztucznych sieci neuronowych, nauczonych na bardzo liczny zbiorze danych, pozwala na wyznaczenie licznego, komplementarnego zbioru parametrów stereometrycznych powierzchni [4]. Możliwe jest ponadto wyznaczenie obrazu powierzchni o cechach statystycznych zgodnych z powierzchnią, na której przeprowadzono pomiar.

System składa się ze zbioru aplikacji do pobierania, normalizacji i przetwarzania danych z profilografometru (współrzędnych zarysu – 2D) oraz modułów do wyznaczania licznego zbioru parametrów powierzchni (3D) i modułu wizualizacji powierzchni. Dodatkowo w systemie opracowywany jest układ akwizycji obrazów 2D powierzchni technicznych i transformacja danych do obrazów 3D wraz z oceną powierzchni. Wyznaczanie parametrów stereometrycznych powierzchni, z wykorzystaniem danych reprezentujących obrazy płaskie (2D) powierzchni, pozwala na dodatkowe rozszerzenie zakresu systemu na zadania oceny topografii powierzchni takich, jak powierzchnie narzędzi ściernych bez użycia metod stykowych i bez ich demontażu z obrabiarek.

3. Etapy budowy systemu

Realizacja budowy systemu składała się z trzech etapów:

1. ETAP PROJEKTOWANIA I TWORZENIA REGUŁ SYSTEMU:

- utworzenie licznego zbioru obrazów powierzchni (reprezentacji cyfrowych powierzchni) po obróbce ściernej i odpowiadających im parametrów ich obróbki (powierzchnie uzyskane w wyniku realizacji procesów),
- utworzenie zbioru obrazów powierzchni z wykorzystaniem opracowanych metod symulacji kształtowania powierzchni w

procesach obróbki ściernej (powierzchnie uzyskane w wyniku realizacji symulacji procesów),

- utworzenie licznego zbioru wzorców do uczenia, testowania i weryfikacji sztucznych sieci neuronowych do wyznaczania parametrów charakteryzujących stereometrię powierzchni (3D) na podstawie parametrów zarysu (2D), przeznaczonych do wykorzystania w etapie II,
- badanie cech i wyznaczenie relacji pomiędzy parametrami zarysu (2D) a parametrami powierzchni (3D),
- opracowanie zależności matematycznych pomiędzy parametrami charakteryzującymi zarys powierzchni (2D) oraz warunki jej obróbki, a parametrami charakteryzującymi cechy stereometryczne powierzchni (3D).

II. ETAP BUDOWY I UCZENIA SYSTEMU:

- opracowanie systemu wnioskowania o parametrach powierzchni na podstawie parametrów zarysu,
- uczenie, testowanie i weryfikacja działania systemu zawierającego sztuczne sieci neuronowe do określania wartości parametrów powierzchni na podstawie informacji o parametrach zarysu powierzchni,
- uczenie, testowanie i weryfikacja działania systemu zawierającego sztuczne sieci neuronowe do określania parametrów potrzebnych do generowania trójwymiarowego obrazu powierzchni na podstawie parametrów powierzchni,
- opracowanie dodatkowych modułów umożliwiających przekształcenia, analizę oraz wizualizację powierzchni.

III. ETAP TESTOWANIA, WERYFIKACJI I ULEPSZEŃ SYSTEMU:

- weryfikacja systemu do generowania i prognozowania parametrów i pełnych trójwymiarowych obrazów powierzchni na podstawie parametrów i warunków obróbki oraz cech zarysu powierzchni.

4. Moduły analiz systemu

Omawiany kompleksowy system modelowania i oceny struktury geometrycznej powierzchni technicznych składa się z następujących podsystemów:

- **WCZYTYWANIA POWIERZCHNI RZECZYWISTYCH** umożliwia wczytywanie danych o powierzchniach rzeczywistych, mierzonych za pomocą typowych i najbardziej popularnych profilografometrów, używanych w różnych ośrodkach badawczych i zakładach przemysłowych. Dla każdego z typów wymagany jest osobny moduł, ponieważ urządzenia te stosują różne sposoby zapisu danych w plikach,
- **MODELOWANIA PROCESU KSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI** umożliwiałyby wygenerowanie struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem oryginalnych algorytmów symulacji procesu szlifowania, co pozwoli na szybkie i stosunkowo tanie przeprowadzenie badań doświadczalnych i dobór powierzchni do dalszych eksperymentów, a także zbudowanie w szybkim czasie licznego zbioru powierzchni do uczenia systemu. Jest to współcześnie nowoczesne narzędzie wspomagające projektowanie różnych wyrobów, którym stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące właściwości powierzchni [2,3],
- **PARAMETRÓW I FUNKCJI** realizuje
 - ocenę ilościową stanu powierzchni poprzez wyznaczenie parametrów chropowatości, falistości i parametrów funkcjonalnych zarysów (zgodnie z PN-ISO 13565), dla danych niefiltrowanych, jak i z zastosowaniem filtrów Gaussa i 2RC,
 - wyznaczenie stereometrycznych parametrów amplitudowych, objętościowych, przestrzennych, hybrydowych, funkcyjnych (parametry z listy Birmingham) dla powierzchni,
 - wyznaczenie krzywej nośności zarysu i powierzchni, co da wyczerpującą informację o kształcie nierówności, charakteryzującej się nawet bardzo dużymi wzniesieniami i wgłębieniami,

- wyznaczenie symetrycznej krzywej kontaktu SCGC, będącej transformacją krzywej nośności, polegającą na tym, aby każdą z rzędnych tej krzywej przesunąć równoległe do kierunku odcinka pomiarowego chropowatości, w taki sposób, żeby środki rzędnych znalazły się na prostej prostopadłej do kierunku odcinka pomiarowego, w punkcie połowiącym go,

- wyznaczenie znormalizowanej funkcji autokorelacji - miary ogólnej zależności wartości w jednym przekroju od ich wartości w innym przekroju oraz gęstości widmowej mocy pokazującej znaczenie różnych składowych harmonicznych o określonych wartościach,

- **SIECI NEURONOWYCH** umożliwia tworzenie różnych struktur sieci neuronowych o typowych i nietypowych rodzajach połączeń, funkcjach aktywacji i sposobach uczenia oraz badanie ich właściwości. Podsystem ten umożliwia również tworzenie wzorców potrzebnych do uczenia, testowania i weryfikacji sieci neuronowych,

- **ANALIZ STATYSTYCZNYCH** przeprowadza badanie rozkładów i histogramów określonych zbiorów cech zarysów, jak i powierzchni, zautomatyzowane opracowanie modeli regresyjnych relacji pomiędzy cechami zarysu i cechami powierzchni oraz ocenę adekwatności tego modelu,

- **WIZUALIZACJI I PRZEKSZTAŁCEN** umożliwia:

- wizualizację 2D i 3D zarysów, powierzchni, a także w połączeniu z innymi podsystemami, wykresów statystycznych określonych cech,

- wybór praktycznie dowolnej palety kolorów. Wybranie odpowiedniego gradientu koloru pozwala na wizualne wyodrębnienie określonego poziomu chropowatości powierzchni, określenie rozmieszczenia wierzchołków, jak również pokazanie szerokości i głębokości zagłębień występujących na analizowanej powierzchni,

- wyznaczenie zarysów chropowatości w dowolnym kierunku, co pozwala na określenie ukształtowania geometrycznego danej powierzchni,

- lustrzane odbicia w kierunkach poziomym oraz pionowym, a także wykonanie tzw. reliefu, czyli odcisku powierzchni,

- poziomowanie i obroty powierzchni, co pozwala wyeliminować błąd pochyleń powierzchni podczas wierszowania z użyciem profilografometru,

- wycinanie mniejszych fragmentów powierzchni, co pozwala wyeliminować pewne wady, a także przyrzeć się danemu fragmentowi powierzchni w dużym powiększeniu,

- filtrowanie określonych składowych harmonicznych powierzchni, co pozwala odseparować chropowatości, falistość i błędy kształtu analizowanej powierzchni

- zapis wizualizacji do wybranego formatu pliku graficznego, co pozwoli na bezproblemowe umieszczanie wyników analiz w wszelkiego rodzaju opracowaniach naukowych.

- **BAZY DANYCH** zapewnia gromadzenie i archiwizację bardzo dużej ilości przetwarzanych danych w systemie,

- **KOMUNIKACJI INTERNETOWEJ** służy do zdalnej komunikacji pomiędzy systemami znajdującymi się w różnych ośrodkach badawczych i wymianę danych między sobą.

Dodatkowo w systemie opracowany będzie moduł do transformacji obrazów płaskich powierzchni technicznych (2D) do obrazów 3D wraz z ich oceną. Służyłby on do estymacji parametrów powierzchni czynnej narzędzi skrawnych na podstawie ujęć z pojedynczego, nieruchomego punktu obserwatora oraz generacji mapy 3D powierzchni czynnej narzędzia na podstawie jej obrazu 2D, jako uzupełnienie czasochłonnych badań profilometrycznych. Wyznaczanie parametrów stereometrycznych powierzchni z wykorzystaniem danych reprezentujących obrazy płaskie (2D) powierzchni pozwala na dodatkowe rozszerzenie zakresu systemu na zadania oceny topografii powierzchni takich jak powierzchnie narzędzi ściernych bez użycia metod stykowych i bez ich demontażu z obrabiarek. W skład modułu wchodziłyby następujące elementy:

- układ akwizycji danych,

- baza danych o cechach statystycznych powierzchni danego rodzaju,
 - podsystem analizy danych i rekonstrukcji topografii powierzchni,
 - podsystem obliczania parametrów i cech stereometrycznych powierzchni,
 - podsystem weryfikacji wyników rekonstrukcji powierzchni.
- Układ akwizycji pozyskiwałoby obrazy 2D powierzchni narzędzi ściennych z pojedynczego punktu obserwatora w okresach przestoju obrabiarki. Obrazy te poddawane byłyby procesowi wstępnego przetwarzania w postaci:

- określenia rozmiaru i orientacji obszaru obserwacji.
- niwelacji nierównomierności oświetlenia.
- opcjonalnej konwersji obrazu na zbiór danych luminancji obrazu.

W kolejnym etapie działania modułu wykonywane byłyby rozpoznawanie cech obiektów na obrazie:

- binaryzacja obrazu wg zadanego kryterium,
- interpretacja cech populacji obiektów uzyskanych na podstawie binaryzacji obrazu,
- operacje przekształceń morfologicznych na treści obrazów intensywności luminancji 2D.

Rekonstrukcja powierzchni 2D do powierzchni 3D odbywałaby się w podsystemie analizy danych i rekonstrukcji topografii powierzchni w następujących etapach:

- naliczanie sum kumulacyjnych z treści obrazu intensywności luminancji 2D na kierunku pionowym oraz poziomym,
 - wyznaczenie przebiegu linii wartości średniej luminancji dla każdej z linii danych wyników metodą regresji liniowej,
 - niwelacja nachylenia linii w wynikowych mapach 3D uzyskanych z analizy obrazu 2D na kierunku pionowym oraz poziomym,
 - skalowanie i sumowanie treści dwóch map 3D w jedną mapę wynikową
- Dalej wykonywane byłyby obliczanie parametrów i cech stereometrycznych powierzchni oraz weryfikacja wyników rekonstrukcji powierzchni. Wyniki analiz zapisywane byłyby w bazie danych dla rozwoju bazy wiedzy o powierzchniach określonego rodzaju. Wyniki badań w oparciu o przekształcenia i analizę danych uzyskanych z quasi-realistycznego obrazu intensywności luminancji dają możliwość wykorzystania zastosowanej metody wnioskowania o stereometrii badanej powierzchni na podstawie realnych zdjęć monoskopowych, jako metody pomocniczej lub nawet zastępczej względem czasochłonnych i kosztownych badań profilometrycznych. W celu uzyskania niezawodnej ekstrakcji informacji o pełnej stereometrii powierzchni badanej, system wnioskowania powinien uwzględniać szereg zdjęć monoskopowych pozyskiwanych przy nieruchomym punkcie obserwatora oraz zmiennym kącie azymutu oświetlenia.

Opracowany system zostanie wyposażony w mechanizmy dodatkowego uczenia się podczas jego użytkowania oraz mechanizmy rozwoju bazy danych i reguł działania, co zapewni, iż może być on produktem rozwijającym przez użytkownika.

5. Efekty stosowania systemu

Do efektów wynikających z opracowania opisywanego SYSTEMU można zaliczyć:

- stworzenie systemu, zapewniającego niskie koszty szybkiej i kompleksowej oceny właściwości stereometrycznych powierzchni na podstawie powszechnie stosowanych pomiarów liniowych – wielokrotne (nawet do kilkudziesięciu razy) zmniejszenie czasu wyznaczania parametrów opisujących strukturę stereometryczną powierzchni,
- powszechną przydatność systemu – obecnie w Polsce nabywa się ponad 100 profilografometrów rocznie, co w warunkach, tylko, ich dziesięcioletniej eksploatacji, daje liczbę ponad 1000 użytkowanych urządzeń. Liczbę pomiarów w ciągu roku można

oszacować następująco: średnio 5 pomiarów przez 300 dni dla 1000 urządzeń daje 1,5 miliona pomiarów,

- zachowanie zgodności zastosowanych metod z dotychczasowymi przyrządami i parametrami oceny nierówności powierzchni, co oznacza, że dotychczasowe wyposażenie metrologiczne do pomiarów liniowych można będzie wykorzystać do oszacowania stereometrycznych parametrów powierzchni,
- łatwą i kompleksową ocenę struktury geometrycznej powierzchni i ocenę jej walorów eksploatacyjnych,
- zautomatyzowane sprawdzenie zgodności efektu technologicznego z założeniami dotyczącymi procesu obróbki,
- ułatwione badanie i ocena relacji między parametrami i warunkami obróbki a cechami po-wierzchni oraz prognozowanie wyników obróbki na podstawie określonych warunków i parametrów obróbki,
- łatwa i wygodna prezentacja wyników kształtowania powierzchni obrobionej do opracowań naukowych, publikacji i dokumentacji technicznej,
- estymacja parametrów powierzchni czynnej narzędzi skrawnych na podstawie ujęć z pojedynczego, nieruchomego punktu obserwatora oraz generacji mapy 3D powierzchni czynnej narzędzia na podstawie jej obrazu 2D, jako uzupełnienie czasochłonnych badań profilometrycznych,

Znaczenie naukowe i użyteczne systemu dla rozwoju wiedzy i zastosowań wynika ponadto z efektów o szerszym znaczeniu, do których można zaliczyć:

- prognozowanie parametrów oceny powierzchni, umożliwiające lepszy dobór i optymalizację parametrów obróbki, zapewniających uzyskanie wymaganych właściwości stereometrycznych powierzchni obrobionej,
- testowanie nowych rozwiązań technologicznych narzędzi i metod obróbki już na etapie projektowania z wykorzystaniem systemów generowania powierzchni po obróbce ścierniej, co przyczyni się do znacznych oszczędności wprowadzania nowych technologii w przemyśle i przyspieszonego rozwoju technologicznego,
- stworzenie kompleksowego systemu modelowania i oceny topografii powierzchni pozwalające na tanią i pełną ocenę struktury geometrycznej powierzchni,
- opracowanie systemu wnioskowania do wyznaczania parametrów służących do generowania obrazów stereometrycznych powierzchni, odpowiadających odpowiednim warunkom i parametrom procesu szlifowania powierzchni, oznacza możliwość prognozowania nie tylko parametrów powierzchni, ale i pełnego ich ukształtowania,
- stworzenie systemu w postaci profesjonalnego pakietu aplikacji komputerowych, wygodnego i prostego w stosowaniu, w warunkach produkcyjnych jak i laboratoryjnych.

6. Literatura

- [1] Robert Cincio, Wojciech Kacalak: Wybrane problemy wnioskowania o topografii powierzchni na podstawie zarysów. X Warsztaty Naukowe PTSK Symulacja w badaniach i rozwoju, Kraków-Zakopane 2003.
- [2] Robert Cincio, Wojciech Kacalak: Wybrane problemy modelowania topografii powierzchni technicznych o określonych charakterystykach. X Warsztaty Naukowe PTSK Symulacja w badaniach i rozwoju, Kraków-Zakopane 2003.
- [3] Robert Cincio, Wojciech Kacalak, Sławomir Makuch: Metoda i algorytm generowania obrazów powierzchni o parametrach zgodnych z parametrami powierzchni szlifowanych. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr. 36, Koszalin 2004.
- [4] Robert Cincio, Wojciech Kacalak: Nowe narzędzia do modelowania i analizy powierzchni kształtowanych w różnych procesach technologicznych. XI Warsztaty Naukowe PTSK Symulacja w badaniach i rozwoju, Augustów 2004.