

Jan TOMASIK, Ryszard RUDZIŃSKI

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ MECHATRONIKI

Charakterystyki wybranych filtrów cyfrowych aktualnie stosowanych w pomiarach chropowatości powierzchni

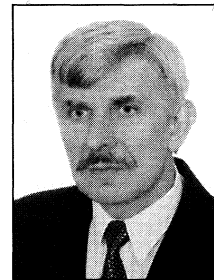
Dr inż. Jan TOMASIK

– absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki) Politechniki Warszawskiej (1969 r.). Od 1970 roku pracuje w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej, obecnie na stanowisku adiunkta. Od 1996 r. pełni funkcję dyrektora Instytutu. Jego zainteresowania związane są z mikrogeometrią powierzchni, głównie w zakresie jej opisu i opracowywania cyfrowych metod pomiaru.



Dr inż. Ryszard RUDZIŃSKI

– absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki) Politechniki Warszawskiej (1969 r.). Od 1971 roku pracuje w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Pracę doktorską obronił w 1979 r. Jego zainteresowania związane są z komputeryzacją w pomiarach makro i mikrogeometrii powierzchni, atestacją czujników i współrzędnościowych maszyn pomiarowych XYZ.



Streszczenie

W artykule przedstawiono zależności teoretyczne opisujące filtry cyfrowe, realizowane w programie Talyprofile firmy Rank Taylor Hobson oraz wyniki badań ich charakterystyk przenoszenia. Wykazano różnice w charakterystykach amplitudowych i fazowych filtrów oraz zarekomendowano do stosowania w pierwszej kolejności filtr Gaussa, który ma najlepszą charakterystykę przenoszenia (dla $\lambda/\lambda_c = 1$, $k_u = 50\%$) oraz nie wprowadza przesunięcia fazowego.

Abstract

Theoretical dependences describing digital filters applied in Talyprofile software of Rank Taylor Hobson company are presented. Also the tests of the transfer function of these filters are shown. Differences in amplitude and phase characteristics of these filters are evaluated. Gamma filter shows the best transfer function (for $\lambda/\lambda_c = 1$, $k_u = 50\%$) and it does not introduce phase shift. So this filter is recommended as the first one for application.

Wprowadzenie

Powierzchnie wykonywanych w procesie produkcyjnym elementów charakteryzują się złożoną budową stereometryczną. Występują na nich nierówności o różnych kształtach, wymiarach i położeniu, nakładające się wzajemnie. W związku z wynikającą niekiedy potrzebą identyfikacji przyczyn wywołujących te nierówności oraz w związku z tym, że mogą one w różny sposób wpływać na parametry użytkowe części maszyn, staje się konieczne oddzielenie ich od siebie. Wymagają tego również normy. W praktyce oddzielenia dokonuje się przy pomocy filtrów mechanicznych i elektrycznych, a ostatnio cyfrowych. Wprowadzenie do pomiarów chropowatości powierzchni techniki cyfrowej ułatwiło projektowanie filtrów, ale nie doprowadziło do ich optymalizacji i normalizacji.

Dosyć szeroki zestaw filtrów cyfrowych do oddzielania składowych występujących w strukturze geometrycznej powierzchni proponuje firma Rank Taylor Hobson [1] w profesjonalnym programie TalyProfile przeznaczonym do analizy mikrogeometrii powierzchni. Program ten umożliwia między innymi rozdzielenie w procesie filtracji składowych falistości i chropowatości z wykorzystaniem czterech filtrów cyfrowych.

W programie jest też opcja, która pozwala na graficzne zobrazowanie udziału falistości oraz chropowatości w badanym profilu (rys. 1). W górnym oknie widoczna jest linia falistości na tle profilu niefiltrowanego a w dolnym linia chropowatości.

Program umożliwia ocenę profilu filtrowanego i niefiltrowanego według większości znormalizowanych parametrów. Możliwe jest też wykonanie analizy spektralnej profilu. Analiza harmoniczna i korelacyjna umożliwia wykrycie poszczególnych składowych częstotliwościowych struktury geometrycznej powierzchni.

Analiza teoretyczna

Rozdzielenie profilu na składowe odpowiadające falistości i chropowatości polega zazwyczaj na wyznaczeniu linii średniej będącej w istocie profilem falistości poprzez wykorzystanie filtru dolnoprzestupowego a następnie na odjęciu jej od zarysu wyjściowego dla otrzymania profilu chropowatości. Oddzielenie chropowatości od innych składników struktury geometrycznej może być prowadzone także przez zastosowanie odrębnych filtrów dolno- i górnoprzestupowych.

W programie TalyProfile zmierzony profil jest reprezentowany przez zbiór rzędnych profilu zmierzonych ze stałym odstępem np. co 1 μm

Program TalyProfile umożliwia filtrację przy pomocy czterech rodzajów filtrów:

- filtru o funkcji wagowej o postaci krzywej dzwonowej, zwanego filtrem Gaussa,
- filtru symulującego filtrację analogową przy pomocy podwójnego filtru RC zgodnie z normą ISO - oznaczonym 2RC ISO,
- filtru o identycznej z poprzednim charakterystyce amplitudowej, ale nie dającym przesunięcia fazy - nazywanym 2RC PC
- oraz filtru o prostokątnej funkcji wagowej nazywanym ruchomą średnią - Sliding average.

Tab. Charakterystyki przenoszenia filtrów

Rodzaj filtru	Współczynnik przenoszenia chropowatości k_u	Współczynnik przenoszenia falistości l_u	Przesunięcie fazowe φ
Filtr Gaussa	$2^{-\alpha^2}$	$1 - k_u$	0
Filtr 2RC ISO	$\frac{3}{3 + \alpha^2}$	$\frac{3}{3 + \frac{1}{\alpha^2}}$	$2 \arctg \left(\frac{\alpha}{\sqrt{3}} \right)$
Filtr 2RC PC	$\frac{3}{3 + \alpha^2}$	$1 - k_u$	0
Filtr sliding average	$1 - l_u$	$\frac{\sin(\beta)}{\beta}$	0

gdzie: $\alpha = \frac{\lambda}{\lambda_c}$ $\beta = \frac{\pi}{\alpha}$

λ_c – długość odcinka filtru („cut-off”),
1 – długość fali profilu nierówności

Zależności matematyczne opisujące parametry poszczególnych filtrów przedstawiono w tabeli [1, 2]. Zostały one przez autorów niniejszej publikacji przekształcone do możliwie najprostszej postaci matematycznej.

Filtrację można przeprowadzić dla znormalizowanych długości odcięcia „cut off” filtru lub wybrać wartość niestandardową.

Śród wymienionych filtrów tylko filtr 2RC ISO wprowadza przesunięcie fazy, gdyż brane są pod uwagę wyłącznie wcześniejsze rzędne profilu.

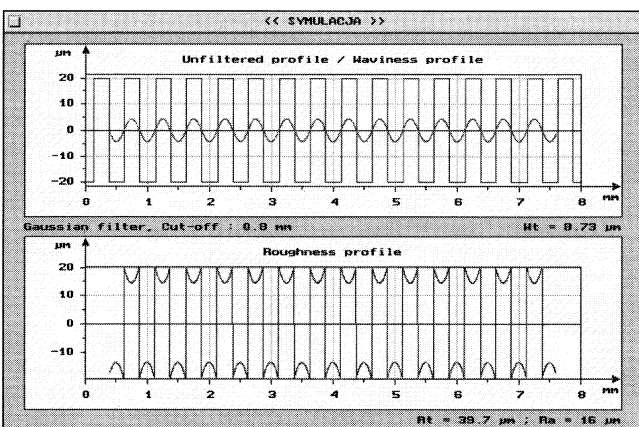
Czas filtracji profilu zawierającego 8000 próbek dla komputera klasy Pentium 100 jest dla pierwszych trzech filtrów zbliżony i wynosi ok. 0,3 s, a dla ostatniego jest w przybliżeniu trzykrotnie krótszy.

Badania charakterystyki filtrów

Wykorzystując w pomiarach chropowatości powierzchni program TalyProfile, autorzy niniejszego referatu zauważyli istotne różnice w wartościach mierzonych parametrów w zależności od zastosowanego filtru [3]. Spostrzeżenia te są zgodne z wcześniejszymi pracami [4] dotyczącymi filtrów analogowych typu RC. Stąd wyniknęła potrzeba przeprowadzenia szczegółowych badań charakterystyk przenoszenia tych filtrów.

Badania charakterystyk filtrów realizowanych w programie TalyProfile przeprowadzono przy pomocy profilu sinusoidalnego uzyskując informację o zmianach amplitudy i fazy w trakcie filtracji. Autorzy nie dysponowali odpowiednim wzorcem materialnym o profilu sinusoidalnym, którego pomiar mógłby być wykorzystany do wyznaczenia charakterystyki przenoszenia filtrów. Dlatego wykorzystano możliwość filtracji profili uprzednio zapisanych na dysku. Opracowano dla tego celu w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych oryginalny program umożliwiający zapisanie w formacie czytelnym dla programu TalyProfile symulowanych regularnych profili o zadanej amplitudzie i okresie. Program ten umożliwił utworzenie profilu sinusoidalnego, prostokątnego, trójkątnego, piłokształtnego, złożonego z łuków okręgowych oraz superpozycję dwu takich profili. Przy pomocy tego programu powstał między innymi profil prostokątny przedstawiony na rysunku 1.

Do wyznaczenia charakterystyki filtrów wykorzystano wzorcowy sygnał sinusoidalny o amplitudzie 0,02 mm i długości fali 0,5 mm.



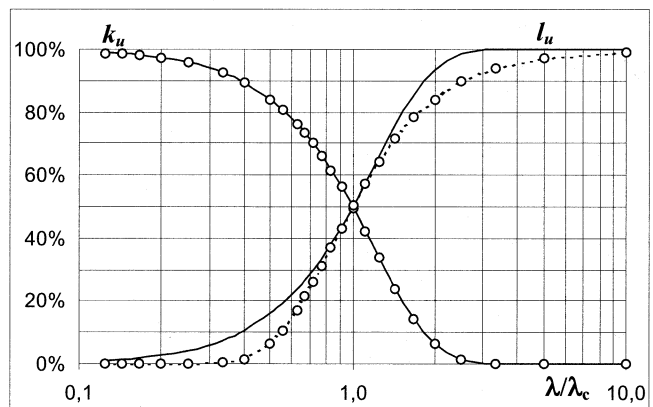
Rys. 1. Graficzne zobrazowanie udziału falistości oraz chropowatości w badanym profilu

Stosowano filtry o długościach odcięcia z zakresu od 1/8 mm do 10 długości fali sygnału wzorcowego. Po filtracji zarówno profil falistości jak i chropowatości są sygnałami sinusoidalnymi o tej samej długości fali, a ich amplituda i faza jest funkcją rodzaju filtru długości odcięcia filtru oraz długości fali sinusoidy.

Przyjęto, że wartość współczynnika przenoszenia k_u chropowatości jest równa stosunkowi wartości parametru R_t do dwukrotnej wartości amplitudy sygnału niefiltrowanego. Natomiast współczynnik przenoszenia falistości oznaczony symbolem l_u określono jako wartość stosunku parametru W_t do dwukrotnej amplitudy sygnału wejściowego.

Charakterystyki przenoszenia filtrów przedstawiono w formie wykresów odkładając na osi rzędnych współczynniki przenoszenia amplitudy k_u i l_u , a na osi odciętych stosunek długości fali symulowanego profilu nierówności do długości odcięcia filtru λ/λ_c w skali logarymicznej. Linia ciągłą na wykresach zaznaczono teoretyczne charakterystyki przenoszenia badanych filtrów a punkty oznaczone okręgami wyznaczają charakterystyki doświadczalne.

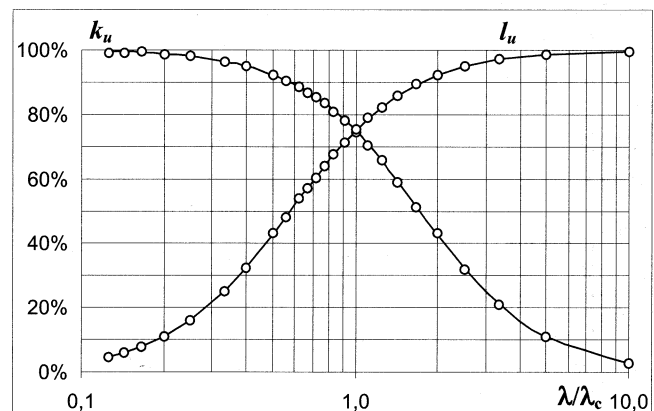
Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę amplitudową filtru Gaussa. Przebieg krzywej charakteryzuje się dużym nachyleniem,



Rys. 2. Charakterystyki przenoszenia amplitudy filtru Gaussa

co w efekcie powoduje, że dla stosunku $\lambda/\lambda_c = 1$, współczynnik przenoszenia k_u amplitudy wynosi 50%. Nie obserwuje się przebiegu charakterystyki obecności zafalowań. Występuje także pełna zgodność charakterystyki teoretycznej i doświadczalnej dla współczynnika przenoszenia chropowatości k_u . Natomiast charakterystyka l_u otrzymana doświadczalnie ma wyraźnie bardziej stromy przebieg niż charakterystyka teoretyczna. Odstępstwa sięgają 10%. Jest to spowodowane najprawdopodobniej stosowaniem w programie TalyProfile uproszczonego algorytmu realizacji tego filtru w postaci trzykrotnego obliczenia średniej ruchomej [2].

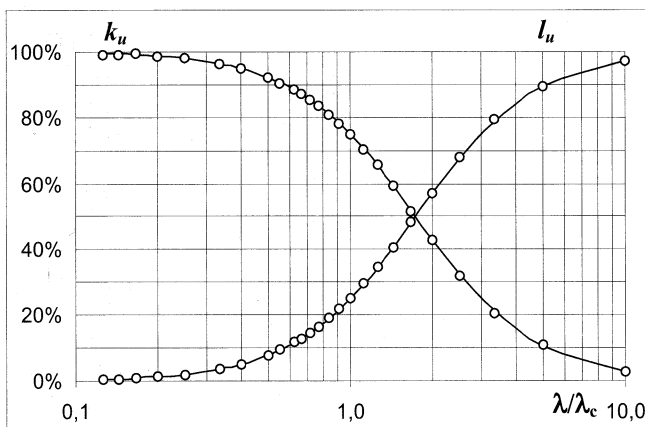
Charakterystykę przenoszenia amplitudy filtru 2RC ISO zilustrowano na rysunku 3. Przebieg charakterystyki jest znacznie



Rys. 3. Charakterystyki przenoszenia amplitudy filtru 2RC ISO

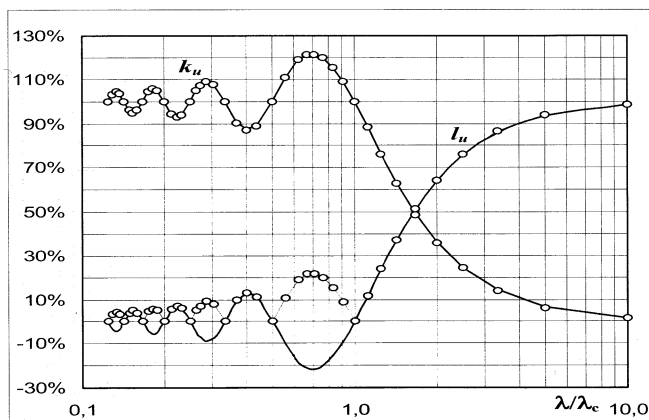
mniej stromy niż w przypadku poprzedniego filtru. W tym przypadku dla stosunku $\lambda/\lambda_c = 1$, współczynnik przenoszenia amplitudy wynosi 75 %. Jednocześnie współczynnik przenoszenia falistości wynosi w tym punkcie także 75 %. Jest to wynik przesunięcia fazowego wprowadzonego przez ten filtr. Ponieważ suma k_u i l_u dla tego filtru sięga prawie 150 %, trudno mówić o poprawnym rozdzielaniu falistości i chropowatości. Profil chropowatości nie wynika w tym przypadku z odjęcia od profilu niefiltrowanego profilu falistości. Charakterystyki teoretyczna i doświadczalna dla obu współczynników praktycznie pokrywają się.

Przedstawiona na rysunku 4 charakterystyka amplitudowa filtru 2RC PC jest prawie identyczna jak dla filtru Gaussa, ale współczynnik przenoszenia $k_u = 50\%$ jest osiągany dopiero dla $\lambda \approx 1,73 \lambda_c$. W tym przypadku, podobnie jak dla filtru 2RC ISO, obserwuje się dużą zgodność charakterystyki doświadczalnej z teoretyczną.



Rys. 4. Charakterystyki przenoszenia amplitudy filtru 2RC PC

Rysunek 5 ilustruje przebieg charakterystyki amplitudowej filtru „sliding average”. Dla tego filtru, w odróżnieniu od poprzednich, dla stosunku $\lambda/\lambda_c = 1$ współczynnik przenoszenia chropowatości $k_u = 100$, a współczynnik przenoszenia falistości $l_u = 0$. Przebieg tej charakterystyki wyróżnia się obecnością zafalowań, szczególnie dla $\lambda/\lambda_c < 1$. Amplituda profilu chropowatości wzrasta o ponad 20 % w stosunku do profilu niefiltrowanego. Natomiast dla charakterystyki l_u wartości doświadczalne pokrywają się z wartościami bezwzględnie charakterystyki teoretycznej, zaznaczonymi na rysunku linią przerywaną. Faktycznie w obszarach „ujemnej amplitudy” obserwuje się zmianę fazy sygnału na przeciwną (o 180°), co nie jest rozróżniane w wartości parametru R_t .



Rys. 5. Charakterystyki przenoszenia amplitudy filtru „ruchoma średnia” (sliding average)

Wnioski

1. Badane filtry cyfrowe różnią się w sposób istotny, zarówno charakterystyką amplitudową w szczególności wartością współczynnika przenoszenia chropowatości k_u , który dla $\lambda/\lambda_c = 1$ wynosi 50 %, 75 % lub 100 %, stromością nachylenia charakterystyki, obecnością zafalowań oraz charakterystyką fazową (obecność lub brak przesunięcia fazowego). Charakterystyki doświadczalne i teoretyczne wykazują bardzo dobrą zgodność z wyjątkiem l_u dla filtru Gaussa.
2. Filtr Gaussa jest przez autorów programu TalyProfile uprzywilejowany i stosowany w programie jako domyślny - mimo braku odpowiednich norm a także odstępstwa od charakterystyki teoretycznej dla tego filtru. Filtr ten ze względu na to, że współczynniki przenoszenia, zarówno składowej falistości, jak i chropowatości wynoszą 50 %, przy stosunku $\lambda/\lambda_c = 1$ jest zdecydowanie najlepszy podczas równoczesnego wyznaczania parametrów chropowatości i falistości. Filtr nie wprowadza przesunięcia fazowego w procesie filtracji. Stosowana jednak w programie uproszczona realizacja tego filtru w postaci trzykrotnego obliczania średniej ruchomej wpływa prawdopodobnie na przebieg charakterystyki l_u , która odbiega od krzywej teoretycznej.
3. Wydaje się, że stosowanie filtru 2RC ISO jest celowe jedynie w przypadku konieczności porównania wyników z uzyskanymi z profilometru analogowego. Filtr ten wprowadza przesunięcia fazowe linii średniej, co może zniekształcić przebieg profilu chropowatości. Charakterystyka filtru jest zgodna z zaleceniami normalizacyjnymi.
4. Filtr 2RC PC identyczny pod względem charakterystyki amplitudowej z poprzednim, ale nie wprowadzający przesunięcia fazowego, mniej zniekształca zarys chropowatości. Jednakże współczynnik przesunięcia 50 % jest osiągany dopiero dla $\lambda \approx 1,73 \lambda_c$. Czas filtracji jest dla tych trzech filtrów zbliżony i dla komputera klasy Pentium 100 wynosi ok. 0,3 s.
5. Filtr Sliding average („średnia ruchoma”) raczej nie powinien być stosowany ze względu na niemonotoniczność charakterystyki amplitudowej (zafalowanie sięga 20 %). Tej wady nie rekompensuje prostota jego realizacji cyfrowej i wynikająca stąd większa szybkość obliczeń. Skrócenie czasu obliczeń w stosunku do pozostałych filtrów jest jednak nieistotne.
6. Przeprowadzone badania potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia, że w zależności od zastosowanego typu filtru, jeżeli w widmie profilu występują długości fal zbliżone do długości odcięcia l_c , to otrzymuje się istotne różnice w wartościach większości parametrów chropowatości a także falistości, sięgające nawet 20 %. Z tego względu wynik pomiaru powinien być podawany wraz z informacją o rodzaju zastosowanego filtru i długości odcięcia λ_c .

Literatura

- [1] TalyProfile handbook, ver. 1.2.0. Rank Taylor Hobson Ltd. Leicester 1996
- [2] D.J. WHITEHOUSE: Handbook of Surface Metrology. 1994
- [3] J. TOMASIK, R. RUDZIŃSKI: Badanie wpływu charakterystyki filtrów cyfrowych na wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni. Materiały konferencyjne Mechatronika 97. Prace naukowe. Konferencje z. 14, tom II. Oficyna Wydawnicza PW, 1997
- [4] S. ŻEBROWSKA-LUCYK, M. BELICZYŃSKA-WRÓBEL: Wpływ charakterystyki filtru na wyniki pomiaru nierówności powierzchni. Mechanik nr 4/1984