

Uwarunkowania i ograniczenia cyfrowego pomiaru nierówności profili powierzchni

ADAM BORYCZKO*

Pomiar zdeterminowanych wartości nierówności profili powierzchni wyrażanych cyfrowo jest złożonym problemem interdyscyplinarnym, który ma istotne ograniczenia techniczne i metrologiczne, często niezauważane w praktyce pomiarowej i analizie ich wyników. Aby spełnione były różne uwarunkowania zależne od charakteru nierówności oraz celu i założeń badania powierzchni, należy przyjąć odpowiednie cyfrowe parametry pomiaru profili powierzchni przed pomiarami. W artykule podano uwarunkowania i usystematyzowano ograniczenia pomiaru nierówności powierzchni w szerokoczęstotliwościowym ujęciu składowych profili.

Nierówności mają duże znaczenie w jakościowej ocenie powierzchni, jak również cech technicznych i eksploatacyjnych przedmiotów, zwłaszcza gdy bierze się pod uwagę ukształtowanie i rozmieszczenie nierówności w długości profilu. Zakłócanie powierzchni przedmiotów oddziaływaniami z całego *Układu Obróbkowego* (UO) może być bardzo złożone i generuje w procesie rozbudowaną *Strukturę Geometryczną Powierzchni* (SGP). Poprzeczne i wzdłużne nierówności powierzchni, jako profile powierzchni formowane narzędziami o policzalnej liczbie ostrzy, są traktowane w procesie jako sygnały z UO o składowych okresowych z zakłóceniami okresowo-przypadkowymi. Nierówności powierzchni mierzone są cyfrowo, a parametry ich pomiaru należy ustalić przed pomiarami, aby spełnione były różne uwarunkowania, zależne od charakteru nierówności i celu badania efektów powierzchni. Ogólne zasady pomiaru i filtrowania profili powierzchni omawiane są szeroko w literaturze [1, 8, 9], jednak kolejno ograniczane zakresy nierówności eliminują pewne parametry nierówności całkowitych występujących w powierzchniach rzeczywistych. Świadomość utraty części sygnału nierówności zmusza do zajęcia się tymi problemami i systemowego ustalenia uwarunkowań.

Warunki pomiarowe wynikające z próbkowania sygnału powinny zapewnić:

- zachowanie informacji pomiarowej w sygnale nierówności powierzchni,
- nie zniekształcanie i nie obcinanie sygnału nierówności.

Bardzo ważne jest systemowe podejście do spełnienia i realizowania cyfrowych warunków pomiarowych nierówności powierzchni w odniesieniu do ich ograniczeń technicznych i założeń badawczych.

Standardowe parametry wysokości stosowane do wartościowania profilu powierzchni nie uwzględniają sekwencji występowania charakterystycznych kształtów nierówności oraz nie określają ich cykliczności i rozłożenia na długości profilu. Zalecane w normach parametry wyso-

kości nierówności profilu (np. Ra – średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności od linii średniej, Rq – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności od linii średniej) nie pozwalają jednoznacznie ocenić charakteru powierzchni. Normatywne parametry wysokości nierówności nie umożliwiają wyodrębnienia składowych periodycznych i przypadkowych jako składowych nierówności, jak również ich zakłóceń z UO. Również grupy parametrów:

- horyzontalnych,
- planimetrycznych,
- punktowych (punkty szczególne profilu),
- funkcje, np. udział nośny,
- rozkłady, np. wysokości nierówności

nie uwzględniają systemowej i kompleksowej oceny oraz usytuowania nierówności na długości pomierzonego profilu powierzchni [3].

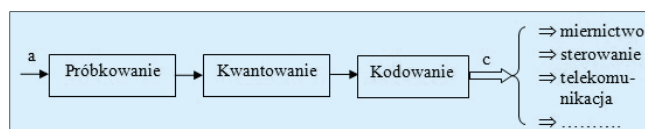
Ponieważ nierówności profili powierzchni są złożonymi przebiegami okresowymi z zakłóceniami przypadkowymi to najkorzystniejsze jest ich rozpatrywanie widmowe, szerokopasmowe [2, 5, 7]. Takie ujęcie składowych nierówności ma duże znaczenie przy określaniu cech technicznych i użytkowych powierzchni w aspekcie technologicznym, eksploatacyjnym, jakościowym itp.

Warunki cyfrowego pomiaru nierówności powierzchni

Przyjmowane wartości parametrów przetwarzania analogowo-cyfrowego (a/c) w pomiarach cyfrowych sygnału powierzchni narzucają określone konsekwencje w ujęciu pomiarowym, a następnie ich analizie komputerowej. Dlatego realizując procesy pomiarowe, należy przyjmować odpowiednie parametry ucyfrowiania sygnałów i uwzględniać wynikające z nich ograniczenia pomiarowe. Należy mieć świadomość występujących ograniczeń i popełniania błędów, które są wprowadzane na kolejnych etapach przetwarzania a/c , to jest: **próbkowania**, **kwantowania** i **kodowania**, w celu zastąpienia sygnału analogowego ciągiem danych cyfrowych, jak to przedstawiono na rys. 1 [4].

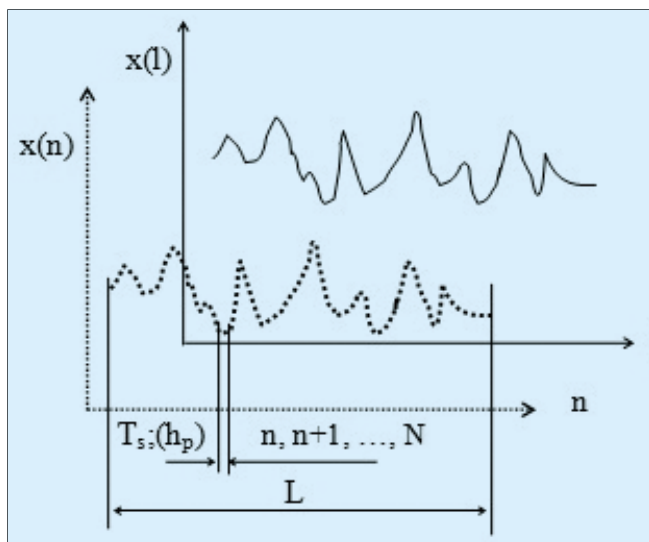
W pomiarach nierówności powierzchni najważniejszy jest etap próbkowania, w którym przyjmowane wartości odcinka próbkowania w czasie T_s , lub innej wielkości, np. odległości h_p oraz liczba próbek N nierówności mierzonej decydują o długości L (rys. 2), a jednocześnie determinują zakres częstotliwości rozpatrywanego sygnału powierzchni.

Kwantowanie o rozdzielczości q powinno być uzależnione od parametrów próbkowania i od zakresu wartości



Rys. 1. Schemat procesu przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału nierówności powierzchni

* Dr hab. inż. Adam Boryczko – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej



Rys. 2. Interpretacja parametrów dyskretyzacji sygnału nierówności powierzchni $x(n)$ dla przebiegu analogowego $x(l)$

mierzonej x_z lub od maksymalnej wartości x_{max} w przypadku pomiarów z wartością zerową. Można zwiększać rozdzielczość przetwarzania a/c , zmniejszając wartość kwantowania q . Rodzaj kodowania wartości próbkowanych i kwantowanych nie powinien mieć wpływu na dokładność wartości cyfrowych mierzonych nierówności, lecz determinować liczbę bitów przetwarzania analogowo-cyfrowego [4].

Warunek próbkowania

Dla nierówności opisanej w postaci wartości cyfrowych ważne jest przyjęcie założenia o warunkach ucyfrowiania, w jakich należy próbować sygnał analogowy, aby nie stracić zawartej w nim informacji. W cyfrowej metodzie pomiaru profilu należy dopasować przedział próbkowania h_p do maksymalnej częstotliwości całego przebiegu zgodnie z twierdzeniem Shannona o próbkowaniu sygnału ciągłego [5]. Na tej podstawie wyznacza się wartość przedziału próbkowania w stosunku do maksymalnej częstotliwości w sygnale mierzonym, określanej według wzoru:

$$h_p \leq \frac{1}{2v_{max}} \quad (1)$$

gdzie: v_{max} – największa częstotliwość występująca w sygnale nierówności, h_p – odcinek próbkowania.

Częstotliwość próbkowania określa się z zależności:

$$v_p = \frac{1}{h_p} \quad (2)$$

Jest ona nazywana częstotliwością Nyquista.

Odcinek próbkowania h_p powinien być dopasowany do charakteru częstotliwościowego sygnału pomiarowego i spełniać twierdzenie o próbkowaniu. Jest to niekorzystne ze względu na nieuwzględnienie niskoczęstotliwościowych składowych sygnału, które mogą mieć duże znaczenie dla mierzonej nierówności powierzchni. Warunki te można poprawić przez zwiększenie liczby próbek sygnału, co wiąże się z dłuższymi odcinkami mierzonych profili i wykorzystaniem większej pojemności pamięciowej cyfrowych jednostek obliczeniowych. Twierdzenie o próbkowaniu stosuje się dla sygnałów długich czasowo

o ograniczonym zakresie częstotliwości; praktycznie trudno spełnić te wymagania. Wobec niespełnienia warunku twierdzenia o próbkowaniu sygnału, w widmie następuje przemieszanie składowych poprzez ich nakładanie, określane jako błąd maskowania, i nazwane z angielskiego *aliasing*.

Błędy maskowania składowych można wyeliminować dwoma sposobami przez:

- przyjęcie odpowiednio dużej częstotliwości próbkowania,
- filtrację sygnału analogowego przed próbkowaniem tak, aby ograniczyć jego widmo do częstotliwości v_a , jako częstotliwości antyaliasingowej [7].

Warunek kwantowania

Wartość kwantowania decyduje o błędzie kwantowania, tzw. *szumie kwantowania*, jednocześnie określa rozdzielczość układu oraz warunkuje p -bitowość przetwornika a/c lub układu przetwarzania. Pełny zakres przetwarzania wielkości $x_{max} = FSR$ (Full Scale Range) zostaje podzielony na skończoną liczbę stanów kwantowania; wartości analogowe są przyporządkowane odpowiednim zdeterminowanym wartościom nierówności kwantowanej.

Kwantowanie polega na przyporządkowaniu każdej wartości sygnału analogowego zdeterminowanej wartości dyskretnej wg wzoru:

$$x_o = \text{ent}\left(\frac{x}{q} + \frac{1}{2}\right)q \quad (3)$$

gdzie: x_o – wartość układu kwantującego na wyjściu, x – wartość sygnału analogowego na wejściu układu, q – elementarny przedział kwantowania, $\text{ent}(x)$ – operator wyznaczający część całkowitą liczby rzeczywistej.

Powoduje to niejednoznaczności pomiędzy sygnałami analogowymi i cyfrowymi wyrażone błędem kwantyzacji $\pm q/2$, gdyż pewnej liczbie na wejściu odpowiada nie tylko jedna określona wartość x_i , gdzie $i = 1, 2, \dots$, lecz wiele wartości z przedziału $x_i \pm q/2$ [4].

Warunek kodowania

W przetworniku a/c po skwantowaniu wartości sygnału wyjściowego następuje jego zakodowanie. W naturalnym kodzie dwójkowym uzyskuje się p -bitowy rezultat przetwarzania a_1, a_2, \dots, a_p według wzoru:

$$x = (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_p 2^{-p})x_{max} \quad (4)$$

gdzie: a_1, \dots, a_p mogą przyjmować wartości 0 lub 1, x_{max} – pełny zakres sygnału wejściowego, a_1 – współczynnik określający stan najbardziej znaczącego bitu (MSB – **Most Significant Bit**), a_p – współczynnik określający stan najmniej znaczącego bitu (LSB – **Least Significant Bit**).

Wyjście binarne przetwornika osiąga wartość maksymalną, gdy wszystkie bity przyjmują wartość równą 1. Słowo kodowe złożone z samych jedynek nie odpowiada wartości pełnego zakresu przetwarzania, lecz wartości mniejszej o wagę najmniej znaczącego bitu $LSB = q$.

W praktyce układy kwantowania i kodowania są ściśle z sobą powiązane. Układ kwantujący jest zaprojektowany tak, że dzieli pełny zakres przetwarzania x_{max} na 2^p przedziałów q :

$$x_{max} = 2^p \cdot q \quad (5)$$



gdzie: p – liczba bitów przetwornika, q – elementarny przedział kwantowania (rozdzielczość układu, którą określa ekwiwalent analogowy najmniej znaczącego bitu – LSB) [4].

Natomiast wartość zakresu x_{max} jest uzależniona od powiększenia pionowego profilometru powiązanego z wartościami wysokości nierówności powierzchni i tzw. współczynnikiem skali lub czułością pomiaru profilu powierzchni.

Jak widać, przetwarzanie analogowo-cyfrowe jest złożonym problemem interdyscyplinarnym, który zawiera istotne uwarunkowania metrologiczne, niekiedy niezauważane w praktyce pomiarowej i analizie ich wyników.

Warunek pomiaru i przetwarzania

Bardzo ważnym elementem przetwarzania a/c jest poprawne przyjęcie wartości odcinka próbkowania h_p . Jego wartość, przy stałej liczbie próbek N , decyduje o długości L rozpatrywanego sygnału według wzoru (6), jak również determinuje zakres częstotliwości jego analizy widmowej, którego wartości graniczne podają wzory (7) i (8).

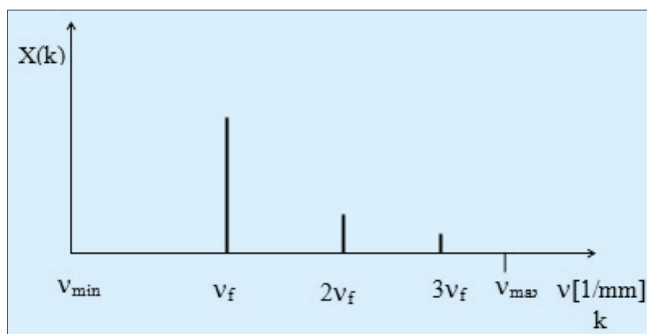
Długość mierzonego profilu L z danych cyfrowych sygnału nierówności określa wzór:

$$L = N \cdot h_p \quad (6)$$

gdzie: N – liczba próbek mierzonego sygnału, h_p – odcinek próbkowania.

Sygnały nierówności powierzchni $x(l)$ determinowane są cyfrowo $x(n)$ dla $n = 1, 2, 3, \dots, N$ (rys. 2).

Jeżeli takie ujęcia w długości profilu nie pozwalają na pełne ich wartościowanie (jak przedstawiono dla parametrów wysokościowych), należy przejść z czasowego/długościowego określania sygnału nierówności na ujęcie częstotliwościowe, według przekształcenia Fouriera [3, 5]. Widmo amplitudowe oparte na współczynnikach Fouriera $X(k)$ dla $k = 1, 2, 3, \dots, N/2$ pokazuje charakterystykę występowania wysokości nierówności w całym rozpatrywanym zakresie częstotliwościowym ich składowych (rys. 3).



Rys. 3. Widmo amplitudowe składowych $X(k)$ szybkiej transformanty Fouriera nierówności profilu powierzchni $x(n)$ toczonych bez zakłóceń układu obróbkowego, v_f – główna składowa okresowa nierówności profilu z harmonicznymi

Przyjęte w pomiarze cyfrowym parametry h_p i N decydują o zakresie i rozdzielczości tej analizy, a tym samym o odpowiednio ujętym charakterze nierówności. Nierozpatrywanie doboru parametrów cyfrowego opisu profilu do jego charakteru może niepotrzebnie prowadzić do zmniejszania przedziału próbkowania i zwiększania liczby punktów pomiarowych, a jednocześnie do obciążenia składowych nisko- i wysokoczęstotliwościowych (krótko- lub długofalowych) nierówności. Może również przyczynić się

do wypełniania pamięci komputera pomiarowego, ponoszenia większych kosztów pomiaru i opóźniania otrzymania wyników analizy powierzchni.

Rozpoznanie składowych o charakterze okresowym w analizowanym sygnale profilu upoważnia do dalszej analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości, w oparciu o transformację Fouriera, w postaci szybkiej transformaty Fouriera (*Fast Fourier Transformation* – FFT) [5, 7]. Do przeprowadzenia pomiaru i analizy częstotliwościowej sygnału z zastosowaniem szybkiej transformaty Fouriera wymagana jest liczba próbek N według zależności $N = 2^p$, gdzie $p = 1, 2, 3, \dots$; wykładnik p przyjmuje zwykle liczbę 6, 7, 8, 9, 10. Mając na uwadze możliwości pojemnościowe przetwarzania danych cyfrowych, jak również zakres częstotliwości analizowanych nierówności przyjmuje się przeważnie $p = 10$. Daje to $N = 1024$ punkty pomiarowe nierówności profilu powierzchni, jako liczbę danych cyfrowych profilu do przetwarzania i analizy częstotliwościowej oraz do archiwizacji profili powierzchni. W symetrycznym widmie o dodatniej i ujemnej częstotliwości otrzymuje się dla $k > 0$ liczbę prążków składowych częstotliwościowych $k = 1, 2, 3, \dots, N/2$ o rozdzielczości zależnej od wartości przedziału próbkowania h_p . Analiza współczynników dyskretnego przekształcenia Fouriera $X(k)$ odbywa się w zakresie częstotliwości v [1/mm] lub wyrażana jest numerami k kolejnych składowych.

Warunki ujęcia częstotliwościowego nierówności powierzchni

Widmowe ujęcie nierówności powierzchni umożliwia szerokie pasmo analizy o najmniejszej wartości częstotliwości, powiązanej z długością rozpatrywanego odcinka profilu według wzoru (8). Ograniczenia zakresu analizy częstotliwościowej profili SGP zależą od możliwości układu i przyjętych warunków pomiarowych nierówności. Dolna wartość częstotliwości zależy od długości mierzonego profilu, a górna od wielkości końcówki pomiarowej w metodzie stykowej lub rozdzielczości układu bezstykowego. Analiza taka jest możliwa przy zastosowaniu cyfrowego zapisu pomiaru nierówności profilu. Wynikają z tego uwarunkowania dotyczące doboru długości przedziału próbkowania h_p oraz liczby punktów pomiarowych profilu N , a w widmowym przetwarzaniu nierówności determinowane jest pasmo częstotliwościowe analizy $v_z = v_{max} - v_{min}$ i jego rozdzielczość Δv .

Określenie parametrów analizy częstotliwościowej sygnału nierówności:

- obliczenie częstotliwości maksymalnej z warunku twierdzenia o próbkowaniu:

$$v_{max} = \frac{1}{2h_p} \quad (7)$$

- obliczenie częstotliwości minimalnej z długości mierzonego sygnału L :

$$v_{min} = \frac{1}{N \cdot h_p} \quad (8)$$

- obliczenie zakresu częstotliwości analizy sygnału:

$$v_z = v_{max} - v_{min} = \frac{1}{h_p} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{N} \right) \quad (9)$$

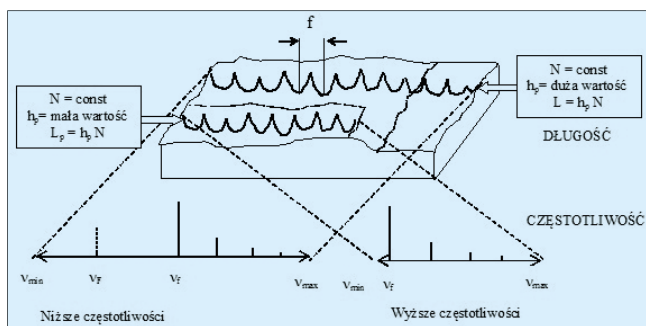
Obliczenie rozdzielczości analizy Δv dla dyskretnej wartości częstotliwości i pojedynczej składowej dla $k = 1$ może być określane według wzoru (8).

Ograniczenia cyfrowego pomiaru profili powierzchni

Dobór zakresu częstotliwości analizy widmowej SGP dla warunków cyfrowego przetwarzania danych profili powierzchni należy przeprowadzać w aspekcie potrzeb rozpoznawania głównych składowych nierówności w całym ich zakresie według podstawowych kryteriów [3, 6]:

- szerokości pasma analizy nierówności powierzchni dla składowych kształtu, falistości i chropowatości,
- maksymalnej rozdzielczości widma dla dokładności analizy składowych powierzchni.

Należy przedstawić kompleksowo ograniczenia pomiarowe przetwarzania a/c i analizy częstotliwościowej nierówności profili powierzchni oraz podzielić systemowo ich częstotliwościowe wartości graniczne na wysokie i niskoczęstotliwościowe. Pomiedzy wartościami granicznymi znajdują się pasma analizy, jako zakresy częstotliwościowe nierówności powierzchni, przy określonych uwarunkowaniach (rys. 4).



Rys. 4. Interpretacja dopasowania odcinka próbkowania h_p do zakresu składowych częstotliwościowych v_z profilu powierzchni, f – główna składowa okresowa nierówności, v_f – główna składowa częstotliwościowa nierówności profilu z harmonicznymi, v_f – niskoczęstotliwościowa składowa zakłóceń nierówności profilu

Ograniczenia wysokoczęstotliwościowe (krótkofalowe)

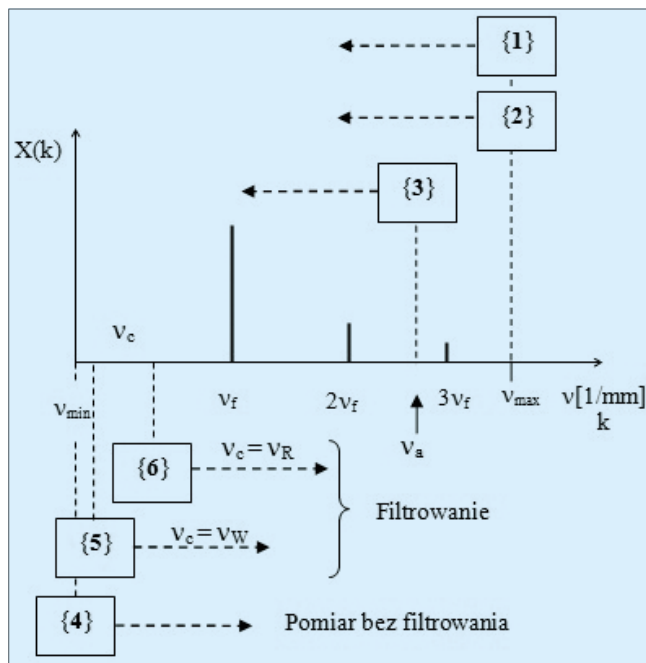
■ **Ograniczenie wielkością ostrza pomiarowego nierówności.** Warunek ten sprowadza się do zastosowania zdeterminowanej wartości promienia zaokrąglenia ostrza pomiarowego profilometru lub wielkości plamki odwzorowującej nierówności w metodzie bezstykowej. Jest to najmniejsza długość fali nierówności profilu, odwzorowywana przez końcówkę pomiarową; zwykle ma ona wartość jej promienia zaokrąglenia. Stanowi też największą częstotliwość **{1}** filtrowania dolnoprzepustowego nierówności powierzchni końcówką stykową układu pomiarowego.

■ **Ograniczenie przedziałem próbkowania nierówności.** W cyfrowej metodzie pomiaru profilu należy dopasować przedział próbkowania h_p do maksymalnej częstotliwości całego przebiegu, zgodnie z twierdzeniem Shannona o próbkowaniu sygnału ciągłego **{2}**. Na tej podstawie wyznacza się wartość odcinka próbkowania w stosunku do maksymalnej częstotliwości w sygnale mierzonym, określanej według wzoru (1).

W związku z przyjętymi parametrami pomiaru cyfrowego można określić zakres rozpatrywanej częstotliwości nierówności, nazywany pasmem analizy częstotliwościowej według zależności:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{h_p N} = v_{\min} \leq v_z \leq v_{\max} = \frac{1}{2h_p} \quad (10)$$

Częstotliwość minimalna – wyznaczana jest na długości odcinka pomiarowego L , jako pierwsza składowa widma



Rys. 5. Częstotliwościowe uwarunkowania i ograniczenia zakresu $v_z = v_{\max} - v_{\min}$ pomiaru i analizy widmowej nierówności profilu powierzchni

dla $k = 1$ – jest zależna od wartości przedziału próbkowania h_p oraz liczby danych pomiarowych profilu N .

Częstotliwość maksymalna rozpatrywanej nierówności jest determinowana wartością przedziału próbkowania i przy zmniejszaniu jego wartości v_{\max} rośnie. Taka sytuacja z punktu widzenia oceny niskoczęstotliwościowych składowych dla dokładności powierzchni, np. v_f w ujęciu eksploatacyjnym, trybologicznym czy diagnostycznym jest niekorzystna. Powoduje ona nieuzasadnione rozszerzenie pasma analizy ku większym wartościom częstotliwości, gdyż znaczące lub dominujące składowe nierówności v_f – jako składowe zakłóceń niskoczęstotliwościowych – zawarte są w zakresie mniejszych wartości częstotliwości. Z tego też względu należy tak dobierać wartości przedziału próbkowania, aby uwzględnić niskoczęstotliwościowy zakres nierówności (rys. 5).

■ **Ograniczenie antyaliasingowe (niespełnienie twierdzenia o próbkowaniu sygnału).**

W metrologii struktury geometrycznej powierzchni istnieje tendencja do zmniejszania przedziału próbkowania i przy stałej liczbie punktów pomiarowych przebiegu niepotrzebnie poszerzane jest pasmo nierówności i przesuwane ku większym wartościom częstotliwości. Jest to niecelowe ze względu na charakter dominujących składowych okresowych, występujących w niskich częstotliwościach nierówności powierzchni i znaczących dla zastosowań praktycznych powierzchni, które np. dla toczenia dokładnego mieszczą się w paśmie $v < 10$ 1/mm [3]. Z uwagi na charakter powierzchni często nie wykorzystuje się wysokoczęstotliwościowego podzakresu składowych i nie spełnia twierdzenia o próbkowaniu sygnału nierówności. Wówczas przyjmuje się wartości przedziału próbkowania większe niż we wzorze (1), ale może wystąpić błąd przemieszania składowych w widmie, tzw. *aliasing*. W takim przypadku należy zastosować filtrowanie antyaliasingowe, dolnopasmowe sygnału nierówności o częstotliwości v_a , odpowiadającej przyjętej wartości próbkowania. Dla możliwego do zastosowania przedziału próbkowania wyznaczona jest częstotliwość antyaliasingowa

v_a , jako maksymalna w analizowanej nierówności profilu {3}. Jest ona ograniczeniem pasma od góry i obejmuje niskoczęstotliwościowy zakres analizy z uwzględnieniem przyjętych warunków próbkowania dla niespełnienia twierdzenia o próbkowaniu sygnału i dla danego charakteru nierówności powierzchni.

Ograniczenia niskoczęstotliwościowe (długofalowe)

Ograniczenia długofalowe wiążą się z długością rozpatrywanych profili nierówności. Do określania jakości powierzchni i ich cech eksploatacyjnych najkorzystniejszymi warunkami są jak najdłuższe odcinki profili, mierzone przy największych możliwych odstępach próbkowania. Z tych też względów należy mierzyć powierzchnie bez filtrowania. Jednak takie ujęcie nie uwzględnia nierówności o małych wysokościach i długościach dla składowych wysokoczęstotliwościowych. Można uzyskać takie pomiary, ale wiążą się one z przyjmowaniem małych wartości odstępów próbkowania i dużej liczby punktów pomiarowych nierówności, co wymaga większej pamięci komputera. W stosowanych profilometrach, w zależności od charakteru nierówności powierzchni, stosuje się filtrowanie normatywne długością fali filtrowania nierówności, tzw. wartością *cut-off*. Dla profili o składowych okresowych przyjmuje się zdeterminowane wartości filtrowania *cut-off*, w zależności od wartości parametru *RSm* długości nierówności i parametrów ich wysokości, np. *Ra*. Dla profili o składowych nieokresowych przyjmuje się zdeterminowane wartości filtrowania *cut-off* w zależności od wartości parametru ich wysokości *Ra* jak przedstawiono w tabl. I [8]. Ponieważ parametry wysokościowe nierówności – ze względu na statystyczne ujęcie zmiennych wartości profilu – są niejednoznaczne, przyjmowanie wartości filtrowania jest w pewnym sensie subiektywne, również co do określania i rozdzielania składowych okreso-

TABLICA I. Normatywne filtrowanie długością fali *cut-off* nierówności profili powierzchni

Profile o składowych okresowych	Profile o składowych nieokresowych	Długość fali filtrowania „cut-off”	Odcinek elementarny	Długość odcinka pomiarowego
<i>RSm</i> (mm)	<i>Ra</i> (μm)	λ_c (mm)	<i>l_r</i> (mm)	<i>l_n</i> (mm)
0.013 < <i>RSm</i> ≤ 0.04	0.006 < <i>Ra</i> ≤ 0.02	0.08	0.08	0.4
0.04 < <i>RSm</i> ≤ 0.13	0.02 < <i>Ra</i> ≤ 0.1	0.25	0.25	1.25
0.13 < <i>RSm</i> ≤ 0.4	0.1 < <i>Ra</i> ≤ 2	0.8	0.8	4
0.4 < <i>RSm</i> ≤ 1.3	2 < <i>Ra</i> ≤ 10	2.5	2.5	12.5
1.3 < <i>RSm</i> ≤ 4	10 < <i>Ra</i> ≤ 80	8	8	40

wych i nieokresowych. Dlatego też w niektórych ujęciach, dla zastosowanych filtrowań nierówności o przyjętych wartościach *cut-off*, część składowych o charakterze falistości wchodzi do rozpatrywanego w pomiarze z takim filtrowaniem zakresu chropowatości (może być odwrotnie). Jeżeli w widmie w zakresie chropowatości powierzchni wystąpi wąskopasmowy zakres składowych falistości, świadczy to o niewłaściwie przyjętym filtrowaniu w pomiarze [3].

W związku z tymi niejednoznacznościami w warunkach filtrowania, korzystnym rozwiązaniem jest pomiar profili bez filtrowania *cut-off* i rozpatrywanie tzw. profilu pierwotnego dla przyjętych parametrów pomiaru cyfrowego nierówności powierzchni. O wartościach parametrów pomiaru cyfrowego powinny decydować: cel analizy powierzchni i charakter składowych falowych lub częstotliwościowych nierówności. Jest to bardzo ważne ograniczenie

niskoczęstotliwościowe {4} rozpatrywania składowych nierówności powierzchni reprezentowane przez zależność (8). Rozpatrywana nierówność powierzchni może zawierać jedną składową, interpretowaną jako składowa stała lub trend profilu. Dla błędu kształtu należy rozpatrywać profil nierówności bez filtrowania i wtedy jego składowa jest rozpatrywana na długości odcinka pomiarowego *L*. Może ona również uwzględniać niedokładne ustawienie powierzchni pomiarowej w przyrządzie, ale taki przypadek należy eliminować w ponownym pomiarze.

Jeżeli rozpatrywana nierówność powierzchni wymaga rozpoznawania falistości i chropowatości, to należy – zgodnie z warunkami norm podanymi w tabl. I i II – wykonać w pomiarze filtrowanie długością fali *cut-off* [8, 9]. W tabl. II podano przeliczone wartości częstotliwości składowych nierówności powierzchni v_c dla odpowiadających im wartości odcinków elementarnych filtrowania normatywnego *cut-off*. Wtedy wyfiltrowana nierówność zawiera składowe falistości dla częstotliwości $v_c = v_W$ (*W* – *waviness*) lub chropowatości dla $v_c = v_R$ (*R* – *roughness*). Są to ograniczenia dolnoczęstotliwościowe nierówności pierwotnej i mają charakter filtrowania górnoprzepustowego, określanego dolną wartością częstotliwościową v_c dla falistości {5} i chropowatości {6}.

TABLICA II. Normatywne wartości odcinków elementarnych i odpowiadające im częstotliwości filtrowania nierówności powierzchni w analizie widmowej

Długość fali filtrowania „cut-off”	Odcinek elementarny pomiaru	Częstotliwość filtrowania dla „cut-off”
λ_c (mm)	<i>l_r</i> (mm)	v_c (1/mm)
0.08	0.08	12.5
0.25	0.25	4
0.8	0.8	1.25
2.5	2.5	0.4
8	8	0.125

*

Podsumowując: ograniczenia pomiarowe przetwarzania *a/c* i analizy częstotliwościowej nierówności profili powierzchni należy podzielić ich wartości graniczne na wysokości i niskoczęstotliwościowe, pomiędzy którymi znajdują się pasma analizy jako zakresy częstotliwościowe nierówności powierzchni dla odpowiednich uwarunkowań (rys. 4).

Do wysokoczęstotliwościowych ograniczeń, w kolejności od największej wartości częstotliwości odcięcia sygnału nierówności, należą:

- {1} filtrowanie promieniem zaokrąglenia ostrza pomiarowego w pomiarze,
- {2} określenie częstotliwości maksymalnej analizowanego profilu nierówności,
- {3} określenie częstotliwości v_a filtru antyaliasingowego.

Warunki te ograniczają zakres w górnych wartościach częstotliwości nierówności i powodują kolejno jego zmniejszanie. Są ważne w analizie przy uwzględnianiu składowych nierówności dla chropowatości i mikrostruktury geometrycznej powierzchni.

Niskoczęstotliwościowymi ograniczeniami pomiaru i analizy nierówności profilu powierzchni są wartości częstotliwości określane dla:

- {4} długości analizowanych nierówności profilu bez filtrowania,
- {5} wartości zastosowanego filtru odcięcia *cut-off* w pomiarze, odcięcia nierówności długością fali $\lambda_c = \lambda_W$ lub częstotliwością $v_c = v_W$ dla pasma falistości,



- {6} wartości zastosowanego filtra odcięcia *cut-off* w pomiarze, odcięcia nierówności długością fali $v_c = v_R$ lub częstotliwością $v_c = v_R$ dla pasma chropowatości.

Dolne ograniczenia zakresu częstotliwości nierówności są bardzo ważne ze względu na znaczące składowe niskoczęstotliwościowe profilu jako kształt na obserwowanej długości i falistości w ocenie dokładności i jakości powierzchni przedmiotu.

Dla użytkowych i jakościowych celów analizy powierzchni należy tak dobrać przedział próbkowania h_p i liczbę danych pomiarowych N , aby dominujące w powierzchni okresowe nierówności znalazły się wewnątrz pasma analizy według wzoru (10). Należy uwzględnić przedstawione ograniczenia i tak dopasować pasmo analizy, aby główna składowa nierówności v_f przyjmowała wartości częstotliwości środkowych dla rozpatrywanego zakresu nierówności v_c .

Zaprezentowana metoda widmowa analizy nierówności powierzchni i dopasowanie jej zakresu do nierówności profilu umożliwiając częstotliwościowe przedstawienie składowych falistości i chropowatości, a nawet kształtu na obserwowanej długości, które występują wspólnie w rzeczywistej powierzchni. Natomiast w pomiarze i określaniu parametrami normatywnymi są one rozgraniczane i nie mają wspólnego odniesienia wartościującego. To spostrzeżenie jest podstawą do szerokopasmowego ujęcia nierówności powierzchni w aspekcie ich formowania w procesie oraz współwartościującego rozpatrywania składowych, jak również rozpoznawania relacji pomiędzy nimi. Należy dodać, że dzięki wspólnemu i szerokopasmowemu ujęciu nierówności profili powierzchni można poszukiwać zależności diagnostycznych, technologi-

cznych i eksploatacyjnych w widmowej analizie zmian poszczególnych składowych nierówności powierzchni.

LITERATURA

1. S. ADAMCZAK: Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Ocena chropowatości i falistości powierzchni. Zasady i warunki prowadzenia pomiarów. Cz. 9. *Mechanik* 79(2006)3, 180 ÷ 183.
2. A. BORYCZKO: Conditions for measurement, analog-to-digital conversion and frequency analysis of irregularities of profile surface. *Metrology and Measurement Systems*, vol. IX (2002)2, 157 ÷ 167.
3. A. BORYCZKO: Metoda analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni toczonych w diagnozowaniu układu obróbkowego. Monografie 42, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk 2003.
4. Z. KULKA, A. LIBURA, M. NADACHOWSKI: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. Warszawa WKiŁ 2004.
5. R.G. LYONS: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Warszawa WKiŁ 2000.
6. J. RAJA, B. MURALIKRISHNAN, FU SHENGYU: Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, vol. 26(2002), 222 ÷ 235.
7. T.P. ZIELIŃSKI: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. WKiŁ 2007.
8. PN-EN ISO 11562:1998 Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Charakterystyki metrologiczne filtrów z korekcją fazy
9. PN-ISO 4288:1997 Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni, metoda profilowa ■