

Adam BORYCZKO

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Dopasowanie wartości parametrów pomiaru cyfrowego nierówności profilu do charakteru powierzchni przedmiotu

Dr hab. inż. Adam BORYCZKO

Pracuje w Zespole Inżynierii Jakości i Metrologii Katedry Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji w Politechnice Gdańskiej. Stopień dr n.t. uzyskał w 1985r. na Wydziale Mechanicznym Technologicznym, a dr. hab. n.t. w 2005r. w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, specjalność Metrologia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. W zakresie jego zainteresowań znajdują się badania struktur geometrycznych powierzchni przedmiotów, analiza widmowa nierówności i zakłóceń powierzchni.



e-mail: aboryczk@pg.gda.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono dopasowanie parametrów pomiaru do rodzaju powierzchni i analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni toczonej dla celów rozpoznawania ich głównych składowych. Podano zależności parametrów cyfrowych pomiaru nierówności warunkujące ich częstotliwościowe zakresy rozpatrywania. W podsumowaniu podano zakres analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni z dolno- i górnopasmowymi rodzajami ograniczeń oraz wskazówki doboru parametrów pomiaru dla otrzymania właściwego zakresu analizy nierówności powierzchni.

Słowa kluczowe: pomiary powierzchni, warunki pomiaru, struktura geometryczna powierzchni, analiza częstotliwościowa.

Matching the parameter values of digital measurement to workpiece surface profile irregularities**Abstract**

Conditions of measurement, the analogue-to-digital conversion and the frequency analysis of turned surface irregularities for the purpose of its main components identification are presented in the paper. A range of digital parameters have been defined along with their relation to each other, specifying the ranges in which they should be used in order to measure surface irregularity (Tab.1). The parameter values obtained by digital measurement vary within specific ranges, and hence determine the surface irregularities [1, 2, 3]. For this measurement, it is essential to select proper sampling interval h_p and the number of measured data N for the value and character of the irregularities measured [4, 5] (Fig.2). The method of frequency analysis for periodical surface irregularities, with the application of power spectral density and the use of fast Fourier transformation (FFT), has been presented in papers [6, 7]. The required conditions for the method presented in this paper, and the possible matching of frequency to wide-band surface irregularities are presented. The maximum frequency of the given irregularity is determined by the value of the sampling interval. Due to this fact, the sampling interval values should be selected in a way to include the low-frequency range of dominant components of the surface irregularity [8] (Fig.3). To summarise, the resulting frequency range of surface irregularities, with high and low-frequency limitations, has been given. Furthermore, the indication of the suitable selection range to capture significant surface irregularities has been included.

Keywords: surface measurement, measurement conditions, surface geometrical structure, frequency analysis.

1. Wprowadzenie

Rozpatrując cyfrowy pomiar nierówności powierzchni i jej analizę częstotliwościową dla celów rozpoznawania głównych składowych i oceny dokładności powierzchni należy brać pod uwagę zakresy częstotliwości nierówności, warunkowane pomiarami, przetwarzaniem a/c i analizą. Przyjmowane wartości parametrów

pomiaru cyfrowego, zmieniające się w określonych przedziałach determinują opisy nierówności powierzchni. Istotą przyjęcia warunków pomiarowo-przetwarzających jest takie dopasowanie wartości parametrów pomiaru, aby sygnały nierówności nie były zniekształcane i obcinane. Ponieważ normatywne parametry określania wysokości nierówności są niejednoznaczne dla różnych rodzajów struktur powierzchni, dlatego w badaniach i analizach należy ujmować je funkcjami amplitudowo-częstotliwościowymi [1]. Natomiast bardzo ważnym warunkiem ze względu na rozpatrywanie składowych nierówności, jest odpowiednie uzyskanie zakresu częstotliwościowego, który zawierałby główne i najbardziej znaczące składowe struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [2]. W związku z tym w procesie pomiaru nierówności występują różne warunki i w analizie widmowej otrzymuje się odpowiedni zakres częstotliwości rozpatrywania nierówności powierzchni. W zależności od rodzaju SGP i celu badań należy określać wartości parametrów pomiaru cyfrowego i zakresy analizy częstotliwościowej nierówności profilu powierzchni.

2. Określenie częstotliwości głównej składowej nierówności profilu powierzchni

Dla anizotropowych struktur geometrycznych powierzchni generowanych narzędziem jednoostrzowym występuje wyraźna składowa okresowa poprzecznego profilu nierówności, której długość odpowiada wartości posuwu narzędzia na obrót przedmiotu f . Częstotliwość składowej okresowej rozpatrywanego profilu nierówności przyjmuje wartość według wzoru:

$$v_f = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Przykładowo dla toczenia średnio dokładnego o przyjętej wartości posuwu $f = 0,16$ mm/obr. jej częstotliwość wynosi $v_f = 6,25$ 1/mm. Częstotliwość posuwu narzędzia wyznacza bazę odniesienia dla rozpatrywanego zakresu częstotliwościowego sygnału nierówności powierzchni, która powinna przyjmować jego wartości środkowe, a pasmo zawierać co najmniej kilka składowych harmonicznych.

Ze względu na potrzeby analizy widmowej nierówności oraz pomiar i przetwarzanie danych cyfrowych istnieją warunki ograniczające zakres analizy. Zaliczyć do nich należy:

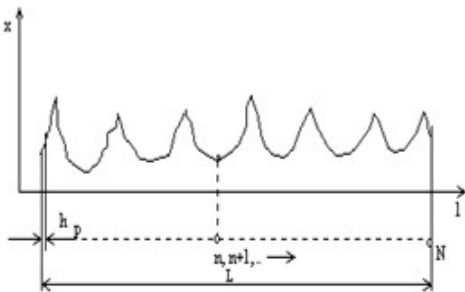
- filtrujące, dolnoprzepustowe działanie odwzorowania nierówności zaokrągleniem ostrza pomiarowego,
- warunki pomiaru cyfrowego profilu wartością odcinka próbki h_p i liczbą danych profilu N , które determinują częstotliwościowy zakres analizy widmowej nierówności Δv_p ,
- warunki przetwarzania częstotliwościowego danych pomiarowych ograniczające pasmo górną wartością,
- warunki pomiaru ograniczające dolną wartość częstotliwości nierówności poprzez filtrowanie „cut-off” lub przyjęcie długości odcinka pomiarowego nierówności,
- podział pasma na podzakresy składowych nierówności jako falistości i chropowatości z dolnopasmowym ograniczeniem błędu kształtu na mierzonej długości.

Ograniczenia wymienionych warunków stanowią wartości graniczne filtrów pasmowych o działaniu górno- i dolnoprzepustowym w odniesieniu do częstotliwościowego zakresu nierówności powierzchni z główną składową odwzorowania narzędzia v_f i dominujących zakłóceń v_z w analizowanym paśmie Δv_p [3, 4].

Należy rozpatrywać ich współzależności i wpływ na określanie oraz ograniczanie pasma częstotliwości analizowanej widmowo nierówności profilu powierzchni w kolejnych etapach pomiaru, przetwarzania a/c i analizy widmowej.

3. Parametry pomiaru cyfrowego nierówności profilu powierzchni

Cyfrowy opis nierówności profilu powierzchni wymaga przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału nierówności pomierzonego na profilometrze dla przebiegu ciągłego. Wiąże się to z doбором parametrów digitalizacji nierówności mierzonych na profilometrach, również z wyjściem cyfrowym. Jest to bardzo ważne zagadnienie określania cyfrowych danych nierówności w punktach pomiarowych, gdyż wiąże się z dokładnością opisu ich przebiegu oraz z zakresem częstotliwości nierówności w analizie widmowej. Przyjęcie konkretnych wartości parametrów pomiarowych determinuje zakres częstotliwości nierówności, który powinien zawierać wszystkie znaczące składowe rozpatrywanej powierzchni. Dla pomiaru cyfrowego istotne jest odpowiednie dobranie odcinka próbkowania h_p i liczby danych pomiarowych N dla wielkości i rodzaju mierzonej nierówności, które wpływają na długość L rozpatrywanego odcinka profilu jak pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Parametry pomiaru cyfrowego w okresowej nierówności powierzchni
Fig. 1. Parameters of digital measurement in periodical surface irregularities

Mierzony cyfrowo profil nierówności powierzchni określony jest na długości L w mm przez odcinek próbkowania h_p w μm i liczbę danych pomiarowych N według zależności:

$$L = h_p N \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

gdzie: $N = 2^p$, wykładnik p przyjmuje zwykle liczby 6, 7, 8, 9, 10. Mając na uwadze możliwości pojemnościowe przetwarzania danych cyfrowych jak również zakres częstotliwości analizowanych nierówności przyjmuje się przeważnie $p = 10$, jako optymalną liczbę dla pomiaru, przetwarzania i analizy częstotliwościowej. Daje to praktycznie $N = 1024$ dane pomiarowe profilu nierówności powierzchni. Wielkości te wyznaczają długości odcinków mierzonych profili wg wzoru (2) jak również pasmo częstotliwościowe $\Delta\nu_p$ i częstotliwość maksymalną analizowanych nierówności profili z zależności:

$$\frac{1}{L} = \nu_{\min} \leq \Delta\nu_p \leq \nu_{\max} = \frac{1}{2h_p} \quad (3)$$

Metodę analizy częstotliwościowej okresowych nierówności powierzchni przy pomocy funkcji gęstości widmowych z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT) przedstawiono w pracach [6, 7]. Należy natomiast przedstawić metody i możliwości dopasowania częstotliwościowego do szerokopasmowego ujęcia nierówności powierzchni [2, 5].

4. Uwarunkowania pomiaru cyfrowego i analizy częstotliwościowej nierówności

Aby przeprowadzić analizę częstotliwościową sygnału przy pomocy szybkiej transformaty Fouriera wymagana jest liczba N próbek. Natomiast w widmie otrzymuje się liczbę prążków $k=N/2$ o rozdzielczości zależnej od wartości odcinka próbkowania. Rozpatrując szerokość pasma analizowanego sygnału należy mieć również na uwadze możliwości pojemnościowe cyfrowego przetwarzania danych pomiarowych z wykorzystaniem FFT. Wartości częstotliwości składowych nierówności profilu ze względu na zawartość informacji o zakłóceniach powierzchni z oddziaływań układu obróbkowego wyznacza analitycznie wzór:

$$\nu_k = \frac{k}{h_p N} 10^3, \quad (4)$$

gdzie: ν_k – kolejna częstotliwość dyskretna FFT nierówności,
 $k = 1, 2, 3, \dots, N/2$,
 h_p – odcinek próbkowania w μm ,
 N – liczba próbek profilu.

Częstotliwość maksymalna rozpatrywanej nierówności ν_{\max} jest determinowana wartością odcinka próbkowania h_p i przy bardzo małych wartościach przyjmuje duże wartości ν . Z punktu widzenia analizy dokładności powierzchni taka sytuacja powoduje nieuzasadnione rozszerzenie pasma, gdyż dominujące składowe zakłóceń nierówności dla oddziaływań układu obróbkowego o częstotliwości ν_s , określające dokładność powierzchni zawarte są w paśmie o niższych częstotliwościach $\nu_s < \nu_f$. Z tego też względu należy tak dobrać wartości odcinka próbkowania, aby uwzględnić niskoczęstotliwościowy zakres dominujących składowych nierówności powierzchni. Przyjmując $k = 1$ otrzymuje się rozdzielczość widma jako odstęp na osi częstotliwości, na który dzielona jest szerokość pasma analizy odpowiednio do przyjętej liczby próbek profilu N . Zmniejszenie wartości odcinka próbkowania powoduje wzrost szerokości pasma analizy i zmniejszenie rozdzielczości przy zachowaniu tej samej liczby próbek pobranych z profilu powierzchni. Jest to istotne dla określenia zakresu częstotliwościowego analizy nierówności w poznawczym aspekcie analizy zakłóceń powierzchni w obróbce. Współzależności odcinka próbkowania i efekty częstotliwościowe ujęto w tabeli 1, która ułatwia dobór parametrów pomiaru i analizy nierówności profili powierzchni, natomiast ich graficzne zależności przedstawiono na rys. 2.

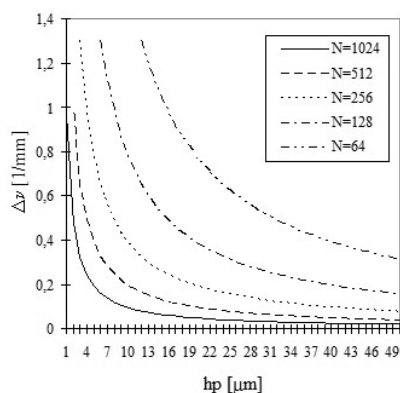
Tab. 1. Parametry pomiaru i analizy częstotliwościowej nierówności dla liczby danych $N = 1024$

Tab. 1. Measurement parameters and surface irregularity frequency analysis for the data of profile $N = 1024$

Lp.	$h_p, \mu\text{m}$	$\nu_{\max}, 1/\text{mm}$	$\nu_{\min}, 1/\text{mm}$	L, mm
1	4	125,0	0,244	4,096
2	8	62,5	0,122	8,192
3	12	41,6	0,083	12,288
4	16	31,25	0,061	16,384
5	20	25,0	0,048	20,480
6	30	16,6	0,032	30,720

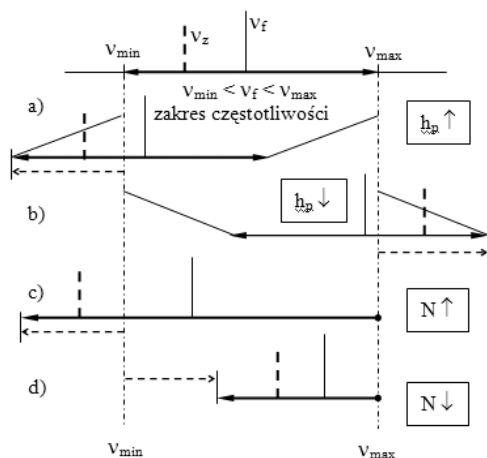
Dobór parametrów pomiaru może determinować różne zakresy częstotliwościowe nierówności profili w zależności od potrzeb pomiaru i celu analizy danego sygnału powierzchni. Należy rozpatrywać znaczące składowe nierówności, odzwierciedlające odwzorowania zarysu ostrza, które dla narzędzi jednoostrzowych przyjmują okresowość ich posuwu na obrót przedmiotu. Składowe te jako okresowe są zakłócanie szerokopasmowo i stanowią zaszku-

miony przebieg poliokresowy z dominującą główną składową o częstotliwości ν_f , odwzorowującą zarys ostrza narzędzia.



Rys. 2. Wykres doboru parametrów próbkowania dla rozdzielczości częstotliwościowej analizy widmowej nierówności powierzchni
Fig. 2. Graph for selection of sampling parameters and for frequency resolution of spectral analysis in surface irregularities

Dla tak określanych nierówności profili należy przyjąć pasmo częstotliwościowe analizy, które powinno zawierać znaczące składowe widmowe zakłóceń nierówności o częstotliwości ν_z , a częstotliwość okresowego odwzorowania narzędzia ν_f przyjmować wartości w pobliżu wartości środkowej zakresu częstotliwości jak przedstawiono na rys. 3.



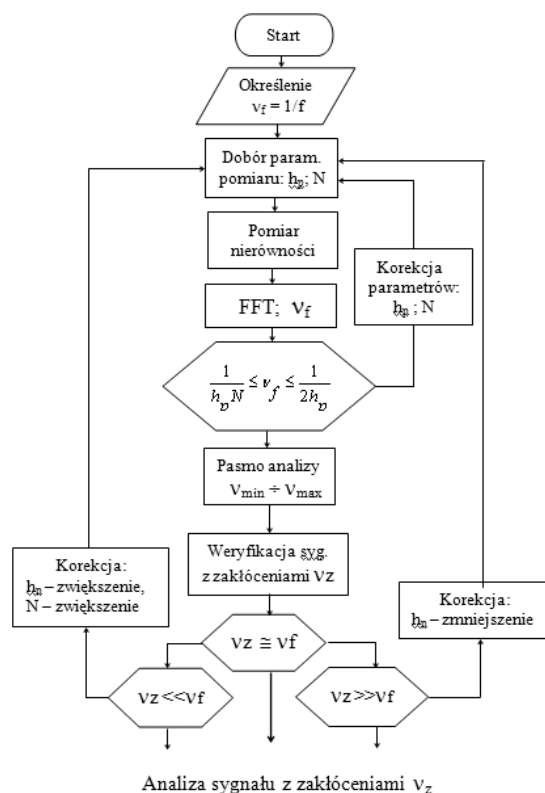
Rys. 3. Schemat zmian parametrów pomiaru nierówności powierzchni w zakresach częstotliwościowych ich analizy widmowej:

Fig. 3. Diagram showing the surface irregularity parameter changes in the frequency ranges of the spectral analysis:
a) and b) increase and decrease of sampling interval h_p ,
c) and d) increase and decrease of number data profile N

Przy wzrastających możliwościach cyfrowej techniki komputerowej można zwiększać liczbę danych pomiarowych N , ale niesie to za sobą wzrost czasu pomiaru, przetwarzania i zakresu częstotliwości oraz zmniejszenie rozdzielczości analizy. Nie jest to wskazane dla analizy nierówności o składowych wąskopasmowych i niskoczęstotliwościowych, w których skupione są znaczące składowe okresowe nierówności, świadczące o jej dokładności i jakości oraz oddziaływaniach układu obróbkowego na powierzchnię przedmiotu. Odcinek próbkowania warunkuje częstotliwość maksymalną ν_{max} nierówności powierzchni zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu, określonym prawą stroną zależności (3). Przyjmując możliwe najmniejsze odcinki próbkowania w pomiarze realizowane jest filtrowanie nierówności, które charakteryzuje się krótkimi odcinkami profili powierzchni. Przykładowo

dla bardzo małej wartości $h_p = 4 \mu\text{m}$ uzyskuje się $L = 4,096 \text{ mm}$, co jest również niekorzystne w analizie nierówności powierzchni o charakterze niskoczęstotliwościowym. W metrologii struktury geometrycznej powierzchni istnieje tendencja do zmniejszania odcinka próbkowania nierówności i przy stałych liczbach punktów profilu pasmo nierówności jest niepotrzebnie przesuwane w zakres o wyższych częstotliwościach. Jest to niecelowe ze względu na dominujące składowe zakłóceń nierówności ν_z , które dla tocznia średnio dokładnego mieszczą się w zakresie $\nu < 10 \text{ 1/mm}$ [4].

Z analizy powyższych współzależności dla cyfrowego opisu nierówności profilu wynikają warunki doboru wartości odcinka próbkowania h_p i liczby danych pomiarowych profilu N , których schemat przedstawiono na rys. 4. Przy doborze parametrów pomiaru cyfrowego nierówności powierzchni należy tak przyjmować ich wartości, aby spełniony był warunek według wzoru (3). Natomiast składowe zakłóceń powierzchni ν_z powinny znajdować się w rozpatrywanym zakresie analizy częstotliwościowej nierówności. W przypadku nie spełniania tych warunków należy skorygować dobór wartości parametrów pomiaru cyfrowego powierzchni przedstawiony na schemacie rys. 4.



Rys. 4. Schemat doboru i dopasowania parametrów pomiaru nierówności powierzchni

Fig. 4. Schematic presentation of selection and matching of surface irregularity parameters

5. Dopasowanie parametrów pomiaru cyfrowego nierówności profilu powierzchni

W praktyce sygnały nierówności powierzchni są z reguły szerokopasmowe i z twierdzenia o próbkowaniu wynika, że jeżeli analizie cyfrowej powinno podlegać całe pasmo rozpatrywanego sygnału oraz gdy nie ma ograniczeń wprowadzanych przez stosowaną aparaturę to częstotliwość próbkowania należy określić z wzoru (3). W efekcie pomiaru otrzymuje się krótkie odcinki profili nierówności powierzchni do analizy widmowej. W przypadku składowych niskoczęstotliwościowych nierówności powierzchni, nieuzasadnionym jest stosowanie małych wartości

przedziału, zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu i realizowanie analizy nierówności w całym zakresie częstotliwości. W związku z tym należy zwiększyć odcinek próbkowania w zależności od składowych nierówności, ale niesie to również niekorzystne zjawisko z niespełnienia warunku twierdzenia o próbkowaniu sygnału. W wyniku tego w przetwarzaniu cyfrowym przy pomocy FFT istnieje możliwość wprowadzenia błędu przemieszania składowych nisko- i wysokoczęstotliwościowych nierówności w postaci tzw. maskowania składowych (aliasing). W takim przypadku należy ograniczyć dolnoprzepustowo pasmo sygnału stosując filtr antyaliasingowy o częstotliwości ν_a . Uwarunkowanie to przedstawiają prace [1, 8], z których analiz oraz doświadczeń pomiarowych nierówności powierzchni generowanych narzędziem jednoostrzowym wynika ograniczenie częstotliwościowe do $\nu_a = 30$ 1/mm według przyjętej zależności:

$$\nu_a = (6 \div 10) \nu_f \quad (5)$$

Mniejsze wartości współczynników należy przyjmować dla powierzchni o dominujących składowych niskoczęstotliwościowych jako falistości. Należy sprawdzić czy ograniczone w ten sposób pasmo analizy zawiera dominujące składowe częstotliwościowe nierówności SGP. Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości odcięcia ν_a jest również celowe ze względu na jakościowe i diagnostyczne odniesienia do znaczących składowych powierzchni, skupionych w zakresie niskoczęstotliwościowych oddziaływań wnoszonych do powierzchni z procesu, obrabiarki i narzędzia.

Również bardzo ważnym warunkiem przeprowadzenia analizy częstotliwościowej jest zachowanie stałego odcinka próbkowania $h_p = \text{const}$, który nie powoduje „pływania” składowych częstotliwościowych, co zostało wykazane w pracach [2, 5]. W tradycyjnych profilometrach stykowych przesuw końcówki pomiarowej jest realizowany ze zdeterminowaną prędkością, charakteryzującą się występowaniem nierównomierności przesuwu, co przy parametrowym wartościowaniu wysokości nierówności ma niewielkie znaczenie. Dlatego też zastosowany w pomiarach profilometr został zmodernizowany o a/c przetwornik drogi przesuwu końcówki pomiarowej z wybranym odcinkiem próbkowania oraz zastosowanym dolnoprzepustowym filtrem antyaliasingowym [8].

Z rozważanych warunków przedstawiono ograniczenia wysokoczęstotliwościowe, które mają jednostronne i mniejsze znaczenie dla analizy powierzchni o charakterze okresowym o dominujących falistościach w zakresie składowych nierówności. Ze względu na niskoczęstotliwościowe składowe nierówności powierzchni, które mają istotne znaczenie dla ich cech techniczno-użytkowych i jakościowych należy uwzględnić ograniczenia dolnozakresowe [3]. Ograniczenie niskoczęstotliwościowe pochodzi od zastosowanego odcięcia filtrującego w pomiarze długością fali elektrycznego filtra λ_c tzw. wielkością „cut-off”, przyjmowaną odpowiednio dla długości fal nierówności λ : 2,5; 8; 25 mm, co daje częstotliwości falistości nierówności ν : 0,4; 0,125; 0,04 1/mm. Są to dolne wartości analizowanego pasma częstotliwości nierówności, które przeliczono na podstawie długości fal filtrowania przyjmowanych normatywnie.

Ujęcie widmowe nierówności w szerokim zakresie $\Delta \nu_p$ jest dogodną sytuacją dla częstotliwościowego wartościowania składowych falistości i chropowatości. Występują one wspólnie w rzeczywistej nierówności powierzchni, a w pomiarze i określaniu parametrami normatywnymi są rozgraniczane i nie mają wspólnego odniesienia wartościującego. To spostrzeżenie autora jest podstawą do szerokopasmowego ujęcia nierówności powierzchni w aspekcie ich formowania w procesie i zakłócania oddziaływaniami z układu obróbkowego. Należy dodać, że dzięki szerokopasmowej analizie widmami amplitudowymi profili nierówności, można poszukiwać zależności diagnostycznych, technologicznych i eksploatacyjnych dla powierzchni obrabianych narzędziami jednoostrzowymi.

6. Podsumowanie

Podsumowując ograniczenia pomiarowe i analizy widmowej nierówności profili powierzchni należy podzielić je na wysokoczęstotliwościowe wartości (ν_{max}) i niskoczęstotliwościowe wartości (ν_{min}), pomiędzy którymi powinno znajdować się wspólne pasmo częstotliwościowe nierówności. Do wysokoczęstotliwościowych ograniczeń od największej wartości częstotliwości odcięcia sygnału nierówności należą:

- filtrowanie promieniem zaokrąglenia ostrza pomiarowego,
- częstotliwość filtra antyaliasingowego ν_a .

Warunki te ograniczają zakres w górnych wartościach częstotliwości nierówności i powodują kolejno jego zmniejszanie, a są ważne dla uwzględniania w analizie mikrogeometrycznych składowych nierówności typu mikrostruktury i chropowatości powierzchni.

Niskoczęstotliwościowymi ograniczeniami pomiaru i analizy nierówności profili powierzchni są zastosowane wartości filtra odcięcia ν_c jako „cut-off” w pomiarze. Dolne ograniczenia zakresu częstotliwości nierówności ze względu na znaczące składowe niskoczęstotliwościowe są bardzo ważne w ocenie dokładności i jakości powierzchni.

Należy podkreślić, że analiza częstotliwościowa nierówności profilu powierzchni z przedstawionymi ograniczeniami określa szerokopasmowo składowe nierówności obejmujące zarówno zakres częstotliwościowy falistości i chropowatości określany przez przedział:

$$\nu_{min} = \nu_c \leq \Delta \nu_p \leq \nu_a = \nu_{max} \quad (6)$$

Ograniczony jest on od dołu wartością ν_c filtra odcięcia nierówności w pomiarze „cut-off”, a od góry, w zależności od celu i potrzeby analizy, zastosowanym filtrowaniem antyaliasingowym określonym przez częstotliwość ν_a . Dla potrzeb analizy widmowej powierzchni należy tak dobrać wartość odcinka próbkowania i liczbę danych pomiarowych, aby dominujące w powierzchni nierówności okresowe znalazły się wewnątrz pasma, określonego przedstawionymi ograniczeniami. Natomiast składowa częstotliwości odwzorowania zarysu narzędzia przyjmowała wartości częstotliwości środkowych dla rozpatrywanego zakresu.

7. Literatura

- [1] Boryczko A.: Metoda analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni toczonych w diagnozowaniu układu obróbkowego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Seria Monografie nr 42, Gdańsk 2003.
- [2] Konczakowski A.: Metrologiczne uwarunkowania analizy widmowej struktury geometrycznej powierzchni w diagnostyce obrabiarek. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika nr 62, Gdańsk 1991.
- [3] Boryczko A.: Zmiany struktury geometrycznej powierzchni toczonych w diagnostycznym rozpoznawaniu oddziaływań obrabiarki. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Vol.36, Z. 3 (127), 2001, 155-169.
- [4] Boryczko A.: Conditions for measurement, analog-to-digital conversion and frequency analysis of irregularities of profile surface. Metrology and Measurement Systems, Vol. 4, No 2, 2002, 159-169.
- [5] Dong W.P., Mainsah E., Stout K.J.: Determination of appropriate sampling conditions for three-dimensional microtopography measurement. Int. J. Mach. Tools Manufact., vol. 36, no 12, 1996, 1347-1362.
- [6] Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN, Warszawa 1976.
- [7] Sherrington I., Smith E.H.: Areal Fourier analysis of surface topography. Part1: Computational methods and sampling considerations. Surface Topography, no 3, 1990, 43-68.
- [8] Feld M., Konczakowski A., Boryczko A., Lipiński Z.: System do pomiaru i analizy widmowej struktury geometrycznej powierzchni w diagnostyce tokarek i procesu toczenia. Konferencja N-T „Metrologiczne Problemy w Technikach Wytwarzania”, WSI Koszalin, Koszalin - Mielno 1990, 67-79.