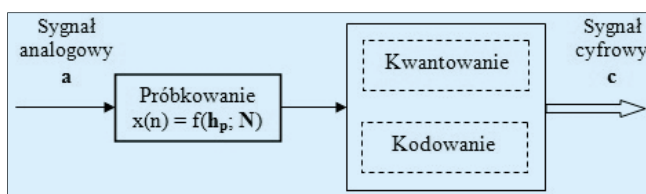


# Dobór parametrów pomiaru cyfrowego profili i jego następstwa w analizie amplitudowo-częstotliwościowej nierówności powierzchni

ADAM BORYCZKO\*

Analiza pomiaru cyfrowych nierówności profili jest złożonym problemem interdyscyplinarnym, którego parametry powinny uwzględniać ich charakter i cele postawione badanym nierównościom powierzchni. Poznawcze i badawcze analizy profili powinny być prowadzone funkcjami amplitudowo-częstotliwościowymi ich nierówności. Widma profili uwzględniają rozkład amplitud w częstotliwościowym ujęciu składowych powierzchni i zależą od przyjęcia parametrów pomiaru cyfrowego nierówności. Dlatego należy się liczyć z konsekwencjami pasmowych ujęć widmowych w zależności od przyjmowanych wartości parametrów pomiarowych, a jednocześnie dopasowanych do charakteru częstotliwościowego analizowanych powierzchni.

W pomiarach powierzchni przedmiotów wykorzystywana jest cyfrowa technika pomiarowa, a w komputerowym przetwarzaniu danych pomiarowych – cyfrowa postać sygnału jest koniecznością. W związku z tym, że cechy nierówności powierzchni zmieniają się w sposób ciągły, a ich sygnały do analizy i rejestracji komputerowej powinny być cyfrowe, występuje konieczność przetwarzania analogowo-cyfrowego (a/c) w systemach pomiarowych powierzchni (rys. 1). Przetwarzanie takie wymaga pewnych ograniczeń i stawia warunki mierzonemu powierzchni przedmiotów [1]. Dlatego należy odpowiednio dobrać i dopasować parametry przetwarzania a/c do charakteru mierzonych profili powierzchni oraz przeanalizować ich wpływ na wyniki i błędy występujące w cyfrowych pomiarach i analizach sygnałów powierzchni.



Rys. 1. Składowe procesy przetwarzania analogowo-cyfrowego profilu nierówności powierzchni i parametry procesu próbkowania

Rozpatrując cyfrowy pomiar nierówności powierzchni i jego analizę amplitudowo-częstotliwościową w celu rozpoznawania głównych składowych i oceny dokładności powierzchni należy brać pod uwagę zakresy częstotliwości nierówności warunkowane przetwarzaniem a/c. Przyjmowane wartości parametrów pomiaru cyfrowego, zmieniające się w określonych przedziałach, determinują długość profili nierówności powierzchni. Istotą przyjęcia warunków pomiarowo-przetwarzających jest takie dopasowanie zakresów, aby sygnały nierówności nie były zniekształcane i obcinane. W procesie pomiaru i przetwarzania istnieją ograniczenia, dla których

w analizie widmowej otrzymuje się określony zakres częstotliwości rozpatrywanej nierówności powierzchni. W zależności od ograniczeń należy określać uwarunkowania dla przyjmowanych zakresów parametrów pomiaru cyfrowego i analizy częstotliwościowej nierówności profili powierzchni [2]. W związku z tym należy podać możliwości doboru parametrów pomiaru a/c do potrzeb badawczych oraz charakteru analizowanych sygnałów powierzchni.

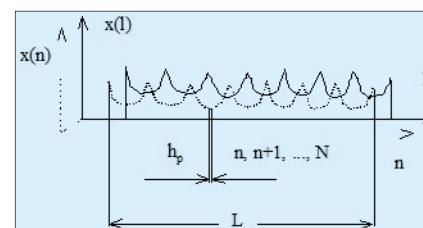
## Cyfrowy opis nierówności profili powierzchni

Cyfrowy opis nierówności profilu powierzchni wymaga przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału ciągłego nierówności zmierzonego na profilometrze. Również dla współczesnych profilometrów z cyfrowym wyjściem pomiarowym istotny jest wybór parametrów cyfrowego opisu nierówności powierzchni. Wiąże się to z kompromisowym doбором parametrów digitalizacji mierzonych nierówności wynikających z: założeń badawczych, dokładności pomiarowych profilometru oraz zakresu pojemności pamięci do analizy komputerowej mierzonego profilu nierówności. Przy dokładności mierzenia nierówności powierzchni istotny jest dobór wartości odcinka próbkowania  $h_p$  [ $\mu\text{m}$ ]. Ze względu na długość mierzonego profilu  $L$  i zakres składowych nierówności ważna jest również liczba punktów  $N$  cyfrowego pomiaru nierówności według zależności:

$$L = N \cdot h_p \cdot 10^3 \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Przy przetwarzaniu a/c istotne jest odpowiednie dobranie przedziału próbkowania  $h_p$  i liczby danych pomiarowych  $N$  do wielkości i charakteru mierzonej nierówności, które determinują długość  $L$  rozpatrywanego odcinka profilu (rys. 2).

Rys. 2. Schemat opisu parametrów analogowych  $x(l)$  i cyfrowych  $x(n)$  nierówności profilu powierzchni i interpretacja parametrów cyfrowego opisu profilu  $h_p$  i  $N$

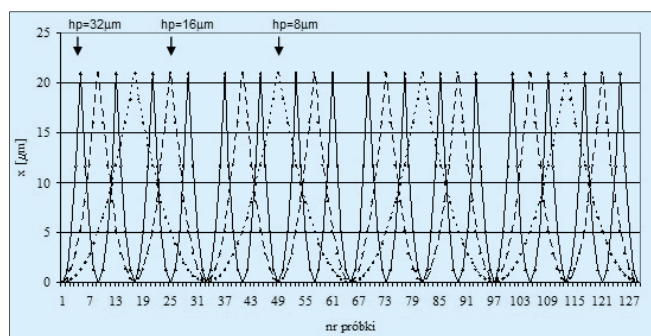


Ciągły przebieg nierówności powierzchni oznaczono przez  $x(l)$ , natomiast zapis kolejnych rzędnych obserwowanego profilu po dyskretyzacji  $x(n)$ , który jest ciągiem wartości wybranych z nierówności w odstępach  $h_p$  pomiędzy kolejnymi próbkami. Mierzony cyfrowo profil nierówności powierzchni określony jest na długości  $L$  przez odcinki próbkowania  $h_p$  i liczbę próbek pomiarowych profilu  $N$  dla:

$$N = 2^p \quad (2)$$

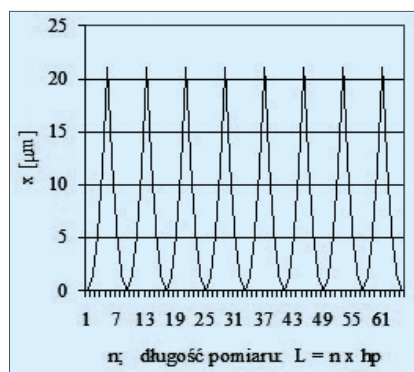
\* Dr hab. inż. Adam Boryczko – Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechniki Gdańskiej

gdzie:  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ , a wykładnik  $p$  przyjmuje zwykle liczby: 6, 7, 8, 9, 10. Mając na uwadze pojemność przetwarzania danych przyjmuje się przeważnie liczbę  $p=10$ , jako optymalną do pomiaru, archiwizacji, przetwarzania i analizy częstotliwościowej nierówności. Daje to praktycznie liczbę  $N=1024$  cyfrowych danych pomiarowych profilu powierzchni. Dla przyjętej liczby próbek w pomiarze cyfrowym można odpowiednio dobrać odcinki próbkowania i uzyskiwać profile (rys. 3), a w konsekwencji – zakresy częstotliwości analizowanej nierówności powierzchni [3].

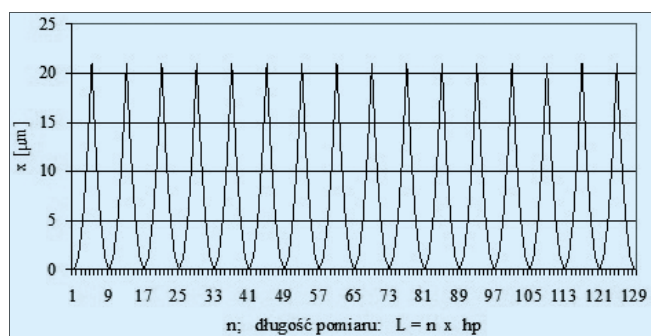


Rys. 3. Efekty próbkowania profilu nierówności odcinkami o różnych wartościach odcinka próbkowania  $h_p$

Do uwzględnienia wpływu doboru liczby próbek pomiarowych profilu  $N$  przedstawiono na rys. 4 profil o  $N=64$  danych dla  $p=6$  oraz na rys. 5 profil o  $N=128$  danych dla  $p=7$ . Liczba danych profilu i odcinka próbkowania, zgodnie ze wzorem (1), określa długość mierzonego profilu i obejmuje zakres zmian nierówności na odcinku pomiarowym. Większa długość pomiarowa profilu umożliwia poszerzenie zakresu analizy powierzchni, zwiększa zakres częstotliwości składowych nierówności, ale również wymaga większej pojemności pamięci układów komputerowych. Różnie przyjmowana liczba  $p$  zmienia długość



Rys. 4. Długości zapisu profilu  $L$  dla liczby punktów pomiarowych  $N=64$  jako danych nierówności powierzchni w zależności od przyjętej wartości przedziału próbkowania  $h_p$



Rys. 5. Długości zapisu profilu  $L$  dla liczby punktów pomiarowych  $N=128$  jako danych nierówności powierzchni w zależności od przyjętej wartości przedziału próbkowania  $h_p$

pomiarową odcinka analizowanej nierówności, a także określa dolną wartość częstotliwości dla mierzonej w ten sposób nierówności profilu powierzchni.

### Rodzaje nierówności profili powierzchni i niejednoznaczność parametrów w ich ocenie

Nierówności struktury geometrycznej powierzchni (SGP) można analizować w profilach wzdłużnych i poprzecznych, które generowane są w obróbce i wynikają ze względnego przemieszczania narzędzia w stosunku do przedmiotu. Nierówności w profilach mogą mieć charakter okresowy lub przypadkowy, w zależności od rodzaju i dokładności obróbki. Praktycznie w nierównościach powierzchni zawierają składowe okresowe z zakłóceniami okresowo-przypadkowymi z różnym udziałem rodzaju zakłócenia. Relacja pomiędzy składowymi nierównościami może występować w szerokim zakresie, z podziałem na chropowatość, falistość i błąd kształtu na rozpatrywanej długości pomiaru. Dlatego też ujęcia użytkowe i jakościowe profili powierzchni powinny być rozpatrywane widmowo i szerokopasmowo.

Do wartościowania SGP stosowane są normatywne parametry wysokości i długości profili, rozkłady i momenty statystyczne oraz funkcje udziałów nośnych, korelacyjne i częstotliwościowe. Ze względu na szerokie potrzeby analizy różnych rodzajów nierówności powierzchni istotny jest odpowiedni ich dobór.

Stosowane do wartościowania nierówności profilu powierzchni standardowe parametry wysokości nie uwzględniają sekwencji występowania charakterystycznych kształtów nierówności oraz nie określają cykliczności i ich rozłożenia na długości profilu. Przykładowo: zalecane przez normy parametry wysokości nierówności profilu, jak:  $R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności od linii średniej,  $R_q$  – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności od linii średniej niejednoznacznie rozróżniają charakter powierzchni uzyskiwanych w różnych rodzajach obróbek. Normatywne parametry wysokości nierówności nie umożliwiają wyodrębnienia składowych periodycznych i przypadkowych jako częstotliwościowych zakłóceń z układu obróbkowego i nie zawierają informacji o ich przebiegu na długości przedmiotu. O ile parametry wzdłużne profilu uwzględniają nierówności w jego długości, to podanie ich wartości średniej (np. średniego odstępów chropowatości  $RSm$ ) ukrywa nierówne ich rozłożenie w profilu. Parametry średniego arytmetycznego pochylenia nierówności  $R\Delta a$  profilu zawierają parametry wysokości i długości nierówności wraz z ich wadami, a praktyczna interpretacja wyników z profilem rzeczywistym jest utrudniona, ze względu na uśrednianie ich wartości. Należy podkreślić, że przedstawione grupy parametrów nie pokazują rozmieszczenia nierówności na długości profilu, bądź częstotliwości ich występowania na mierzonej odcinku, co ma duże znaczenie dla określania cech technicznych i użytkowych powierzchni w aspekcie technologicznym, eksploatacyjnym itp. [2].

### Filtrowanie normatywne składowych profilu powierzchni

Nierówności SGP stanowią rejestrację szerokopasmową, a w metrologii – dla różnych użytkownych celów – są rozpatrywane selektywnie, poprzez eliminowanie składowych kształtu oraz filtrowanie falistości i chropowatości. Uniemożliwia to kompleksową ocenę nierówności powierzchni, tak jak tworzona jest ona w procesie, oraz analizę

jej dokładności i jakości w celach badawczych i praktycznych. Pojęcie chropowatości w sensie składowych SGP jest ograniczeniem wąskopasmowym i odnosi się tylko do niewielkiego zakresu najmniejszych wysokości nierówności o małej długości. Bardzo istotnymi dla dokładności i jakości powierzchni są nierówności na dłuższych odcinkach, określane jako falistość i błąd kształtu na rozpatrywanej długości profilu powierzchni [4, 5].

Parametry wysokości i długości poszczególnych składowych nierówności profili SGP nie oddają jednoznacznie oraz kompleksowo cech powierzchni w ujęciu szerokopasmowym, ani procesu formowania nierówności w obróbce. Ogólnie przyjęte wartościowanie nierówności parametrami wysokości nie uwzględnia ich kształtu w profilu powierzchni. Parametry długości uśredniają położenie nierówności i „gubią” zakłócenia ich okresowości, tak jak generuje je układ obróbkowy w procesie. W SGP przedmiotem jest zarejestrowany „nadmiar” informacji, które nie są wykorzystywane (lub tylko w małym zakresie) dla normatywnych ujęć nierówności powierzchni.

Normatywne wydzielenie składowych falistości i chropowatości realizowane jest poprzez standardowe filtrowanie profili pierwotnych długościami fal filtrowania określanymi *cut-off*, dla których – w zależności od charakteru składowych nierówności – przyjmuje się zdeterminowane odcinki filtrowania, podawane w normach i przedstawione w tabl. I [6].

**TABLICA I. Normatywne filtrowanie nierówności o składowych okresowych i przypadkowych dla długości fal „cut-off” oraz odpowiadające im wartości częstotliwości**

Profile o składowych okresowych	Profile o składowych nieokresowych	Długość fali filtrowania „cut-off”	Częstotliwość filtrowania dla „cut-off”
<i>RSm</i> (mm)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c$ (mm)	$\nu_c$ (1/mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	12,5
$0,04 < RSm \leq 0,13$	$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	4,0
$0,13 < RSm \leq 0,4$	$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	1,25
$0,4 < RSm \leq 1,3$	$2 < Ra \leq 10$	2,5	0,4
$1,3 < RSm \leq 4$	$10 < Ra \leq 80$	8	0,125

Ze względu na niejednoznaczność parametrów wysokości w ocenie profili powierzchni, jak i wycinanie filtrowaniem składowych, występuje ograniczona analiza rzeczywistych nierówności na powierzchniach przedmiotów. Natomiast w przypadku tribologii i innych zastosowań praktycznych analiza powierzchni powinna obejmować profile całkowite (pierwotne) z zastosowaniem funkcji amplitudowo-częstotliwościowych. W tabl. I podano – oprócz długości fal filtrowania – również wartości ich częstotliwości. Ujęcie amplitudowo-częstotliwościowe nierówności filtrowanych też nie stanowi pełnej analizy powierzchni, gdyż w tym przypadku występuje wycinanie składowych w profilu. Podsumowując, przy uwzględnieniu uwarunkowań dla analiz przyczynowo-skutkowych z nierówności powierzchni, badania powinno się prowadzić z zastosowaniem funkcji widmowych (amplitudowo-częstotliwościowych), o ile to możliwe dla profili pierwotnych, bez filtrowania.

### Widmo amplitudowe nierówności powierzchni

W strukturach geometrycznych powierzchni generowanych narzędziami o policzalnej liczbie ostrzy występują wyraźne składowe okresowe poprzecznego profilu nierówności, których długość odpowiada wartościom posuwu

narzędzia na obrót przedmiotu  $f$ . Częstotliwość okresowych składowych posuwu narzędzia rozpatrywanego profilu nierówności przyjmuje wartość:

$$\nu_f = \frac{1}{f} \quad [1/\text{mm}] \quad (3)$$

Częstotliwość ta wyznacza bazę odniesienia rozpatrywanego zakresu częstotliwości sygnału nierówności powierzchni, która powinna przyjmować jego wartości środkowe, a pasmo – zawierać co najmniej kilka składowych harmonicznych. Jest to podstawowy warunek dopasowania pomiarów cyfrowych do charakteru i kluczowych składowych okresowych nierówności powierzchni. Dobór zakresu częstotliwości analizy widmowej powierzchni dla warunków cyfrowego przetwarzania danych profili należy przeprowadzać w aspekcie potrzeb rozpoznawania zakłóceń nierówności z oddziaływań układu obróbkowego w procesie według głównych kryteriów [2]:

- szerokości pasma analizy nierówności powierzchni dla głównych składowych,
- maksymalnej rozdzielczości widma dla dokładności analizy.

Należy określić zależności i wpływ metody pomiaru cyfrowego na zakres analizy częstotliwościowej nierówności, a także przedstawić możliwości doboru parametrów pomiaru cyfrowego do szerokopasmowego charakteru nierówności powierzchni z możliwymi składowymi wysoko- i niskoczęstotliwościowymi.

Metodę analizy częstotliwościowej okresowych nierówności powierzchni za pomocą ich funkcji amplitudowych i gęstości widmowych mocy z zastosowaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT) przedstawiono w [2, 3].

Współczynniki dyskretnej transformaty Fouriera ciągu próbek  $x(n)$  dla  $n=0, 1, \dots, N-1$  wyrażają się wzorem Cooleya-Tuckeya dla cyfrowej postaci nierówności:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp \left[ -j \frac{2\pi kn}{N} \right] \quad (4)$$

gdzie:

- $N$  – liczba próbek na długości profilu  $<0, (N-1) h_p >$ ,
- $k$  – kolejny numer prążków w częstotliwości;  $\nu_k = 1, 2, \dots, N/2$ ,
- $x(n)$  –  $n$ -ta próbka profilu dyskretnego,
- $X(k)$  –  $k$ -ty współczynnik szybkiej transformaty Fouriera,
- $h_p$  – odcinek próbkowania nierówności profilu.

W analizie widmowej wartość częstotliwości  $\nu_k$  składowej  $k$  nierówności profilu wyznacza analitycznie wzór [2]:

$$\nu_k = \frac{k}{h_p \cdot N} 10^3 \quad [1/\text{mm}] \quad (5)$$

Widmowe ujęcie nierówności powierzchni umożliwia szerokopasmową analizę o dolnej wartości, powiązanej z długością rozpatrywanego profilu. Ograniczenia zakresu analizy częstotliwości profili SGP zależą od możliwości 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. Wynikają z tego uwarunkowania dotyczące doboru długości odcinka próbkowania  $h_p$  oraz liczby punktów pomiarowych profilu  $N$ . W widmowym przetwarzaniu nierówności determinowany jest zakres (pasmo) częstotliwości analizy według zależności:

$$\Delta \nu = \nu_{\max} - \nu_{\min} \quad (6)$$



Wartości parametrów pomiaru  $h_p$  i  $N$  wyznaczają długości odcinków mierzonych profili, jak również częstotliwość minimalną i pasmo częstotliwościowe analizowanych nierówności powierzchni [2, 8].

W cyfrowej metodzie pomiaru profilu należy dopasować odcinek próbkowania  $h_p$  do maksymalnej częstotliwości całego przebiegu, zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu sygnału ciągłego. Na tej podstawie wyznacza się wartość przedziału próbkowania w stosunku do maksymalnej częstotliwości w sygnale mierzonym, określanej również jako częstotliwość Nyquista według wzoru [3]:

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

gdzie:  $v_{max}$  – największa częstotliwość występująca w nierówności.

Minimalną częstotliwość determinuje długość rozpatrywanego profilu, która zależy od liczby przyjętych próbek w pomiarze cyfrowym  $N$  oddalonych od siebie odcinkami próbkowania  $h_p$  według zależności:

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

W związku z przyjętymi parametrami pomiaru cyfrowego można określić zakres częstotliwości rozpatrywanej nierówności, który znajduje się pomiędzy ekstremalnymi wartościami częstotliwości według zależności (7) i (8) i nazywany jest pasmem częstotliwości.

#### Następstwa w analizie widmowej dla pomiaru cyfrowego nierówności profilu

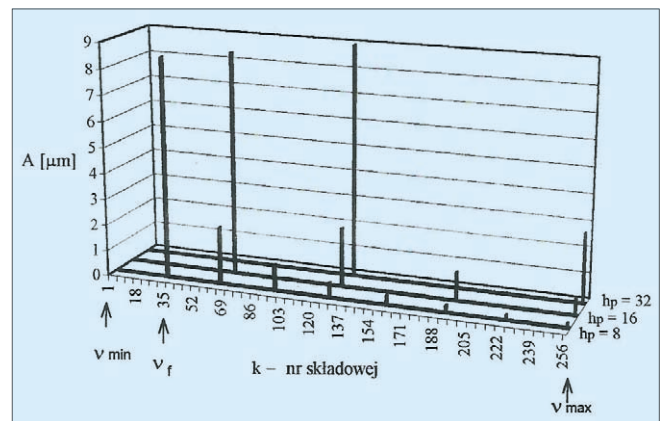
Nierówności powierzchni mogą mieć złożony charakter o zakłóceniach  $v_z$  rozpatrywanych szerokopasmowo ze składowymi niskoczęstotliwościowymi falistości dla  $v_z < v_f$  oraz wysokoczęstotliwościowymi o charakterze chropowatości (mikronierówności) dla  $v_z \geq v_f$ . W związku z tym należy przygotować właściwy zakres analizy częstotliwościowej powierzchni, szczególnie w przypadku kiedy dominują składowe zakłóceń nierówności o wartościach różnych od częstotliwości głównej składowej nierówności  $v_f$ .

W analizie widmowej nierówności, częstotliwość minimalna  $v_{min}$  wyznacza długość odcinka pomiarowego i jest zależna od wartości przedziału próbkowania  $h_p$  oraz liczby danych pomiarowych profilu  $N$ . Przykłady relacji pomiędzy tymi parametrami podano w tabl. II dla długości odcinków pomiarowych podawanych normatywnie. Natomiast częstotliwość maksymalna  $v_{max}$  związana jest z wielkością końcówki pomiarowej systemu i powinna spełniać twierdzenie o próbkowaniu sygnału.

TABLICA II. Zestawienie wartości parametrów odcinka pomiarowego profilu powierzchni, częstotliwości minimalnej jego analizy widmowej i odcinka próbkowania dla przyjętej stałej liczby pomiarowej profilu  $N=1024$

Długość odcinka pomiarowego profilu	Częstotliwość minimalna dla pomiaru profilu	Odcinek próbkowania profilu dla liczby danych $N = 1024$
$l_n$ (mm)	$v_{min}$ (1/mm)	$h_p$ ( $\mu$ m)
0,4	2,5	0,4
1,25	0,8	1,2
4	0,25	4,0
12,5	0,08	12,2
40	0,025	39,6

W celu pokazania wpływu wartości próbkowania na zakres częstotliwości analizy posłużono się widmami amplitudowymi (rys. 6) dla symulowanych profili powierzchni z łukowym odwzorowaniem okresowej składowej nierówności. Profile symulowano dla stałej liczby danych pomiarowych  $N=1024$  z różnymi wartościami odcinka próbkowania  $h_p$  równymi 8, 16 i 32  $\mu$ m. Dla profilu o najmniejszym odcinku próbkowania w widmie występuje główna składowa okresowa  $v_f$  o największej amplitudzie z kolejnymi harmonicznymi  $u$  o zmniejszających się amplitudach, gdzie  $u=2, 3, 4, \dots$  [1]. W widmie profilu o  $h_p=16 \mu$ m występuje główna składowa  $v_f$  z harmonicznymi  $2v_f, 3v_f, 4v_f$ , o mniejszej częstotliwości maksymalnej widma  $v_{max}$ , a zakres częstotliwościowy analizy przesuwają się ku wartościom o mniejszych częstotliwościach. W widmie profilu o  $h_p=32 \mu$ m występuje główna składowa  $v_f$  z jedną harmoniczną  $2v_f$  o jeszcze mniejszej wartości częstotliwości maksymalnej  $v_{max}$  i mniejszej wartości częstotliwości minimalnej  $v_{min}$ . Zakres analizy widmowej profilu  $\Delta v$  dla tego próbkowania przesuwają się ku mniejszym częstotliwościom. Z przedstawionych symulacji profili mierzonych różnymi wartościami odcinków próbkowania rozpoznać można ich wpływ na ujęcia pasmowe, określane różnymi wartościami częstotliwości ekstremalnych rozpatrywanych w analizie widmowej.

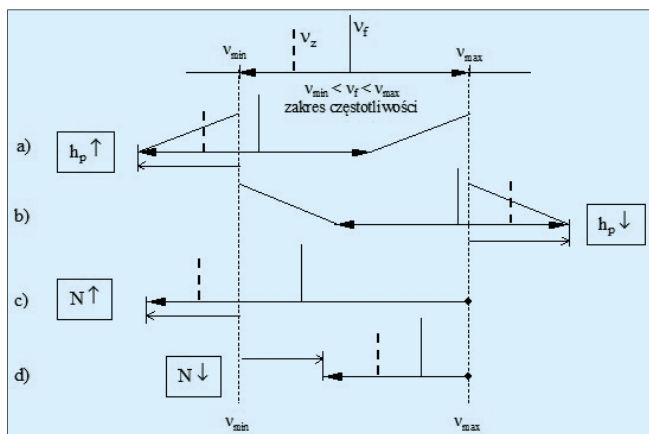


Rys. 6. Zależność wartości częstotliwości głównej składowej odwzorowania zarysu ostrza narzędzia  $v_f$  (położenia składowej  $v_f$ ) z harmonicznymi w zakresie częstotliwości analizowanej nierówności powierzchni  $v_{min} \div v_{max}$  od wartości przedziału próbkowania profilu  $h_p$

Aby przeanalizować wpływ różnych zmian wartości parametrów pomiaru cyfrowego na zakresy pasmowe widm profilu powierzchni, posłużono się również różnymi liczbami danych pomiarowych  $N$  w profilach. Ponieważ zmiana liczby danych pomiarowych wpływa na długość profilu (patrz rys. 4 i 5), w związku z tym również – zgodnie ze wzorem (8) – zmienia się częstotliwość minimalna  $v_{min}$  rozpatrywanej widmowo nierówności [9].

W przypadku występowania wyraźnych składowych okresowych nierówności  $v_f$  występuje prosty wybór wartości parametrów pomiarowych. W przypadkach gdy profile mają złożony charakter i występują dodatkowe składowe zakłócające nierówności (np.  $v_z$ ), trudno jest dokonać wyboru wartości parametrów pomiaru cyfrowego. O wartości parametrów powinny decydować zarówno charakter zakłóconych nierówności, jak i wartości częstotliwościowe dominujących składowych w profilu. Mogą one mieć przebiegi wysokoczęstotliwościowe lub niskoczęstotliwościowe w stosunku do głównej składowej okresowej  $v_f$ . Dlatego też dobór parametrów pomiaru cyfrowego powinien uwzględniać charakter nierówności powierzchni, a szczególnie zakres częstotliwościowy jej analizy widmowej (rys. 7). Na rys. 7a pokazano wpływ zmian przy

zwiększaniu wartości próbkowania profilu  $h_p$  na przesuwanie pasma w niższe wartości częstotliwości, a na rys. 7b zmniejszanie  $h_p$  na przesuwanie pasma w wyższe wartości częstotliwości. Rys. 7c pokazuje wpływ zwiększania liczby danych pomiarowych w profilu  $N$  na zmniejszanie wartości minimalnej częstotliwości rozpatrywanej widmowo nierówności. Na rys. 7d przedstawiono wpływ zmniejszania liczby danych pomiarowych w profilu na zwiększanie wartości minimalnej częstotliwości nierówności. Zaprezentowana analiza ma bardzo ważne znaczenie przy doborze wartości parametrów próbkowania profilu do odpowiedniego charakteru nierówności o składowych niskoczęstotliwościowych lub wysokoczęstotliwościowych. Jak pokazuje analiza wpływu wartości parametrów pomiaru cyfrowego nierówności na ich zakresy widmowe, można je dobierać dwoma sposobami, przez zmiany wartości  $h_p$  lub  $N$ . W przypadku niejednoznaczności wyboru należy preferować zmianę parametru, który daje większą dokładność w długości pomiarowej profilu lub większą rozdzielczość w analizie widmowej [10].



Rys. 7. Ideowy schemat wpływu doboru zmian wartości przedziału próbkowania  $h_p$  i liczby próbek  $N$  na zakres częstotliwości nierówności powierzchni. Pionowe strzałki przy parametrach oznaczają wzrost ( $\uparrow$ ) lub zmniejszenie ( $\downarrow$ ), natomiast poziome strzałki przy wymiarowaniu zakresu częstotliwości oznaczają przesunięcie (a) i (b) lub zmianę (c) i (d) zakresu częstotliwości nierówności w kierunku większych ( $\rightarrow$ ) i mniejszych ( $\leftarrow$ ) wartości częstotliwości

Częstotliwość maksymalna rozpatrywanej nierówności jest determinowana wartością odcinka próbkowania i przy bardzo małych  $h_p$  jej wartość rośnie. Taka sytuacja powoduje nieuzasadnione rozszerzenie pasma analizy do oceny składowych niskoczęstotliwościowych powierzchni, gdyż dominujące składowe z zakłóceń układu obróbkowego zawarte są w zakresie niższych częstotliwości. Z tego względu należy tak dobierać wartości przedziału próbkowania, aby uwzględnić niskoczęstotliwościowy zakres nierówności.

W metrologii struktury geometrycznej powierzchni istnieje tendencja do zmniejszania przedziału próbkowania i – przy stałej liczbie punktów pomiarowych – pasmo nierówności jest niepotrzebnie poszerzane i przesuwane ku wyższym wartościom częstotliwości. Zakres częstotliwości nierówności w analizie można rozszerzyć przez zwiększenie w pomiarze liczby próbek i wartości przedziału próbkowania. Zwiększenie wartości przedziału  $h_p$  może spowodować niespełnienie warunku o próbkowaniu sygnału, a to wprowadza błędy w przemieszaniu składowych widma analizowanej powierzchni, nazywane aliasingiem. Nie należy stosować rozwiązań pomiarowych o zwiększaniu przedziału próbkowania, a gdy taki przypadek zaistnieje – należy określić i stosować w analizie

odpowiednie dolnopasmowe filtrowanie sygnału pomiarowego o częstotliwości antyaliasingowej [3, 5].

Przedstawionymi sposobami można regulować zakresy częstotliwościowe analizowanych profili już w pomiarze cyfrowym, przyjmując odpowiednie wartości parametrów pomiarowych. Jest to istotne przy określaniu zakresu częstotliwościowego analizy nierówności w aspektach zadań tribologicznych, jakościowych czy rozpoznawania zakłóceń obróbkowych z powierzchni.



Z analizy przedstawionych współzależności w digitalizacji nierówności profilu wynikają sposoby doboru wartości odcinka próbkowania  $h_p$  i liczby danych pomiarowych profilu  $N$ . Główna składowa okresowa nierówności z harmonicznymi powinna determinować dobór zakresu analizy widmowej. Przy stałej liczbie danych pomiarowych o dopasowaniu decyduje wartość przedziału próbkowania nierówności profilu. Odcinek próbkowania powinien być dopasowany do charakteru częstotliwości sygnału pomiarowego i spełniać tzw. twierdzenie o próbkowaniu, co nie uwzględnia niskoczęstotliwościowych składowych nierówności.

W pomiarach struktury geometrycznej powierzchni istnieje tendencja do zmniejszania przedziału próbkowania nierówności profilu i przy stałej liczbie punktów pomiarowych niepotrzebnie przesuwane jest pasmo nierówności w kierunku wartości o wyższych częstotliwościach. Jest to niecelowe dla powierzchni mniej dokładnych, kiedy dominują składowe nierówności o niskich częstotliwościach.

Zmiany wartości  $h_p$  powodują odpowiednie zmiany granicznych wartości zakresu częstotliwości analizy, natomiast zmiany liczby próbek  $N$  determinują najmniejszą wartość zakresu częstotliwości. Bezkrtyczne przyjmowanie i niedopasowanie przyjmowanych wartości parametrów cyfrowej postaci sygnału powierzchni w odniesieniu do rzeczywistego charakteru nierówności może prowadzić do obcięcia zakresu analizy, zniekształcenia sygnału i wprowadzenia niepotrzebnych błędów w pomiarze cyfrowym nierówności i jej analizie widmowej.

#### LITERATURA

1. A. BORYCZKO: Uwarunkowania i ograniczenia cyfrowego pomiaru nierówności profilu powierzchni. *Mechanik* 12(2010), 957 ÷ 962.
2. A. BORYCZKO: Metoda analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni toczonych w diagnozowaniu układu obróbkowego. Monografie 42, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk 2003.
3. J.S. BENDAT, A.G. PIERSOL: Metody analizy i pomiarów sygnałów losowych. Warszawa PWN 1976.
4. A. BORYCZKO: Distribution of roughness and waviness components of turned surface profiles. *Metrology and Measurement Systems*. Vol. XVII (2010) No. 4, 611 ÷ 620.
5. J. RAJA, B. MURALIKRISHNAN, F. SHENGYU: Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, vol. 26(2002), 222 ÷ 235.
6. PN-ISO 4288:1997 Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni, metoda profilowa.
7. A. BORYCZKO: Podstawy pomiarów wielkości mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk 2010.
8. K.S. MOON, J.W. SUTHERLAND: The Origin and Interpretation of Spatial Frequencies in a Turned Surface Profile. *J. of Eng. for Industry*, vol.116(1994), 340 ÷ 347.
9. X. CHEN, J. RAJA, S. SIMANAPALLI: Multi-Scale Analysis of Engineering Surfaces. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 35, No 2(1995), 231 ÷ 238.
10. M. BIGERELLE, A. GAUTIER, B. HAGEGE, J. FAVERGEON, B. BOUNICHANE: Roughness characteristic length scales of belt finished surface. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009), 6103 ÷ 6116. ■

