

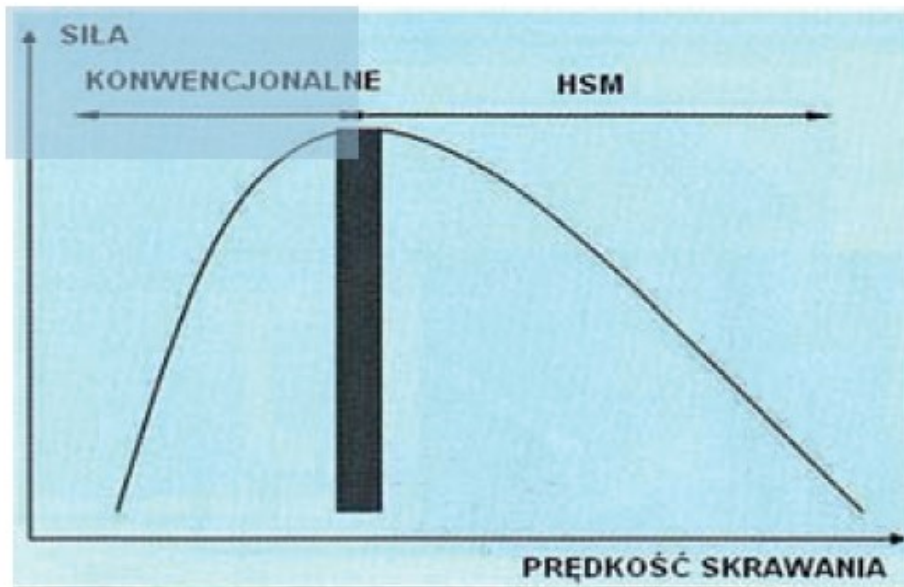
# Wybrane układy diagnostyczne Procesów obróbkowych

# NADZOROWANIE PROCESU FREZOWANIA

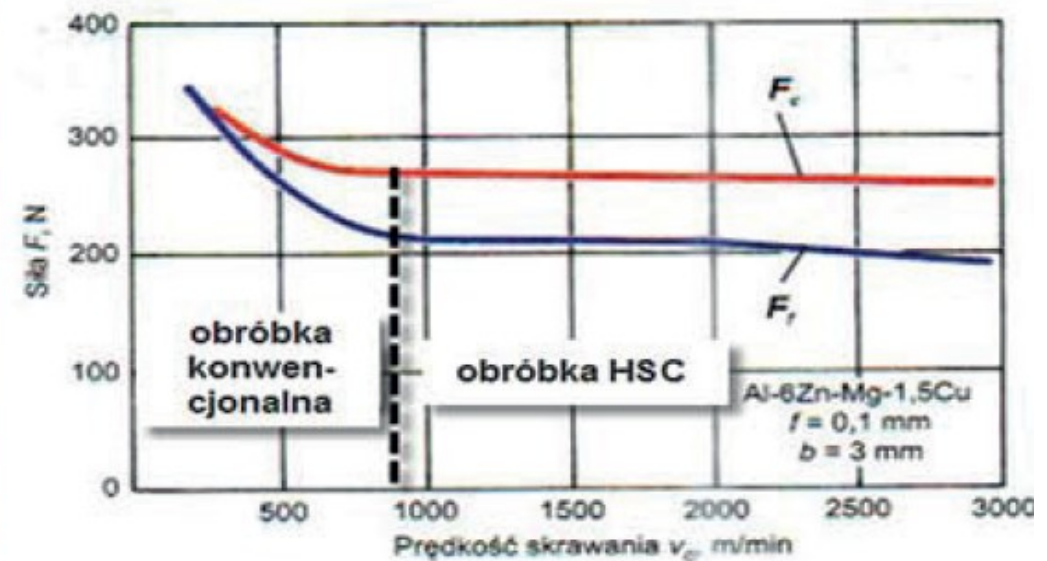
Zastosowanie nowych, efektywniejszych metod frezowania w połączeniu ze stosowaniem bardziej niezawodnych narzędzi z wymiennymi płytkami oraz monolitycznych narzędzi węglkowych, daje dużo lepsze wyniki obróbki. Zastępuje szlifowanie, obróbkę elektroerozyjną oraz pozwala obrabiać elementy zahartowane



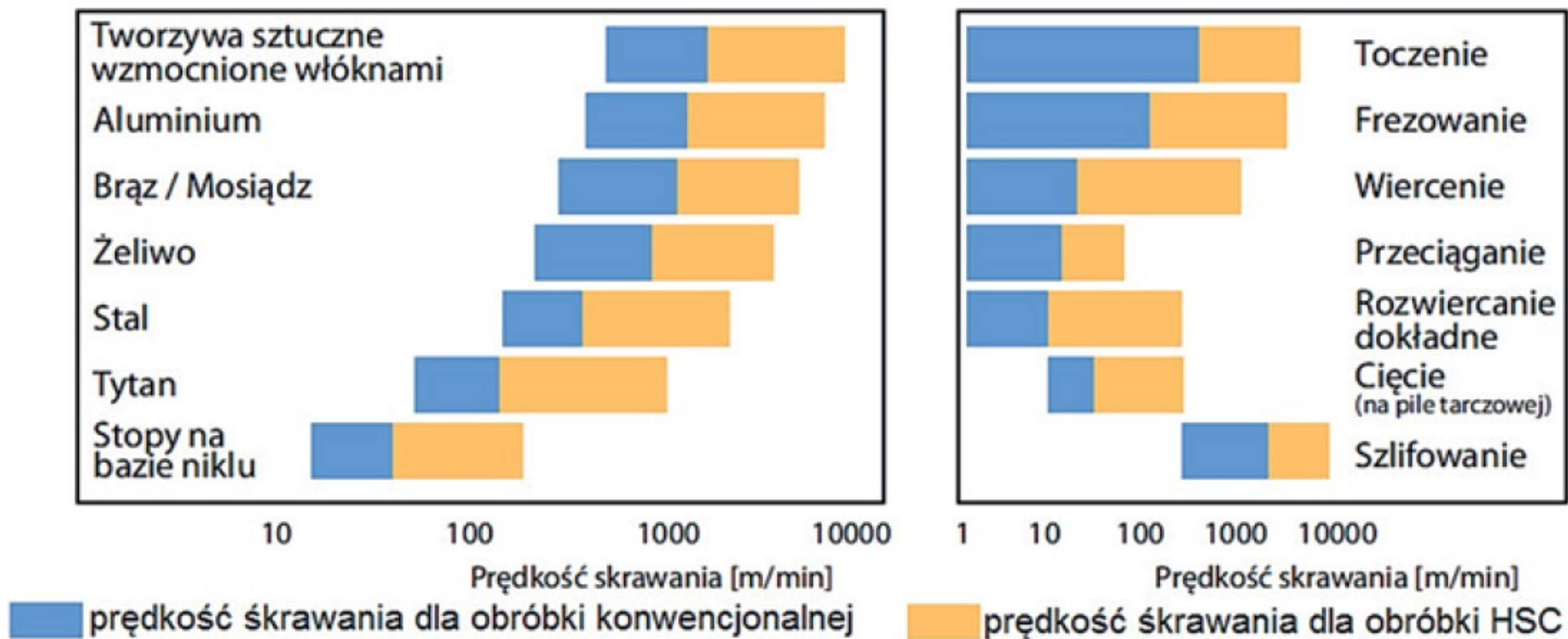
- odpowiednia prędkość obrotowa wrzeciona, osiągająca niekiedy 30 000 obr/min,
- duża moc wrzeciona, nawet 60kW,
- wysokie wartości posuwów roboczych oraz ustawczych (w skomplikowanych konstrukcjach kieszeniowych, gdzie narzędzie musi dokonać wielu zmian kierunku, czas ruchów ustawczych może sięgać 20% całkowitego czasu cyklu obróbkowego, w związku tym stosowane prędkości tych ruchów niekiedy przekraczają wartość 100 m/min)



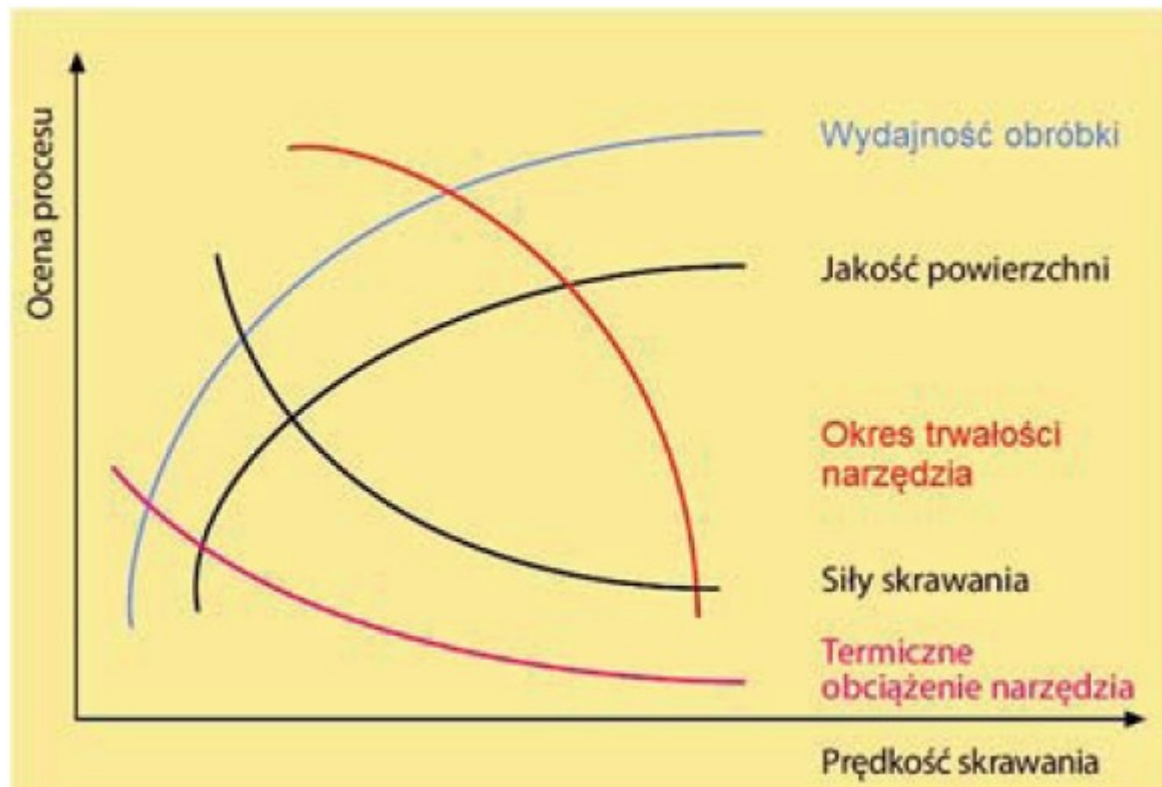
Przebieg sił skrawania w funkcji prędkości



Zależność składowych siły skrawania od prędkości skrawania przy toczeniu stopu Al6ZnMg1,5Cu

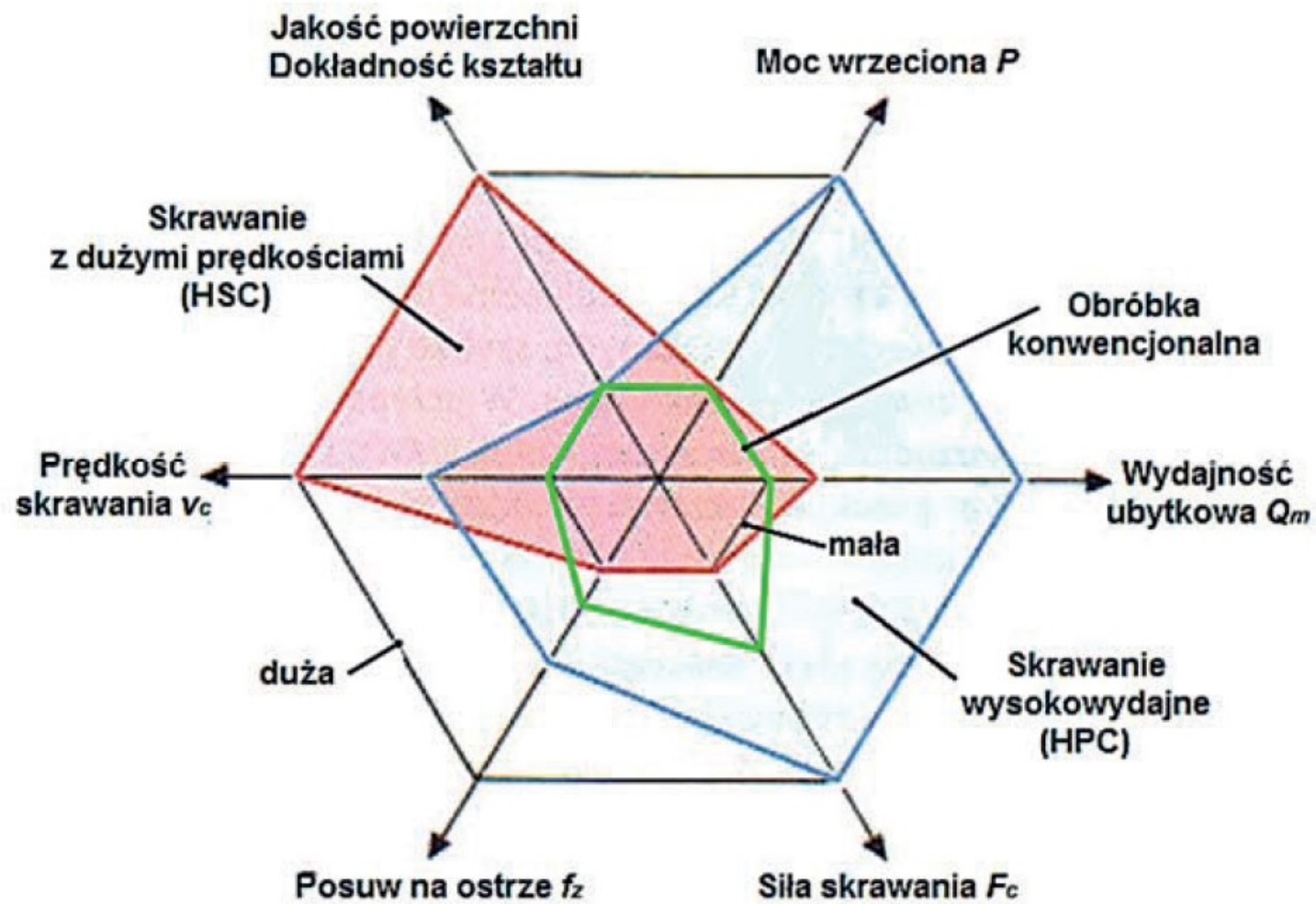


Porównanie zakresów prędkości skrawania  $v_c$  dla obróbki konwencjonalnej i HSC, w zależności od: a) rodzaju materiału obrabianego, b) sposobu skrawania



Wpływ wzrostu prędkości skrawania na zmiany zjawisk towarzyszących procesowi obróbki





Porównanie obróbki konwencjonalnej z obróbkami HSC i HPC

Do podstawowych problemów technologicznych występujących w procesie skrawania stopów aluminium należy zaliczyć:

- usuwanie wiórów ze strefy skrawania,
- powstawanie narostu na ostrzu narzędzia skrawającego,
- kształtowanie nierówności powierzchni obrabianej,
- zużycie ostrza,
- temperaturę skrawania,
- siły skrawania.



# STABILNOŚĆ PROCESU FREZOWANIA

Z punktu widzenia oddziaływania na układ masowo-sprężysto-tłumiący (MST), w obróbce skrawaniem można wyróżnić trzy rodzaje drgań: swobodne, wymuszone i samowzbudne.

Drgania te można w sposób ogólny opisać równaniem ruchu układu drgającego o jednym stopniu swobody przez porównanie częstotliwości i amplitudy drgań tego układu:

$$m\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + cx(t) = \begin{cases} 0 \text{ swobodne } \omega = \omega_0, x_0 \rightarrow 0 \\ F(t) \text{ wymuszone } \omega = \omega_F, x_0 = \text{const} \\ F[x(t)] \text{ samowzbudne } \omega \approx \omega_0, x_0 \rightarrow \infty \end{cases}$$

gdzie:  $m$  - masa układu drgającego [kg],

$k$  - współczynnik tłumienia [Ns/m],

$c$  - współczynnik sztywności [N/m],

$\omega$  - częstotliwość drgań [rd/s],

$\omega_0$  - częstotliwość drgań własnych [rd/s]

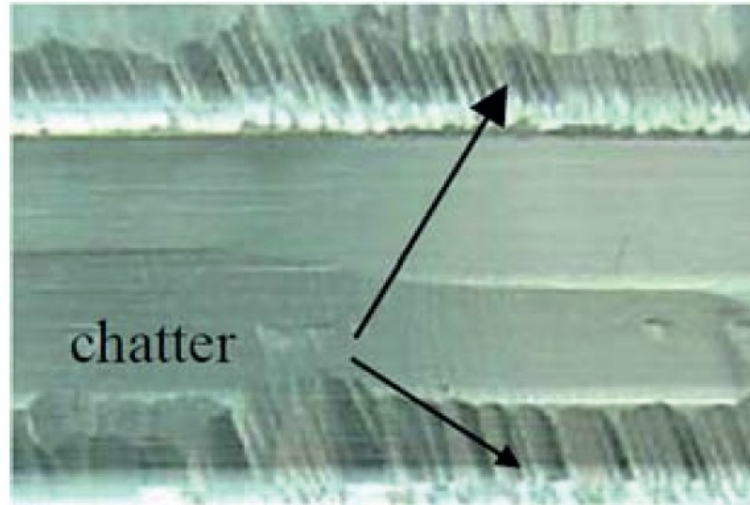
$\omega_F$  - częstotliwość siły wymuszającej [rad/s],

$X_0$  - amplituda drgań.

**Drgania swobodne** występują, gdy na układ nie działa żadna siła, a jego równowaga została zakłócona przejściowo. Drgania swobodne rzadko występują w obróbce skrawaniem.

**Drgania wymuszone** występują wtedy, gdy na układ działa zewnętrzna, zmienna siła wymuszająca. Jeśli to wymuszenie trwa odpowiednio długo częstotliwość drgań jest równa częstotliwości siły wymuszającej. W obróbce skrawaniem drgania wymuszone występują dość często, np. przy frezowaniu. Mogą być także spowodowane przez drgania innych maszyn przenoszone przez podłoże.

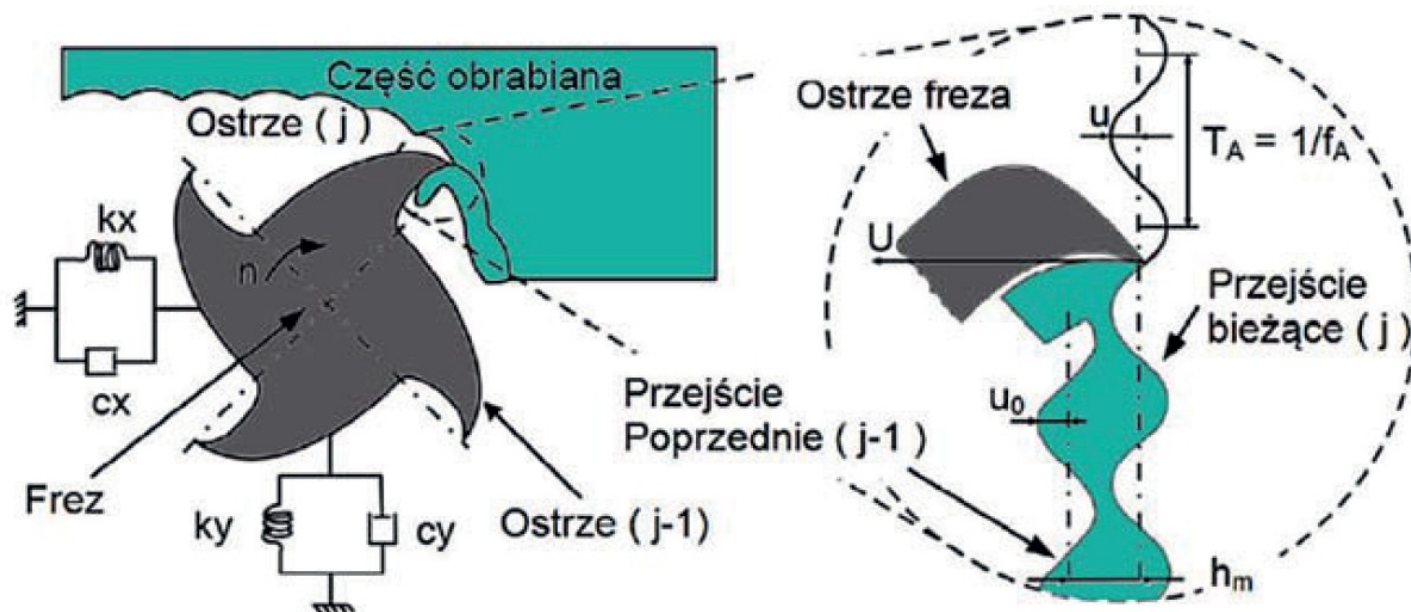
**Drgania samowzbudne** występują przy braku siły wymuszającej i są spowodowane utratą stabilności przez układ OUPN. Ich podstawową cechą jest to, że zmienna siła dostarczająca energię do układu jest generowana przez same drgania, co oznacza, że jeśli drgania ustaną, zniknie również siła je podtrzymująca. Tak więc, aby drgania samowzbudne mogły powstać, musi wystąpić sprzężenie zwrotne między drganiami układu MST, a działającą na ten układ siłą. Układ, w którym występują drgania samowzbudne nazywamy niestabilnym. Stabilnością układu nazywamy jego odporność na powstawanie w nim drgań samowzbudnych. Niestabilność procesu frazowania objawia się powstawaniem karbowania (z ang. chatter).



### Efekt niestabilnej pracy narzędzia - karbowanie (chatter)

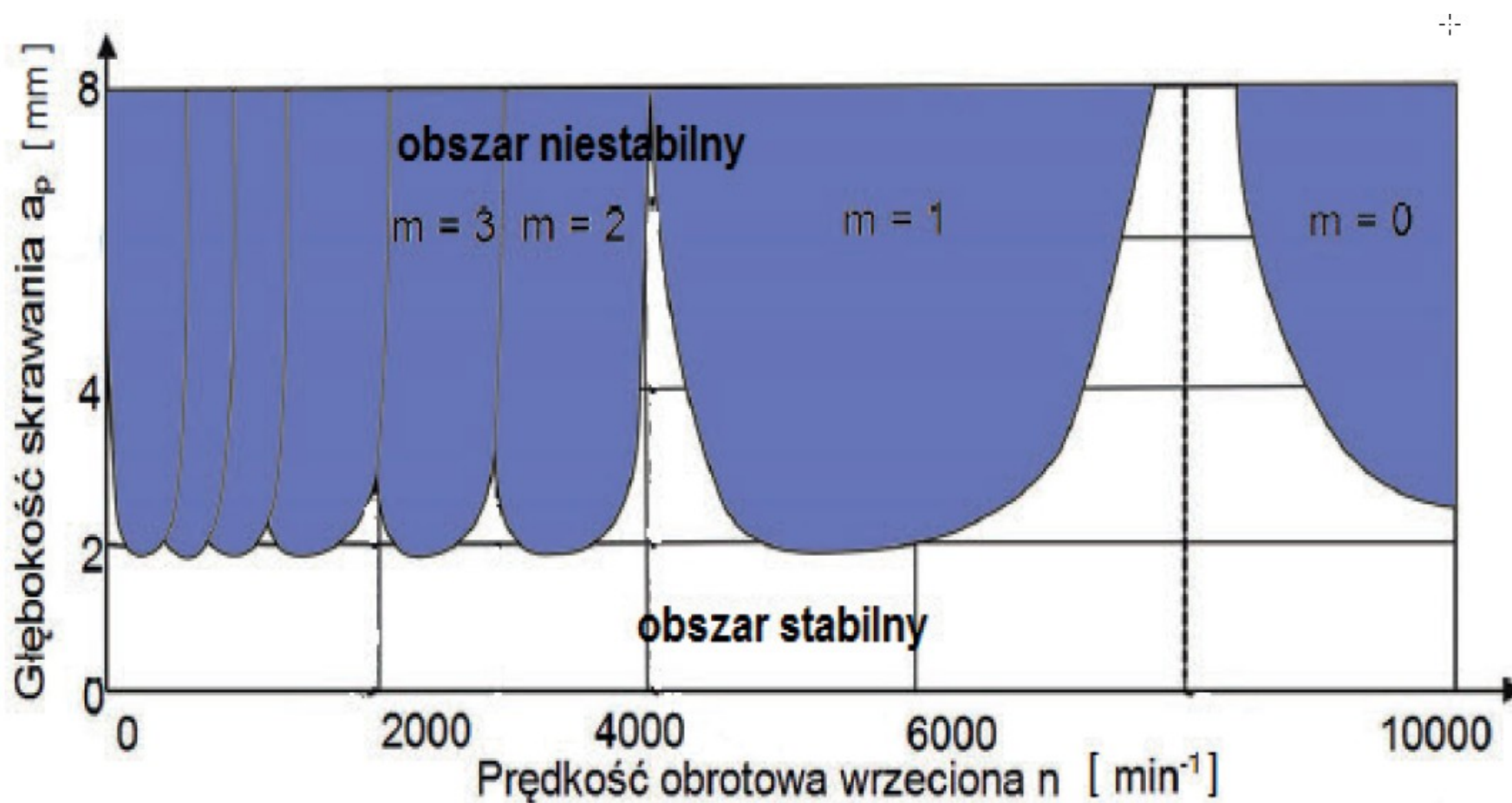
Z wielu przyczyn utraty stabilności w obróbce skrawaniem najistotniejszym wydaje się być tzw. efekt regeneracyjny. W przypadku frezowania, z powodu odchyłeń ostrza frezu, na obrabianej powierzchni pozostaje falista struktura, w którą wchodzi kolejne ostrze.

Częstotliwość drgań narzędzia może nakładać się na częstotliwość drgań własnych obrabiarki i w ten sposób wzbudzać układ OUPN, można tego uniknąć przez właściwy dobór prędkości obrotowej wrzeciona.



Schemat powstawania drgań karbujących

Najistotniejszymi parametrami technologicznymi wpływającymi na stabilność układu są głębokość skrawania  $a_p$  oraz prędkość obrotowa  $n$ , co jest uwzględnione na wykresach stabilności, które ze względu na swój kształt nazywane są krzywymi workowymi.



Do identyfikowania i oceny stabilnych zakresów parametrów frezowania mogą być stosowane różne metody analizy i obliczeń [13, 32]:

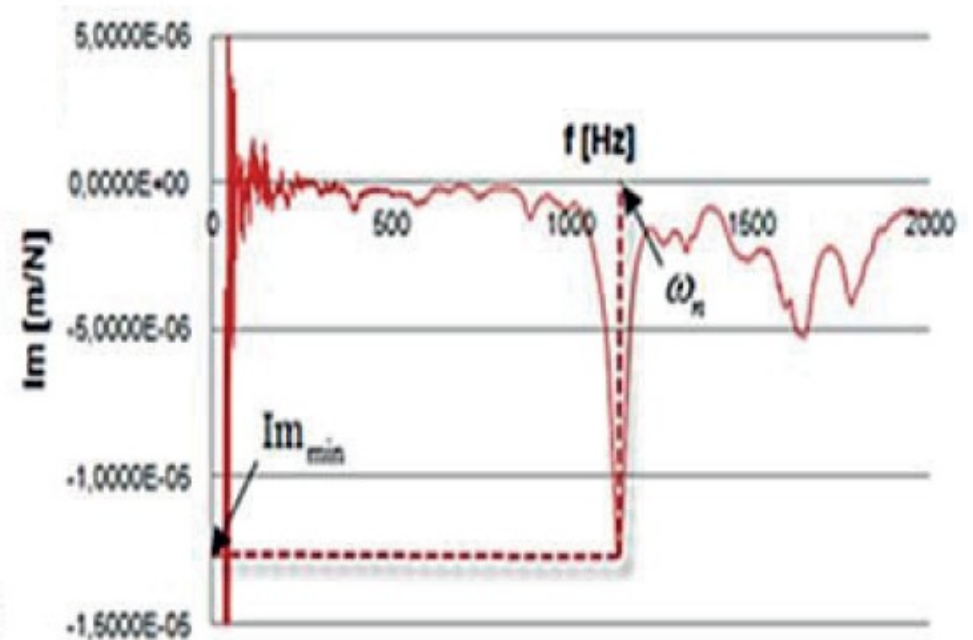
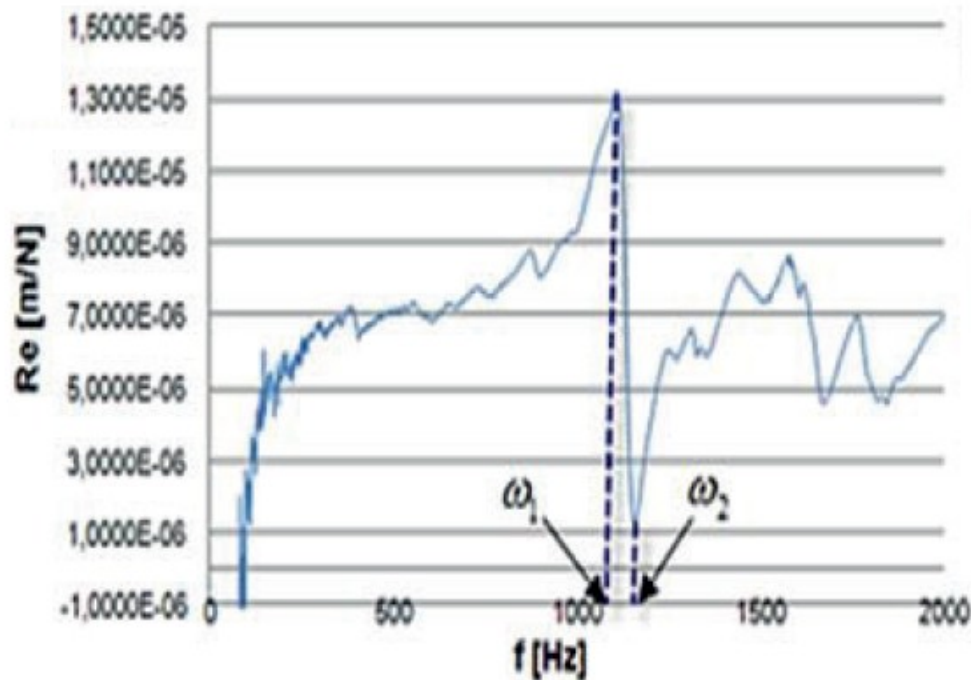
pomiar charakterystyki częstotliwościowej podczas obróbki przy wykorzystaniu

- czujnika przyspieszenia, który może być umieszczony np. na wrzecionie,
- pomiar charakterystyki częstotliwościowej sił skrawania za pomocą siłomierza,
- analiza akustyczna częstotliwości drgań frezu przy obróbce,
- analiza modalna.
- 

Metody te służą do oceny procesu skrawania, zwłaszcza odpowiedzi na pytanie, czy zmierzone widmo zdominowane jest przez częstotliwość wchodzenia ostrza w materiał (proces stabilny), czy przez częstotliwość drgań układu OUPN (proces niestabilny).

Metody te pozwalają na wyznaczenie warunków stabilnej pracy przed rozpoczęciem obróbki, jednak aby przeprowadzić obliczenia z ich zastosowaniem konieczne jest uwzględnienie wpływu wielu czynników, takich jak: parametry procesu oraz warstwy skrawanej, geometria narzędzia, właściwości materiałowe przedmiotu obrabianego i narzędzia.





Przykładowa odpowiedź układu narzędzie-oprawka-wrzeciono na wymuszenie a) część rzeczywista, b) część urojona

Współczynnik tłumienia można wyznaczyć z zależności:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n}$$

a następnie sztywność wyznacza się z zależności:

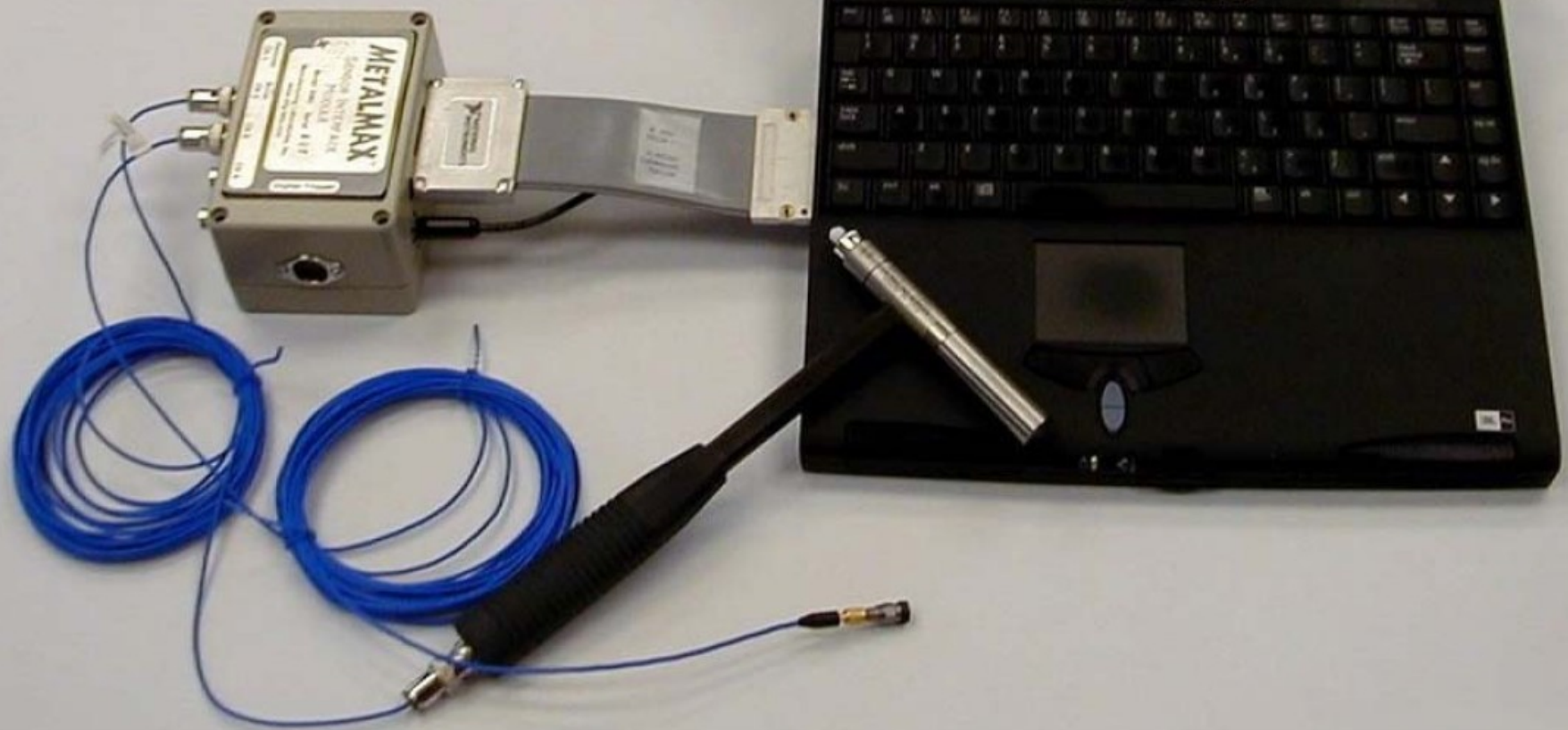
$$j = \frac{-1}{2\zeta \text{Im}_{\min}} [N / m]$$

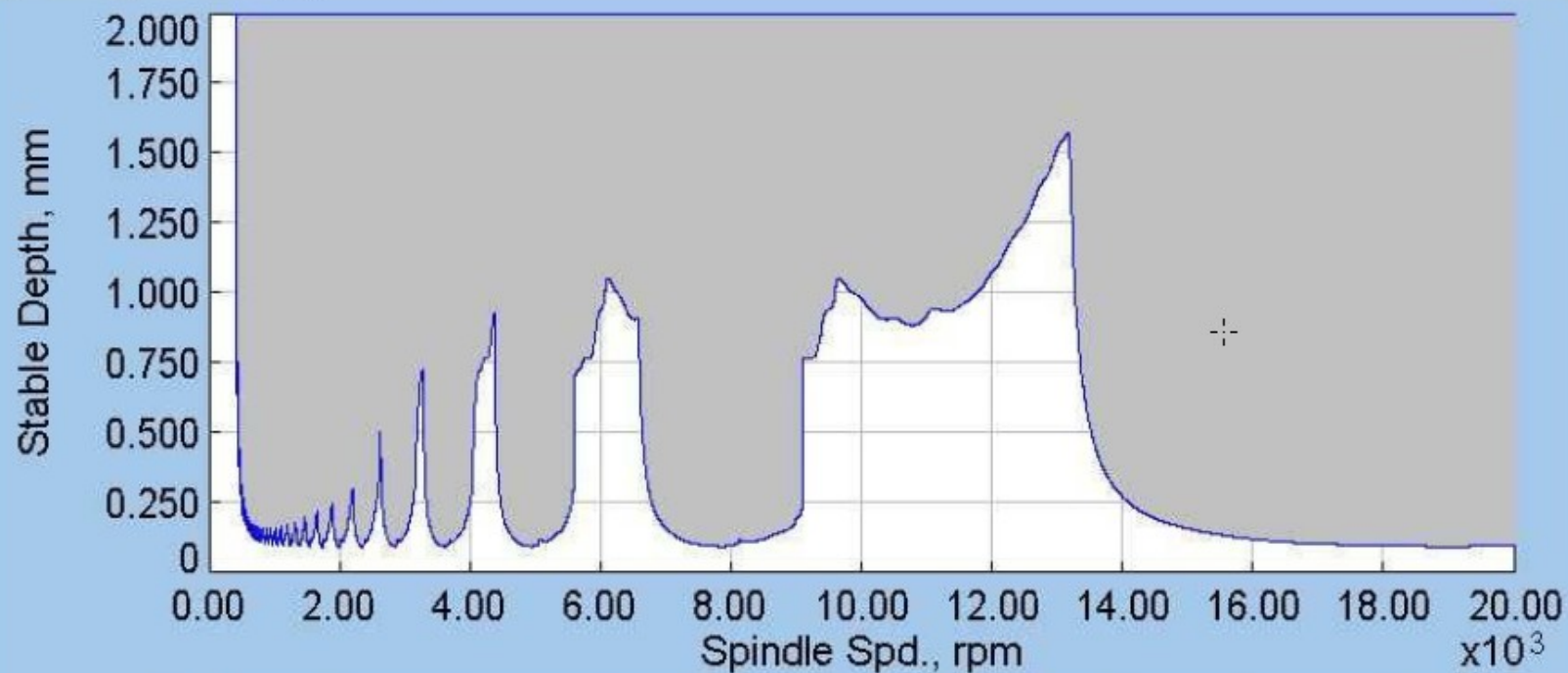
gdzie: j – sztywność

$\text{Im}_{\min}$  – wartość części urojonej odpowiadająca częstotliwości  $\omega_n$

$K_c$  - opór właściwy skrawania  
 $z$  - liczba ostrzy  
 $k$  - wsp. sztywności  
 $\xi$  - wsp. tłumienia  
 $D$  - średnica narzędzia  
 $a_e$  - dosuw osiowy

$$a_{pgr} = \frac{2 * k * \xi}{K_c * \frac{a_e}{D} * \frac{z}{2}}$$



**METALMAX****TXF**[Calibrate](#)[Setup](#)[Autorange](#)[Measure](#)[Print](#)



# Wykorzystanie krzywej workowej – podsumowanie

Frez:  $\phi 25$  mm, 6 ostrzy, szerokość frezowania = 25mm, posuw na ząb  $f_z = 0.2$ mm



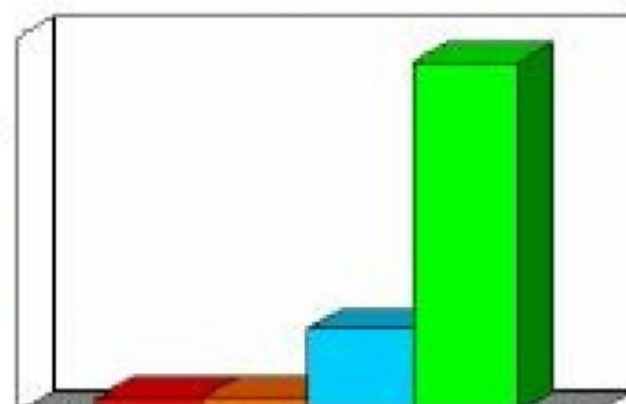
- redukcja prędkości obrotowej lub głębokości to obniżenie wydajności
- stabilne warunki skrawania można znaleźć dla b. dużych objętościowych wydajności skrawania

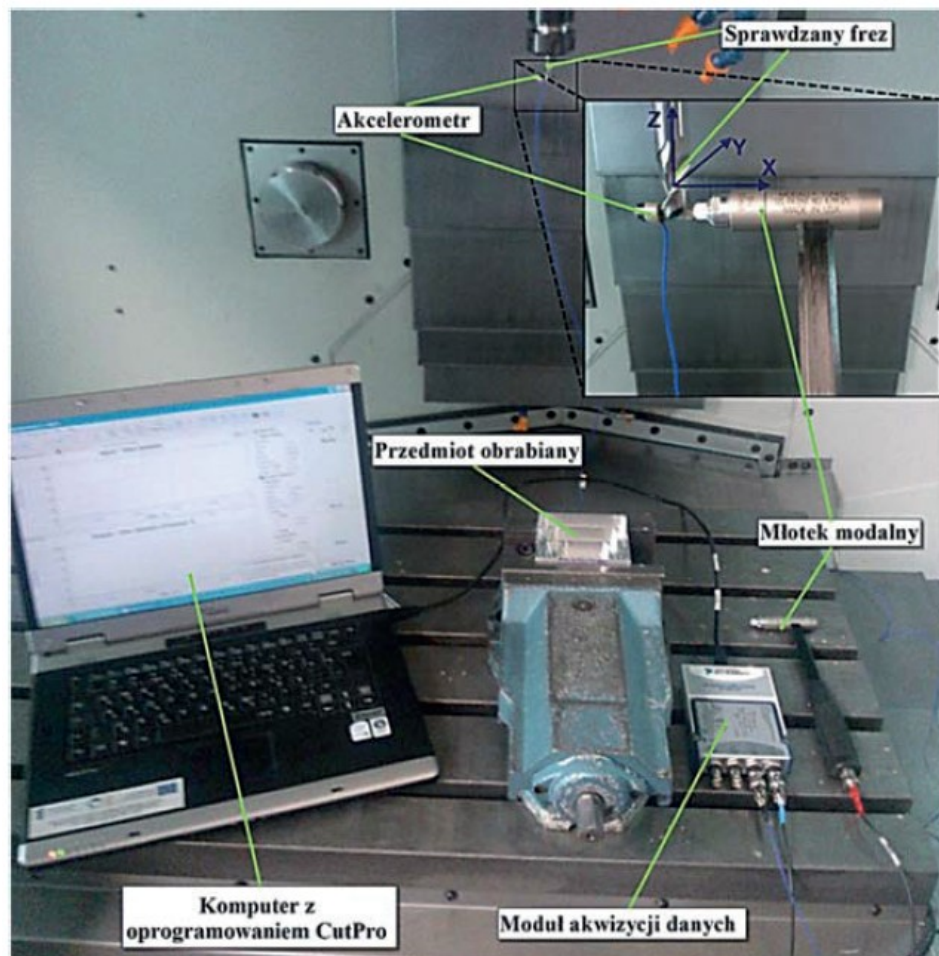
$$Q = v_c f a_p \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

- prędkość skrawania może być ograniczona przez trwałość ostrza

prędkość obrotowa.: [obr/min]	500	1500	15000	12700
głębokość skr.: [mm]	10	3.5	2	11
Q [cm <sup>3</sup> /min]	150	158	900	3810

wydajność  
objętościowa Q





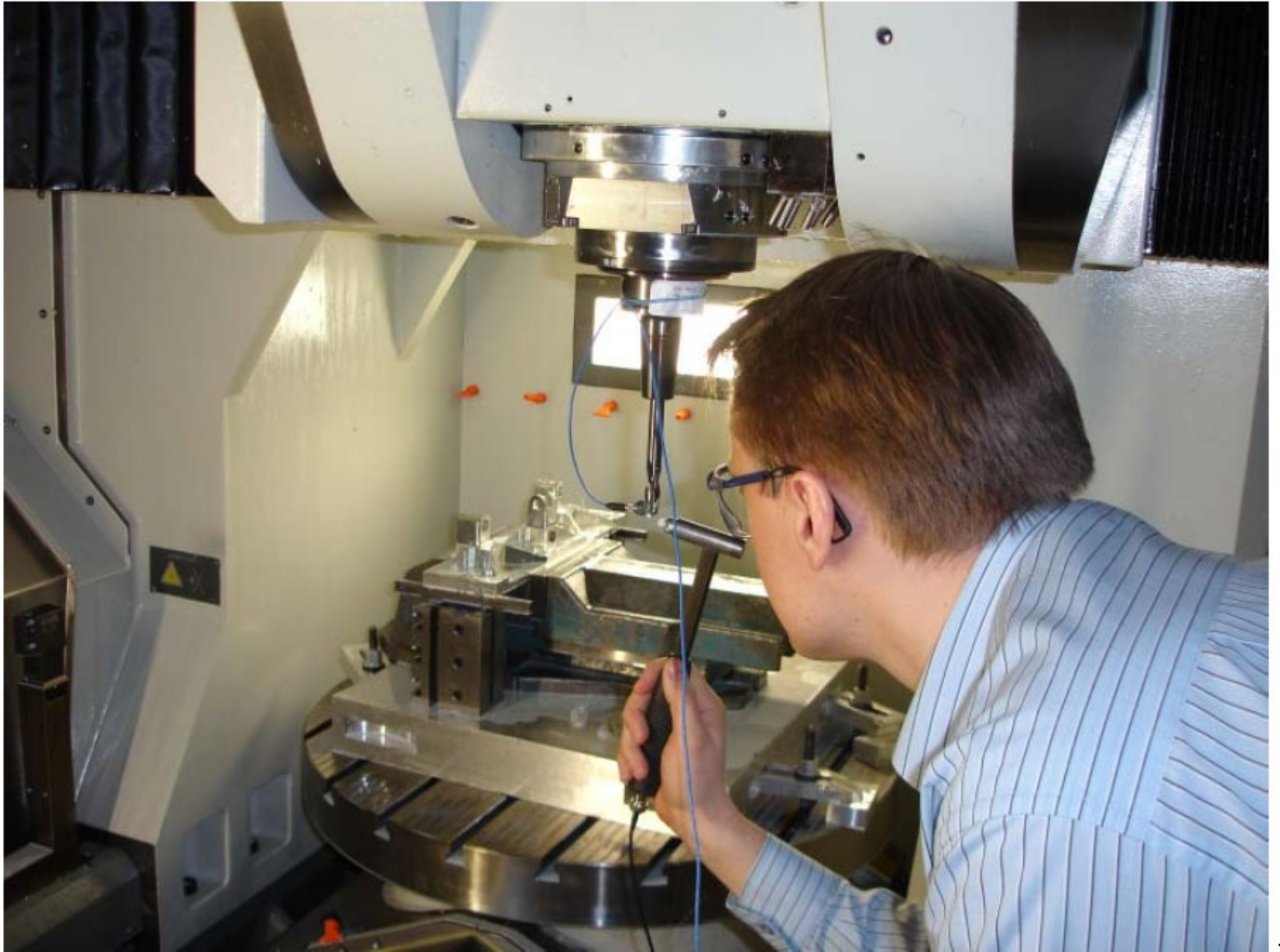
Charakterystyka dynamiczna obrabiarki jest wyznaczana w dwóch kierunkach X i Y, metodą eksperymentalnej analizy modalnej.

W metodzie tej mierzona jest wartość siły wymuszającej oraz odpowiedź układu na to wymuszenie, co pozwala na wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych.

Najważniejszymi elementami zestawu są młotek modalny z czujnikiem pomiaru siły wymuszenia oraz akcelerometr.

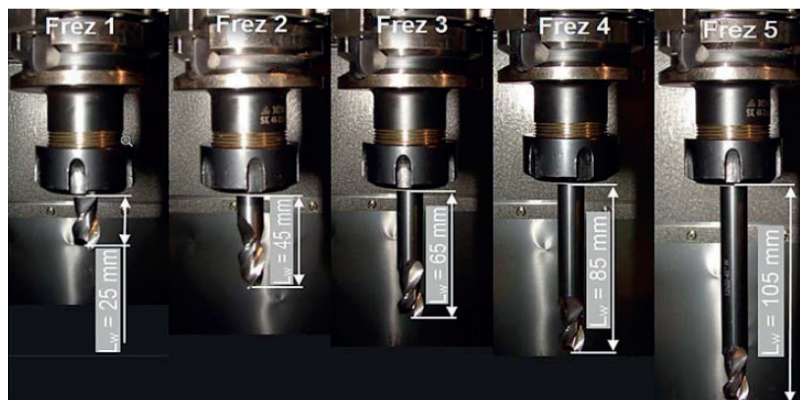
W trakcie obróbki danych w programie CutPro definiowane są właściwości materiału obrabianego, parametry obróbki oraz narzędzia. Na podstawie zebranych sygnałów oraz zdefiniowanych parametrów, program tworzy krzywe stabilności, które służą do wyznaczenia obszarów stabilności.



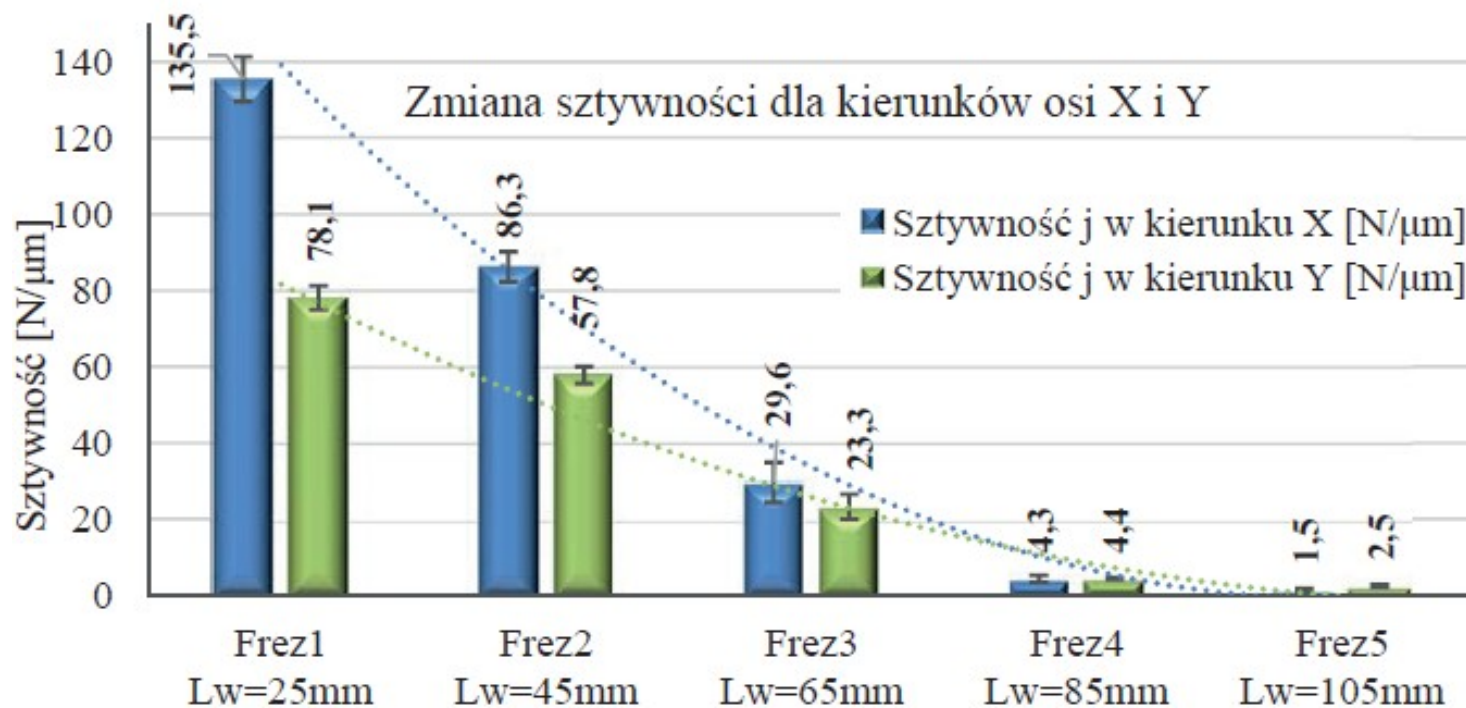




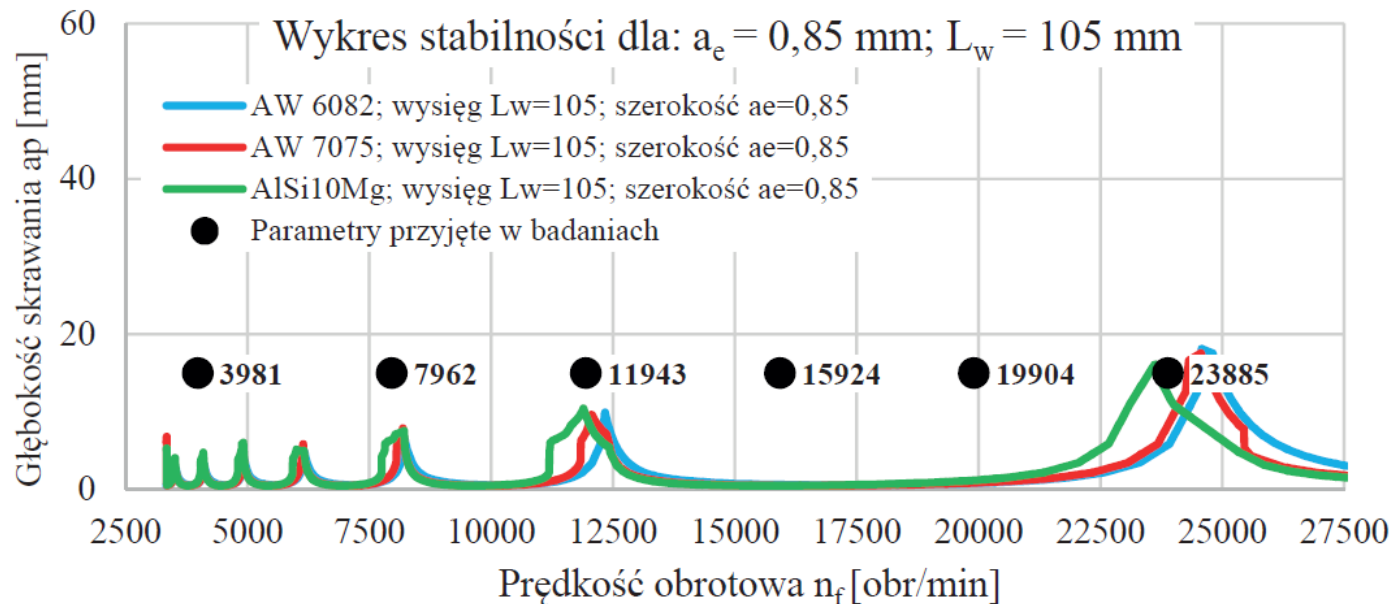
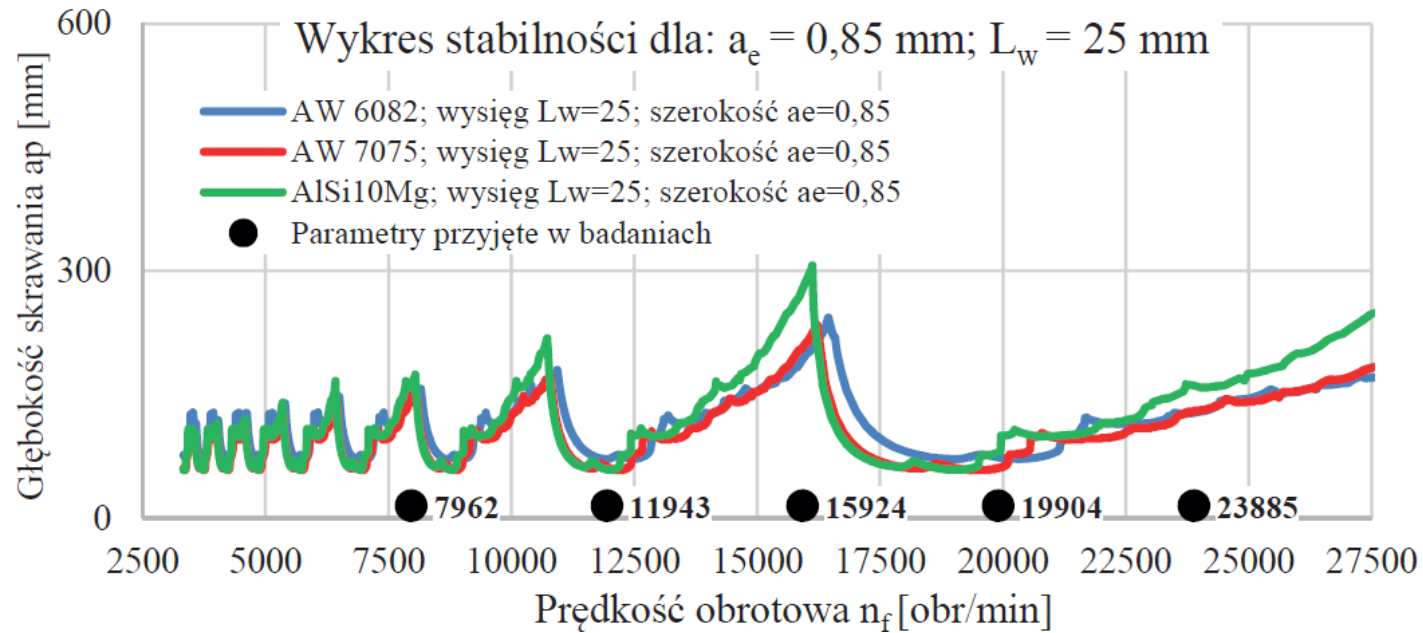
## Wyznaczenie sztywności narzędzi

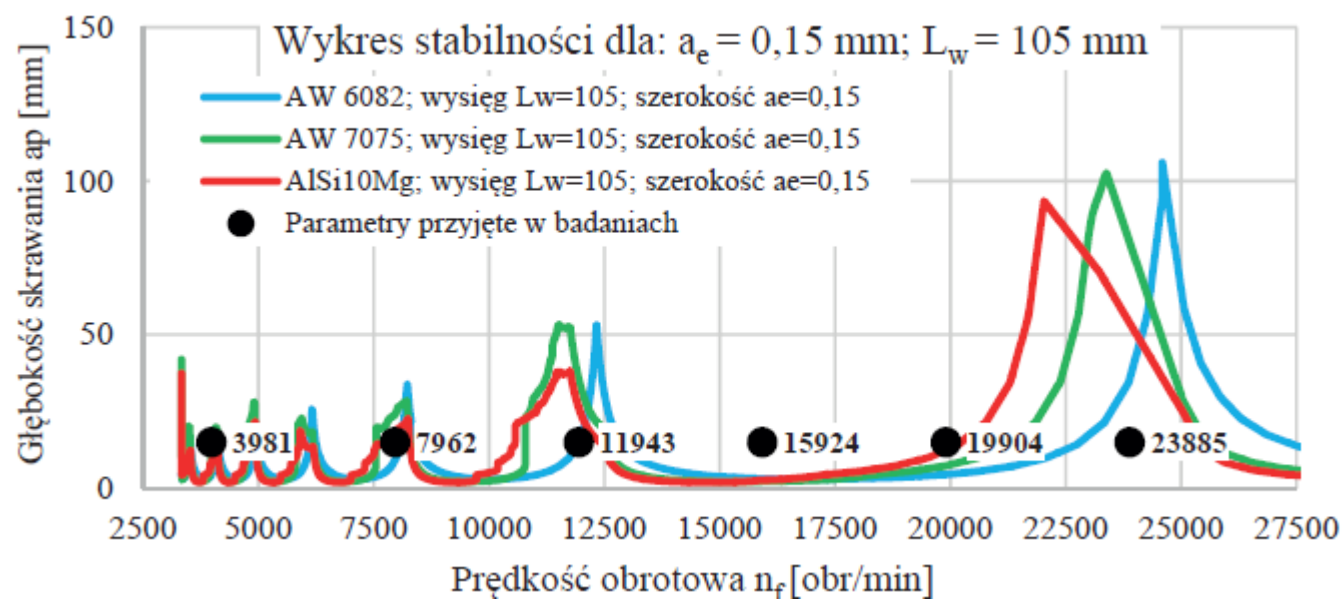
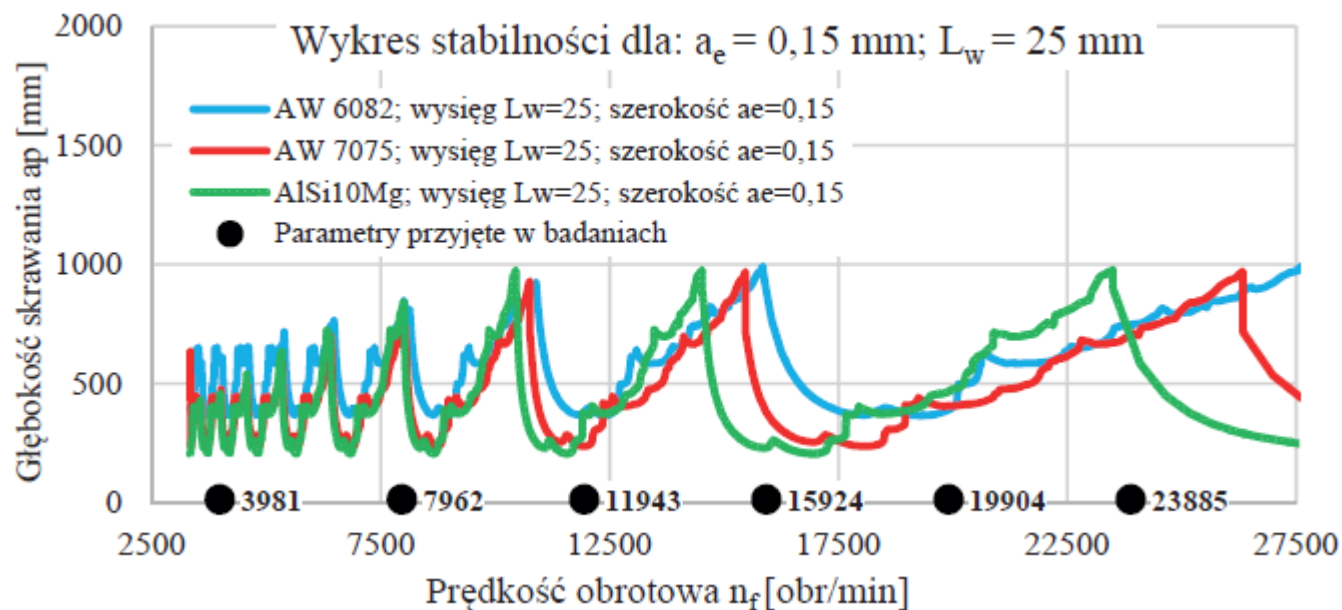


Parametry geometryczne stałe dla wszystkich narzędzi					
Ilość ostrzy	Średnica	Dł. części roboczej	Kąt pochylenia linii śrubowej	Kąt przyłożenia	Kąt natarcia
$Z_n$	$D_c$ [mm]	$a_p$ [mm]	$\lambda_s$	$\alpha_o$	$\gamma_o$
2	12	22	$45^\circ$	$12^\circ$	$15^\circ$



## Wyznaczenie obszarów stabilności pracy narzędzi



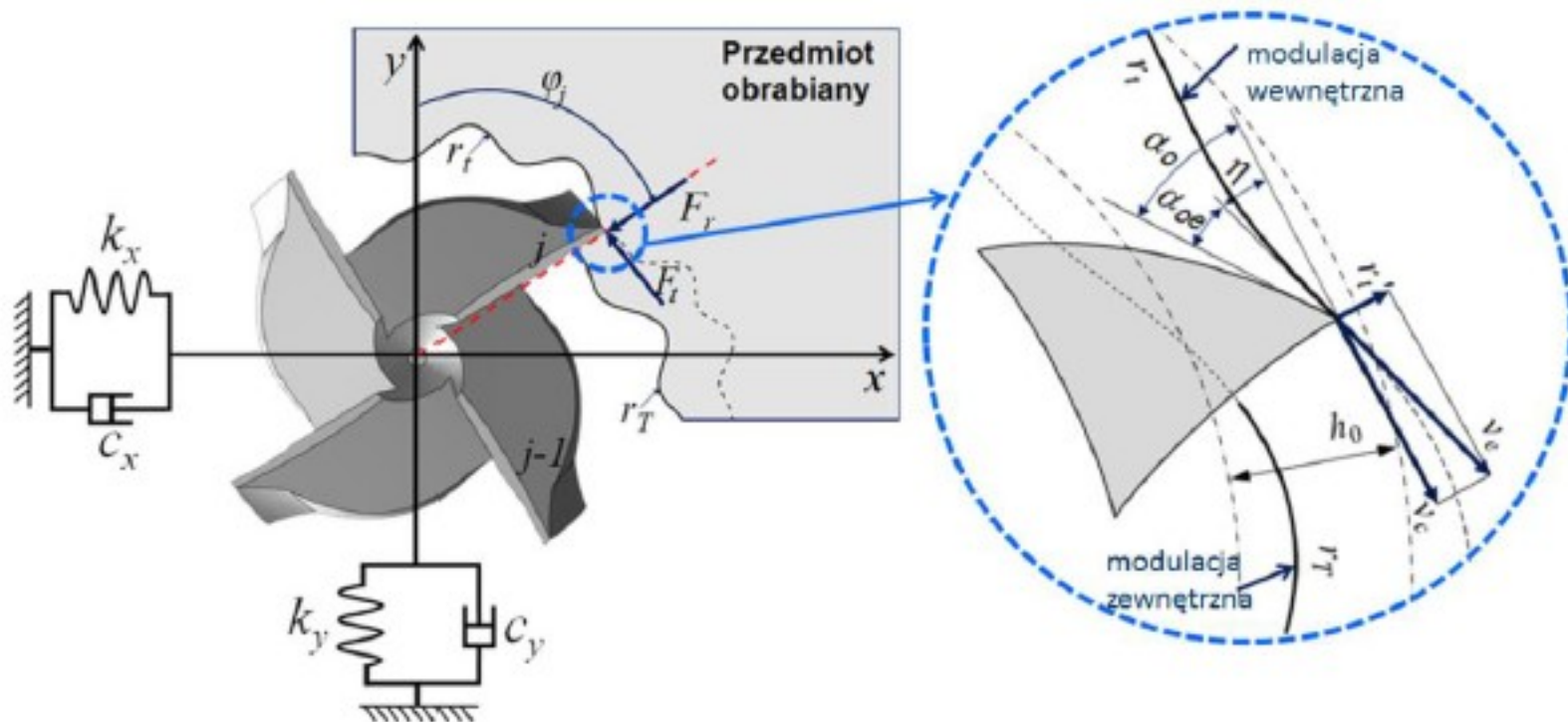


Pomimo szeregu zalet, do których należy m.in. łatwość i szybkość analizy, możliwość szczegółowego definiowania parametrów obróbki, narzędzia oraz materiału obrabianego, eksperymentalna analiza modalna nie zawsze się sprawdza. Wpływa na to przyjęty sposób przeprowadzanego badania, który nie uwzględnia złożoności procesu skrawania i złożoności badanego modelu jakim jest obrabiarka. Do najważniejszych wad tej metody możemy zaliczyć:

- nie uwzględnia dynamiki procesu – próba przeprowadzana jest przy postoju maszyny, a nie w trakcie obróbki, sztywność układu wrzecionowego zmienia się w zależności od jego obrotów,
- nie uwzględnia zmian sztywność układu wrzecionowego w trakcie jego pracy – obrabiarka w trakcie pracy rozgrzewa się,
- nie uwzględnia możliwości wystąpienia niejednorodności i wad materiałowych, które wpływają na chwilowe zmiany warunków obróbki i mogą powodować utratę stabilności,
- nie uwzględnia wpływu zmian przekroju warstwy skrawanej wynikających ze śladów obróbkowych po wcześniejszych przejściach, tzw. efekt regeneracyjny,
- nie uwzględnia zmiany masy obrabianego materiału, a tym samym zmian tłumienia w układzie O-U-P-N.

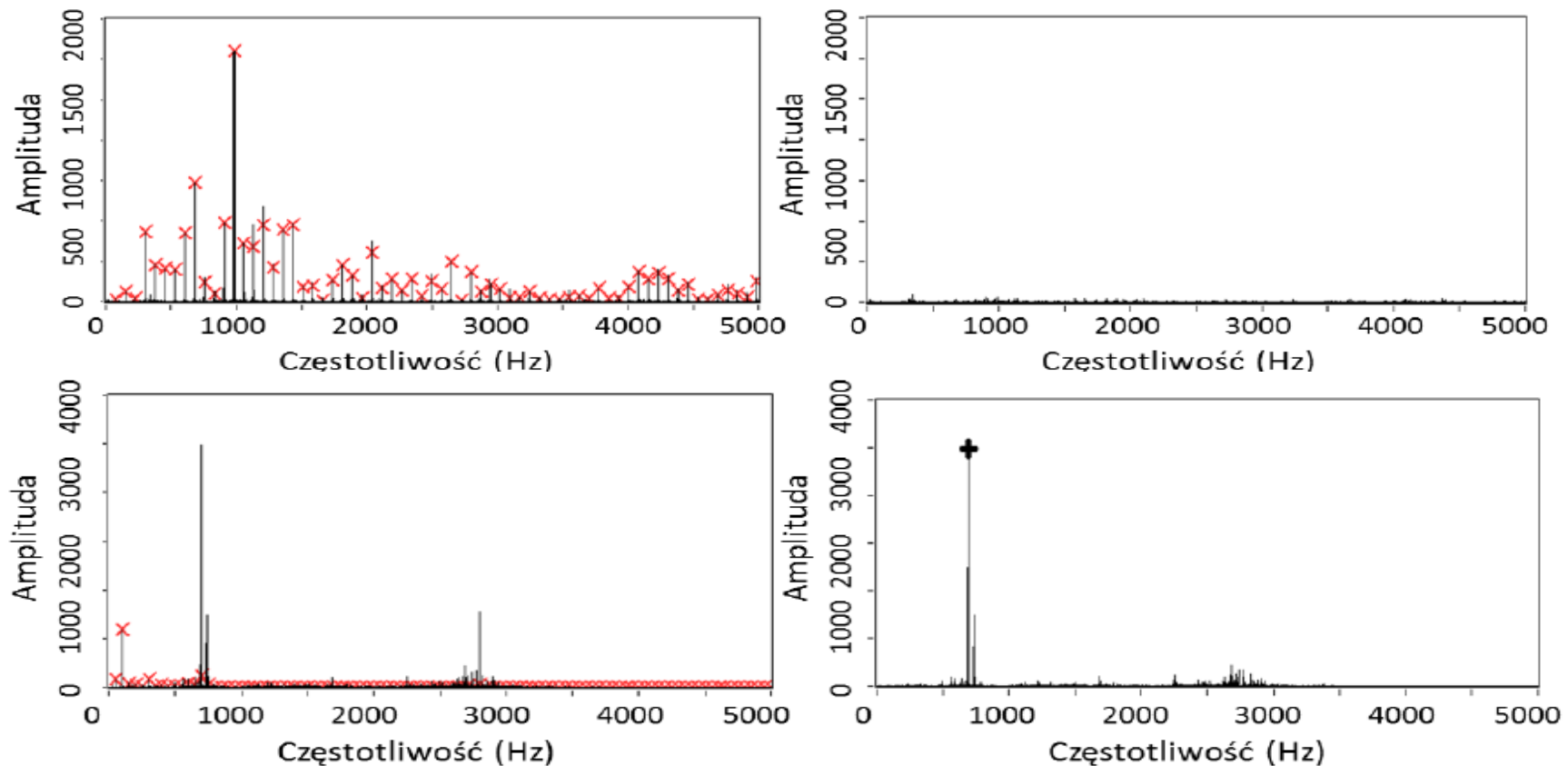
# DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE GRANICY STABILNOŚCI PRZY FREZOWANIU

Drgania samowzbudne są istotnym czynnikiem ograniczającym wydajność, jakość obróbki oraz trwałość narzędzi i obrabiarek. Doświadczalne określenie granicy stabilności polega na znalezieniu osiowej głębokości skrawania  $a_p$ , powyżej której układ jest niestabilny.

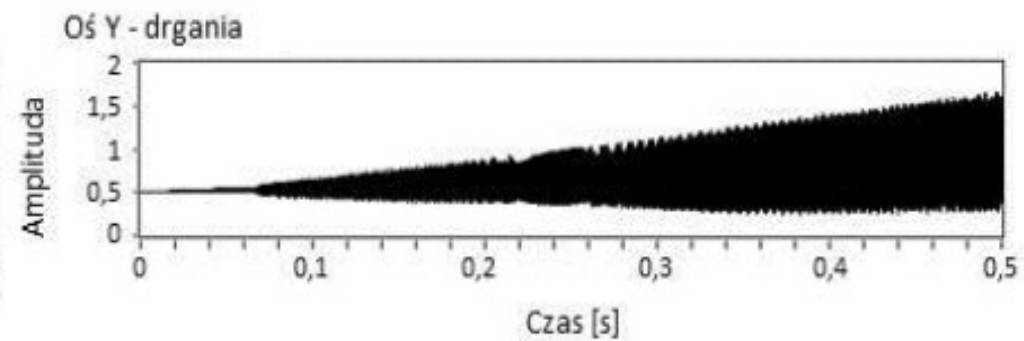
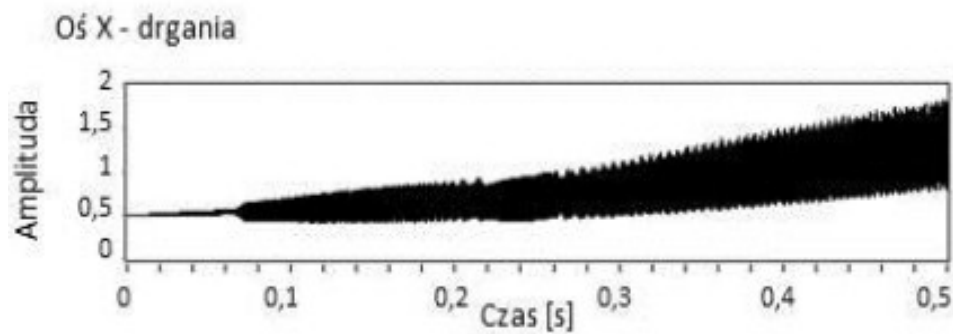
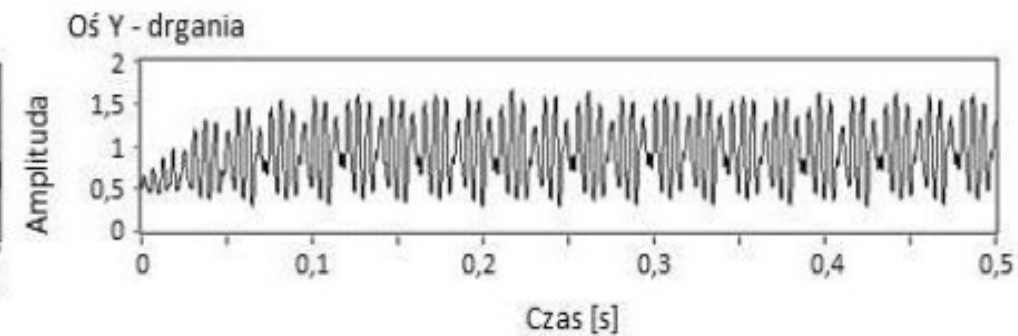
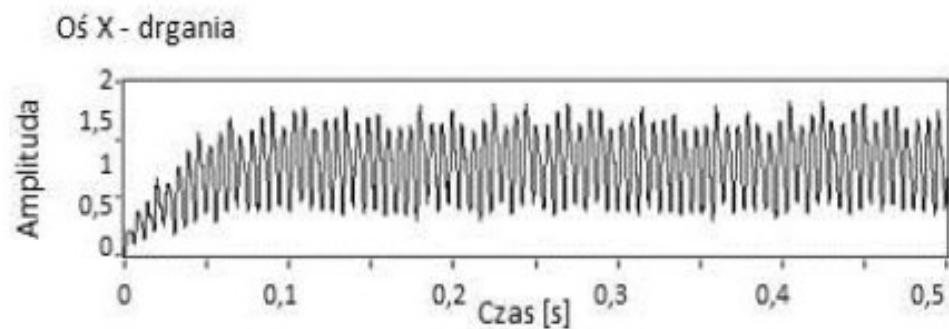
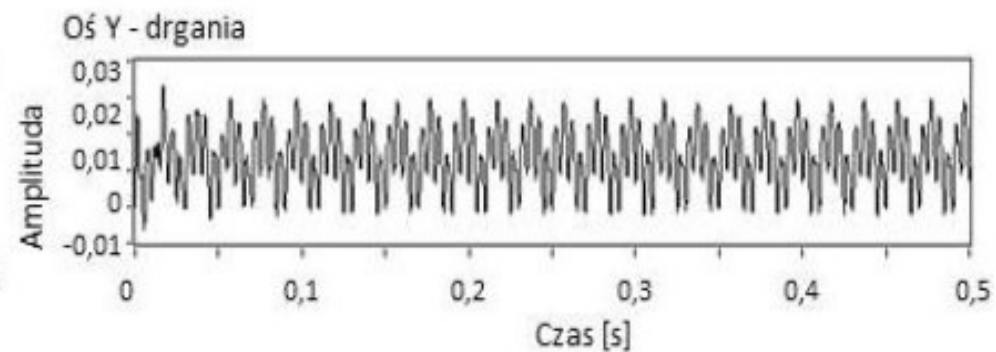
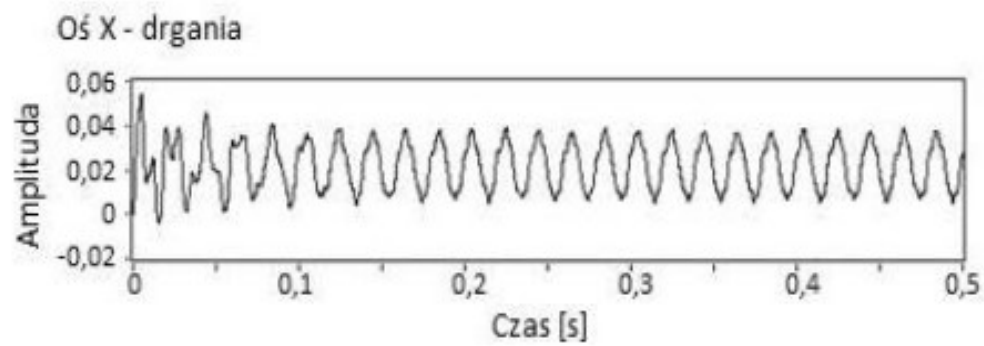


Zastosowana metoda wykrywania drgań samowzbudnych polega na odfiltrowaniu z widma FFT przebiegu ruchu narzędzia drgań o częstotliwości przechodzenia ostrzy oraz częstotliwości obrotowej wrzeciona. Koniecznie przy tym należy wykryć rzeczywistą prędkość obrotową wrzeciona, ponieważ że może się ona różnić od zadanej, co znacząco wpływałoby na wynik analizy. Opracowany algorytm wykrywa rzeczywistą prędkość obrotową. W tym celu oblicza się nominalną częstotliwość prędkości obrotowej:

$$f_{obr} = n/60 \text{ Hz}$$







Kąt pochylenia rampy [°]	0	2	3	5	7	8,5
Graniczna głębokość skrawania [mm]	5,85	6,35	6,79	8,16	8,48	9,79

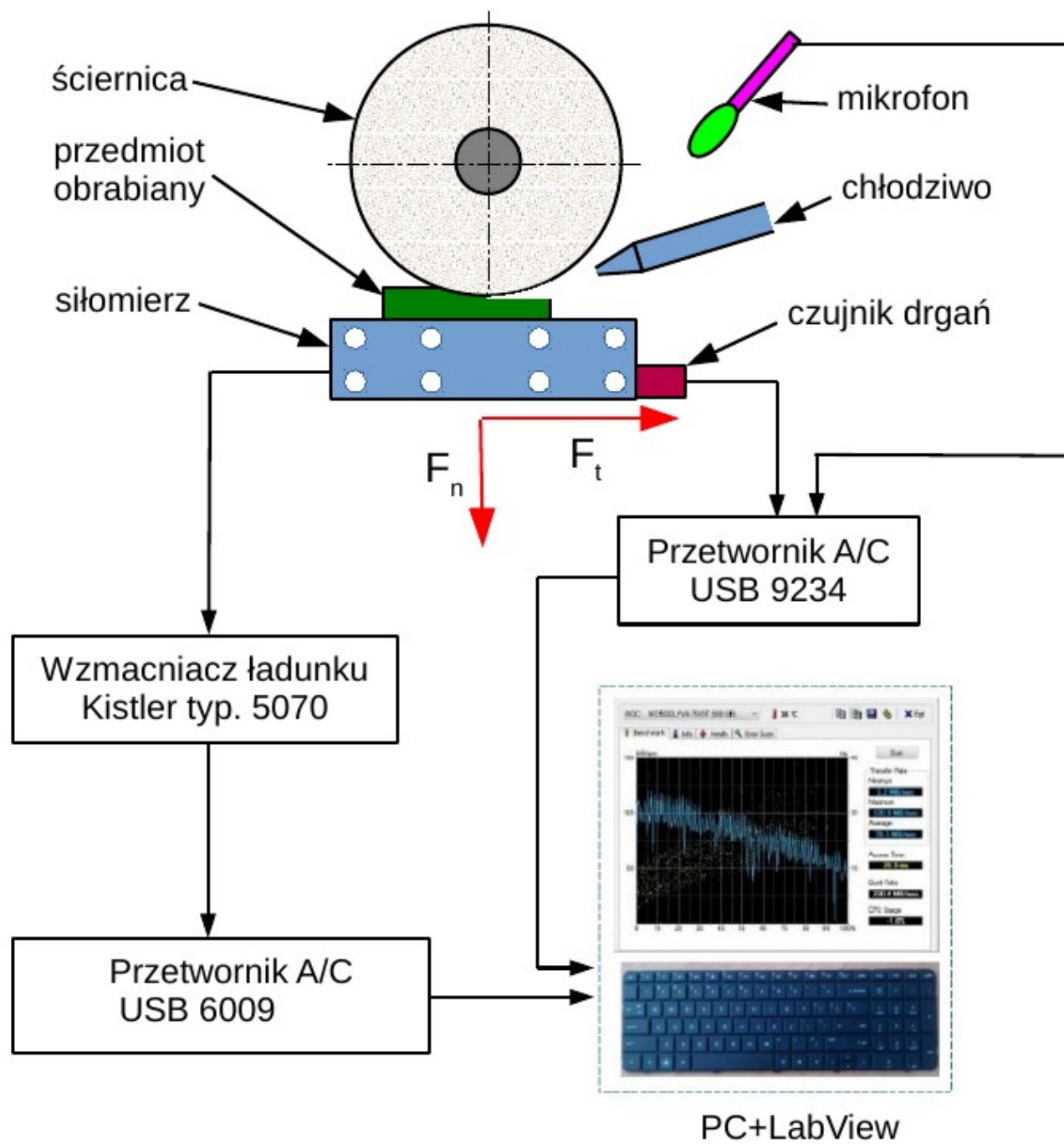
Doświadczalne wyznaczanie granicy stabilności przy pomocy tzw. frezowania rampy należy stosować z dużą ostrożnością i możliwie małym kątem nachylenia.

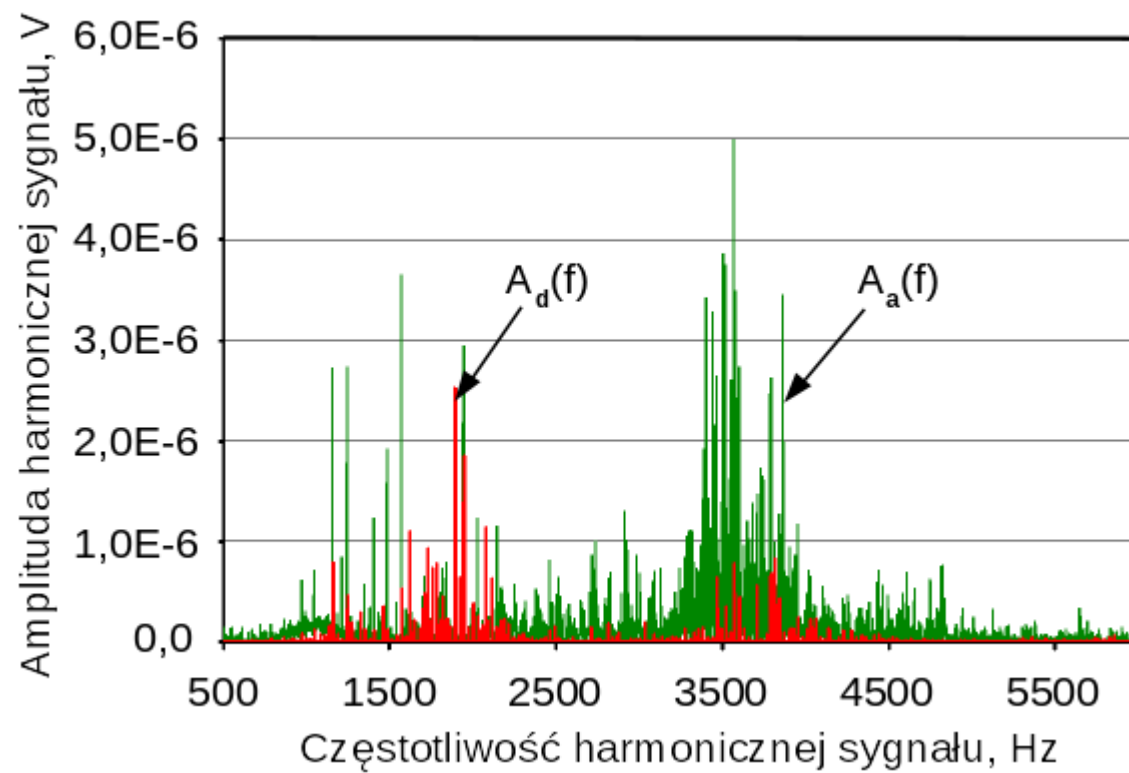
Należy liczyć się z wyraźnym zawyżeniem granicy stabilności, tym większym, im większy kąt. Jeśli chodzi o symulację numeryczną, frezowanie rampy nie znajduje żadnego uzasadnienia.

Skokowa metoda poszukiwania granicy stabilności, która pozwala na dokładne wyznaczenie tej granicy jest efektywniejsza obliczeniowo niż metoda wykorzystująca rampę.

Do znalezienia granicy stabilności przy metodzie skokowej wystarczy kilkukrotne powtórzenie symulacji o długości 0,5 s, przy frezowaniu rampy natomiast czas trwania 60 s nie gwarantuje znalezienia granicy stabilności z dużą dokładnością.

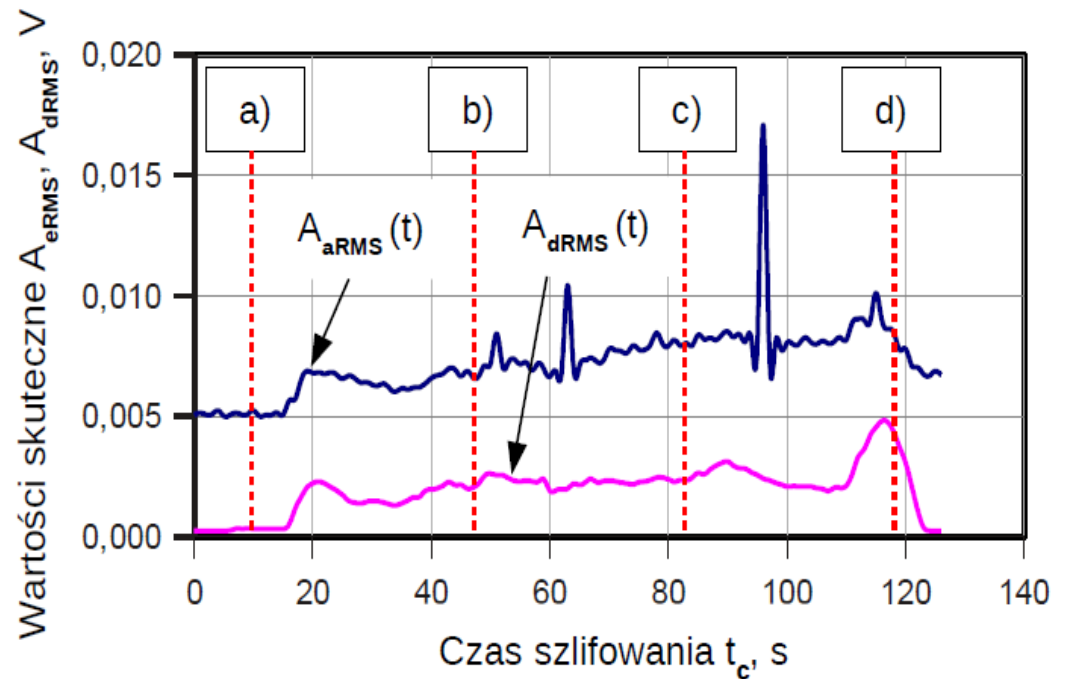
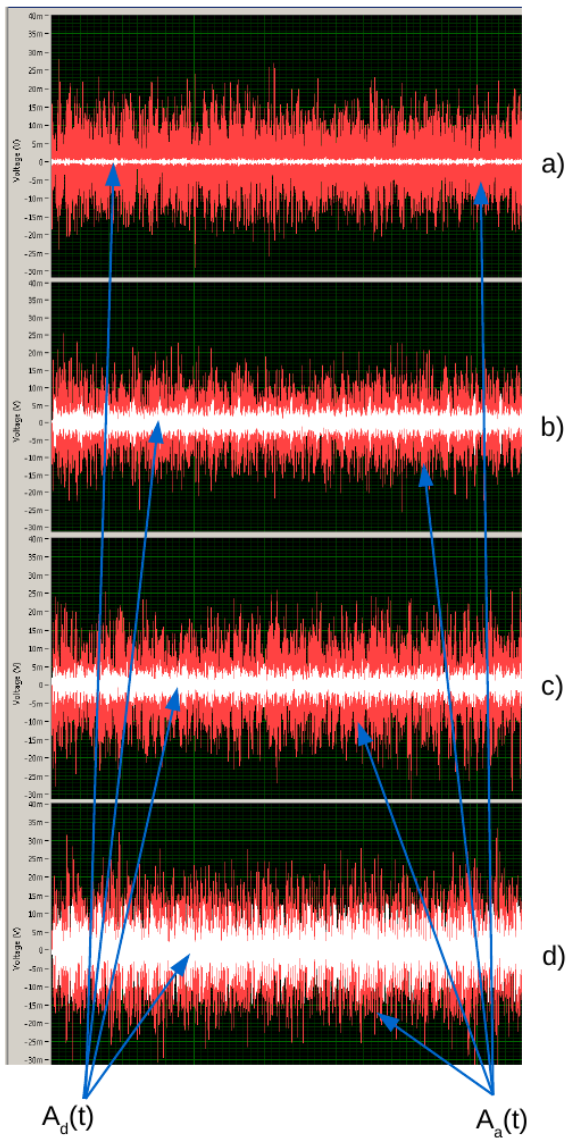
# NADZOROWANIE PROCESU SZLIFOWANIA





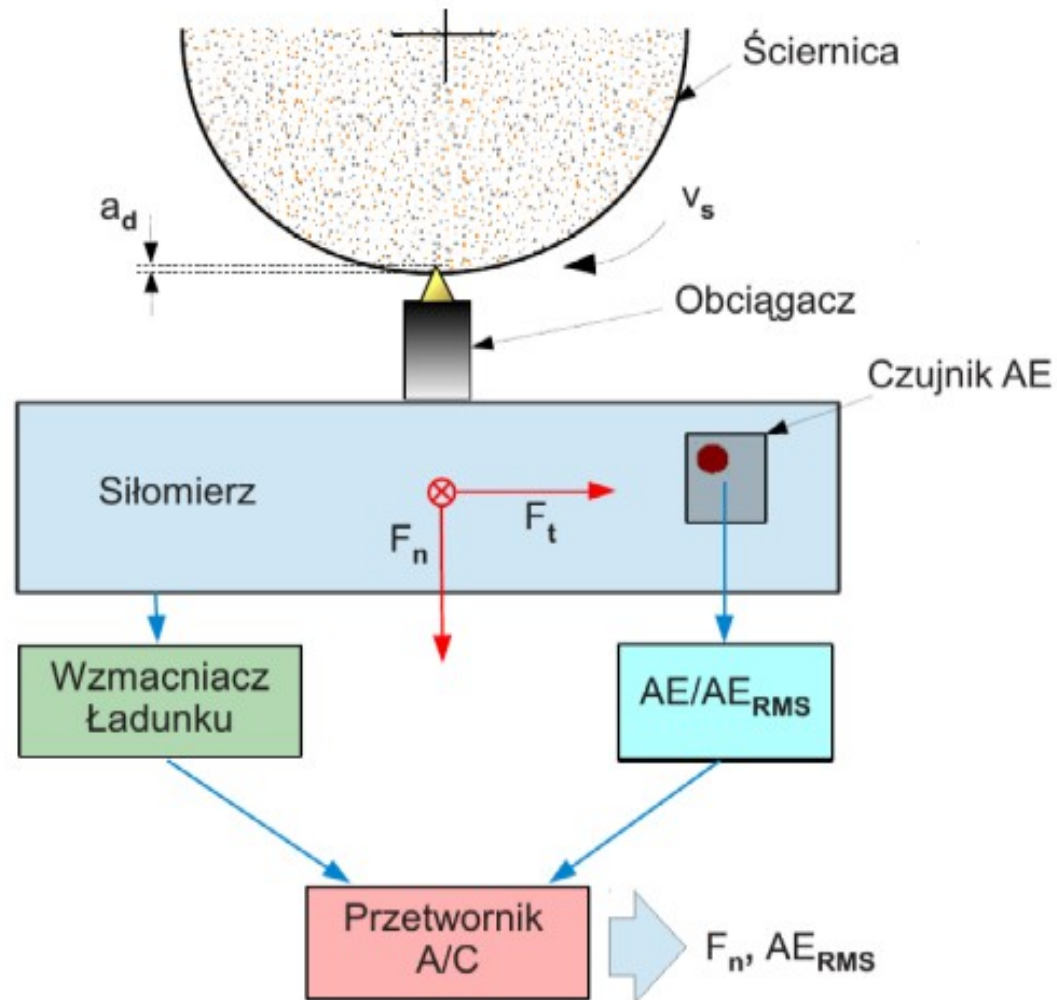
Rozkład widmowy sygnału drgań  $A_d(t)$  oraz sygnału dźwięku  $A_a(t)$



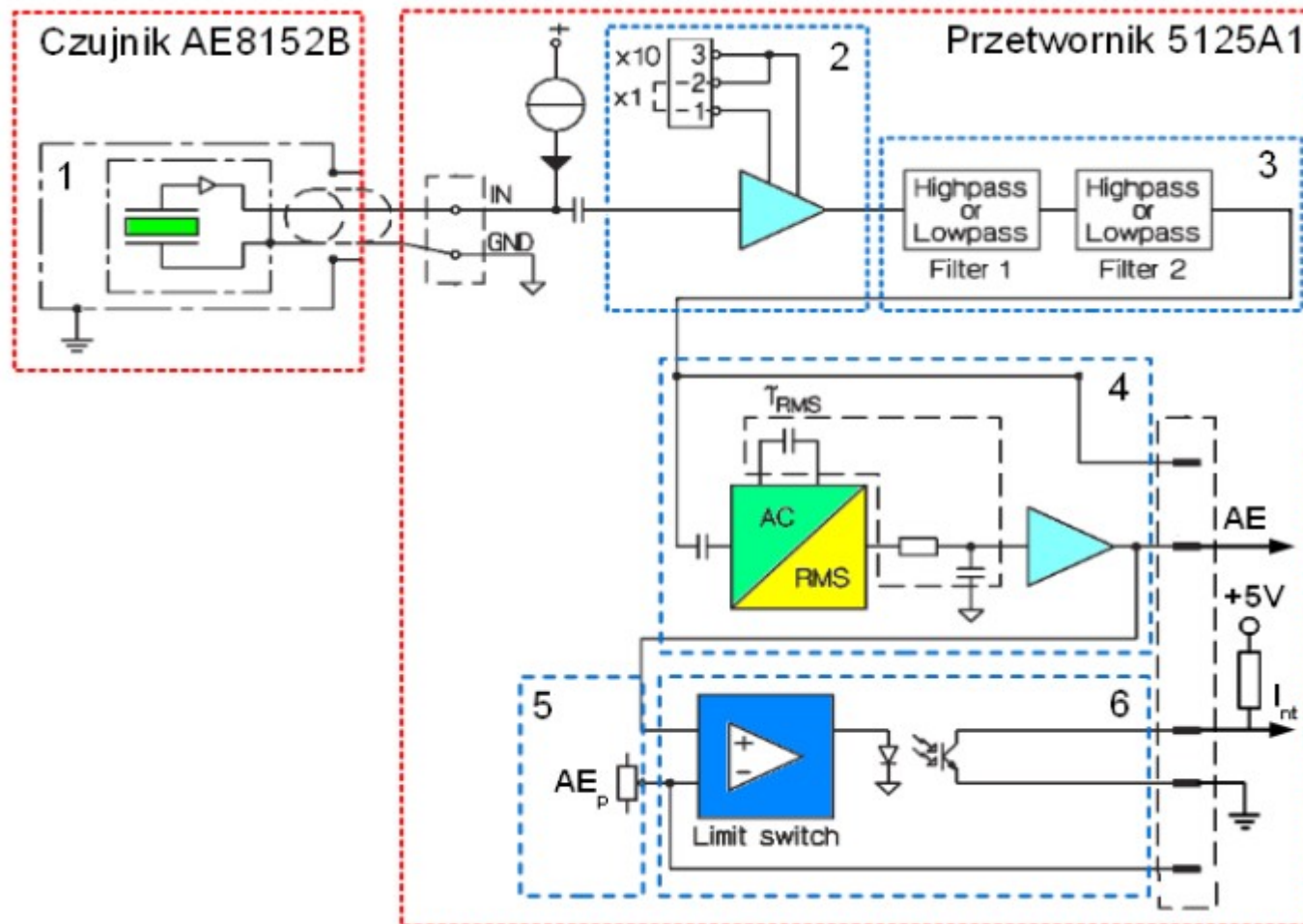


Przebiegi wartości skutecznych amplitudy sygnału drgań  $A_{dRMS}$  oraz amplitudy sygnału dźwięku  $A_{aRMS}$  w funkcji czasu szlifowania  $t_c$

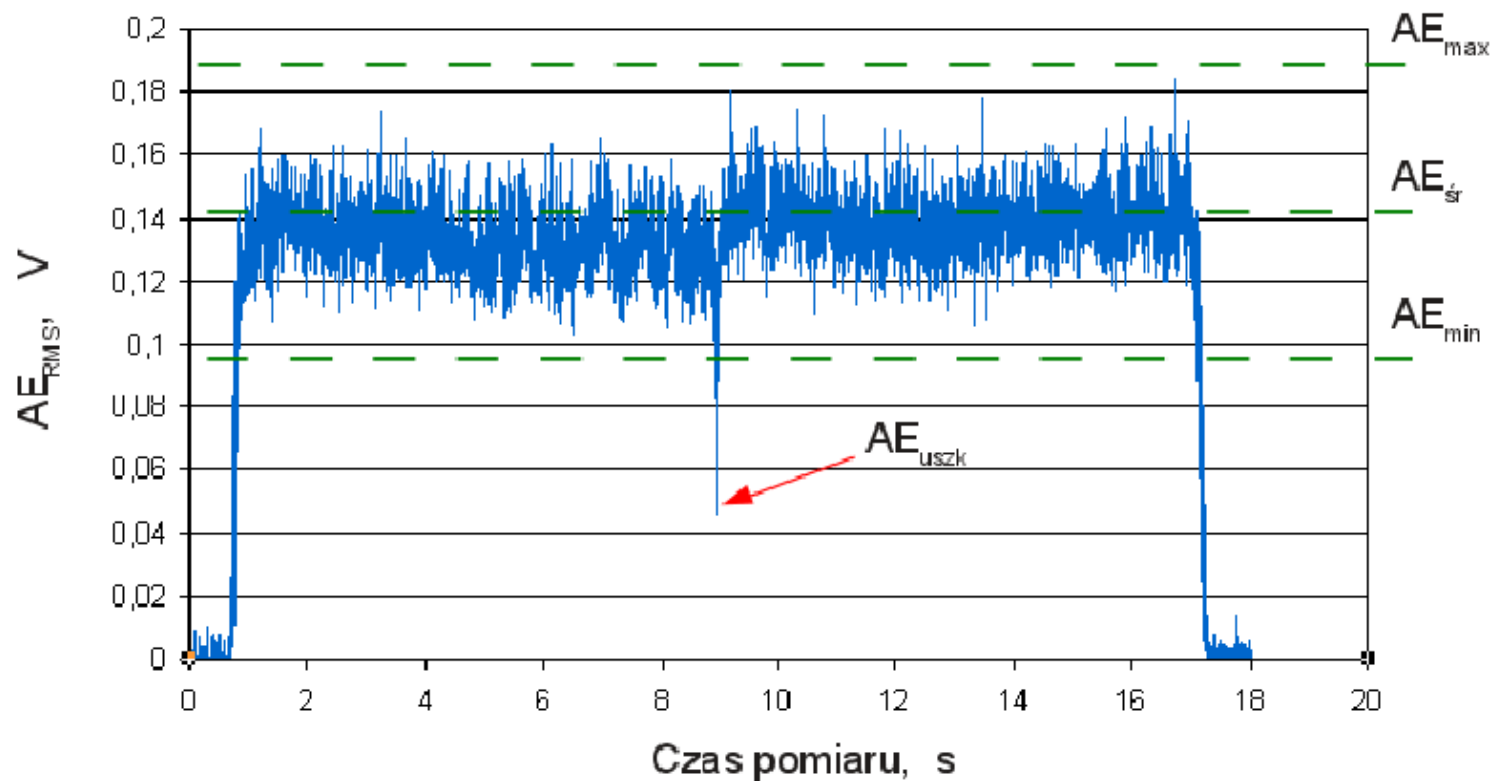
Przebiegi amplitudy drgań  $A_d(t)$  oraz amplitudy dźwięku  $A_a(t)$  dla pięciu wybranych przedziałów czasowych o długości  $T=1s$ .



Schemat blokowy przetwarzania sygnałów pomiarowych w procesie diamentowania



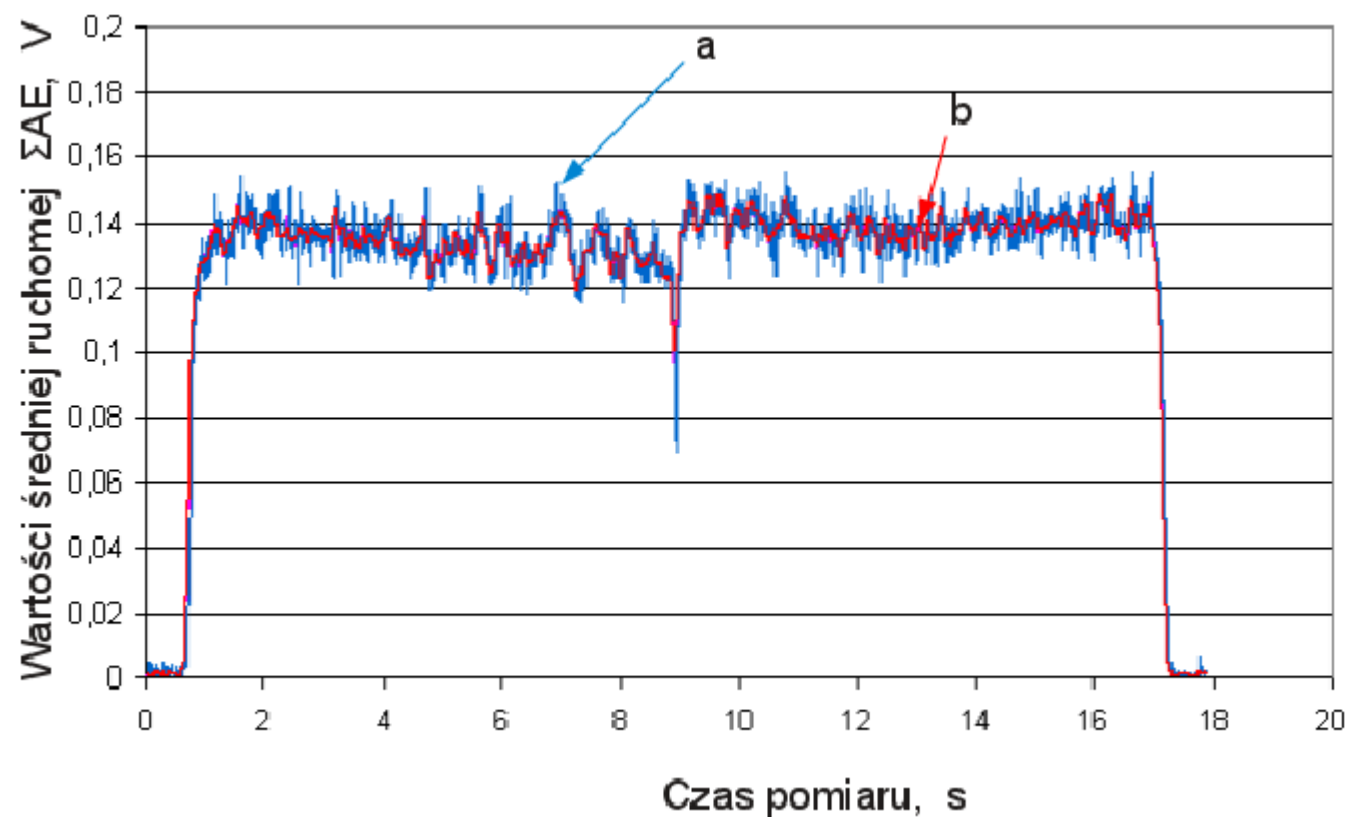
Przetwornik sygnału emisji akustycznej: 1- czujnik piezoelektryczny,  
 2 - wzmacniacz o nastawianym wzmocnieniu (x1,x10), 3 – filtr pasmowo-  
 przepustowy,  
 4 - przetwornik RMS, 5 - potencjometr nastawy wartości progowej  $AE_p$ ,  
 6 – komparator



Przykładowy przebieg sygnału AERMS podczas obciążania ściernicy  $AE_{max}$  -  $AE_{min}$  pole tolerancji sygnału AERMS,  $AE_{uszk}$  – wartość sygnału odzwierciedlająca uszkodzenie powierzchni ściernicy

$$\Sigma AE = \frac{1}{k} \sum_{n=k}^n (x_n)$$

gdzie:  
*k* – okno uśredniania,  
*n* – nr. próbki.



Wartości średniej ruchomej sygnału  $\Sigma AE$  dla dwóch wartości okna uśredniania:  
a)  $k=20$ , b)  $k=50$

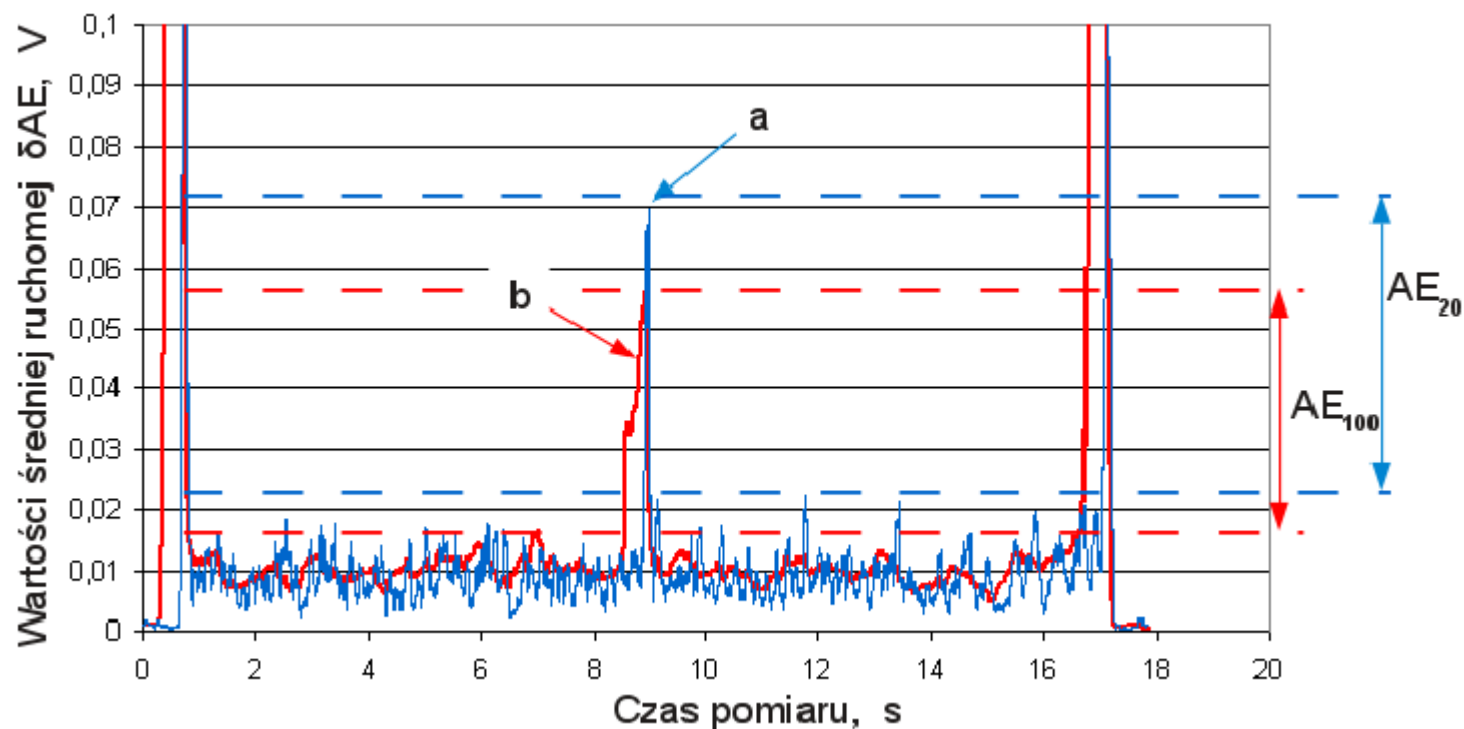
$$\delta AE = \frac{1}{k} \sum_{n=k}^n (x_{k-n} - \bar{x}_k)^2$$

gdzie:

$n$  – nr. bieżącej próbki pomiarowej,

$\bar{x}_k$  – wartość średnia z  $k$  próbek,

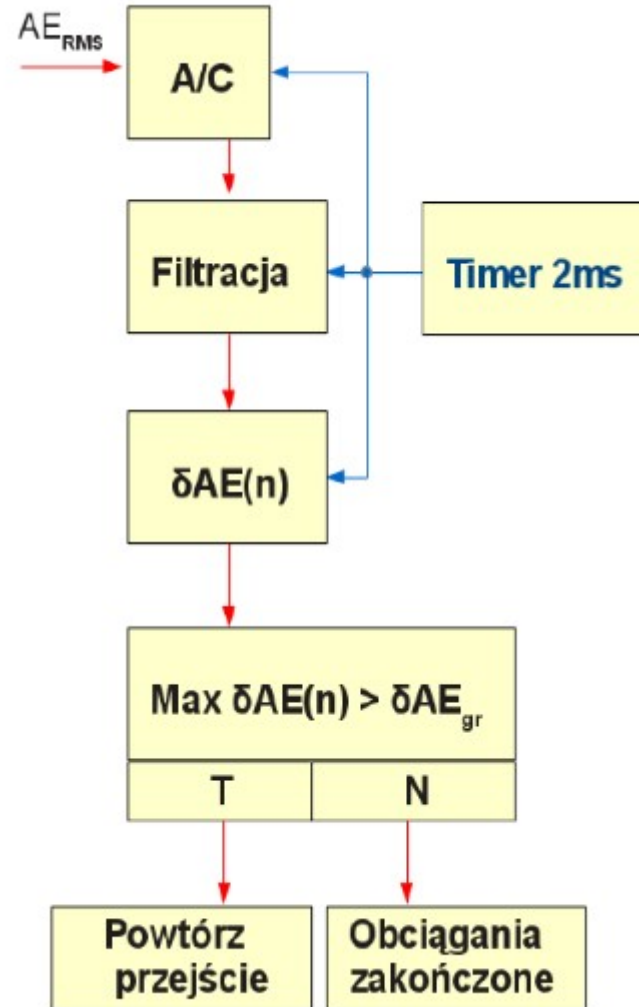
$k$  – długość okna filtracji.



Wartości znormalizowane średniego odchylenia kwadratowego sygnału  $\delta AE$  dla dwóch wartości okna uśredniania:

a)  $k=20$ , b)  $k=100$





Schemat blokowy algorytmu określania wartości granicznych

KONIEC