

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE NADZOROWANIE DRGAŃ CHATTER PRZY FREZOWANIU SZYBKOŚCIOWYM METALI

dr hab. inż. Krzysztof Kaliński, mgr inż. Marek Galewski
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Wytrzymałości
Materiałów, 80-952 Gdańsk ul. Narutowicza 11/12, tel. (0-58) 347-29-29,
e-mail: kkalinsk@o2.pl, marg@mech.pg.gda.pl

1. WSTĘP

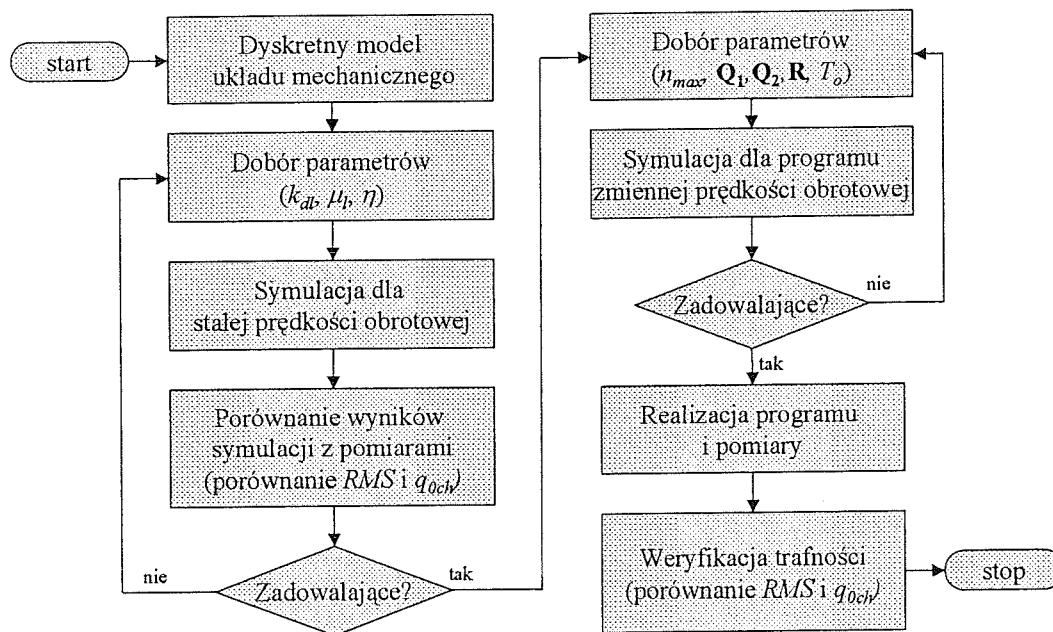
Frezowanie smukłymi narzędziami jest często stosowane w nowoczesnych centrach obróbkowych i wynika z konieczności dokładnego (obróbka „na gotowo”) wykonywania elementów o złożonych kształtach geometrycznych. Światowa tendencja zwiększania w obróbce mechanicznej prędkości skrawania oraz prędkości posuwu, pozwala uzyskać dużą jej wydajność przy małych naddatkach. W takich warunkach, zjawiskiem dynamicznym o istotnym znaczeniu są drgania względne narzędzie-przedmiot obrabiany. Przy określonych warunkach ich rozwój może doprowadzić do utraty stabilności oraz do wystąpienia drgań samowzbudnych typu *chatter* [1]. Mogą one wystąpić nawet przy małych głębokościach skrawania, których dalsze zmniejszanie powoduje utratę kontaktu narzędzia z przedmiotem. Problem zapobiegania powstawaniu drgań *chatter* w nowoczesnych obrabiarkach próbowano rozwiązać za pomocą [2] regulacji prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do częstotliwości drgań własnych układu, sterowania pulsacją prędkości obrotowej wrzeciona, regulacji prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do optymalnego kąta przesunięcia fazowego w kolejnych przejściach narzędzia, zwiększania prędkości skrawania, sterowania programowego oraz sterowania optymalną prędkością obrotową wrzeciona. Badania i symulacje [2, 3] wykazały, że dobre rezultaty można uzyskać stosując programy okresowo zmiennej prędkości obrotowej oraz programy wykorzystujące sterowanie optymalno-liniowe prędkością obrotową wrzeciona.

2. PROCEDURA NADZOROWANIA DRGAŃ

Procedura nadzorowania składa się z 4 podstawowych kroków.

1. Utworzenie dyskretnego modelu obliczeniowego procesu skrawania (model mechanistyczny) [2, 3].
2. Dobór parametrów modelu w cyklu symulacji komputerowych i na podstawie wyników pomiarów dla przypadku skrawania ze stałą prędkością obrotową wrzeciona [3, 4].
3. Dobór parametrów sterowania optymalno-liniowego w cyklu symulacji komputerowych i generacja programu zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona.
4. Zastosowanie programu zmiennej prędkości obrotowej do redukcji drgań podczas skrawania.

Schemat procedury nadzorowania drgań z wykorzystaniem programu zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat procedury nadzorowania drgań z wykorzystaniem programu zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona; k_{dl} – dynamiczny opór skrawania powierzchniowy właściwy, μ – współczynnik siły skrawania, η – stała tłumienia materialowego narzędzia, q_{och} – maksimum widma amplitudowego drgań *chatter*, n_{max} – maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa wrzeciona dla sterowania optymalno-linowego, Q_1, Q_2, R – macierze współczynników w energetycznym wskaźniku jakości, T_o – czas opadania dla sterowania optymalno-linowego,

3. MODEL DYNAMIKI PROCESU SKRAWANIA

Przeprowadzono analizę dynamiki procesu skrawania smukłym frezem kulistym, przyjmując następujące założenia [2, 3].

- W strukturze obrabiarki wyodrębniono wrzeciono wraz z narzędziem i stół z przedmiotem obrabianym, jako podukłady wykonujące zadane ruchy względne.
- Uwzględniono jedynie podatność narzędzia.
- Do modelowania procesu skrawania przyjęto elementy sprzęgające (ES).
- Dla umownego punktu styku ostrza z przedmiotem obrabianym (ES nr l) przyjęto model proporcjonalny dynamiki skrawania [1, 2].
- Efekt przejścia bieżącego ostrza narzędzia wzdłuż warstwy skrawanej powoduje sprzężenie proporcjonalne, zaś efekt przejścia ostrza poprzedniego – dodatkowo sprzężenie opóźniające.

Jako rezultat modelowania dyskretnego procesu frezowania otrzymano układ (rys. 2) składający się z elementu skończonego (OES) nr e typu belkowego o długości L_c (długość czynna freza) oraz ES, których położenie odpowiada chwilowym położeniom ostrzy freza. Ponadto oznaczono:

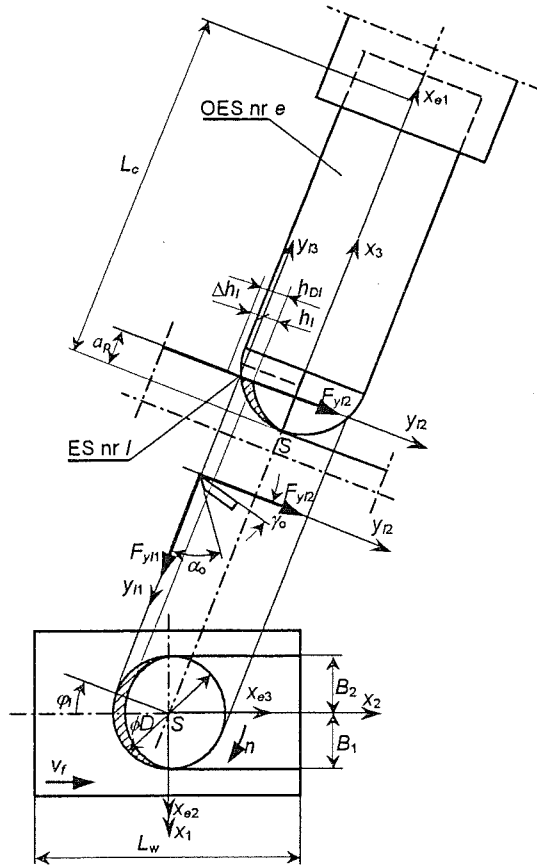
- kąt natarcia γ_0 oraz kąt przyłożenia α_0 , jako elementy geometrii ostrza,
- grubość warstwy skrawanej h_l , zaś siłę działającą w jej kierunku – $F_{y/l2}$,
- głębokość skrawania a_p ,
- siłę $F_{y/l1}$ działającą w kierunku nominalnej prędkości skrawania.

Dla umownego punktu styku ostrza z przedmiotem obrabianym (ES nr l) przyjęto model proporcjonalny dynamiki skrawania [1, 2]. Otrzymano:

$$F_{y1}(t) = \begin{cases} k_{dl} a_p [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)] & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0, \\ 0 & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{y12}(t) = \begin{cases} \mu_l k_{dl} a_p [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)] & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0, \\ 0 & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{y13}(t) = 0 \quad (3)$$



Rys. 2. Schemat frezowania frezem kulistym

gdzie: k_{dl} –dynamiczny opór skrawania powierzchniowy właściwy,
 $h_{Dl}(t)$ –nominalna grubość warstwy skrawanej; $h_{Dl}(t) \cong f_z \cos \varphi_l(t)$,
 $\Delta h_l(\cdot)$ –dynamiczna zmiana grubości warstwy skrawanej,
 μ_l –współczynnik siły skrawania (iloraz siły F_{y12} przez siłę F_{y11}),
 τ_l –czas pomiędzy identycznymi położeniami ES nr l oraz ES nr $l-1$,
 f_z –posuw na ostrze; $f_z = v_f / (nz)$.

Równanie dynamiki niestacjonarnego modelu procesu frezowania przyjmie postać [2, 3]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*\mathbf{q} = \mathbf{f}^*, \quad (4)$$

gdzie:

$$\mathbf{K}^*(t) = \mathbf{K} + \sum_{l=1}^i \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{D}_{pl} \mathbf{T}_l(t),$$

$$\mathbf{f}^* = \sum_{l=1}^i \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{F}_l^0(t) + \sum_{l=1}^i \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{D}_{ol} \Delta \mathbf{w}_l(t - \tau_l),$$

zaś:

- \mathbf{q} – wektor przemieszczeń uogólnionych układu,
- $\mathbf{M}, \mathbf{L}, \mathbf{K}$ – macierze bezwładności, tłumienia oraz sztywności układu mechanicznego,
- $\mathbf{F}_l^0(t)$ – wektor sił oddziaływania ES nr l ,
- $\mathbf{D}_{Pl}, \mathbf{D}_{Ol}$ – macierze sprzężeń proporcjonalnych oraz sprzężeń opóźniających ES nr l ,
- $\Delta \mathbf{w}_l(t - \tau_l)$ – wektor odkształceń ES nr l dla chwili czasu $t - \tau_l$,
- i_l – liczba „aktywnych” elementów sprzęgających.

Macierz transformacji $\mathbf{T}_l(t)$ jest funkcją czasu, ponieważ w wyniku ruchu wrzeciona i przedmiotu obrabianego ostrza freza zmieniają swoje położenie.

4. STEROWANIE OPTYMALNO-LINIOWE PRĘDKOŚCIĄ OBROTOWĄ WRZECIONA

Rozważmy proces skrawania realizowany przy zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona $n=n(t)$. Czas opóźnienia τ_l dla ostrza nr l jest wówczas funkcją chwilowej prędkości obrotowej, tj. $\tau_l = \tau_l(n)$. W wyniku chwilowej zmiany prędkości obrotowej δn , równanie dynamiki (4) przyjmie postać:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*(t)\mathbf{q} = \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t)\mathbf{F}_l^{(0)}(t) + \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t)\mathbf{D}_{Ol}\Delta \mathbf{w}_l \left(t - \int_{\varphi_l - \varphi_{0l}}^{\varphi_l} \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{n(\varphi)} \right). \quad (5)$$

W pracy [2] wykazano, że proces skrawania przy zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona opisuje równanie dynamiki układu sterowanego:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*(t)\mathbf{q} = \mathbf{f}^* + \mathbf{B}_u \mathbf{u}, \quad (6)$$

gdzie macierz sterowań

$$\mathbf{B}_u(t) = \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t)\mathbf{D}_{Ol}\Delta \dot{\mathbf{w}}_l \left(t - \int_{\varphi_l - \varphi_{0l}}^{\varphi_l} \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{n(\varphi)} \right) \cdot \left[-\frac{\Delta t}{n(\varphi_l)} \right], \quad (7)$$

zaś wektor (jednowymiarowy) sygnałów sterujących

$$\mathbf{u} \equiv \delta n. \quad (8)$$

Zdefiniujemy teraz uzmienniony w czasie energetyczny wskaźnik jakości [2]:

$$J(t) = \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}})^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{M}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}}) + \frac{1}{2}(\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}})^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{K}^*(\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}, \quad (9)$$

przy czym: $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ – macierze bezwymiarowych współczynników wagowych,
 \mathbf{R} – macierz efektu sygnałów sterujących.

Optymalny sygnał sterujący, po minimalizacji energetycznego wskaźnika jakości ze względu na chwilową zmianę prędkości δn , ma postać [2, 4]:

$$\mathbf{u} \equiv -\mathbf{R}^{-1} \int_{t_0}^t \left[\mathbf{B}_u^T(\tau) \quad \mathbf{0} \right] \Phi^T(t, \tau) d\tau \cdot \left\{ \mathbf{T}_1^T \mathbf{M}^T \mathbf{Q}_1^T \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \mathbf{T}_2^T (\mathbf{K}^* \mathbf{Q}_2^T + \mathbf{Q}_2 \mathbf{K}^{*T}) (\mathbf{q} - \mathbf{K}^{*-1} \mathbf{f}_0) \right\} \quad (10)$$

gdzie: $\Phi(t, t_0)$ – rozwiązanie różniczkowego równania jednorodnego $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}$, $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{I}$,
 $\mathbf{A}(t)$ – macierz stanu układu.

Sterowanie optymalne prędkością obrotową wrzeciona polega zatem na generowaniu optymalnego sygnału sterującego w postaci chwilowych zmian δn prędkości obrotowej $n(t)$.

Ponieważ sterowanie bazujące na sygnale optymalnym nie może być zrealizowane w praktyce ze względu na stały wzrost prędkości obrotowej, proponowane jest zastosowanie sterowania optymalno-linowego [3, 4]. Po uzyskaniu maksymalnej wartości prędkości n_{max} , zmianę prędkości do wartości nominalnej n_0 opisuje zależność:

$$n(t) = n_{max} - (n_{max} - n_0) \cdot \frac{t - t_j}{T_0}, \quad t_j \leq t \leq (t_j + T_0), \quad (11)$$

przy czym: T_0 – czas opadania,
 t_j – czas początku opadania nr j .

Wygenerowany program zmiennej prędkości obrotowej, pomimo uzyskania pożądaných wyników symulacji, nie zawsze może zostać zrealizowany na rzeczywistym centrum obróbkowym. Jest to następstwem ograniczonej mocy napędu, ograniczonej maksymalnej prędkości obrotowej oraz własności układów sterowania. Ograniczenia te należy uwzględnić na etapie symulacji i generacji programu zmiennej prędkości obrotowej.

5. STANOWISKO BADAWCZE

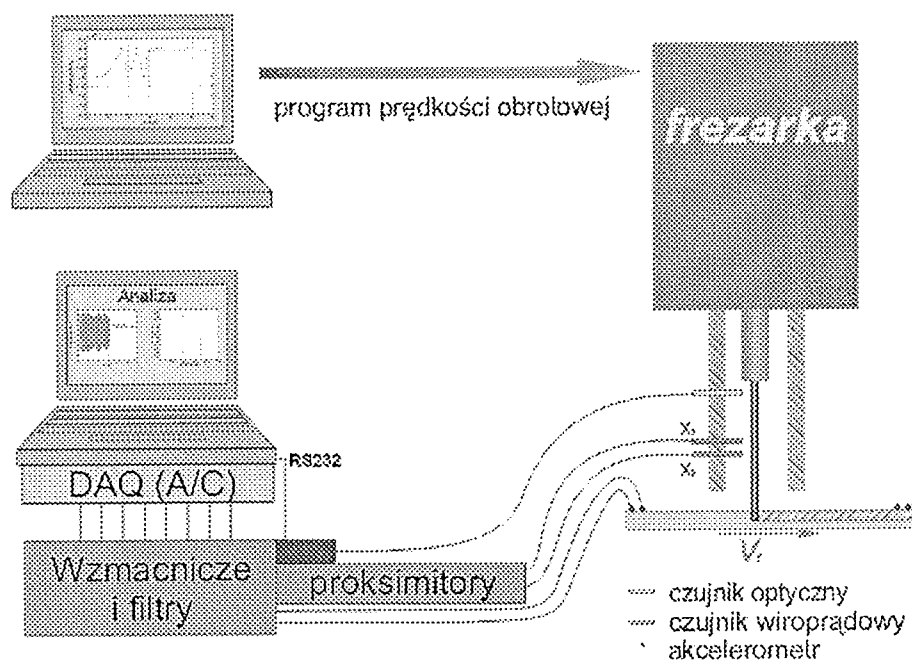
W celu wykonania badań eksperymentalnych, zintegrowano stanowisko badawcze (rys. 2). Umożliwia ono wykonanie jednoczesnych pomiarów prędkości obrotowej narzędzia, przemieszczeń narzędzia w dwóch prostopadłych osiach oraz przyspieszeń wybranych (do ośmiu) punktów skrawanego przedmiotu. Oprócz pomiarów podczas skrawania stanowisko można wykorzystać także między innymi do wykonywania testów modalnych freza oraz przedmiotów obrabianych.

Pomiar prędkości realizowany jest za pomocą sondy optycznej podłączonej do mikrokontrolera Microchip PIC16C74. Możliwy jest pomiar prędkości w zakresie od około 2000 do 30000 obr/min z dokładnością do 0.5% (w zakresie prędkości powyżej 15000 obr/min uzyskiwana jest dokładność powyżej 0.1%).

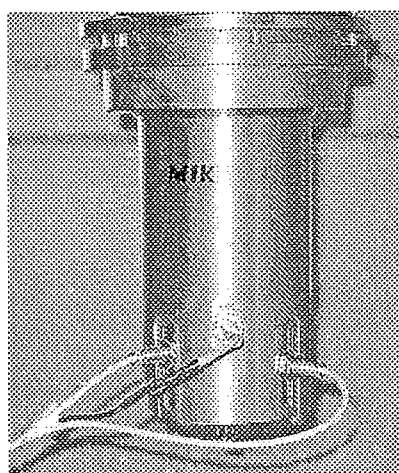
Pomiar przemieszczeń freza realizowany jest przy użyciu czujników zbliżeniowych (sond wiropędowych), pracujących w zakresie pomiarowym ± 1 mm w otoczeniu położenia nominalnego z dokładnością 5%.

Czujnik optyczny oraz sondy wiropędowe są instalowane w specjalnym uchwycie mocowanym do tulei wrzeciona frezarki (rys. 4).

Pomiar przyspieszeń realizowany jest przy użyciu akcelerometrów PCB pracujących w zakresie pomiarowym ± 200 g.



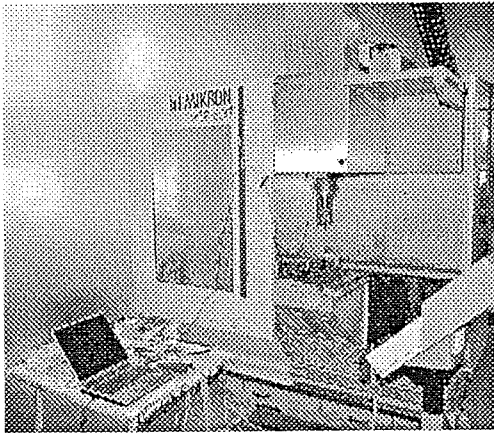
Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego



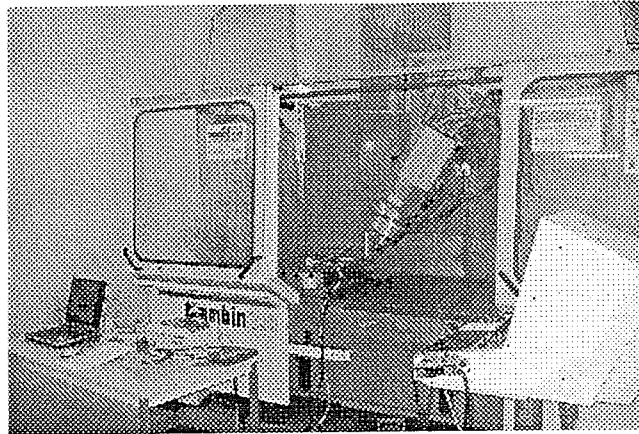
Rys. 4. Uchwyt do mocowania czujników pomiarowych

Sygnały pomiarowe z akcelerometrów oraz sond wiroprowodowych doprowadzone są do 8-kanalowego wzmacniacza z filtry antyaliasingowymi. Następnie, są przekształcane one na postać cyfrową z wykorzystaniem karty analogowo-cyfrowej National Instruments DAQ 6036E PCMCIA. Karta ta ma możliwość próbkowania do 16 analogowych kanałów wejściowych z rozdzielczością próbkowania 16 bitów i częstotliwością do 200 kS/s. Konfiguracją karty pomiarowej i rejestracją danych zarządza autorski program komputerowy napisany w środowisku Microsoft Visual C++ i działający w systemie operacyjnym Windows XP. Analiza danych pomiarowych wykonywana jest w środowisku Matlab i wspierana jest symulacjami komputerowymi modelu obliczeniowego, z wykorzystaniem programu autorskiego napisanego w języku Fortran.

Wykorzystanie do rejestracji i analizy danych komputera przenośnego (laptopa) z kartą PCMCIA znacznie zwiększa mobilność stanowiska pomiarowego, dzięki czemu można łatwo je instalować na różnych maszynach technologicznych (rys. 5 i 6). Elastyczność stanowiska pozwala na jego wykorzystanie także do pomiarów drgań obiektów innych, niż frezarki.



Rys. 5. Frezarka Mikron VCP 600



Rys. 6. Frezarka Alcera Gambin 120CR

6. SYMULACJE KOMPUTEROWE I BADANIA EKSPERYMENTALNE

Podczas przeprowadzania symulacji komputerowych należy zwracać uwagę przede wszystkim na wzajemne zależności pomiędzy maksimami widma amplitudowego oraz na trendy zmian wartości skutecznej przemieszczeń. Dopasowanie wartości wielkości symulowanych do wartości uzyskanych w trakcie pomiarów ma znaczenie drugorzędne.

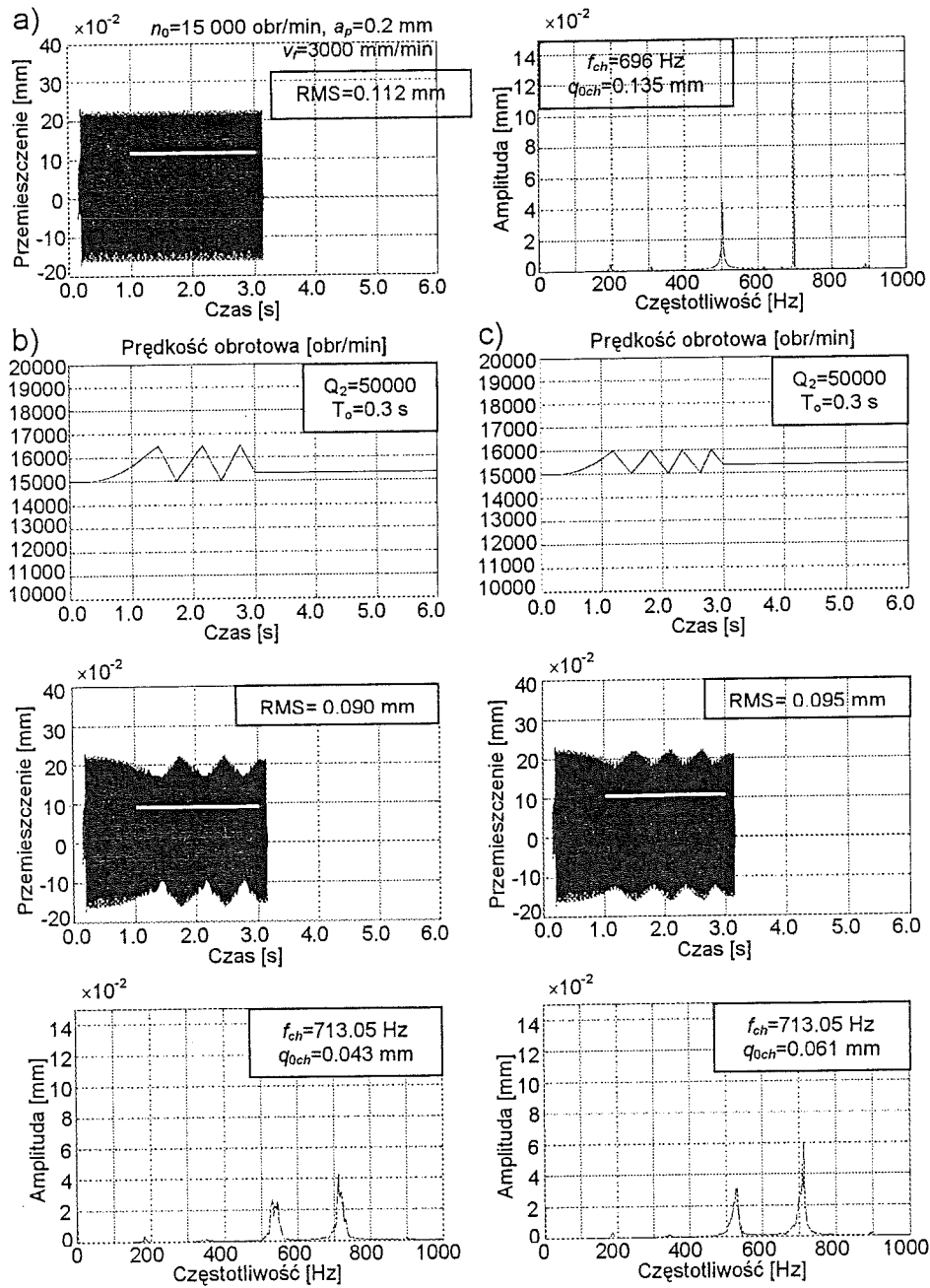
Przeprowadzono symulację komputerową nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona podczas frezowania sztywnej próbki smukłym frezem kulistym (liczba ostrzy skrawających $z=2$). Do symulacji przyjęto dane: $D=3,56$ mm, $L_c=135$ mm, $L_w=150$ mm, $B_1=B_2=1,78$ mm, $n_0=15000$ obr/min, $v_f=3000$ mm/min, $k_{dl}=2,3 \times 10^9$ N/m², $\mu_l=0,3$.

Przy głębokości skrawania $a_p=0,2$ mm (rys. 7a) zaobserwowano rozwój drgań narzędzia w kierunku x_1 do poziomu $RMS=0,112$ mm określonego cyklem granicznym [2]. Natomiast w widmie amplitudowym pojawił się w paśmie 600–800 Hz rezonans o dominującej amplitudzie. Spostrzeżenia te świadczą o utracie stabilności oraz o wystąpieniu silnych drgań typu *chatter* [1, 2]. Spostrzeżenia te zostały potwierdzone eksperymentalnie (tabela 1, rys. 8).

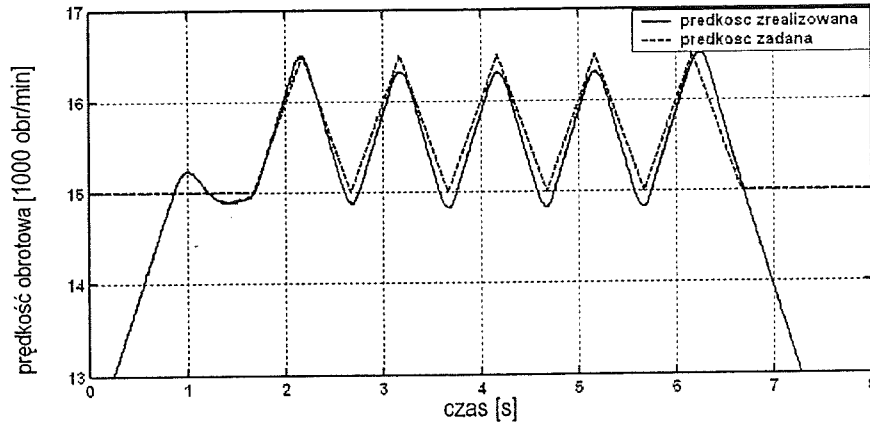
Aby przeciwdziałać drganiom *chatter*, rozważano możliwość nadzorowania za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona. Przykłady symulacji komputerowej nadzorowania drgań za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona (rys. 7b i c) wykazały zasadność proponowanego podejścia. Wygenerowane programy zmiennej prędkości obrotowej, możliwe do zrealizowania na współczesnych maszynach technologicznych do obróbki szybkościowej, powodują bowiem ok. 3-krotną redukcję amplitudy drgań *chatter*.

Dalsze symulacje nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona wykazały, że dobre wyniki, ze względu na redukcję drgań *chatter*, można uzyskać gdy przełączanie prędkości ma miejsce co $0,3 \div 0,5$ s. Ze względu na specyfikę układu sterowania frezarki, optymalno-liniowy przebieg zmian prędkości obrotowej przybliżono przebiegiem trójkątnym. Przebieg ten oraz jego realizacja na obiekcie (wyniki pomiaru) pokazane są na rys 8.

W wyniku nadzorowania drgań poprzez zastosowanie programów zmiennej prędkości obrotowej uzyskano (w porównaniu z przypadkiem skrawania ze stałą prędkością 16500 obr/min) redukcję wartości RMS do 12% oraz redukcję amplitudy drgań *chatter* do 66% dla brązu CC331G i (odpowiednio) do 15% i do 77% dla stali C45. Zestawienie wyników podano w tabeli 1.



Rys. 7. Wyniki symulacji komputerowej drgań poprzecznych narzędzia: a) brak nadzorowania drgań, b) i c) nadzorowanie drgań za pomocą dwóch programów sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona, $Q_1=0$, $Q_2=Q_2 \cdot I$, $R=0,1$ Nm/(obr/min)²



Rys. 8. Prędkość zadana i zrealizowana dla programu zmiennej prędkości obrotowej $n = 15000 \div 16500$ obr/min ze zmianami zadanymi co 0,5 s, frezarka Alcera Gambin 120CR

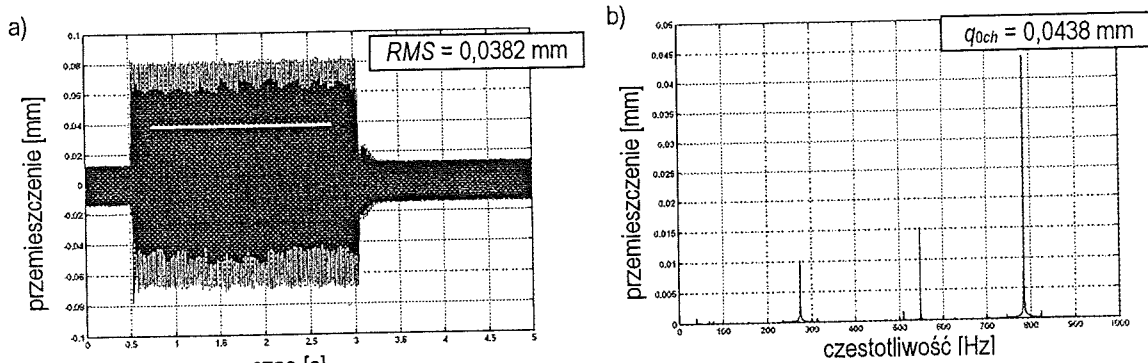
Tabela 1. Wartości skuteczne drgań narzędzia (RMS) i amplitudy drgań *chatter* q_{ch} przy frezowaniu pełnym dla
 - brązu CC331G (dawniej BA1032), głębokość skrawania $a_p = 0,3$ mm
 - stali C45, głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm
 prędkość posuwu $v_f = 3000$ mm/min, frezarka Alcera Gambin 120CR

Material	Brąz CC331G		Stal C45	
	RMS [mm]	q_{ch} [mm]	RMS [mm]	q_{ch} [mm]
Realizowany przebieg prędkości obrotowej				
Stała prędkość obrotowa $n = 15000$ obr/min	0,0332	0,0251	0,0325	0,0325
Stała prędkość obrotowa $n = 16500$ obr/min	0,0382 (rys. 9a)	0,0438 (rys. 9b)	0,0378	0,0405
Prędkość zmienna, zmiany co 0,4 s $n = 15000 \div 16500$ obr/min	0,0354	0,0169	0,0336	0,0119
Prędkość zmienna, zmiany co 0,5 s $n = 15000 \div 16500$ obr/min (rys. 8)	0,0335 (rys. 10a)	0,0150 (rys. 10b)	0,0322	0,0093

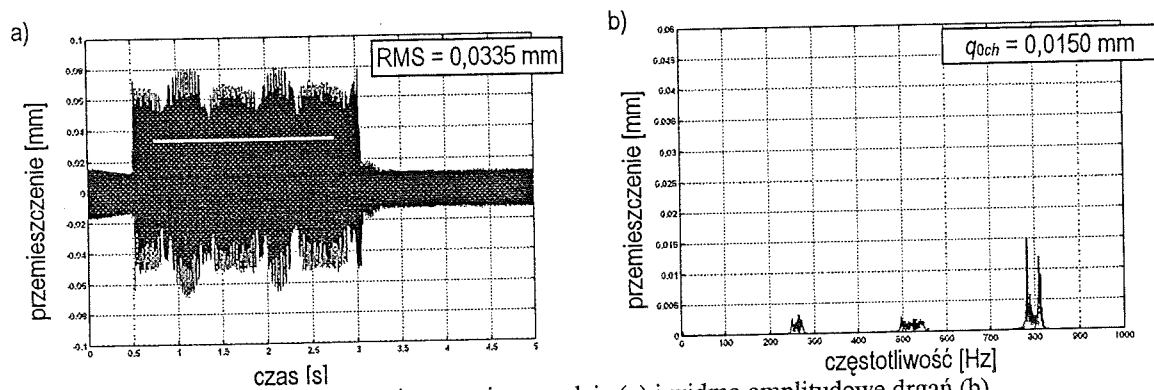
7. WNIOSKI

Zastosowanie programów ciągłej zmiany prędkości obrotowej umożliwia nadzorowanie drgań narzędzia w procesie obróbki szybkościowej na frezarkach. Potwierdziły to wyniki symulacji komputerowych oraz badania doświadczalne wykonane na maszynie Alcera Gambin 120CR. Należy zwrócić uwagę, że przedstawiona procedura nadzorowania drgań wymaga równoczesnego wykorzystania metod pomiarowych i symulacyjnych, zwłaszcza na etapie doboru parametrów modelu mechanistycznego.

Praktyka badawcza pokazała także dużą przydatność zbudowanego przez autorów i wykorzystywanego do badań stanowiska pomiarowego. Jego duża elastyczność i łatwość przenoszenia umożliwia wykonanie badań praktycznie na każdej frezarce, zarówno w kraju jak i za granicą.



Rys. 9. Przeszyczenie narzdzia (a) i widmo amplitudowe drgań (b) przy frezowaniu brązu CC331G ze stałą prędkością 16500 obr/min, frezarka Alcera Gambin 120CR



Rys. 10. Przeszyczenie narzdzia (a) i widmo amplitudowe drgań (b) przy frezowaniu brązu CC331G z prędkością obrotową zmienną w zakresie 15000 ÷ 16500 obr/min, zmiany co 0,5 s, frezarka Alcera Gambin 120CR

8. LITERATURA

1. Tomków J., Wibrosterbilność obrabiarek, Warszawa WNT, 1997
2. Kaliński K., Nadzorowanie drgań układów mechanicznych modelowanych dyskretnie, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2001
3. Kaliński K., Galewski M., Nadzorowanie drgań procesów obróbkowych z wykorzystaniem optymalno-liniowego sterowania prędkością obrotową wrzeciona W: Teoria maszyn i mechanizmów. Red. J. Wojnarowski, T. Uhl. Kraków: Katedra Robotyki i Dynam. Masz. AGH, 2004 t. 2
4. Kaliński K., Galewski M., Podejście mechatroniczne w nadzorowaniu drgań procesów obróbkowych przy dużych prędkościach skrawania W: Projektowanie mechatroniczne. Zagadnienia wybrane.; T. Uhl; Kraków: Katedra Robotyki i Dynam. Masz. AGH, 2004

Podziękowania

Pracę zrealizowano w ramach badań finansowanych ze środków projektu badawczego MNiI nr 5 T07C 037 25 oraz dotacji podmiotowej MNiI (decyzja 155/E-359/SPB/Współpraca z PR UE/DIE 485/2004). Badania doświadczalne na maszynie Alcera-Gambin 120CR wykonano dzięki współpracy z Université Paul Verlaine-Metz oraz Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (Francja).