

## NADZOROWANIE STANU DYNAMICZNEGO PODCZAS FREZOWANIA SZYBKOŚCIOWEGO SMUKŁYMI NARZĘDZIAMI

Krzysztof KALIŃSKI, Marek GALEWSKI, Stefan SAWIAK

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, kkalinsk@pg.gda.pl, marg@mech.pg.gda.pl, ssawiak@pg.gda.pl

### Streszczenie

W pracy opisano proces nadzorowania drgań wirujących narzędzi w nowoczesnych obrabiarkach. Przedmiotem rozważań jest proces frezowania szybkościowego smukłym frezem kulistym. Zjawiskiem dynamicznym o istotnym znaczeniu są drgania względne narzędzie–przedmiot obrabiany, których rozwój, przy określonych warunkach, może doprowadzić do utraty stabilności oraz do wystąpienia drgań samowzbudnych typu *chatter*. Rezultaty zmodyfikowanej metody nadzorowania drgań za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową dowodzą, że można uzyskać redukcję drgań *chatter* poprzez zmiany prędkości obrotowej wrzeciona. Przeprowadzono badania eksperymentalne podczas frezowania na nowoczesnej maszynie Alcera Gambin 120CR, których przykładowe wyniki zamieszczono w pracy. Uzyskane wyniki wykazały praktyczne uzasadnienie stosowanej strategii nadzorowania.

Słowa kluczowe: obrabiarki, drgania narzędzia, nadzorowanie drgań, badania eksperymentalne

### A DYNAMIC STATE SURVEILLANCE DURING HIGH SPEED MILLING USING SLENDER TOOLS

#### Summary

A process of vibration surveillance of rotating tools in modern working machines is described. Here is considered the high speed slender ball end milling process. Tool-workpiece relative vibration means to be a significantly important dynamic phenomenon. Hence it may lead to a loss of stability and then – generate self-excited chatter vibration. Based upon a modified method of vibration surveillance by the linear-optimal spindle speed control it is found out, that spindle speed changes significantly reduce chatter vibration. Results of the milling experiments being performed on modern production machine Alcera Gambin 120CR are explained. The obtained results disclosed a practical meaning of applied strategy of surveillance.

Keywords: machine tools, tool vibration, vibration surveillance, experimental investigation

## 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.

Jednym ze sposobów redukcji drgań *chatter* jest sterowanie programowe oraz sterowanie optymalne prędkością obrotową wrzeciona [2, 3, 4].

W pracy proponuje się zmodyfikowaną metodę nadzorowania drgań za pomocą sterowania optymalno-liniowego prędkością obrotową wrzeciona, dzięki czemu można uniknąć nadmiernego wzrostu wartości prędkości obrotowej.

## 2. DYNAMIKA PROCESU SKRAWANIA

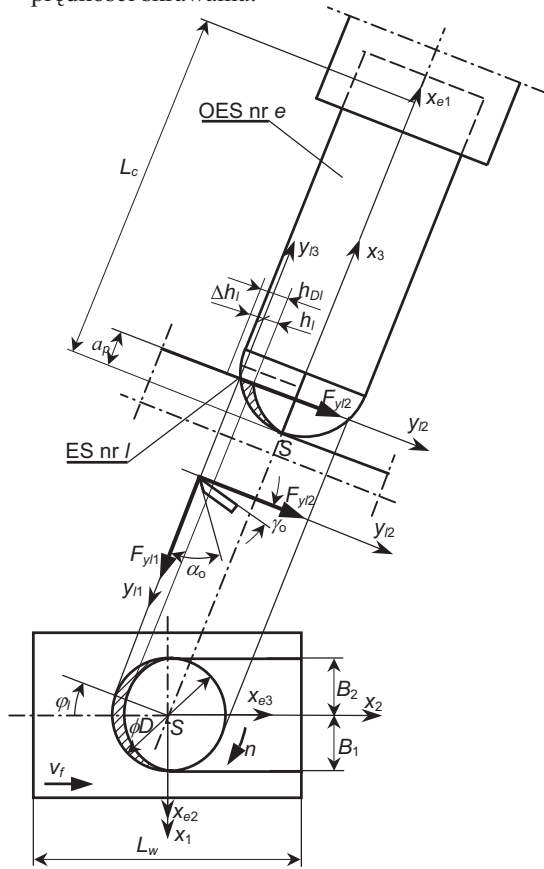
Przeprowadzono analizę dynamiki procesu skrawania smukłym frezem kulistym, przyjmując następujące założenia [2].

- W strukturze obrabiarki wyodrębniono wrzeciono wraz z narzędziem i stół z przedmiotem, jako podukłady wykonujące zadane ruchy względne.
- Uwzględniono jedynie podatność narzędzia.
- Do modelowania procesu skrawania przyjęto elementy sprzęgające (ES).
- 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. 1) 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  $\gamma_0$  oraz kąt przyłożenia  $\alpha_0$ , jako elementy geometrii ostrza,
- grubość warstwy skrawanej  $h_l$ , zaś siłę działającą w jej kierunku –  $F_{yl2}$ ,
- głębokość skrawania  $a_p$ ,
- siłę  $F_{yl1}$  działającą w kierunku nominalnej prędkości skrawania.



Rys. 1. Schemat frezowania frezem kulistym

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

$$F_{yl1}(t) = \begin{cases} k_{dl} a_p [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)] & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0, \\ 0 & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{yl2}(t) = \begin{cases} \mu_l k_{dl} a_p [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)] & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0, \\ 0 & \text{dla } h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{yl3}(t) = 0 \quad (3)$$

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,
- $\mu_l$  – współczynnik siły skrawania (iloraz siły  $F_{yl2}$  przez siłę  $F_{yl1}$ ),
- $\tau_l$  – czas pomiędzy identycznymi położeniami ES nr  $l$  oraz ES nr  $l-1$ ,

Po transformacji przemieszczeń do układu współrzędnych  $x_1, x_2, x_3$  otrzymano równanie dynamiki niestacjonarnego modelu procesu frezowania [2]:

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

gdzie:

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

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

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.

### 3. NADZOROWANIE DRGAŃ ZA POMOCĄ STEROWANEJ PROGRAMOWO PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WRZECIONA

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

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*(t) \mathbf{q} &= \\ &= \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{F}_l^0(t) + \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{D}_{Ol} \Delta \mathbf{w}_l' \left( t - \int_{\varphi_l - \varphi_{0l}}^{\varphi_l} \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{n(\varphi)} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

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 otrzymany po minimalizacji wskaźnika energetycznego ze względu na chwilową zmianę prędkości  $\delta n$  ma postać [2, 4]:

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

gdzie:

$\Phi(t, t_0)$  – rozwiązanie równania

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}, \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{I},$$

$\mathbf{A}(t)$  – macierz stanu układu.

Sterowanie optymalne prędkością obrotową wrzeciona polega na generowaniu optymalnego sygnału sterującego w postaci chwilowych zmian  $\delta n$  prędkości obrotowej  $n(t)$ . Po uzyskaniu w wyniku tego sterowania prędkości maksymalnej  $n_{max}$ , zmianę prędkości do wartości nominalnej  $n_0$  opisuje zależność:

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

przy czym:

$T_O$  – czas opadania,

$t_j$  – czas początku opadania nr  $j$ .

Ponieważ realizacja idealnego przebiegu optymalno-liniowego programu zmiennej prędkości obrotowej nie jest możliwa na każdej maszynie, zaproponowano jego realizację przybliżoną.

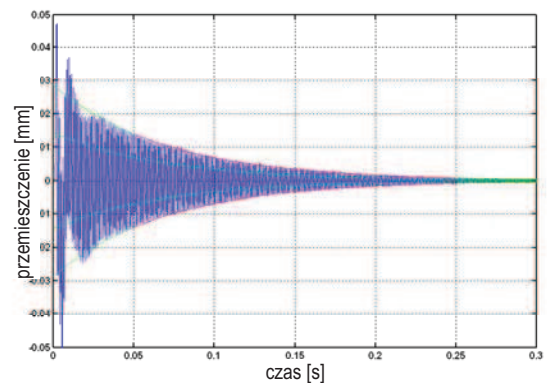
#### 4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu wykonania badań doświadczalnych na frezarce Alcera Gambin 120CR (ENIM, Metz) zainstalowano aparaturę pomiarową, w której skład weszły m.in.:

- 2 sondy wiroprowadowe, umożliwiające pomiar przemieszczeń poprzecznych wirującego narzędzia,
- układ optyczny pomiaru prędkości obrotowej,
- uchwyt do mocowania czujników pomiarowych,
- układ kondycjonowania sygnałów,
- komputer przenośny wraz z kartą pomiarową A/C i autorskimi programami akwizycji i analizy danych.

Mierzono drgania poprzeczne wirującego narzędzia w kierunku prostopadłym do prędkości posuwu.

Przeprowadzono testy modalne narzędzia. Na podstawie wyników pomiarów drgań narzędzia wymuszonych impulsem siły zidentyfikowano parametry modelu modalnego freza. Wyniki jednego z eksperymentów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Drgania narzędzia przy wymuszeniu siłowym sygnałem impulsowym

Wyniki identyfikacji parametrów będą wykorzystywane do symulacji komputerowej nadzorowania procesu frezowania.

Przeprowadzono pomiary prędkości obrotowej wrzeciona i drgań narzędzia podczas procesu skrawania. Wykonano próby przy frezowaniu pełnym, współbieżnym i przeciwbieżnym próbki z brązu BA1032 i stali 45, przy stałej i zmiennej prędkości obrotowej [5]. Wyniki pomiarów dla frezowania pełnego przedstawiono w tabeli 1 i 2 oraz na rysunkach 3 i 4.

Skrawanie przeprowadzono przy następujących parametrach:

dla brązu BA1032:

głębokość skrawania  $a_p = 0.3$  mm

prędkość posuwu  $v_f = 3000$  mm/min

dla stali 45:

głębokość skrawania  $a_p = 0.2$  mm

prędkość posuwu  $v_f = 3000$  mm/min

Frezowano z prędkością stałą 1500 oraz 1650 obr/min, a także ze zmiennymi liniowo (przebieg trójkątny) prędkościami obrotowymi.

Wyniki pomiarów dla stałej prędkości obrotowej wykazały, że skrawanie pełne z głębokością  $a_p = 0,3$  mm (dla brązu BA1032) i  $a_p = 0,2$  mm (dla stali 45) powoduje rozwinięte drgania *chatter* (rys. 3).

Tabela 1. Wartości skuteczne przemieszczeń narzędzia (RMS) i amplitudy drgań chatter  $q_{ch}$  przy frezowaniu pełnym brązu BA1032

Realizowany przebieg prędkości obrotowej	RMS [mm]	$q_{ch}$ [mm]
Stała prędkość obrotowa $n = 15000$ obr/min (rys. 3)	0,033240	0,02513
Stała prędkość obrotowa $n = 16500$ obr/min (rys. 4)	0,038213	0,04380
Prędkość zmienna, zmiany co 0,4 s $n = 15000 + 1500$ obr/min (rys. 5)	0,035350	0,01687
Prędkość zmienna, zmiany co 0,5 s $n = 15000 + 1500$ obr/min (rys. 6)	0,033459	0,01502

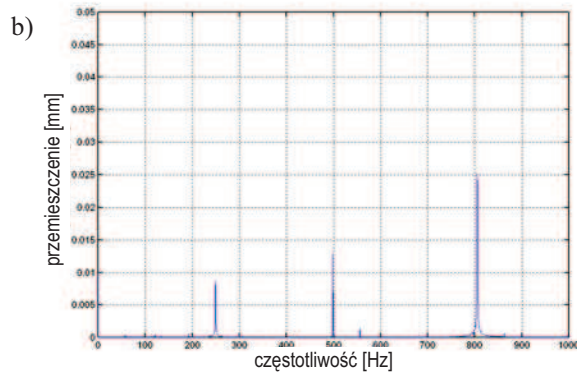
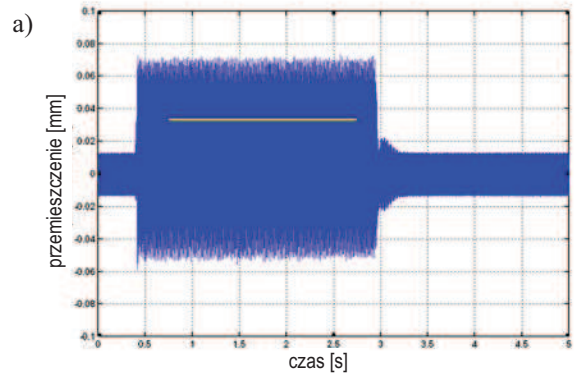
Tabela 2. Wartości skuteczne przemieszczeń narzędzia (RMS) i amplitudy drgań chatter  $q_{ch}$  przy frezowaniu pełnym stali 45

Realizowany przebieg prędkości obrotowej	RMS [mm]	$q_{ch}$ [mm]
Stała prędkość obrotowa $n = 15000$ obr/min	0,032535	0,03253
Stała prędkość obrotowa $n = 16500$ obr/min	0,037754	0,04049
Prędkość zmienna, zmiany co 0,4 s $n = 15000 + 1500$ obr/min	0,033621	0,01193
Prędkość zmienna, zmiany co 0,5 s $n = 15000 + 1500$ obr/min	0,032207	0,00928

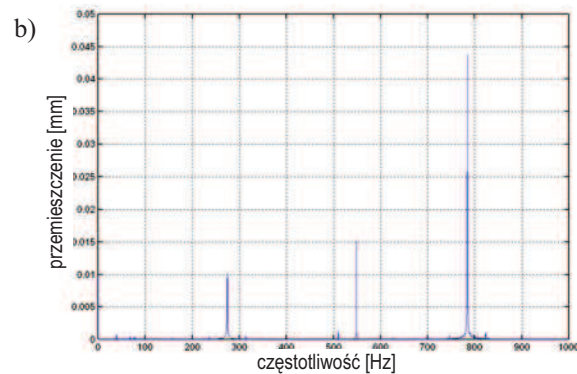
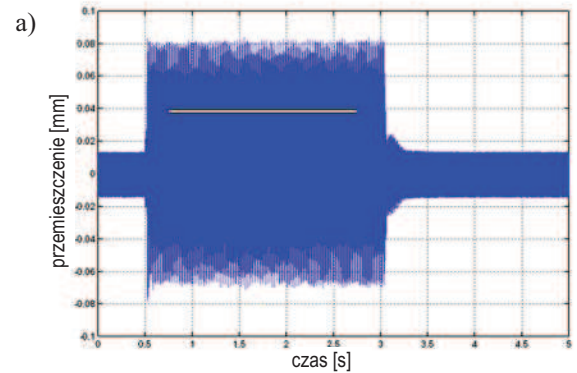
## 5. WNIOSKI

W wyniku nadzorowania drgań z zastosowaniem programów zmiennej prędkości obrotowej wrzeczona zredukowano wartości RMS do 12% oraz amplitudy drgań *chatter* do 66% (w porównaniu z przypadkiem skrawania ze stałą prędkością 16500 obr/min).

Również pomiary drgań podczas frezowania współbieżnego i przeciwbieżnego wykazały jakościowo podobne rezultaty, jak w przypadku frezowania pełnego.

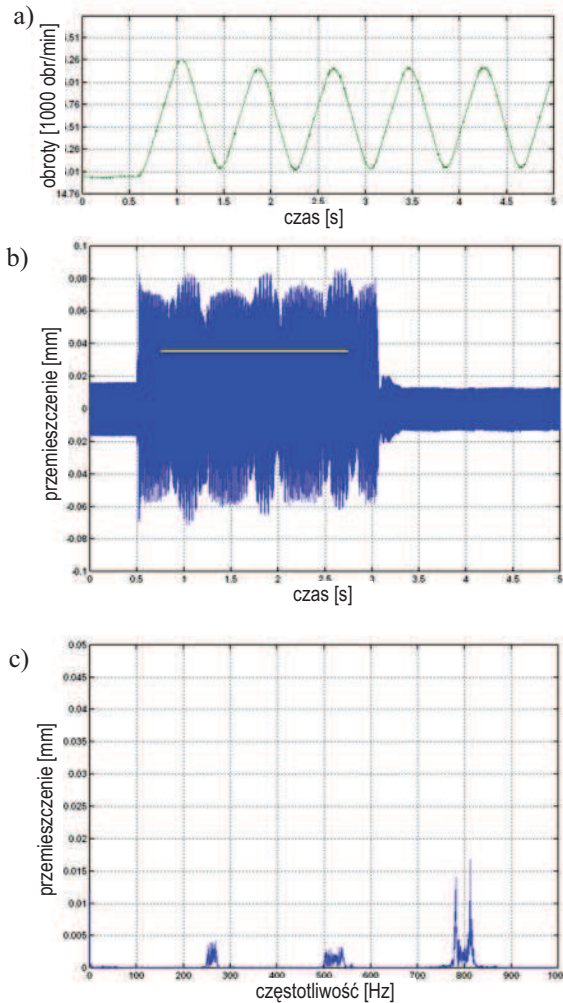


Rys. 3. Przemieszczenie narzędzia (a) i widmo amplitudowe (b) przy frezowaniu pełnym brązu BA1032 ze stałą prędkością 15000 obr/min

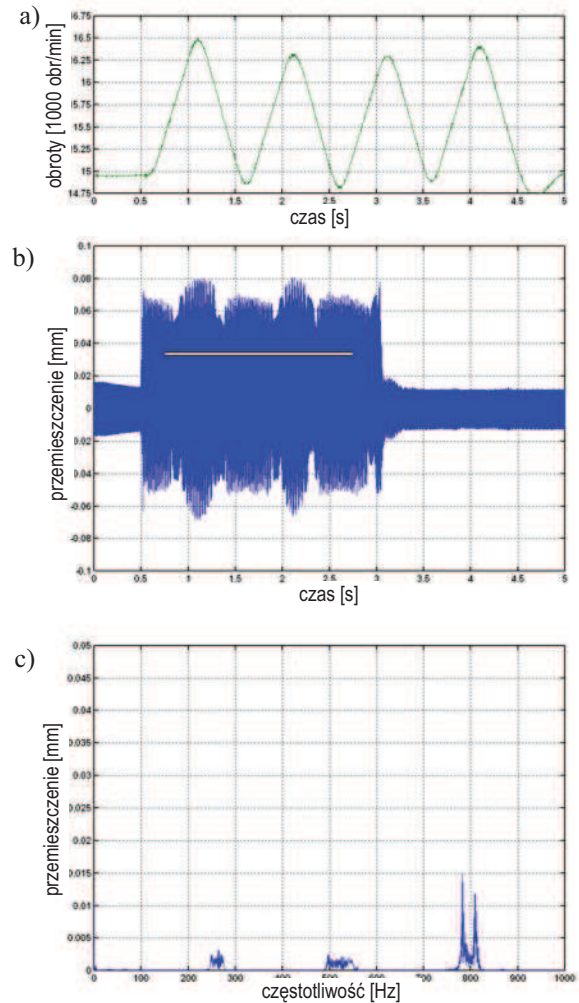


Rys. 4. Przemieszczenie narzędzia (a) i widmo amplitudowe (b) przy frezowaniu pełnym brązu BA1032 ze stałą prędkością 16500 obr/min





Rys. 5. Prędkość obrotowa (a), przemieszczenie narzędzia (b) i widmo amplitudowe (c) przy frezowaniu pełnym brązu BA1032 ze zmienną prędkością obrotową od 15000 do 16500 obr/min, zmiany co 0,4 s



Rys. 6. Prędkość obrotowa (a), przemieszczenie narzędzia (b) i widmo amplitudowe (c) przy frezowaniu pełnym brązu BA1032 ze zmienną prędkością obrotową od 15000 do 16500 obr/min, zmiany co 0,5 s

## LITERATURA

- [1] Tomków J.: Wibrostanbilność obrabiarek, Warszawa, WNT, 1997
- [2] Kaliński K.: Nadzorowanie drgań układów mechanicznych modelowanych dyskretnie, Wyd. Pol. Gdańskiej, 2001
- [3] Kaliński K.J., Kucharski T., Sawiak S.: A new method for suppression of chatter vibration by programmed spindle speed control, Metz: Ecole Nationale d'Ingenieurs de Metz, 2001
- [4] Kaliński K.J.: The spindle speed optimal control as a mean of chatter vibration surveillance. Int. J. Mech. Prod. Systems Eng., Metz: ENIM 2003, Avril 2003, ss. 30–40
- [5] Kaliński K., Galewski M: Nadzorowanie drgań procesów obróbkowych z wykorzystaniem optymalno-liniowego sterowania prędkością obrotową wrzeciona, Teoria maszyn i mechanizmów. Red. J. Wojnarowski, T. Uhl. Kraków: Katedra Robotyki i Dynam. Masz. AGH, 2004, t. 2, s. 71-76



Dr hab. inż. Krzysztof J. Kaliński urodził się 1956 r. Od 1981 r jest zatrudniony w Katedrze Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 1980 r., doktorat – w 1988 r., a habilitację – w 2002 r.

W pracy naukowej zajmuje się nadzorowaniem drgań maszyn i urządzeń technologicznych, opisem kinematyki i dynamiki manipulatorów, sterowaniem robotami mobilnymi, analizą modalną oraz zastosowaniem metody sztywnych elementów skończonych do modelowania układów mechanicznych.

Jest autorem lub współautorem 91 publikacji naukowych, 65 niepublikowanych sprawozdań i referatów oraz 26 programów komputerowych. W chwili obecnej opiekuje się 4 doktorantami, z których 2 otworzyło przewody doktorskie, oraz 3 magistrantami.



Mgr inż. Marek Galewski urodził się w 1978 r. Od 2003 r. zatrudniony w Katedrze Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2002 r., zaś przewód doktorski otworzył w 2005 r.

W pracy naukowej zajmuje się problemami nadzorowania procesów dynamicznych, w szczególności frezowania szybkościowego, metodami pomiarów drgań, projektowaniem mechatronicznym oraz analizą modalną. Jest współautorem 5 publikacji naukowych.



Dr inż. Stefan Sawiak urodził się 1949 r w Sopocie. Od 1976 r jest zatrudniony w Katedrze Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał 1974 r., doktorat – w 1979 r.

W pracy naukowej zajmuje się dynamiką maszyn, ze szczególnym uwzględnieniem drgań okrętowych układów napędowych, zastosowaniem metody sztywnych elementów skończonych do modelowaniu układów mechanicznych.

Jest autorem lub współautorem 52 publikacji naukowych, 56 niepublikowanych sprawozdań i referatów oraz kilkunastu programów komputerowych.