

# METODA POSZUKIWANIA OPTYMALNEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WRZECIONA PODCZAS FREZOWANIA PRZEDMIOTÓW PODATNYCH

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI<sup>1</sup>, BARBARA KOWALSKA<sup>2</sup>

*Politechnika Gdańska*

*Wydział Mechaniczny,*

*Katedra Mechaniki i Mechatroniki,*

*Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk*

<sup>1</sup> kkalinsk@o2.pl, <sup>2</sup> baskow@op.pl

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, drgania, nadzorowanie, prędkość optymalna

## STRESZCZENIE

W pracy zaproponowano nową metodę nadzorowania drgań podatnego przedmiotu obrabianego podczas frezowania, polegającą na doborze optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona z uwzględnieniem częstotliwości drgań własnych przedmiotu. W tym celu opracowano oryginalne podejście do wyznaczania optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona, bazujące na minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania. Umożliwia ono prognozowanie w trybie *off-line* optymalnych warunków skrawania, co skutkuje minimalizacją poziomu drgań względnych narzędzia i przedmiotu, a w konsekwencji – poprawą jakości wykonania wyrobu. Skuteczność metody potwierdzono porównując wartości RMS przemieszczeń w dziedzinie czasu oraz wartości szczytowe w widmie amplitudowym, uzyskane w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych procesu skrawania frezem kulistym.

## 1. Wstęp

Minimalizacja drgań podczas frezowania ma istotne znaczenie z punktu widzenia nowoczesnego przemysłu, ukierunkowanego na jak najlepszy i najszybszy efekt przy możliwie maksymalnej redukcji kosztów. Uzyskanie wysokiej jakości powierzchni, ze względu na zmniejszenie poziomu drgań, pozwala m.in. zredukować koszty związane z obróbką

wykańczająca, która staje się zwyczajnie zbędna. Możliwe jest również zmniejszenie zużycia ostrzy, zapobieganie drganiom samowzbudnym [1], zapobieganie utracie stabilności procesu frezowania czy, w skrajnych przypadkach, nawet zniszczeniu narzędzia lub obrabianej powierzchni.

Wśród metod redukcji poziomu drgań można wymienić m.in.: stosowanie tłumików montowanych w układzie [2], metody aktywne, wykorzystujące dodatkowe źródła energii, jak np. aktywne tłumienie oraz aktywny uchwyt [3, 4], techniki projektowania mechatronicznego bazujące na symulacji w systemie czasu rzeczywistego [5] a także obróbkę ze zmienną prędkością obrotową narzędzia [6].

## 2. Minimalizacja pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania

Dotychczasowe sposoby doboru optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona bazowały głównie na minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku grubości warstwy skrawanej, z którego wynika warunek Liao-Younga (1), wykorzystujący m.in. częstotliwość drgań własnych obrabianego przedmiotu [7, 8]:

$$\frac{zn_\alpha}{60} = \frac{f_\alpha}{0,25 + m} \quad m=0,1,2\dots \quad (1)$$

gdzie:  $z$  – liczba ostrzy narzędzia,  $n_\alpha$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $f_\alpha$  – częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego.

Wyznaczone z warunku Liao-Younga prędkości obrotowe napotykają jednak na poważne ograniczenia związane z ich użytecznością, gdyż często nie mieszczą się one w zakresie dopuszczalnych prędkości pracy obrabiarki. Poniższe układy równań (2) – (4) opisują dynamikę procesu skrawania [8]:

$$F_{y1}(t) = \begin{cases} 0 & \left\{ \begin{array}{l} k_a [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1)], h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1) > 0 \\ \wedge a_p(t) - \Delta a_p(t) > 0 \\ , h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1) \leq 0 \\ \vee a_p(t) - \Delta a_p(t) \leq 0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{y2}(t) = \begin{cases} 0 & \left\{ \begin{array}{l} \mu k_a [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1)], h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1) > 0 \\ \wedge a_p(t) - \Delta a_p(t) > 0, \\ , h_{D1}(t) - \Delta h_1(t) + \Delta h_1(t - \tau_1) \leq 0 \\ \vee a_p(t) - \Delta a_p(t) \leq 0. \end{array} \right. \end{cases} \quad (3)$$



$$F_{y13}(t) = \begin{cases} \mu_l k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & \begin{aligned} & \wedge a_p(t) - \Delta a_p(t) > 0, \\ & , h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \\ & \vee a_p(t) - \Delta a_p(t) \leq 0. \end{aligned} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:  $F_{y11}$ ,  $F_{y12}$ ,  $F_{y13}$  – składowe siły skrawania ostrza nr  $l$ , odpowiednio w kierunku prędkości skrawania, grubości warstwy oraz głębokości skrawania,  $a_p(t)$  – nominalna głębokość skrawania,  $\Delta a_p(t)$  – dynamiczna zmiana głębokości skrawania,  $h_{Dl}(t)$  – nominalna grubość warstwy skrawanej ostrza nr  $l$ ,  $\Delta h_l(t)$  – dynamiczna zmiana grubości warstwy skrawanej ostrza nr  $l$ ,  $k_{dl}$  – dynamiczny opór skrawania powierzchniowy właściwy ostrza nr  $l$ ,  $\mu_l$  – współczynnik siły skrawania  $F_{y12}$ ,  $\mu_l'$  – współczynnik siły skrawania  $F_{y13}$ ,  $\tau_l$  – czas opóźnienia między identycznym położeniem ostrza nr  $l$  i ostrza poprzedniego.

Stosując warunek Liao-Younga (1) wykorzystuje się wyłącznie dwa pierwsze układy równań, czyli te dotyczące jedynie pracy sił skrawania na kierunku grubości warstwy skrawanej. W związku z tym, iż w niniejszej pracy badano proces obróbki przedmiotu podatnego, zaszła potrzeba uwzględnienia również siły skrawania na kierunku normalnym do powierzchni obrabianej (4).

Na podstawie powyższych równań (2) – (4) opracowano nowe podejście do wyznaczania optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona, bazujące na minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania (5).

$$\bar{L} = \frac{\frac{n}{60} f_\alpha^2}{\left(\frac{n}{60}\right)^2 - f_\alpha^2} \sin \frac{2\pi n}{60 f_\alpha} = \min \quad (5)$$

W celu uproszczenia obliczeń prędkości optymalnych określono warunki minimalizacji drgań (6) – (9), czyli zależności między częstotliwością drgań własnych układu  $f_a$ , a optymalną prędkością obrotową wrzeciona  $n_{opt}$ :

$$n < 60f_a, \quad n_{opt} = 60f_a(0,25+k), \quad k=0 \quad (6)$$

$$n > 60f_a, \quad n_{opt} = 60f_a(-0,25+k), \quad k=2,3\dots \quad (7)$$

$$n < 120f_a, \quad n_{opt} = 60f_a(0,5+k), \quad k=0,1 \quad (8)$$

$$n > 120f_a, \quad n_{opt} = 60f_a k, \quad k=3,4\dots \quad (9)$$



### 3. Wyniki symulacji komputerowych

Skuteczność proponowanej metody zweryfikowano poprzez wykonanie szeregu symulacji komputerowych, wykorzystując autorski program komputerowy. Obliczenia przeprowadzono dla modelu płytki ze stopu aluminium PA38 (EN AW-6101A) o wymiarach 0,1565 x 0,05 x 0,005 m (długość x szerokość x grubość). Uwzględniając także dane materiałowe płytki, tj. gęstość  $\rho=2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , moduł Younga  $E=7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ , liczbę Poissona  $\nu=0,34$ , wyznaczono jej częstotliwość drgań własnych  $f_a$ , która wynosi 169 Hz.

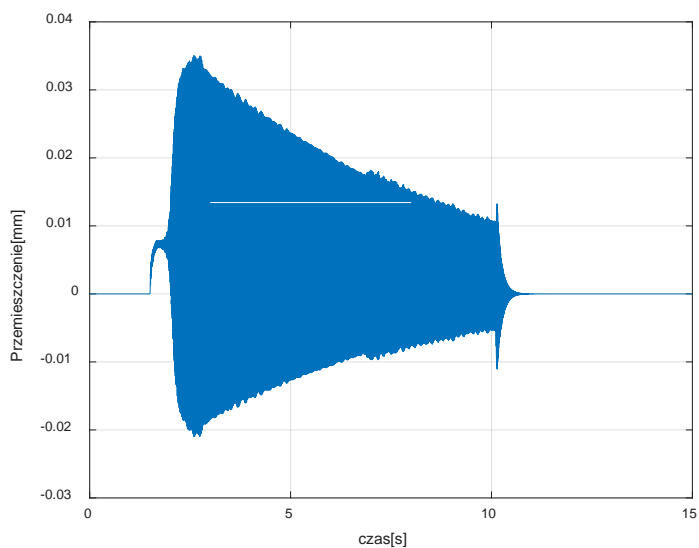
Z warunku (5) wyznaczono optymalną prędkość obrotową wrzeciona obrabiarki równą 17447 obr/min. Znalezione również prędkości optymalne dla uproszczonych warunków (7) oraz (8), wynoszące odpowiednio 17745 obr/min oraz 15210 obr/min. Wyniki dla obliczonych prędkości obrotowych porównano z wynikami dla prędkością wyznaczonej z warunku Liao-Younga (1), czyli równej 20280 obr/min.

W tab. 1 przedstawiono wyniki symulacji dla wyznaczonych prędkości optymalnych oraz kilku przykładowych prędkości, mieszczących się w zakresie dopuszczalnych prędkości pracy obrabiarki Deckel-Maho (10000–18000 obr/min).

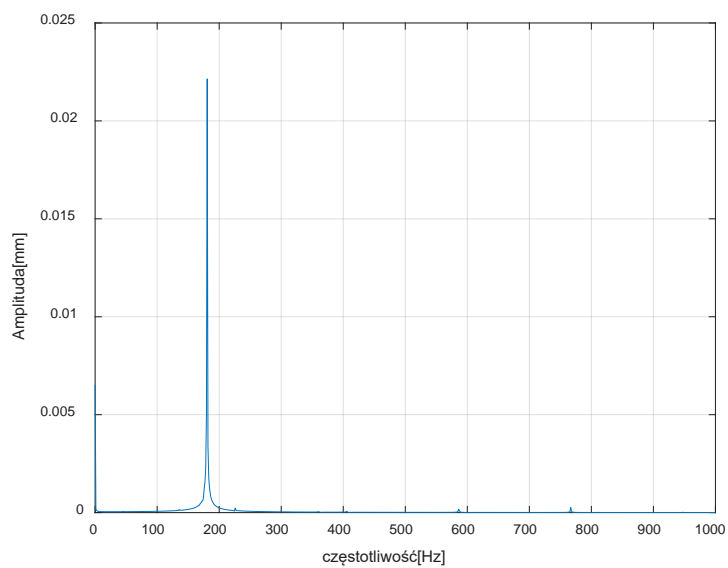
Tabela. 1. Wyniki symulacji komputerowych

| $n$<br>[obr/min] | RMS<br>[mm] | $f_1$<br>[Hz] | $q_1$<br>[mm] | $f_2$<br>[Hz] | $q_2$<br>[mm] | $f_3$<br>[Hz] | $q_3$<br>[mm] |
|------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 10000            | 0,005       | 335           | 0,001         | –             | –             | –             | –             |
| 13000            | 0,0078      | 134           | 0,0045        | 177           | 0,001         | 299           | 0,0016        |
| 15000            | 0,0093      | 178           | 0,00086       | 241           | 0,0018        | 261           | 0,00085       |
| 15210            | 0,0094      | 176           | 0,00065       | 232           | 0,0027        | 271           | 0,00083       |
| 17000            | 0,0111      | 170           | 0,0015        | 183           | 0,0109        | –             | –             |
| 17447            | 0,0134      | 181           | 0,0221        | –             | –             | –             | –             |
| 17745            | 0,0048      | 586           | 0,00025       | –             | –             | –             | –             |
| 20280            | 0,0045      | 670           | 0,00027       | –             | –             | –             | –             |

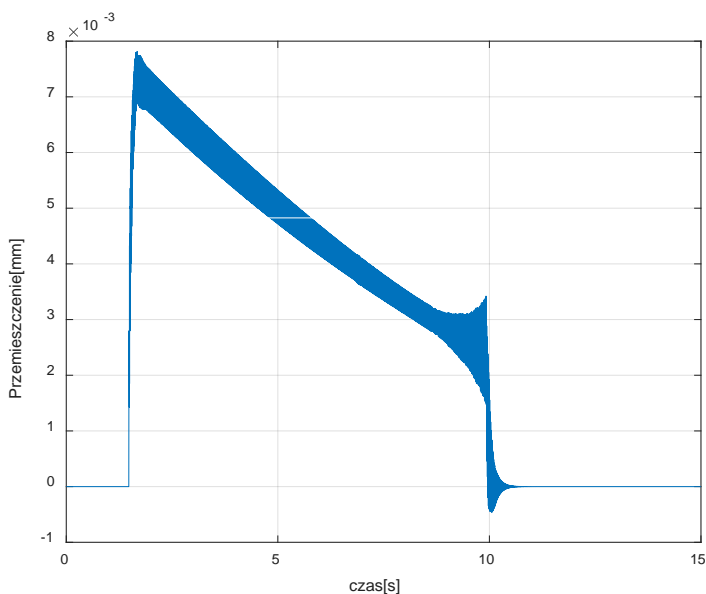
Poniżej zamieszczono również przebiegi przemieszczeń drgań oraz widma amplitudowe dla wybranych prędkości.



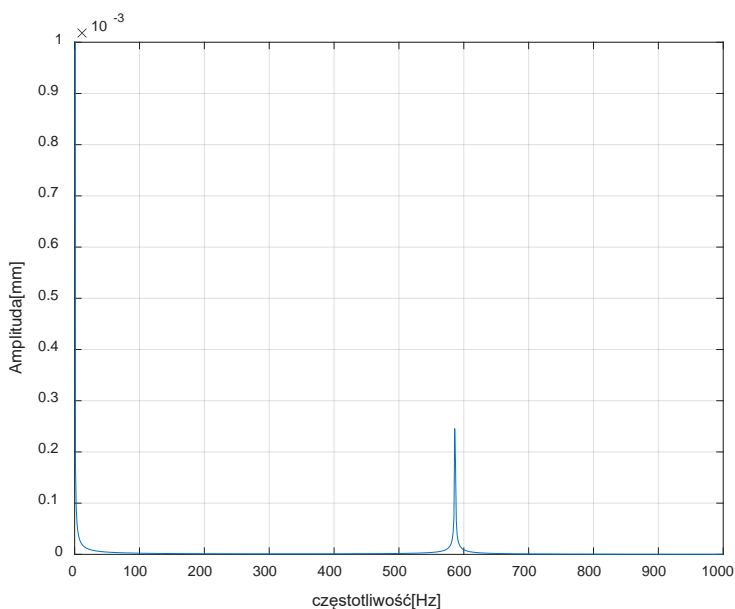
Rys. 1. Przeszyczenia drgań dla prędkości 17447 obr/min.



Rys. 2. Widmo amplitudowe dla prędkości 17447 obr/min.



Rys. 3. Przemieszczenia drgań dla prędkości 17745 obr/min.



Rys. 4. Widmo amplitudowe dla prędkości 17745 obr/min.

Na podstawie otrzymanych wyników (Tab. 1) można zauważyć, iż wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wrzeciona rośnie wartość RMS



poziomu drgań w dziedzinie czasu, jak również ryzyko pojawienia się większej ilości szczytów w widmie amplitudowym, często bliskim wartości częstotliwości drgań własnych płytki. Prowadzą one do chwilowej utraty stabilności procesu frezowania, co skutkuje pogorszeniem jakości obrabianej powierzchni. Wraz z dalszym wzrostem prędkości obrotowej wrzeczona ich liczba zaczyna spadać, jednak wartość RMS nadal rośnie, osiągając wysoce niekorzystne wartości z punktu widzenia jakości obróbki.

Można również zauważyć, iż prędkość 15210 obr/min, mimo że wyznaczona z uproszczonego warunku minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania (8), nie jest korzystna dla danego przypadku obróbki, gdyż skutkuje pojawieniem się większej ilości szczytów w widmie amplitudowym oraz stosunkowo wysoką wartością RMS.

Prędkość 17447 obr/min, obliczona z rozszerzonego warunku minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania (5), jest również niekorzystna ze względu na bardzo wysoką wartość RMS, jednak amplituda drgań zauważalna jest tylko dla jednej częstotliwości podczas całego przebiegu obróbki. Niestety ma ona bardzo wysoką wartość, co dyskwalifikuje ją, jako wartość optymalną prędkości obrotowej wrzeczona.

Bardzo korzystna jest natomiast wartość wyznaczona z warunku Liao-Younga (1), ze względu na stosunkowo niską wartość RMS oraz amplitudę drgań, pojawiającą się jedynie przy wysokich częstotliwościach, odpowiadających częstotliwości drgań frezu. Mimo znakomitych prognoz skuteczności tej prędkości jest ona niestety nieosiągalna dla większości typowych obrabiarek, pracujących w zakresie maksymalnych prędkości na poziomie około 18000 obr/min.

Wysoce korzystna jest natomiast prędkość obliczona z uproszczonego warunku minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania (7) równa 17745 obr/min. Mieści się ona w zakresie prędkości osiągalnych dla większości obrabiarek. Wartość RMS drgań jest stosunkowo niska, jak również amplituda, która pojawia się jedynie w zakresie częstotliwości odpowiadających częstotliwości wchodzenia ostrzy freza w materiał. Nie ma więc ryzyka utraty stabilności procesu skrawania ze względu na pracę w zakresie częstotliwości drgań własnych płytki. Przebieg procesu obróbki (Rys. 3) jest również bardzo zadowalający z punktu widzenia jego stabilności oraz znacznie mniejszego poziomu drgań.

Porównując przebiegi drgań dla prędkości 17447 obr/min (Rys. 1) oraz 17745 obr/min (Rys. 3) można również zauważyć, jak ogromna różnica może wystąpić przy niewielkiej zmianie prędkości obrotowej wrzeczona,



która nie byłaby możliwa do wyznaczenia choćby z powszechnie znanego warunku Liao-Younga (1), czy metody prób i błędów.

#### 4. Wnioski

W niniejszej pracy wykazano skuteczność metody minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania. Upraszczając dodatkowo proponowaną metodę możliwe jest bardzo łatwe i szybkie wyznaczenie optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona. Zastosowanie warunku uproszczonego skutkuje obiecującymi rezultatami w postaci zarówno minimalnego poziomu przemieszczeń, jak też amplitudy drgań. Mimo, iż nie każda wyznaczona prędkość obrotowa wrzeciona jest korzystna z punktu widzenia jakości przebiegu obróbki, to metoda ta jest konkurencyjna, gdyż pozwala wyznaczyć prędkości dotychczas nieosiągalne dla metod bazujących na minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku grubości warstwy skrawanej.

#### Bibliografia

- [1] Tomków J.: *Wibrostanilność obrabiarek*. Warszawa: WNT 1997.
- [2] Kim M.H., Won D., Ziegert J.: Numerical Analysis and Parameter Study of a Mechanical Damper for Use in Long Slender Endmills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, p.500-507, 2006.
- [3] Brecher C., Manoharan D., Ladra U., Kopken H. G.: Chatter suppression with an active workpiece holder. *Production Engineering Research and Development*, Vol. 4, p. 239-245, 2010.
- [4] Parus A., Pajor M., Hoffmann M.: Suppression of Self-Excited Vibration in Cutting Process Using Piezoelectric and Electromagnetic Actuators. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 33, p. 35-50, 2009.
- [5] Kaliński K. J., Galewski M. A.: Vibration surveillance supported by Hardware-In-The-Loop Simulation in milling flexible workpieces. *Mechatronics*, Vol. 24, p.1071-1082, 2014.
- [6] Kaliński K. J., Galewski M. A.: Chatter vibration surveillance by the optimal-linear spindle speed control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, p. 383-399, 2011.
- [7] Liao Y. S., Young Y. C.: A New On-line Spindle Speed Regulation Strategy for Chatter Control. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 1996, 35, 6, 651–660..
- [8] Kaliński K. J.: *Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2012, s. 178-188.

