

# OPRACOWANIE KONCEPCJI ORAZ PROGRAMÓW PILOTOWYCH MODYFIKACJI MAPY OPTYMALNYCH PRĘDKOŚCI OBROTOWYCH WRZECIONA

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI<sup>1</sup>, JAN KAPLIŃSKI<sup>2</sup>,  
<sup>1,2</sup>*Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki i Mechatroniki  
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk*

SŁOWA KLUCZOWE: NADZOROWANIE DRGAŃ, SAMOWZBUDNE  
DRGANIA CHATTER, SKRAWANIE.

## STRESZCZENIE

Podczas obróbki przedmiotów o małych gabarytach, dobór najbardziej korzystnej prędkości wrzeciona w trakcie obróbki, jest realizowany na podstawie uogólnionego warunku Liao-Younga. Częstotliwość drgań samowzbudnych typu chatter może być różna dla różnych punktów obrabianej powierzchni. Dlatego tworzona jest mapa optymalnych prędkości obrotowych. W przypadku obrabiania przedmiotów ponadgabarytowych, wspomniana wcześniej metoda jest modyfikowana poprzez uwzględnienie własności dynamicznych urządzenia, procesu skrawania i zmianę związaną z konfiguracją układu, poprzez zmianę w czasie położenia przedmiotu oraz narzędzia. Rezultatem jest modyfikacja metody tworzenia mapy optymalnych prędkości obrotowych, biorąc pod uwagę wykorzystanie jej w obróbce przedmiotów wielkogabarytowych oraz wdrażając w pilotowy program symulacji komputerowych do nadzorowania procesu skrawania.

## 1. Wstęp

Metodyka niniejszego opracowania, bazuje na wykorzystaniu technik projektowania mechatronicznego [1], które były sukcesywnie rozwijane w pracach zespołu projektowego, w zakresie frezowania szybkościowego przedmiotów podatnych [2], jak też – kołowych robotów mobilnych [3].

## 2. Opracowanie metody modyfikacji mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona z uwagi na minimalizację poziomu drgań narzędzie-przedmiot obrabiany

Opracowanie ma na celu modyfikację metody tworzenia mapy optymalnych prędkości obrotowych, pod kątem jej zastosowania do obróbki przedmiotów wielkogabarytowych w przemyśle. W przypadku obróbki przedmiotów podatnych o wymiarach konwencjonalnych, doboru *optymalnej* prędkości obrotowej wrzeciona, pod kątem redukcji drgań samowzbudnych typu *chatter*, dokonywano na podstawie uogólnionego warunku Liao-Younga (L-Y)[4, 6]:

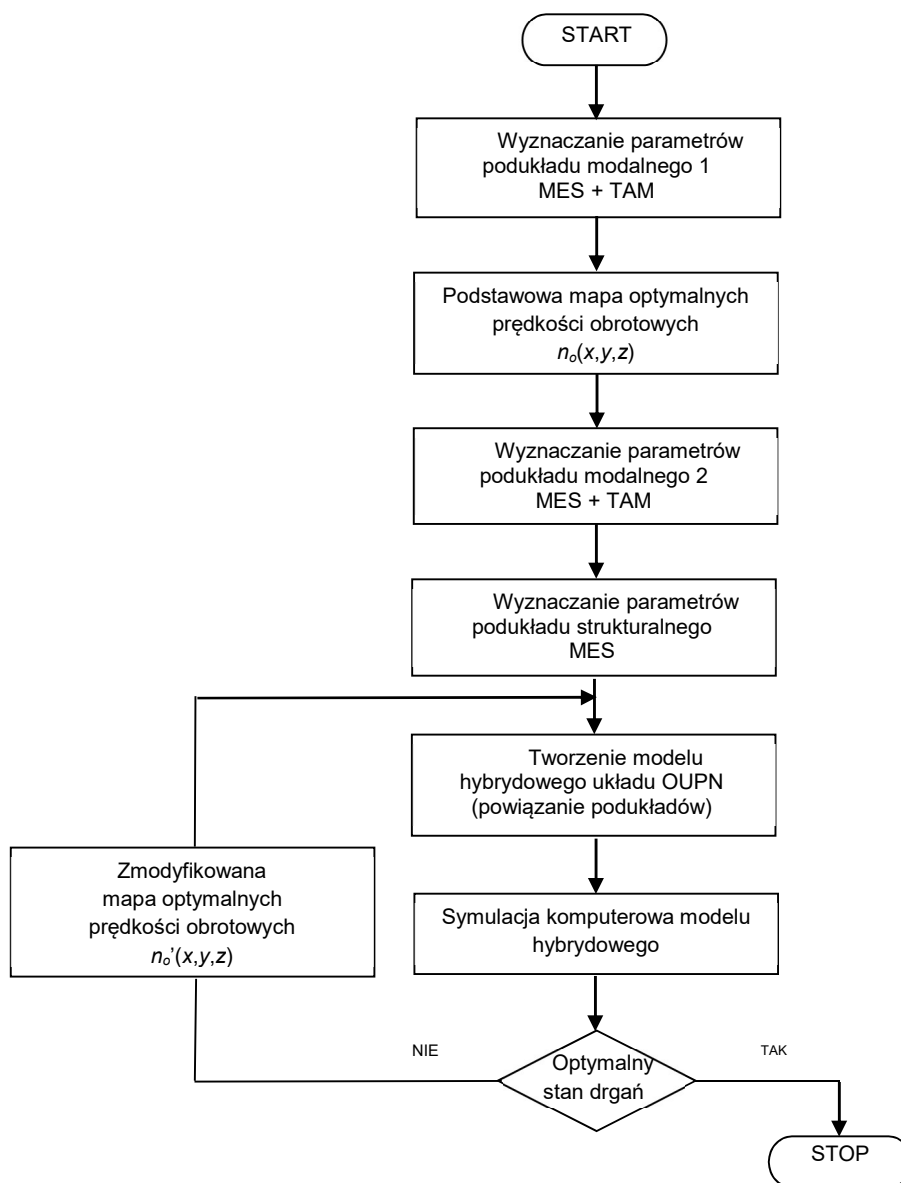
$$\frac{nz}{60} = \frac{f_{ch}}{0.25 + k}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – optymalna prędkość obrotowa wrzeciona,  $z$  – liczba ostrzy skrawających,  $f_{ch}$  - częstotliwość drgań samowzbudnych typu *chatter* przedmiotu, o dominującej amplitudzie.

Ponieważ częstotliwość  $f_{ch}$  może być różna dla różnych punktów na powierzchni przedmiotu obrabianego, należy utworzyć mapę optymalnych prędkości obrotowych przyporządkowując ich wartości poszczególnym punktom powierzchni [4,7]. Takie postępowanie znajdowało uzasadnienie merytoryczne i użytkowe, ponieważ jedynym słabym ogniwem w układzie OUPN był podatny przedmiot obrabiany, a częstotliwość  $f_{ch}$  była bliska jednej z częstotliwości drgań własnych przedmiotu. W przypadku obróbki przedmiotów wielkogabarytowych, opracowaną wcześniej metodę tworzenia mapy optymalnych prędkości obrotowych należy zmodyfikować, uwzględniając pomijane własności dynamiczne obrabiarki i procesu skrawania, jak również zmienną konfigurację układu, która jest spowodowana zmianą w czasie położenia narzędzia i przedmiotu [4].

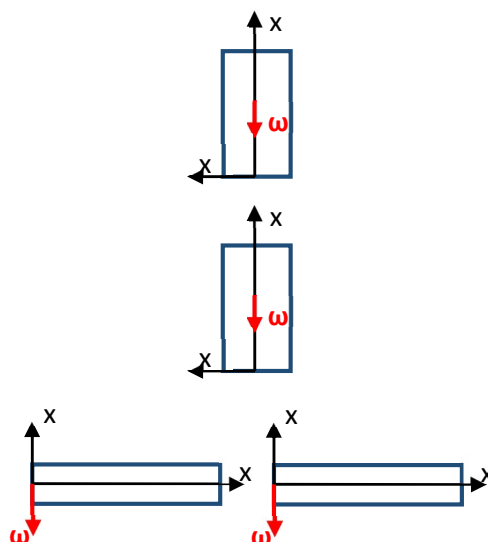
Schemat nadzorowania procesu skrawania przedmiotów wielkogabarytowych ilustruje rys. 1. Procedura tworzenia podstawowej mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona bazuje na pracach [4,7,8].



Rys. 1. Nadzorowanie procesu skrawania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem zmodyfikowanej mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeźnica oraz techniki WP

### 3. Opracowanie wstępne do pilotowego programu symulacji komputerowej nadzorowania procesu frezowania czołowego oraz wytaczania

Opracowanie zawiera opis metody oraz wyników uproszczonej analizy dynamiki wytaczadła 130, które używane jest między innymi do obróbki wykańczającej otworów w części 440424, wykonywanych w PHS HYDROTOR S.A. Celem opracowania jest sprawdzenie, na ile prędkość obrotowa narzędzia wpływa na jego częstotliwości drgań własnych. Model obliczeniowy wytaczadła utworzono przyjmując 4 odkształcalne elementy skończone (OES) typu pręt Eulera-Bernoulliego (rys. 2).



Rys. 2. Model wytaczadła z wykorzystaniem OES, z zaznaczonymi lokalnymi układami współrzędnych

Na bazie modelowania metodą elementów skończonych z uwzględnieniem ruchu obrotowego [4] wykonano obliczenia symboliczne w środowisku Maxima a następnie wykonane zostały symulacje w środowisku Octave.

Macierz funkcji kształtu, sformułowana na podstawie tekstu źródłowego oprogramowania *Aparal* (autor: *K. Kaliński*) została przepisana z autorskiego programu (NE.FOR), z wybraniem trzech pierwszych kolumn odpowiadającym translacyjnym stopniom swobody, do środowiska Maxima.

$$\mathbf{M}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV \quad (1)$$

$$\xrightarrow{\substack{\{x_{e2}:=r\cos(\varphi)\} \\ \{x_{e3}:=r\sin(\varphi)\}}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_1$$

Powyżej przedstawiono macierz bezwładności  $\mathbf{M}_e$  która jest tożsama z macierzą wyznaczoną w pracy [4]. Całkowanie symboliczne odbywało się jednak po objętości z wykorzystaniem współrzędnych biegunowych, a nie wzdłuż długości pręta. Wyznaczono macierze uwzględniające ruch obrotowy modelu wytaczadła. W tym celu zdefiniowano macierz prędkości kątowych [4]  $\mathbf{\Omega}$  :

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{e3} & \omega_{e2} \\ \omega_{e3} & 0 & -\omega_{e1} \\ -\omega_{e2} & \omega_{e1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

i następnie wyznaczono macierze efektów żyroskopowych  $\hat{\mathbf{L}}_e$  i macierz zależną od kwadratu prędkości kątowych  $\hat{\mathbf{K}}_e$  :

$$\hat{\mathbf{L}}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV \quad (3)$$

$$\xrightarrow{\substack{\{x_{e2}:=r\cos(\varphi)\} \\ \{x_{e3}:=r\sin(\varphi)\}}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_1$$

$$\hat{\mathbf{K}}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV \quad (4)$$

$$\xrightarrow{\substack{\{x_{e2}:=r\cos(\varphi)\} \\ \{x_{e3}:=r\sin(\varphi)\}}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_1.$$

Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące dane: gęstość  $\rho_e = 7710 \text{ kg/m}^3$ , moduł Younga  $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , liczba Poissona  $\nu = 0,3$ . Natomiast pominięto tłumienie materiałowe.

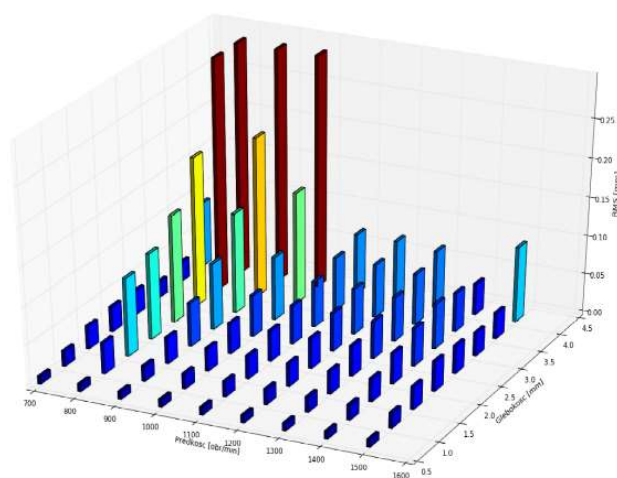
Wyznaczono postacie drgań wytaczadła pozostającego w spoczynku oraz częstotliwości drgań w zależności od prędkości obrotowej rozwiązując zagadnienie własne macierzy stanu:



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}(\hat{\mathbf{L}} - \hat{\mathbf{L}}^T) & -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K} - \hat{\mathbf{K}}) \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

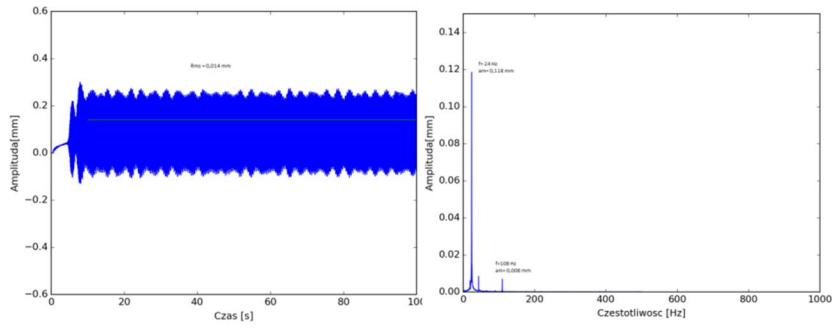
gdzie:  $\mathbf{M}$ – globalna macierz bezwładności,  $\mathbf{K}$ – globalna macierz sztywności,  $\hat{\mathbf{L}}$ – globalna macierz efektów żyroskopowych,  $\hat{\mathbf{K}}$ – globalna macierz zależna od kwadratu prędkości kątowej.

#### 4. Ocena symulowanych drgań przedmiotu obrabianego podczas frezowania czolowego

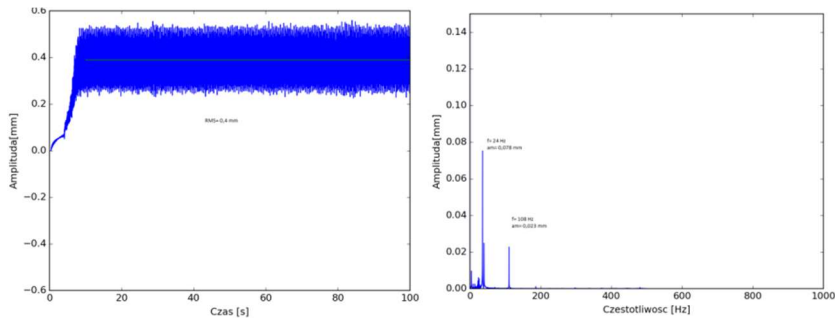


Rys. 3. Wartości *RMS* przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi pionowej w zależności od prędkości obrotowej narzędzia i głębokości skrawania

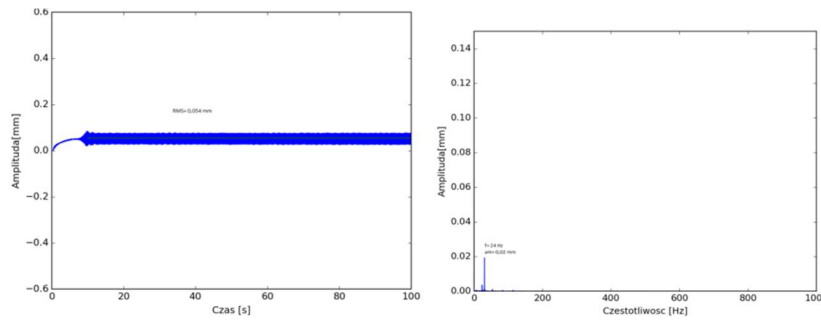
Wyniki symulacji drgań przedmiotu obrabianego w kierunku osi *pionowej* dla wybranych parametrów przedstawiono na rys. 4-7.



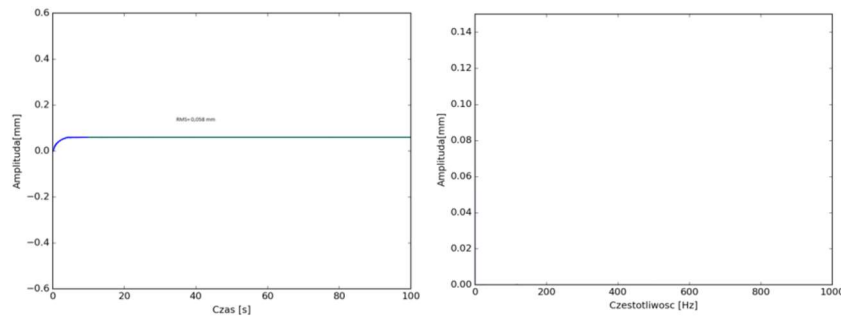
Rys. 4. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi  $x_3$ ,  $n_0=800$  obr/min,  $a_p=2.5$  mm,  $k_1=1000$  N/mm,  $k_2=20000$  N/mm,  $k_3=20000$  N/mm



Rys. 5. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi  $x_3$ .  $n_0=900$  obr/min,  $a_p=4$  mm,  $k_1=1000$  N/mm,  $k_2=20000$  N/mm,  $k_3=20000$  N/mm



Rys. 6. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi  $x_3$ ,  $n_0=1000$  obr/min,  $a_p=2.5$  mm,  $k_1=1000$  N/mm,  $k_2=20000$  N/mm,  $k_3=20000$  N/mm



Rys. 7. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi  $x_3$ ,  $n_0 = 1400$  obr/min,  $a_p = 3$  mm,  $k_1 = 1000$  N/mm,  $k_2 = 20000$  N/mm,  $k_3 = 20000$  N/mm

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, że wybrana spośród policzalnego zbioru wartości optymalna prędkość obrotowa narzędzia, z uwagi na minimalną wartość *RMS* (najniższy poziom drgań) i maksymalną wartość  $a_p = 4$  mm (największa wydajność obróbki), wynosi 1400 obr/min (rys. 7).

## Bibliografia

1. Petko M.: Wybrane metody projektowania mechatronicznego. Radom: Wyd. Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji 2008.
2. Kaliński K. J., Galewski M. A.: Vibration Surveillance Supported by Hardware-In-the-Loop Simulation in Milling of Flexible Workpieces. *Mechatronics* 2014, 24, 1071-1082.
3. Kaliński K. J., Buchholz C.: Mechatronic Design of Strongly Nonlinear Systems on a Basis of Three Wheeled Mobile Platform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2015, 52-53, 700-721.
4. Kaliński K. J.: Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Gdańsk: Wyd. Politechniki Gdańskiej 2012.
5. Nosyreva E. P., Molinari A.: Analysis of Nonlinear Vibrations in Metal Cutting. *Int. J. Mech. Science* 1998 40, 8, 735-748.
6. 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.
7. Kaliński K. J., Mazur M., Galewski M. A.: The optimal spindle speed map for reduction of chatter vibration during milling of bow thruster blade. *Solid State Phenomena* 2013, 198, 686-691.