

# TECHNIKA WIRTUALNEGO PROTOTYPOWANIA WSPOMAGANEGO EKSPERYMENTEM W ZASTOSOWANIU DO POSZUKIWANIA OPTYMALNEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ PODCZAS FREZOWANIA PRZEDMIOTÓW WIELKOGABARYTOWYCH

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI<sup>1</sup>, MAREK A. GALEWSKI<sup>2</sup>,  
MICHAŁ MAZUR<sup>3</sup>, NATALIA MORAWSKA<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Politechnika Gdańska*

*Wydział Mechaniczny,*

*Katedra Mechaniki i Mechatroniki*

*ul. G. Narutowicza 11-12, 80-233 Gdańsk*

<sup>1</sup>*kkalinsk@o2.pl*, <sup>2</sup>*margalew@pg.gda.pl*, <sup>3</sup>*mazur.m.r@gmail.com*

<sup>4</sup>*natmoraw@gmail.com*

SŁOWA KLUCZOWE: wirtualne prototypowanie wspomagane eksperymentem, obróbka, frezowanie, drgania, przedmiot wielkogabarytowy

## STRESZCZENIE

Przedstawiono rozważania dotyczące problemów nadzorowania drgań podczas frezowania wielkogabarytowych przedmiotów podatnych z wykorzystaniem nowego sposobu dopasowania prędkości obrotowej narzędzia skrawającego. Polega on na powtarzalnej zmianie podstawowej wartości prędkości obrotowej, aż do momentu uzyskania optymalnego stanu drgań przedmiotu obrabianego. Ocenie podlegają wartości RMS (ang. *Root Mean Square*) drgań w dziedzinie czasu oraz wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym. Skuteczność proponowanej modyfikacji potwierdzono wykorzystując technikę wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem.

## 1. Wstęp

W dotychczasowych pracach naukowych i badaniach przemysłowych frezowania przedmiotów podatnych, autorzy stosowali modalną procedurę nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany [1]. Polega ona na

uwzględnieniu jedynie własności dynamicznych przedmiotu obrabianego [2]. Metoda ta daje jednak niezadowalające rezultaty, jeśli o stanie dynamiki systemu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie (OUPN) decydują własności dynamiczne procesu obróbkowego oraz zmienne w czasie warunki skrawania.

## 2. Optymalna prędkość obrotowa wrzeciona

Metodami redukcji drgań, związanymi z oddziaływaniem poprzez prędkość obrotową są: ustawiczne zwiększanie prędkości skrawania [3], regulacja prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do częstotliwości drgań własnych układu [4] oraz dopasowanie prędkości obrotowej wrzeciona do optymalnego kąta przesunięcia fazowego w kolejnych przejściach narzędzia [5].

Celem pracy było znalezienie optymalnej prędkości obrotowej narzędzia skrawającego, dla której poziom drgań przedmiotu obrabianego jest jak najniższy. Uwzględnienie wpływu własności dynamicznych przedmiotu na częstotliwość i amplitudę drgań implikuje konieczność tworzenia „mapy” prędkości optymalnych w każdym punkcie na powierzchni przedmiotu, w myśl warunku Liao-Younga [1, 5]:

$$\frac{zn_0}{60} = \frac{f_\alpha}{0,25 + k} \quad (1)$$

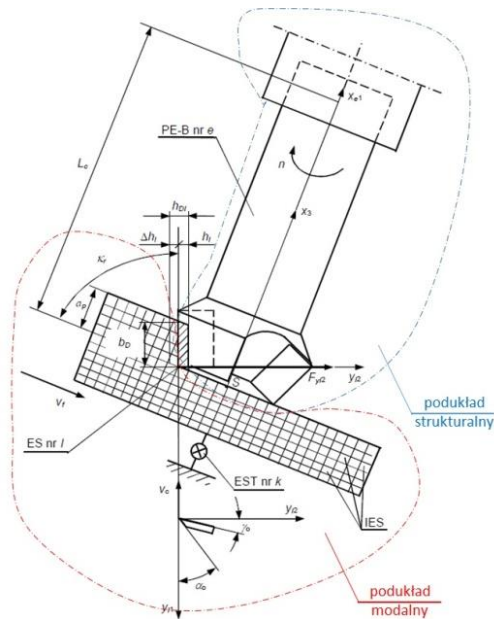
W celu wyznaczenia ciągu optymalnych prędkości obrotowych, przyjmując kolejne liczby całkowite  $k$ , należy dokonać pomiaru częstotliwości drgań własnych  $f_\alpha$  oraz znać liczbę ostrzy narzędzia skrawającego  $z$ . Powyższe dotyczy jednak przedmiotów podatnych o niewielkich gabarytach. W przypadku przedmiotów wielkogabarytowych, podstawowa mapa optymalnych prędkości obrotowych nie spełnia oczekiwanych wymagań i jest jedynie pierwszym przybliżeniem. Optymalnej prędkości obrotowej należy poszukiwać zatem w warunkach dynamicznych, wykorzystując np. autorską technikę wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem (WPWE).

## 3. Model hybrydowy

W modelu hybrydowym procesu skrawania (rys. 1) wyodrębniono podukład modalny (podatny przedmiot wielkogabarytowy modelowany w konwencji MES) będący liniowym układem stacjonarnym, oraz podukład



strukturalny (wirujące narzędzie skrawające, modelowane jako obracająca się bryła sztywna lub pręt Eulera-Bernoulliego [1]). Niedogodnością opisu podukładu modalnego w dziedzinie współrzędnych uogólnionych jest bardzo duża liczba stopni swobody. Stąd zaproponowano uproszczenie polegające na redukcji wymiaru podukładu z ok. 1 200 000 do 15 współrzędnych modalnych. Podukład strukturalny ma jedynie 6 stopni swobody, co nie wpływa na czasochłonność obliczeń. Po „powiązaniu” podukładów, otrzymany model obliczeniowy jest liniowym układem niestacjonarnym i posiada łącznie 21 współrzędnych hybrydowych [1]. W modelu hybrydowym uwzględniono również zmienne w czasie położenie strefy kontaktu ostrza z materiałem. Do opisu wykorzystano tutaj proporcjonalną zależność pomiędzy siłą skrawania, a chwilowym polem powierzchni warstwy (tzw. *model proporcjonalny* [6]).



Rys. 1. Model hybrydowy

#### 4. Procedura WPWE

Przedstawiona procedura (rys. 2) charakteryzuje się dużą uniwersalnością. Może ona być stosowana w przypadku obróbki zgrubnej i dokładnej, bez względu na głębokość skrawania, a także – w przypadku istnienia wielu podukładów modalnych.

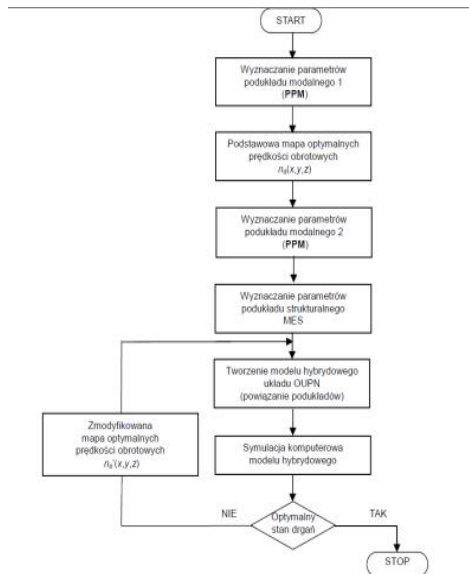
Należy rozpocząć od wyznaczenia parametrów podukładu modalnego (modelowanego z wykorzystaniem oprogramowania MES – MEDINA i PERMAS [1]), który następnie podlega walidacji, czyli ocenie zgodności z obiektem rzeczywistym zainstalowanym na obrabiarce. Natomiast parametry podukładu strukturalnego definiuje się na podstawie znanych zależności obliczeniowych, bądź uzyskanych w procesie walidacji. Oceny zgodności podukładu modalnego dokonano wyznaczając wskaźniki *MAC* (ang. *Modal Assurance Criterion*) ze wzoru:

$$MAC^{e-a}(i, j) = \frac{(\psi_{\alpha}^{aT} * \psi_{\beta}^e)^2}{(\psi_{\alpha}^{aT} * \psi_{\alpha}^a) * (\psi_{\beta}^{eT} * \psi_{\beta}^e)}, \quad (2)$$

przy czym wskaźnik ten jest kwadratem kosinusa kierunkowego między wektorem własnym z obliczeń  $\psi_{\alpha}^a$  i z eksperymentu  $\psi_{\beta}^e$ . Im wartość tego wskaźnika jest bliższa 1, tym bardziej zgodne są oba wektory własne.

Wyznaczone parametry modelu obliczeniowego stanowią pozyskane z eksperymentu wiarygodne dane procesowe. Wykorzystano je do powtarzalnych symulacji procesu obróbkowego, w celu modyfikacji mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona. W przypadku analizowanego obiektu badań, polegało to na przeszukiwaniu zbioru z zakresu 900–1200  $\frac{obr.}{min.}$  i wyznaczeniu wartości optymalnej.

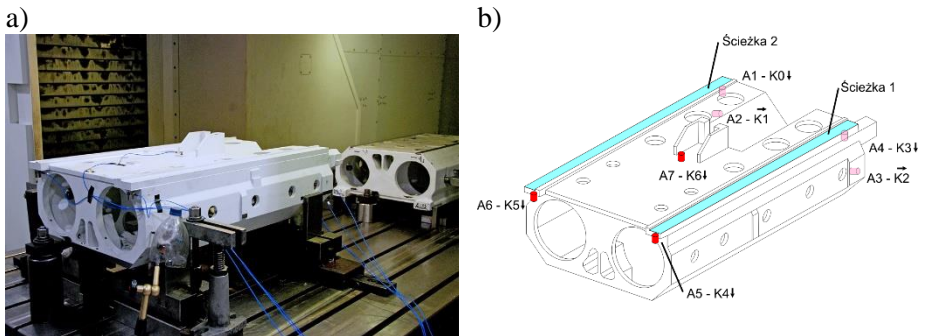




Rys. 2. Schemat ideowy procedury WPWE

## 5. Obiekt badań

Obiektem badań był testowy przedmiot obrabiany, zainstalowany na portalowym centrum obróbkowym MIKROMAT 20V w PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi (rys. 3). Badano drgania względne w umownym punkcie styku narzędzia z przedmiotem podczas frezowania czołowego prowadnicy (ścieżka 2) o długości  $l_d = 956$  mm, w kierunku normalnym do powierzchni obrabianej.



Rys. 3. Testowy przedmiot obrabiany: a) mocowanie na stole obrabiarki, b) schemat uproszczony, zaznaczone położenia akcelerometrów

W pierwszym etapie badań dokonano oceny zgodności modelu MES przedmiotu z obiektem rzeczywistym zamocowanym na obrabiarce. Na rys. 4. przedstawiono wartości współczynników *MAC* dla postaci zidentyfikowanych



w wyniku eksperymentalnej analizy modalnej. Dzięki zastosowaniu metody p-LSCFD [7] zidentyfikowano 5 częstotliwości i postaci drgań własnych. Obliczonych postaci drgań własnych jest znacznie więcej.

0.92 0.15 0.05 0.11 0.01  
 0.18 0.82 0.55 0.19 0.01  
 0.89 0.25 0.03 0.12 0.00  
 0.04 0.48 0.94 0.03 0.04  
 0.08 0.02 0.02 0.05 0.10  
 0.09 0.17 0.02 0.09 0.31  
 0.04 0.09 0.03 0.71 0.04  
 0.02 0.04 0.01 0.00 0.78  
 0.01 0.03 0.19 0.01 0.05  
 0.00 0.16 0.12 0.11 0.78

<b>p-LSCFD</b>	170,241	239,52	-	275,575	-	-	569,708	663,311	-	-
<b>Model obliczeniowy MEDINA + PERMAS</b>	170,341	237,782	266,627	275,869	392,373	542,676	588,824	681,015	748,006	780,266

Rys. 4. Wartości współczynników MAC i częstotliwości drgań własnych

Kolejnym etapem jest ocena symulowanych drgań przedmiotu obrabianego, na podstawie wartości RMS przemieszczeń w dziedzinie czasu oraz wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym. Symulowano obróbkę zgrubną (z naddatkiem 2,25 mm i 0,2 mm) oraz dokładną (z naddatkiem 0,03 mm). Do obróbki zgrubnej zastosowano głowicę frezową SECO Z6  $\phi 63$  o liczbie ostrzy  $z=6$ , zaś do obróbki dokładnej – głowicę Sandvik Z5  $\phi 63$  o liczbie ostrzy  $z=5$ .

## 6. Wyniki symulowanych drgań

Wyniki symulacji stanowią rozwiązanie problemu w postaci poszukiwania optymalnej prędkości obrotowej dla zidentyfikowanych współczynników sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego.

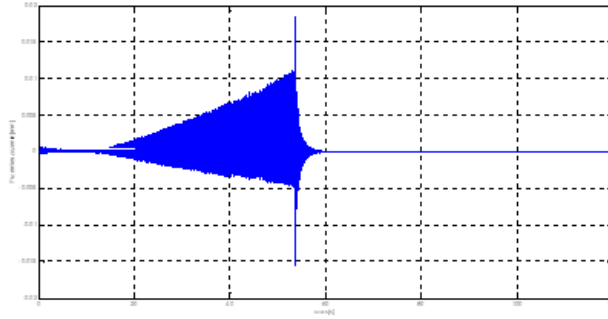
W tab. 1. przedstawiono wartości częstotliwości  $f$  oraz amplitud  $A$  dominujących „szczytów” w widmie zaobserwowanym w chwili  $t_p=10$  s, w przypadku obróbki zgrubnej przy głębokości skrawania  $a_p=2,25$  mm, różnych prędkościach obrotowych  $n$  i różnych prędkościach posuwu  $v_f$ .

Przy prędkości obrotowej  $1080 \frac{obr.}{min}$  otrzymano minimalne amplitudy drgań, zarówno dla harmonik (tj. częstotliwości wchodzenia ostrza w materiał 111 Hz i wielokrotnych), jak też dla częstotliwości odpowiadających biegunom. Analiza widma zaobserwowanego pod koniec przebiegu ( $t_p=50$  s) również potwierdza, że przy prędkości obrotowej  $1080 \frac{obr.}{min}$  otrzymano optymalny stan drgań. Na rys. 5 – 6 przedstawiono przebieg czasowy symulowanej obróbki zgrubnej oraz widma amplitudowe dla prędkości optymalnej.

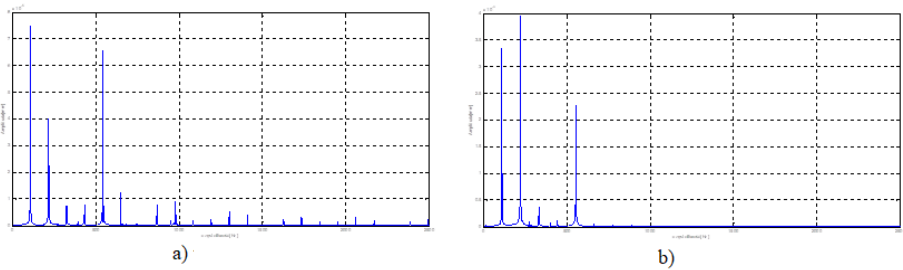


Tab. 1. Wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym

n[obr/min]	v <sub>f</sub> [mm/min]	f[Hz]	t[min]	t[s]	t <sub>p</sub> [s]	f [Hz]	A [m]	f [Hz]	A [m]
1112	1112	92,667	0,86	52	10	111.0975	7.7094e-05	222.1951	4.3446e-05
900	900	75,000	1,06	64	10	90.3431	7.7656e-05	180.6861	3.9954e-05
920	920	76,667	1,04	62	10	91.5639	5.5989e-05	184.3487	4.0233e-05
940	940	78,333	1,02	61	10	94.0056	7.5108e-05	188.0112	3.8529e-05
960	960	80,000	1,00	60	10	95.2265	6.0026e-05	191.6738	4.0267e-05
980	980	81,667	0,98	59	10	97.6682	7.7231e-05	195.3363	4.3915e-05
1000	1000	83,333	0,96	57	10	100.1099	5.7565e-05	198.9989	4.2613e-05
1020	1020	85,000	0,94	56	10	101.3307	6.8395e-05	203.8823	3.3129e-05
1040	1040	86,667	0,92	55	10	103.7724	7.7719e-05	207.5449	4.5439e-05
1060	1060	88,333	0,90	54	10	106.2141	7.7273e-05	212.4283	4.4328e-05
1080	1080	90,000	0,89	53	10	108.6558	7.4963e-05	217.3117	4.0218e-05
1100	1100	91,667	0,87	52	10	111.0975	7.6752e-05	222.1951	4.2169e-05
1120	1120	93,333	0,85	51	10	111.0975	7.7805e-05	222.1951	4.4340e-05
1140	1140	95,000	0,84	50	10	113.5393	8.2470e-05		
1160	1160	96,667	0,82	49	10	115.9810	7.9941e-05	231.9619	4.4652e-05
1180	1180	98,333	0,81	49	10	119.6435	5.5428e-05	238.0662	6.5772e-05
1200	1200	100,000	0,80	48	10	119.6435	5.6890e-05	235.6245	8.3190e-05



Rys. 5. Przebieg czasowy symulowanych drgań



Rys. 6. Widma amplitudowe, czas obserwacji widma: a)  $t_p=10$  s; b)  $t_p=50$  s

Analiza widma amplitudowego dla obróbki zgrubnej ( $a_p=0,2$  mm) i dokładnej ( $a_p=0,03$  mm) też pokazała, że wartość 1080  $\frac{obr.}{min}$  jest prędkością optymalną. Warto zauważyć, że przy obróbce dokładnej, modyfikacja prędkości obrotowej jest jedyną metodą redukcji drgań przedmiotu obrabianego.



## 7. Wnioski

Potwierdzono skuteczność proponowanej metody nadzorowania drgań podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych, z wykorzystaniem dedykowanej techniki projektowania mechatronicznego, czyli wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem pomiarowym (WPWE).

Dzięki wynikom identyfikacji uzyskanym metodą p-LSCFD można stwierdzić, że parametry modelu obliczeniowego (pozyskane z eksperymentu) zostały określone poprawnie i stanowią wiarygodne dane procesowe do badań symulacyjnych. Powyższe potwierdza pięć zidentyfikowanych postaci drgań własnych dla częstotliwości w paśmie do 700 Hz.

## Bibliografia

- [1] Kaliński K. J.: Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Gdańsk: Wydawnictwo PG 2012.
- [2] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M. R.: High Speed Milling vibration surveillance with optimal spindle speed based on optimal speeds map. Key Engineering Materials 2014, 597, 125-130.
- [3] Schulz H.: *State of the Art of High-Speed Machining*. W: *1st French and German Conference on High Speed Machining*. Metz 1997. Metz: Université de Metz 1997, Ref. I, s. 1–7.
- [4] Tarng Y. S., Lee E. C.: *A Critical Investigation of the Phase Shift Between the Inner and Outer Modulation for the Control of Machine Tool Chatter*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1997, Vol. 37 nr 12, s. 1661–1672.
- [5] Liao Y. S., Young Y. C.: *A New On-line Spindle Speed Regulation Strategy for Chatter Control*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1996, Vol. 35, nr 6, s. 651–660.
- [6] Kaliński K. J., Galewski M. A.: Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2015, 92, 19-30.
- [7] Heylen W., Lammens S., Sas P.: *Modal Analysis Theory and Testing*. Leuven: KU Leuven 2007.

## Podziękowania

Pracę zrealizowano w ramach zadań finansowanych ze środków projektu TANGO1/266350/NCBR/2015. Badania doświadczalne na portalowym centrum obróbkowym MIKROMAT 20V wykonano dzięki współpracy z PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi.

