

# OPTIMALIZACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ NARZĘDZIA PODCZAS FREZOWANIA - PROCEDURA MODALNA

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI<sup>1</sup>, MAREK A. GALEWSKI<sup>2</sup>,  
MICHAŁ R. MAZUR<sup>3</sup>, NATALIA MORAWSKA<sup>4</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> marek.galewski@pg.edu.pl,

<sup>3</sup> michal.mazur@pg.edu.pl, <sup>4</sup> natmoraw@gmail.com

SŁOWA KLUCZOWE: redukcja drgań, modelowanie procesu obróbki, optymalizacja obróbki

## STRESZCZENIE

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania optymalnej prędkości obrotowej narzędzia podczas frezowania. Pierwszym etapem procedury jest walidacja parametrów modelu dyskretnego MES przedmiotu obrabianego z wynikami identyfikacji modalnej rzeczywistego obiektu. Po dopasowaniu parametrów modelu dyskretnego przedmiotu tworzony jest model hybrydowy procesu obróbki. Następnie dopasowywane są parametry symulacji i dla wybranych prędkości obrotowych narzędzia realizowane są symulacje procesu skrawania. Po ich zakończeniu, jako optymalna wybierana jest prędkość, dla której uzyskano najniższą wartość RMS drgań. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

## 1. Wstęp

W literaturze naukowej opisano wiele metod nadzorowania procesów obróbkowych, ale dotyczących przede wszystkim redukcji drgań samowzbudnych typu *chatter* [1]. Problemu optymalizacji prędkości obrotowej nie należy łączyć jedynie z tym zjawiskiem. Podczas skrawania przedmiotów wielkogabarytowych obserwuje się bowiem złożony stan drgań, a drgania typu *chatter* mają niekiedy znaczenie drugorzędne. W niniejszym

rozdziale przedstawiono autorskie rozwiązanie innowacyjne w formie procedury modalnej nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem.

## 2. Procedura modalna optymalizacji prędkości

Proponowana metoda doboru optymalnej prędkości obrotowej zapewniającej minimalizację drgań podczas frezowania polega na wyznaczeniu optymalnej prędkości obrotowej narzędzia na podstawie symulacji procesu obróbki przeprowadzonej dla dostrojonego do wyników testów modalnych modelu przedmiotu obrabianego wraz z modelem procesu skrawania.

Pierwszym etapem procedury jest walidacja parametrów modelu dyskretnego MES przedmiotu obrabianego z wynikami identyfikacji modalnej rzeczywistego obiektu. W szczególności dotyczy to częstotliwości dominujących postaci drgań własnych  $f$ , bezwymiarowych współczynników tłumienia  $\zeta$  i wektorów postaci drgań  $\Psi$ . Ocena zgodności modelu realizowana jest z wykorzystaniem kryterium MAC (ang. *Modal Assurance Criterion*) [2]:

$$MAC^{e-a}(i, j) = \frac{(\Psi_{\alpha}^{aT} \cdot \Psi_{\beta}^e)^2}{(\Psi_{\alpha}^{aT} \cdot \Psi_{\alpha}^a) \cdot (\Psi_{\beta}^{eT} \cdot \Psi_{\beta}^e)} \quad (1)$$

gdzie:

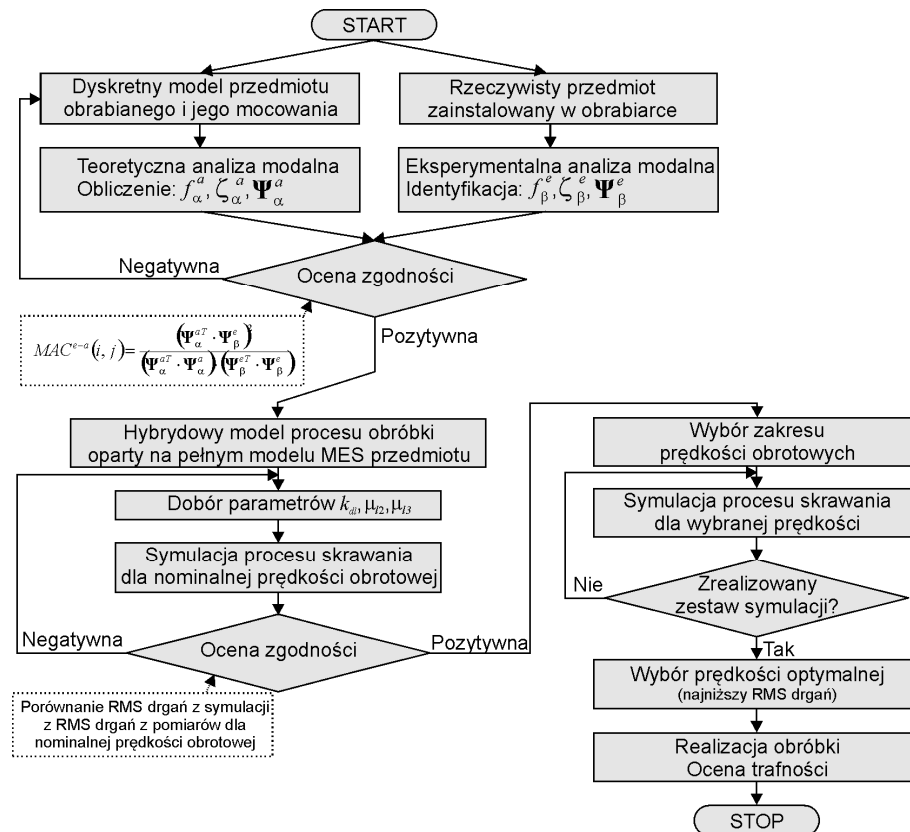
$\Psi_{\alpha}^a$  – wektor nr  $\alpha$  postaci drgań własnych, wyznaczony dla modelu MES przedmiotu,

$\Psi_{\beta}^e$  – wektor nr  $\beta$  postaci drgań własnych zidentyfikowany na podstawie badań modalnych.

Po dopasowaniu parametrów modelu dyskretnego przedmiotu tworzony jest model hybrydowy procesu obróbki. Kolejnym etapem procedury jest dopasowanie parametrów procesu skrawania tj. dynamicznego oporu skrawania powierzchniowego właściwego  $k_{d1}$  oraz współczynników siły skrawania  $\mu_2$  i  $\mu_3$ . Dobór ich wartości odbywa się iteracyjnie, poprzez realizację symulacji procesu skrawania dla nominalnej prędkości obrotowej i porównanie wyników tej symulacji (w szczególności, porównanie wartości RMS drgań) z wynikiem pomiaru drgań podczas testowej realizacji rzeczywistej obróbki przeprowadzonej dla prędkości nominalnej. Po dopasowaniu parametrów obróbki wybierany jest dopuszczalny zakres badanych prędkości obrotowych i dla wybranych prędkości z tego zakresu

realizowane są symulacje procesu skrawania. Po ich zakończeniu, jako optymalna wybierana jest prędkość, dla której uzyskano najniższą wartość RMS drgań.

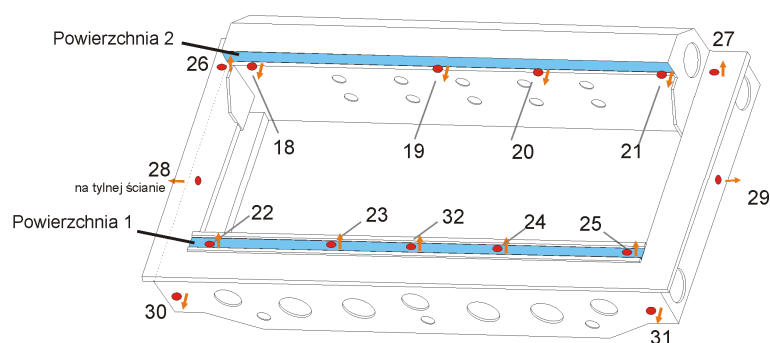
Schemat modalnej procedury optymalizacji prędkości obrotowej narzędzia w procesie frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem (WPWE), przedstawiono na rys. 1. Tworząc niestacjonarny model obliczeniowy procesu frezowania powierzchni, w celu spełnienia warunku zgodności RMS symulowanych przemieszczeń drgań z pomierzonymi podczas obróbki, przy nominalnych parametrach technologicznych stosowanych dla rozpatrywanego przedmiotu, dopasowano wartości parametrów modelu hybrydowego [3] i proporcjonalnego modelu sił skrawania [4].



**Rys. 1.** Schemat optymalizacji prędkości obrotowej narzędzia w procesie frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem – procedura modalna

### 3. Przykładowe rezultaty zastosowania metody nadzorowania

Badania eksperymentalne prowadzone były na obiekcie przedstawionym na rys 2.



Rys. 2. Schemat przedmiotu obrabianego z zaznaczonymi miejscami mocowania czujników i obrabianymi powierzchniami

Zgodnie z proponowaną procedurą przeprowadzono, w celu walidacji modelu MES, eksperymentalną analizę modalną przedmiotu obrabianego. Zidentyfikowano 15 dominujących postaci drgań własnych. Następnie wykonano obróbkę obu powierzchni dla parametrów nominalnych, standardowo stosowanych przy obróbce badanego przedmiotu w normalnym cyklu produkcyjnym. Dla powierzchni 1 wykonywane były dwa przejścia: najpierw frezowanie pełne 4-ostrzową głowicą frezową  $\phi 44$  mm, przemieszczając się względem przedmiotu od lewej strony (począwszy od okolic czujnika 22) do prawej, a następnie frezowanie współbieżne, w stronę przeciwną. Długość powierzchni 1778 mm, szerokość 57,5 mm, nominalna prędkość obrotowa freza  $n = 1300$  obr/min, prędkość posuwu  $v_f = 600$  mm/min, głębokość skrawania  $a_p = 1$  mm.

Na podstawie rezultatów obróbki dobrano parametry symulacji procesu skrawania, a następnie w cyklu symulacji wyznaczono prognozowaną wartość prędkości optymalnej, dla której ostatecznie zrealizowano proces frezowania. Do symulacji procesu frezowania wykorzystano autorski program komputerowy *Amikro4* wsparty autorskimi skryptami w środowisku *Matlab*.

Wyniki prognozy dla prędkości optymalnej i wyniki obróbki dla tej prędkości przedstawiono w tab. 1.

Podczas analizy wyników symulacji, na etapie prognozowania rezultatów dla różnych prędkości obrotowych, obserwowano następujące wskaźniki:

$RMS_{95\%}$  – wartość *RMS* drgań wyznaczona dla 95% czasu obróbki, liczonego od momentu, gdy frez w pełni (całą średnicą) wejdzie w materiał do momentu, gdy frez rozpocznie wychodzenie z materiału. Taki wybór zapobiega uwzględnianiu w *RMS* procesów przejściowych w czasie wchodzenia i wychodzenia narzędzia z przedmiotu;

$A_{max}$  – szczytowa wartość drgań w obszarze skrawania wyznaczonym dla  $RMS_{95\%}$ ;

$RMS_{A_{max}5\%}$  – wartość *RMS* wokół szczytu  $A_{max}$  (+-2,5% czasu przebiegu);

$RMS_{95\%}$  wzg. średniej - wartość *RMS* drgań wyznaczona dla 95% czasu obróbki (podobnie jak dla  $RMS_{95\%}$ ), ale obliczona względem wartości średniej z uwzględnianego przebiegu. Wskaźnik ten jest więc równoważny odchyleniu standardowemu przebiegu. Interpretować go można, jako wskaźnik poziomu drgań po skorygowaniu odkształcenia powierzchni obrabianej wynikającego z nacisku narzędzia. Odpowiada to lepiej sposobowi pomiaru drgań podczas rzeczywistej obróbki tj. pomiarowi przyśpieszeń, podczas którego pomija się „statyczne” składowe ugięcia powierzchni obrabianej / przemieszczenia przedmiotu.

Tab. 1. Wartości *RMS* przemieszczeń podczas frezowania powierzchni. Wyniki pogrubione są lepsze od uzyskanych podczas obróbki wg parametrów nominalnych;  $n$  - prędkość obrotowa narzędzia,  $v_f$  – prędkość posuwu,  $a_p$  – nominalna głębokość skrawania

|                                 | Rodzaj frezowania | $n$ [obr/min] | $v_f$ [mm/min] | $a_p$ [mm] | $RMS_{95\%w\acute{s}}$ przemieszczeń [mm] |
|---------------------------------|-------------------|---------------|----------------|------------|---|
| <b>Powierzchnia 1</b>           |                   |               |                |            |   |
| Obróbka (parametry nominalne)   | Pełne             | 1300          | 600            | 1          | 0,000287                                  |
|                                 | Współbieżne       | 1300          | 600            | 1          | 0,000955                                  |
| Symulacja (parametry nominalne) | Pełne             | 1300          | 600            | 1          | 0,000288                                  |
|                                 | Współbieżne       | 1300          | 600            | 1          |   |
| Prognoza ( $n$ optymalne)       | Pełne             | 1380          | 637            | 1          | <b>0,000268</b>                           |
|                                 | Współbieżne       | 1380          | 637            | 1          |   |
| Obróbka ( $n$ optymalne)        | Pełne             | 1380          | 637            | 1          | <b>0,000247</b>                           |
|                                 | Współbieżne       | 1380          | 637            | 1          | <b>0,000476</b>                           |

Za najważniejszy ze wskaźników przyjęto  $RMS_{95\%}$  względem średniej, a pozostałe traktowano pomocniczo. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe



wyniki symulacji z zaznaczonymi wartościami wskaźników. Na rys. 4 przedstawiono wykresy ilustrujące (dla powierzchni 1) symulowane wartości wszystkich wskaźników w funkcji prędkości obrotowej narzędzia. Na ich podstawie wybrano jako optymalną prędkość obrotową  $n = 1380$  obr/min, a następnie zrealizowano obróbkę z tą prędkością. W celu zapewnienia stałej wartości posuwu na ostrze  $f_z$ , przeskalowano wartości prędkości posuwu  $v_f$ , proporcjonalnie do zmienionych wartości prędkości obrotowej. Następnie zrealizowano obróbkę dla wybranych parametrów.

Na rys. 5 pokazano przebiegi przemieszczeń drgań uzyskanych na podstawie sygnałów zarejestrowanych w poszczególnych czujnikach umieszczonych wzdłuż powierzchni 1 przy frezowaniu pełnym z prędkością nominalną  $n = 1300$  obr/min, a na rys. 6 – z prędkością optymalną  $n = 1380$  obr/min. Wartości *RMS* przedstawione w tab. 1 są wartościami uśrednionymi z *RMS* zaznaczonych fragmentów przebiegów z poszczególnych czujników odpowiednio z rys. 5 i 6. Taki sposób wyznaczania przyjęto jako dający najbardziej zbliżone warunki analizy drgań między pomiarem w warunkach rzeczywistego procesu obróbkowego, a wynikami symulacji. Podczas symulacji drgania mierzone są względem lokalnego układu odniesienia przemieszczającego się wraz z frezem. Podczas rzeczywistej obróbki czujniki pozostają nieruchome, a frez znajduje się w ich pobliżu tylko przez pewien czas.

W porównaniu z technologią standardową, w przypadku obróbki powierzchni 1 uzyskano zdecydowane obniżenie poziomu drgań (*RMS* przemieszczeń) w zabiegach frezowania pełnego o 14% i frezowania współbieżnego o 50%. Dodatkowo towarzyszył temu wzrost prędkości obrotowej o 6% skutkujący skróceniem czasu głównego zdejmowania warstwy nadkładu (2 zabiegi) o 0,34 min, czyli o 6%.

#### 4. Wnioski

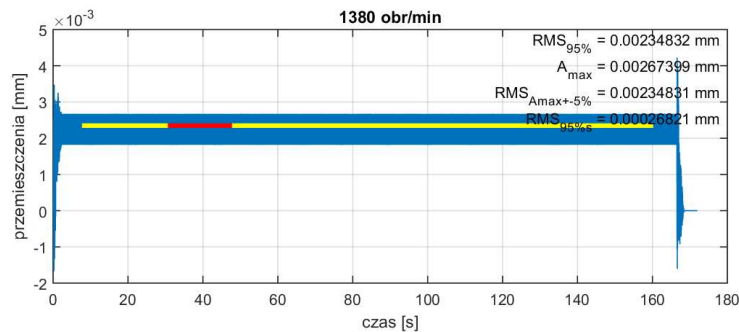
Potwierdzono skuteczność proponowanej metody nadzorowania drgań podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych, z wykorzystaniem dedykowanej techniki projektowania mechatronicznego, tj. wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem. Uzyskano zarówno redukcję drgań (szczególnie znaczącą podczas frezowania współbieżnego) jak i skrócenie czasu obróbki.

## Bibliografia

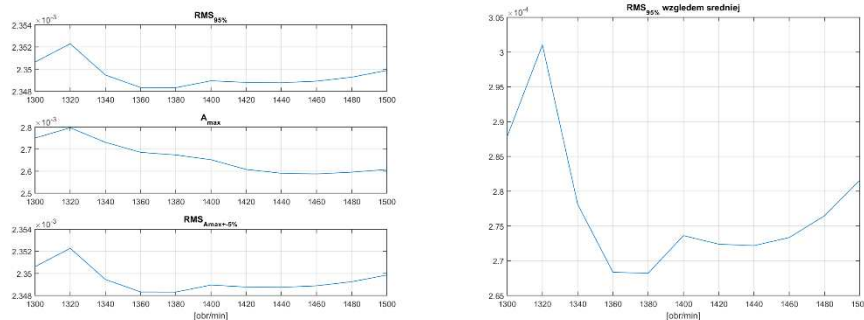
- [1] Quintana G., Ciurana J.: Chatter in machining processes: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2011, 51, 363-376.
- [2] R.J. Allemang, The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, August 2003, pp. 14-21.
- [3] Kaliński K. J.: Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Gdańsk: Wydawnictwo PG 2012
- [4] 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.

## Podziękowania

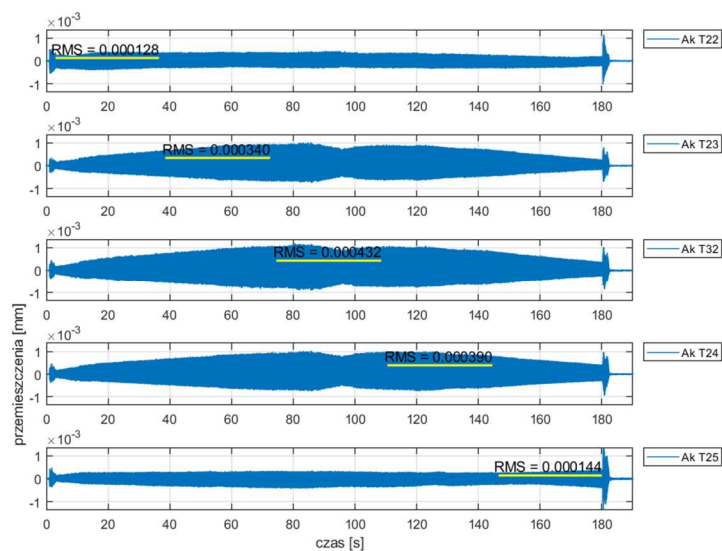
Prace badawcze zrealizowano we współpracy z PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi w ramach projektu TANGO1/266350/NCBR/2015.



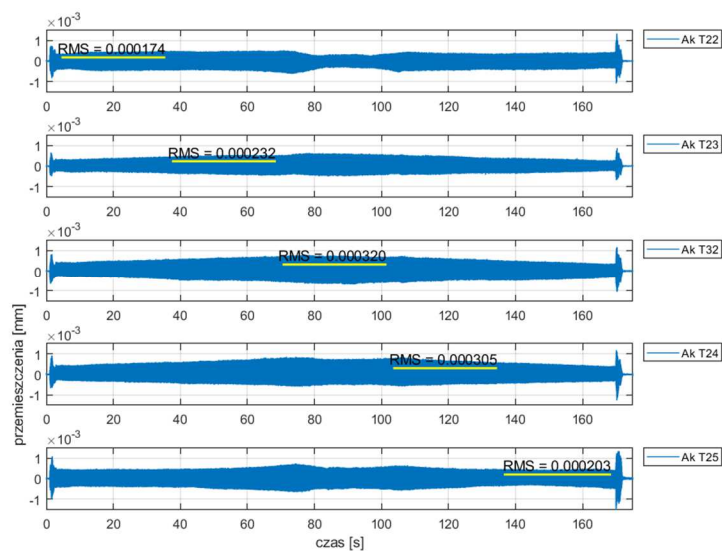
Rys. 3. Wynik symulacji drgań narzędzie-przedmiot obrabiany w procesie skrawania, procedura modalna, powierzchnia 1, prędkość obrotowa narzędzia  $n=1380$  obr/min



Rys 4. Wartości wskaźników poziomu drgań uzyskane w wyniku symulacji procesu skrawania, procedura modalna, powierzchnia 1



**Rys. 5.** Przeszyczenia drgań podczas frezowania pełnego powierzchni 1, uzyskane na podstawie pomiarów z poszczególnych akcelerometrów,  $n = 1300$  obr/min



**Rys. 6.** Przeszyczenia drgań podczas frezowania pełnego powierzchni 1, uzyskane na podstawie pomiarów z poszczególnych akcelerometrów,  $n = 1380$  obr/min