

# Metodyka unikania drgań samowzbudnych bazująca na obróbce wirtualnej

## Self-excited vibrations avoidance methodology in non-linear numerical simulation environment

PIOTR ANDRZEJ BĄK  
KRZYSZTOF JEMIELNIAK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.390

Drgania samowzbudne są jednym z najważniejszych ograniczeń wydajności obróbki i jakości wyrobu gotowego. Dobór prędkości obrotowych pozwala na ograniczenie tych drgań poprzez zakłócenie efektu regeneracji śladu. Testowanie i dobór właściwych parametrów może być znacznie ułatwione dzięki obróbce wirtualnej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** drgania samowzbudne, symulacja numeryczna, wirtualna obróbka

*A self-excited vibrations (chatter) are one of the most important limitation in machining performance and quality of finished parts. Selection of stable spindle speed can suppress self-excited vibrations occurrence, by disrupting regenerative effect. These technic can be tested during process planning via virtual machining.*

**KEYWORDS:** self-excited vibration, numerical simulation, virtual machining

Drgania samowzbudne występujące w procesie skrawania są głównym ograniczeniem wydajności i jakości obróbki oraz trwałość narzędzi i obrabiarek. Stąd wynika potrzeba określenia granicy stabilności obróbki i wskazania parametrów skrawania pozwalających uniknąć lub wygasić drgania samowzbudne. Układ obrabiarka–narzędzie–przedmiot obrabiany jest strukturą z wieloma stopniami swobody. W większości zastosowań, takich jak toczenie i frezowanie, może być zredukowany do struktury z wieloma postaciami drgań o dwóch stopniach swobody, biorąc pod uwagę główną przyczynę powstawiania drgań samowzbudnych, czyli efekt regeneracji śladu [1÷2].

### Symulacja numeryczna drgań samowzbudnych

Pomimo wygody zastosowania metody analitycznej analizy stabilności główną jej wadą jest brak możliwości lub bardzo utrudnione uwzględnianie charakterystyki systemu i zmian parametrów skrawania w przestrzeni i czasie. Podejmowane są więc próby analizy stabilności oparte na symulacji numerycznej w dziedzinie czasu [3, 4].

Metodyka oraz oprogramowanie do symulacji numerycznej nieliniowych drgań samowzbudnych przy frezowaniu zostały opracowane z wykorzystaniem podejścia opisanego w [5]. Pozwala ono na wykonanie symulacji pojedynczego przejścia z zadanymi parametrami, ciągłą symulację z modyfikacją ręczną parametrów skrawania za pomocą panelu sterowania oraz symulację programu sterującego

(kod G) dla wirtualnej weryfikacji parametrów skrawania. Na wejściu program wymaga podania parametrów skrawania, parametrów symulacji, dynamicznych współczynników sił skrawania oraz parametrów modalnych [6, 7].

### Metodyka unikania drgań samowzbudnych z wykorzystaniem selekcji stabilnych prędkości

Selekcja stabilnych prędkości obrotowych wrzeczona obrabiarki jest dobrze znaną metodą opartą na wybieraniu częstotliwości przechodzenia ostrzy równej częstotliwości rezonansowej lub drgań samowzbudnych [8÷10]. Metodyka ta została wykorzystana w oprogramowaniu do symulacji numerycznej w celu przeanalizowania zjawiska eliminacji drgań podczas symulowanej obróbki i umożliwienia łatwego wyboru stabilnych prędkości obrotowych w obróbce wirtualnej, zanim zostanie rozpoczęte realne skrawanie.

Selektor stabilnych prędkości obrotowych (SSPO) nie wymaga wiedzy na temat charakterystyk dynamicznych, których pomiar zazwyczaj bywa złożony. Jedynymi wymaganymi danymi są częstotliwość drgań samowzbudnych oraz liczba ostrzy narzędzia. Głównym celem opisywanej metodyki jest przesunięcie częstotliwości przechodzenia ostrzy w miejsce częstotliwości drgań samowzbudnych, aby uzyskać stabilne prędkości obrotowe:

$$n = 60f_{ch}/Nz$$

gdzie:  $f_{ch}$  – częstotliwość drgań samowzbudnych,  $N$  – kolejne liczby naturalne, począwszy od 1.

### Unikanie drgań samowzbudnych w kodzie sterującym z pomocą metodyki SSPO

Kody sterujące, znane jako kody G lub ISO, są wykorzystywane do programowania maszyn sterowanych numerycznie (CNC). Kody te zawierają szereg informacji dotyczących m.in. położenia osi maszyny, prędkości obrotowej, posuwu.

Na rys. 1 przedstawiono przykład obróbki wirtualnej z występującymi okazjonalnie drganiami samowzbudnymi. Wykorzystano w nim następujące parametry:  $m_{x1} = 15$  kg,  $c_{x1} = 2$  Ns/mm,  $k_{x1} = 40$  kN/mm,  $m_{y1} = 10$  kg,  $c_{y1} = 1,5$  Ns/mm,  $k_{y1} = 60$  kN/mm, gdzie  $m$ ,  $c$  i  $k$  to odpowiednio masa, tłumienie i sztywność modalna. Częstotliwości własne:  $f_{x1} = 260$  Hz,  $f_{y1} = 390$  Hz. Dynamiczne współczynniki sił skrawania:  $C_r = 1000$  N/mm<sup>2</sup>;  $C_t = 1500$  N/mm<sup>2</sup>;  $m_r = 0,44$ ;  $m_t = 0,28$ . Ustawienia symulacji: czas  $t$  = taki jak w kodzie G, częstotliwość próbkowania:  $f_s = 10$  kHz. Warunki skrawania: średnica narzędzia  $D = 30$  mm, osiowa głębokość skrawania  $a_p = 5$  mm, promieniowa głębokość skrawania

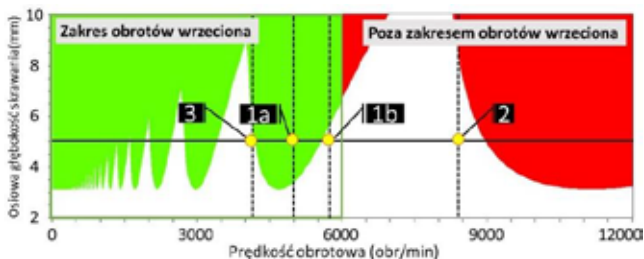
\* Mgr inż. Piotr Andrzej Bąk (piotr.andrzej.bak@zaoios.pw.edu.pl), prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak (k.jemielniak@wip.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji

$a_e = 10$  mm, posuw na ostrze  $f_z = 0,08$  mm/ostrze, liczba ostrzy  $z = 2$ , kąt pochylenia linii śrubowej  $\lambda_s = 10$  stopni, promień naroża  $r_\epsilon = 0,5$  mm, kierunek frezowania – zmienny, jak w G-kodzie, maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona maszyny  $n_{max} = 6000$  obr/min. W obróbce wirtualnej został wykorzystany kod G: G1 X0 Y0 Z-5 S5000 F0,08; G1 X100; G1 Y100 S5700; G1 X0 S5000; G1 Y0 S5700; G1 X50 Y50 S5000; G1 X75 Y75; G1 X25 S5700; G1 Y25; G1 X75 S5000; G1 Y75 S5700.



Rys. 1. Obróbka wirtualna w oparciu o program sterujący

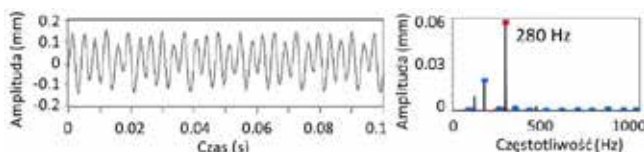
Na podstawie charakterystyk wyznaczono granicę stabilności (krzywą workową) metodą analityczną [11] – jako punkt odniesienia dla wyników symulacji numerycznej (rys. 2).



Rys. 2. Wykres krzywych workowych

W programie sterującym zaprogramowano dwie prędkości obrotowe –  $n_{1a} = 5000$  obr/min oraz  $n_{1b} = 5700$  obr/min, które są oznaczone na wykresie krzywych workowych (rys. 2). Można zauważyć, iż prędkość obrotowa  $n_{1a}$  jest w niestabilnym regionie wykresu krzywych workowych wraz z wystąpieniem drgań samowzbudnych na wykresie obróbki wirtualnej na rys. 1. Prędkość obrotowa  $n_{1b}$  jest w stanie stabilnym. W celu uzyskania obróbki wirtualnej bez drgań samowzbudnych metodyka SSPO została zastosowana do prędkości obrotowej  $n_{1a}$ .

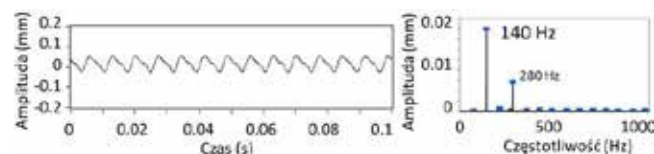
Podczas obróbki wirtualnej z prędkością obrotową  $n_{1a}$  drgania samowzbudne zostały rozpoznane automatycznie z wykorzystaniem metodyki wykrywania drgań samowzbudnych opisanej w [5]. Rozpoznana częstotliwość to  $f_{ch} = 280$  Hz na rys. 3. W celu wygaszenia drgań samowzbudnych częstotliwość przechodzenia ostrzy zostanie zmieniona na 280 Hz.



Rys. 3. Wyniki symulacji podczas drgań (pkt 1a na rys. 2)

Wykorzystując przytoczony wcześniej wzór, dla  $N = 1$ , obliczona została prędkość wrzeciona 8400 obr/min – pkt 2 na rys. 2. Jednakże musimy wziąć pod uwagę ograniczenia prędkości obrotowej wrzeciona  $n_{max} = 6000$  obr/min. W celu uzyskania stabilnych warunków wykorzystany został wzór

z  $N = 2$ , aby uzyskać kolejną sugerowaną prędkość obrotową 4200 obr/min – pkt 3 na rys. 2. Po zmianie prędkości obrotowej uzyskana została stabilna obróbka wirtualna. Pojedyncza symulacja zaprezentowana jest na rys. 4, a cała obróbka wirtualna bez wystąpienie drgań samowzbudnych – na rys. 5.



Rys. 4. Wyniki symulacji bez drgań (pkt 3 na rys. 2)



Rys. 5. Obróbka wirtualna bez drgań samowzbudnych

## Podsumowanie

Metodyka unikania drgań samowzbudnych pozwala na wyznaczenie parametrów skrawania wolnych od drgań samowzbudnych.

Wirtualna maszyna w połączeniu z metodyką SSPO może być wykorzystana do weryfikacji parametrów skrawania w celu zwiększenia produktywności przy braku drgań samowzbudnych.

**Badania realizowane w ramach Projektu „System ekspercki projektowania procesu obróbki skrawaniem elementów lotniczych – CYBERTECH”, Nr POIR.01.02.00-00-0013/15, Program Operacyjny Inteligentny Rozwój.**

## LITERATURA

- Budak E., Tunc L.T. "Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach". *CIRP Annals*. 59 (2010): pp. 403÷408.
- Mahdi E. "Chatter stability of turning and milling with process damping". PhD thesis, The University of British Columbia, Vancouver, 2010.
- Altintas Y., Weck M. "Chatter stability of metal cutting and grinding". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 53/2 (2004): pp. 619÷642.
- Lin S.-Y., Chen C.-K. "Construction of a dynamic cutting force model for oblique cutting". *Proc. IMechE 224 Part B: J. Engineering Manufacture*. 224, No. 3 (2010): pp. 361÷372.
- Bąk P.A., Jemielniak K. "Numerical simulation of self-excited vibrations under variable cutting conditions". *Journal of Machine Engineering*. 15.1 (2015): pp. 36÷45.
- Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. "Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping". *CIRP Annals*. 57 (2008): pp. 371÷374.
- Bąk P.A., Jemielniak K. "Automatic experimental modal analysis of milling machine tool spindles". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. (2016): 0954405415623485.
- Smith S., Tlustý J. "Stabilizing chatter by automatic spindle speed regulation". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 41.1 (1992): pp. 433÷436.
- Delio T., Tlustý J., Smith S. "Use of audio signals for chatter detection and control". *Journal of engineering for industry*. 114.2 (1992): pp. 146÷157.
- Bediaga I. et al. "An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49.5 (2009): pp. 384÷394.
- Altintas Y., Budak E. "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling". University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, *Annals of CIRP*. Vol. 44, 1 (1995).