

# Doświadczalne i symulacyjne badania stabilności frezowania

## Experimental and simulated milling stability tests

PIOTR ANDRZEJ BĄK  
KRZYSZTOF JEMIELNIAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.153>  
English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Drgania samowzbudne istotnie zmniejszają wydajność obróbki frezowaniem, pogarszają jakość powierzchni obrabianej oraz trwałość narzędzi. Jednym ze sposobów uniknięcia tych drgań jest modyfikacja parametrów skrawania w oparciu o wyniki analizy stabilności. W tym celu można wykorzystać metodę symulacji numerycznej drgań samowzbudnych w dziedzinie czasu. Zaprezentowano porównanie wyników symulacji numerycznej z wynikami badań doświadczalnych przeprowadzonych na frezarce. Wyniki te potwierdzają poprawność zastosowanego modelowania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** symulacja numeryczna, drgania samowzbudne, frezowanie

*Self-excited vibrations significantly reduce the milling productivity, deteriorate the quality of machined surface and tool life. One of the ways to avoid these vibrations is to modify the cutting parameters based on the stability analysis results. A method of numerical simulation of self-excited vibrations in the time domain can be used for this purpose. A comparison of numerical simulation results with those from experiments conducted using a milling machine is presented. The results confirm the correctness of applied modeling.*

**KEYWORDS:** simulation numerical, vibration self-excited, milling

Obecność drgań samowzbudnych ma znaczący wpływ na jakość powierzchni obrabianej, wydajność obróbki oraz trwałość narzędzi i obrabiarek. Podczas uruchamiania produkcji dąży się do unikania drgań samowzbudnych.

Określenie granicy stabilności polega na znalezieniu głębokości skrawania  $a_p$ , powyżej której układ staje się niestabilny [1, 2]. Można ją wyznaczyć doświadczalnie poprzez przeprowadzenie frezowania na płasko ze zwiększaniem osiowej głębokości skrawania aż do wystąpienia drgań samowzbudnych, co jest najdokładniejsze, choć kłopotliwe i czasochłonne. Obserwacja śladów obróbki pozostawionych na powierzchni pozwala łatwo rozpoznać, przy jakiej głębokości skrawania granica stabilności zostaje przekroczona i pojawiają się drgania samowzbudne. Metoda ta jest często stosowana, mimo że może prowadzić do istotnych błędów [3].

Alternatywą wobec badań doświadczalnych jest symulacja numeryczna w dziedzinie czasu, mająca określić graniczną głębokość skrawania [4, 5]. Symulacja numeryczna pozwala na obliczenie przebiegów czasowych sił oraz drgań podczas obróbki.

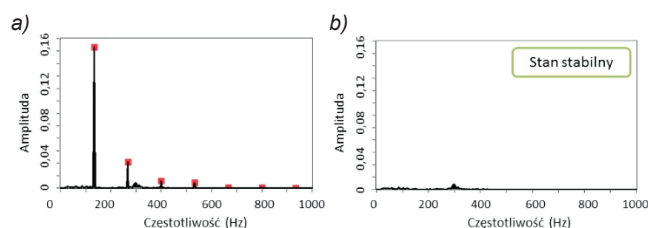
Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule jest weryfikacja doświadczalna dokładności symulacji numerycznej przez porównanie wyników uzyskiwanych tą metodą z otrzymanymi w trakcie rzeczywistego frezowania. Istotnym elementem występującym zarówno w symulacji, jak i w badaniach doświadczalnych jest wykrywanie drgań samowzbudnych, pozwalające na określenie momentu, w którym rosnąca osiowa głębokość frezowania przekracza wartość graniczną.

### Wykrywanie drgań samowzbudnych w procesie frezowania

Ocena stabilności ma na celu rozpoznanie obecności drgań samowzbudnych podczas obróbki rzeczywistej i symulacji obróbki w dziedzinie czasu. W tym celu wykorzystywany jest sygnał siły lub drgań. Jednakże w przebiegach czasowych występują drgania wymuszone, związane z częstotliwością przechodzenia ostrzy i obrotu wrzeciona, oraz ich harmoniczne. Przy toczeniu – w którym drgania wymuszone procesem skrawania nie występują – za kryterium stabilności można przyjąć przekroczenie przez amplitudę drgań określonego progu. Ten sposób nie może być wykorzystany przy frezowaniu, gdzie wchodzenie ostrzy w materiał powoduje drgania wymuszone układu. Ocena stabilności musi zatem zawierać odróżnienie drgań wymuszonych od drgań samowzbudnych.

Wykorzystana w prezentowanej metodzie metodyka oceny stabilności polega na odfiltrowaniu z widma FFT częstotliwości drgań wymuszonych wyznaczonej jako częstotliwość przechodzenia ostrzy i jej wyższe harmoniczne [6]. Rzeczywista prędkość obrotowa wrzeciona ma pewne odchylenie od zadanej i z tego względu częstotliwości drgań wymuszonych są także odmienne od teoretycznych dla zadanej prędkości, a to będzie mieć duże znaczenie dla poprawności wyników analizy. A zatem istotne staje się rozpoznanie rzeczywistej prędkości obrotowej wrzeciona.

Przykład zastosowanej metodyki zaprezentowano na rys. 1 oraz 2. Na rys. 1 pokazano widmo drgań w czasie

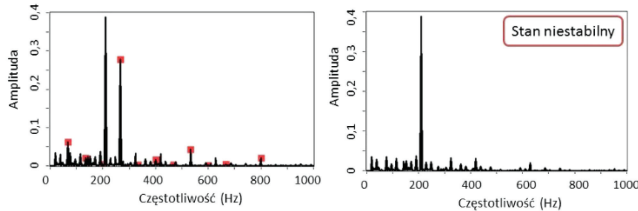


Rys. 1. Wykrywanie drgań samowzbudnych – stan stabilny

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

stabilnej obróbki. Na rys. 1a rozpoznano i oznaczono częstotliwości wymuszenia, wyeliminowane na rys. 1b. Proces został oceniony jako stabilny.

Na rys. 2 widać widmo częstotliwościowe uzyskane w czasie obróbki niestabilnej, w którym rozpoznano częstotliwości wymuszenia i po ich usunięciu pozostała jedna postać drgań o znaczącej amplitudzie, a zatem stan procesu został oceniony jako niestabilny.



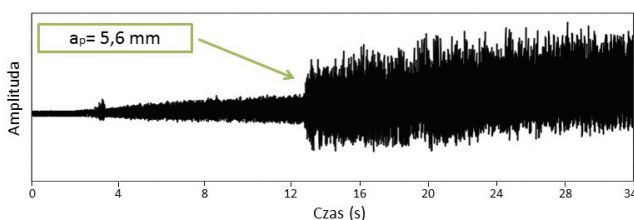
Rys. 2. Wykrywanie drgań samowzбудnych – stan niestabilny

### Doświadczalne określenie stabilności obróbki

Badania doświadczalne – których celem było eksperymentalne rozpoznanie granicznej głębokości skrawania poprzez frezowanie z rosnącą w czasie osiową głębokością – przeprowadzono w sposób opisany w [3]. Frezowany materiał to aluminium PA6. Prędkość obrotowa była zmieniana w zakresie od 1000 do 6000 obr/min przy posuwie 0,03 mm/ostrze. Wykorzystano frez 2-ostrzowy, niepokrywany SILMAX 179100C, o średnicy  $\varnothing 10$  mm. Kąt nachylenia powierzchni w badaniach wynosił  $3^{\circ}28'$ , co na długości przedmiotu obrabianego 100 mm dało zmianę głębokości skrawania o 6 mm.

Rozpoznanie drgań samowzбудnych w próbach skrawania prowadzono na 2 sposoby. Pierwszym była obserwacja śladu obróbki i identyfikacja miejsca, w którym pojawiają się ślady reprodukcji drgań na powierzchni obrobionej. Drugim była analiza przebiegu zarejestrowanych drgań opisaną wcześniej metodą detekcji drgań samowzбудnych. Uzyskana pełna zgodność potwierdziła przydatność metody.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowo zarejestrowane drgania w czasie frezowania z prędkością 3500 obr/min, przy głębokości frezowania  $a_p = 5,6$  mm, w tym miejsce, w którym wykryto drgania samowzбудne.

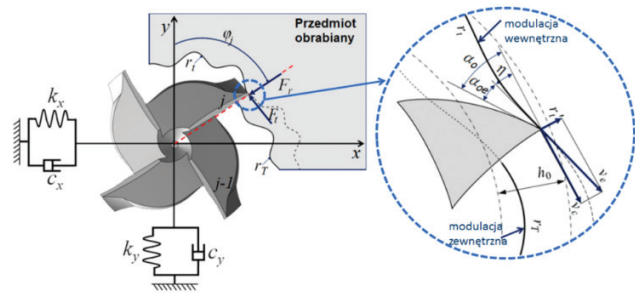


Rys. 3. Przebieg drgań w czasie frezowania

### Symulacja numeryczna w dziedzinie czasu

Symulacja numeryczna pozwala na obliczenie przebiegów czasowych sił oraz drgań podczas obróbki. W połączeniu z metodyką oceny stabilności można obiektywnie porównać doświadczalną i symulowaną graniczną głębokość skrawania. Podstawy symulacji numerycznej drgań samowzбудnych przedstawiono w [7, 8].

Wykorzystano autorskie oprogramowanie do symulacji numerycznej opierające się na metodzie Tlustego i Ismaila [9, 12], bazującej na relacjach opisujących ruch jednostajnie przyspieszony w układzie masowo-tłumiąco-sprężystym dla jednego stopnia swobody. Dzięki super-



Rys. 4. Schemat dynamicznego układu OUPN podczas frezowania [8]

pozycji pojedynczych stopni swobody możliwe jest opisanie rzeczywistego obiektu jako układu o wielu postaciach drgań o dwóch stopniach swobody [1, 2]. Pozwala to na uwzględnienie głównych czynników, które warunkują wystąpienie drgań samowzбудnych, czyli sprzężenia przez przemieszczenie oraz reprodukcji drgań (rys. 4).

Danymi wejściowymi do symulacji numerycznej – które wymagają przeprowadzenia badań wstępnych, czyli analizy symulowanego obiektu – są dynamiczne współczynniki sił skrawania, opisujące siły skrawania, i parametry modalne będące opisem charakterystyki dynamicznej narzędzia, oprawki i wrzeciona.

### Badania charakterystyki dynamicznej narzędzia

Analiza modalna wykorzystana w badaniach to metoda z jednym wejściem i jednym wyjściem [10, 11]. W testach modalnych został użyty młotek modalny do wymuszenia drgań oraz akcelerometr do ich pomiaru. Pomiaru te zostały zrealizowane dla osi X i Y maszyny. Konfiguracja taka jest wystarczająca do uzyskania funkcji odpowiedzi częstotliwościowej, która jest podstawą do obliczenia parametrów modalnych. Parametry te są wymaganymi danymi wejściowymi do symulacji numerycznej opisującymi charakterystykę dynamiczną wrzeciona, oprawki i narzędzia. W tabl. I zestawiono parametry modalne dla osi X, a w tabl. II – parametry modalne dla osi Y.

TABLICA I. Parametry modalne dla osi X

Częstotliwość modalna, Hz	Masa modalna, kg	Tłumienie modalne, Ns/m	Sztywność, kN/m
937	1,376	505,50	47 765
597	9,273	2 106,4	130 868
528	24,70	5 134,1	272 827

TABLICA II. Parametry modalne dla osi Y

Częstotliwość modalna, Hz	Masa modalna, kg	Tłumienie modalne, Ns/m	Sztywność, kN/m
908	2,279	396,62	74 247
616	5,750	2 028,7	86 468

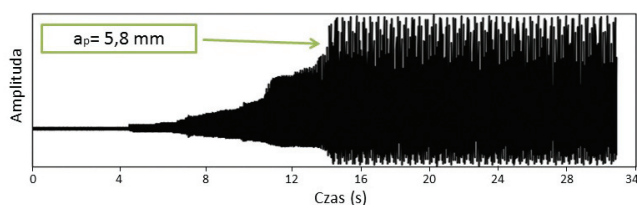
### Badania charakterystyki procesu skrawania

Badania dynamicznych współczynników sił skrawania mają na celu określenie charakterystyki procesu skrawania [1]. Polegają na frezowaniu ze stałą głębokością osiową skrawania w stabilnych warunkach. Głębokość osiowa skrawania musi być tak dobrana, aby nie wystąpiły drgania samowzбудne. Następnie określane są średnie wartości

sił w każdej osi maszyny i zostają one przeliczone na dynamiczne współczynniki sił skrawania. W efekcie obliczono zgodnie z metodyką [13] dynamiczne współczynniki:  $K_{rc} = 685 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_{re} = 26 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_{tc} = 380 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_{te} = 13 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_{ac} = 267 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_{ae} = 14 \text{ N/mm}^2$ . Obliczone parametry są danymi wejściowymi do symulacji numerycznej.

### Wyniki symulacji numerycznej

Obliczone na podstawie badań wstępnych przebiegi sił i drgań w obu osiach oceniono pod kątem rozpoznania obecności drgań samowzbudnych. Przykładowy wynik symulacji zaprezentowano na rys. 5 dla prędkości obrotowej 3500 obr/min, gdzie wykryto drgania samowzbudne przy głębokości frezowania  $a_p = 5,8 \text{ mm}$ . W tabl. III porównano wyniki uzyskane metodą symulacji numerycznej z badaniami doświadczalnymi.



Rys. 5. Przebieg czasowy drgań w czasie symulacji frezowania

### Zestawienie wyników

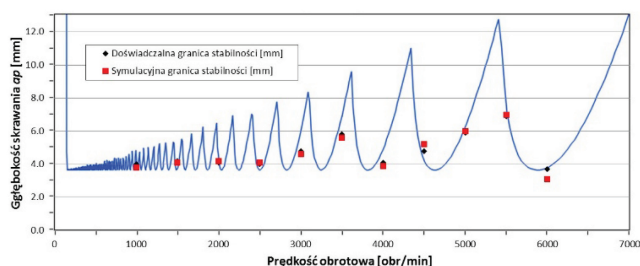
Przeprowadzone doświadczenia stabilności oraz przebiegi sił i drgań obliczone z wykorzystaniem symulacji pozwalają na porównanie wyników.

### Wnioski

Wyniki doświadczalne przyjęto jako podstawę do dalszej analizy. Średnia różnica między wynikami granicy stabilności uzyskanej w sposób doświadczalny i w wyniku symulacji numerycznej wynosi 0,2 mm, co daje średnią rozbieżność 5%. Średnia różnica między wynikami granicy stabilności uzyskanej w sposób doświadczalny i analitycznie wynosi 0,5 mm, co daje średnią rozbieżność 8%.

TABLICA III. Porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami

Prędkość obrotowa, obr/min	Doświadczalna granica stabilności, mm	Analityczna granica stabilności, mm	Symulacyjna granica stabilności, mm
1000	4,0	3,7	3,8
1500	4,2	4,0	4,1
2000	4,1	3,8	4,2
2500	4,0	3,6	4,1
3000	4,8	6,1	4,6
3500	5,8	6,0	5,6
4000	4,1	4,5	3,9
4500	4,8	4,3	5,2
5000	5,9	5,8	6,0
5500	6,9	7,1	7,0
6000	3,7	3,9	3,1



Rys. 6. Symulowana analityczna i doświadczalnie określona granica stabilności

Na podstawie analizy widać 2-krotnie mniejszą różnicę między wynikami symulacji numerycznej i wynikami doświadczalnymi niż między wynikami z metody analitycznej w porównaniu z wynikami uzyskanymi w sposób doświadczalny.

Porównanie granicznej głębokości skrawania uzyskanej doświadczalnie oraz z symulacji numerycznej w dziedzinie czasu ukazuje zbliżone wartości, co potwierdza poprawność symulacji numerycznej. Rozbieżności mogą wynikać z niedokładności badań wstępnych.

Wyniki analizy potwierdzają, że symulacja numeryczna, pomimo zwiększonego kosztu obliczeniowego, jest dokładniejsza niż analityczne metody obliczania granicy stabilności.

### Badania realizowane w ramach projektu „System ekspercki projektowania procesu obróbki skrawaniem elementów lotniczych – CYBERTECH”, Nr POIR.01.02.00-0013/15, 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): s. 403–408.
- Mahdi E. "Chatter stability of turning and milling with process damping". PhD thesis. Vancouver: The University of British Columbia, 2010.
- Bąk P.A., Jemielniak K. „Zastosowanie rampy do wyznaczania granicy stabilności przy frezowaniu”. *Mechanik*. 87, 8 (2014): s. 15–22.
- Altintas Y., Weck M. "Chatter stability of metal cutting and grinding". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 53, 2 (2004): s. 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, 3 (2010): s. 361–372.
- Bąk P.A., Jemielniak K. "Numerical simulation of self-excited vibrations under variable cutting conditions". *Journal of Machine Engineering*. 15, 1 (2015).
- Jemielniak K., Widota A. "Numerical simulation of non-linear chatter vibration in turning". *Int. J. of Mach. Tools & Manuf.* 29 (1989): s. 239–247.
- Jemielniak K., Wypysiński R. "Numerical simulation of self-excited vibrations-review of methods, potential advantages and pitfalls". *Advanced Manufacturing Engineering and Technologies*. NEWTECH 2013, Stockholm, Sweden (27–30 października 2013): s. 199.
- Tlustý J., Ismail F. "Basic non-linearity in machining chatter". *CIRP Annals*. 30 (1981): s. 21–25.
- Bąk P.A., Jemielniak K. „Automatyczna analiza modalna wrzeciona frezarki”. *IM Inżynieria Maszyn*. 17 (2012): s. 69–80.
- Bąk P.A., Jemielniak K. "Improved automatic experimental modal analysis of machine tool spindles". *Advanced Manufacturing Engineering and Technologies*. NEWTECH 2013, Stockholm, Sweden (27–30 października 2013): s. 283.
- Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W., Yang Y. "A novel cutting force modelling method for cylindrical end mill". *Applied Mathematical Modelling*. 34 (2010): s. 823–836.
- Altintas Y., Eymian M., Onozuka H. "Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping". *CIRP Annals* 57.1 (2008): s. 371–374.