Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA ROCZNA
Projektu Kluczowego
12-13 Grudnia 2011

ZB 5

Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium
Modern mechanical working of magnesium and aluminium alloys

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

Wyniki badań
Results

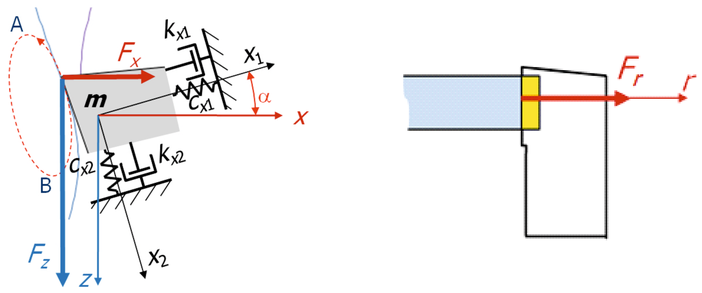
Symulacja numeryczna nieliniowych drgań samowzbudnych przy toczeniu

Numerical simulation of nonlinear chatter in turning

Ogólne informacje
Klasyczna analiza stabilności oparta jest na rozwiązywaniu równań stabilności dynamicznego układu OUPN. Mimo bardzo znacznego rozwoju takich metod, mają one istotne ograniczenie – bardzo trudne lub wręcz niemożliwe jest uwzględnienie w nich nieciągłości, nieliniowości oraz zmienności w czasie parametrów analizowanego układu.
Podstawową cechą numerycznej symulacji drgań jest wyznaczanie kolejnych położeń, prędkości i przyspieszeń drgających elementów, w kolejnych iteracjach (chwilach czasu) na podstawie stanu tych parametrów w poprzedniej iteracji oraz aktualnie działających na układ sił. Siły te wyznaczane są także w każdym kroku iteracji na podstawie chwilowego (aktualnego) przekroju warstwy skrawanej i prędkości skrawania. Takie podejście umożliwia uwzględnienie dowolnie skomplikowanego opisu tak procesu skrawania jak układu OUPN.

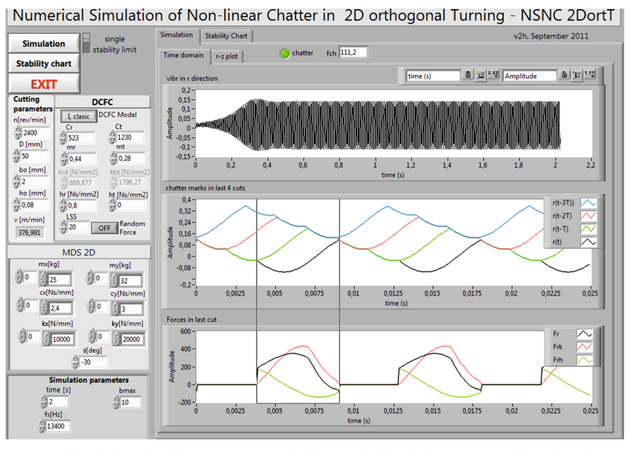
General information
The conventional stability analysis is based on linear differential equations of machine tool – workpiece - cutting force (MWF) system . Despite profound development of analytical methods they have important limitations – it is very difficult, if not impossible, to take into account even basic nonlinearities of the process and variation in time of MWF system.
Basic principle of numerical simulation of machine tool chatter is calculation of current cutting forces dependent on current displacements and velocities of the system. This enables calculation of accelerations of the system and prediction and prediction of displacements and velocities in the next iteration. Cutting forces can be calculated for momentary cutting conditions, including any nonlinearities. Also cutting force model can be nonlinear or even given in form of an array.

Toczenie swobodne o dwóch stopniach swobody x-z
Toczenie swobodne o dwóch stopniach swobody w płaszczyźnie x-z przedstawiono na rys.1. Drgania w kierunkach x1 i x2 są rzutowane na kierunek x powodując zmiany grubości WS (jak w układzie o jednym stopniu swobody) ale powodują również zmiany chwilowej prędkości skrawania.
Równie ważne jest uwzględnienie sprzężenia przez przemieszczenie, jako mechanizmu powstawania, wzmacniania lub osłabiania drgań w zależności od konfiguracji głównych osi sztywności (kąta alfa). Polega on na przekazywaniu energii do układu MDS dzięki ruchowi narzędzia względem przedmiotu obrabianego po zamkniętej krzywej, dzięki czemu gdy układ pobiera energię (ruch od A do B) grubość WS i siła skrawania są większe, niż gdy układ oddaje energię (ruch od B do A).



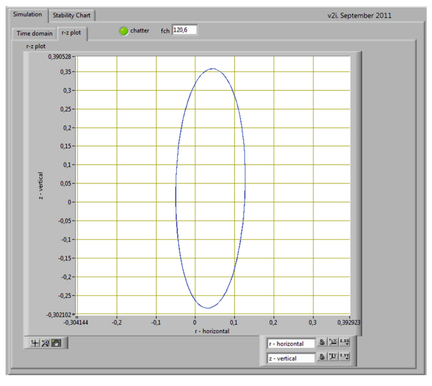
Rys.1. Toczenie swobodne 2D w płaszczyźnie x-z (widok w płaszczyźnie Pr – po lewej i Pr – po prawej)
Fig.1. Model of 2D orthogonal turning in the plane x-z (Pf – left and Pr – right)

Na rys. 2 przedstawiono panel czołowy programu w podstawowym trybie pracy - symulacja drgań samowzbudnych dla jednych, określonych przez operatora warunków symulacji. Warunki prowadzenia symulacji określa operator przy pomocy zadajników po lewej stronie panelu czołowego.



Rys.2. Panel czołowy programu w trybie symulacji pojedynczego przebiegu drgań.
Fig.2. The front panel of the program in single simulation mode of chatter

Oprogramowanie pozwala również na obserwację krzywej zakreślanej przez ostrze w czasie drgań, co ma znaczenia głównie dydaktyczne, umożliwiające lepsze zrozumienie obserwowanych zjawisk, zwłaszcza sprzężenia przez przemieszczenie (rys. 3).
Zmieniając pozycję przełącznika „single-stability limit", program realizuje szereg symulacji zmierzających do wyznaczenia na ich podstawie granicy stabilności. Panel czołowy pokazuje zależność granicy stabilności od częstotliwości drgań (base lobe) wyznaczoną wg zależności (1), zależność kąta przesunięcia fazowego od częstotliwości drgań (phase shift) (wzór 2), oraz krzywą workową (Stability lobe diagram) wyznaczoną wg wzorów (1), (2) i (3).



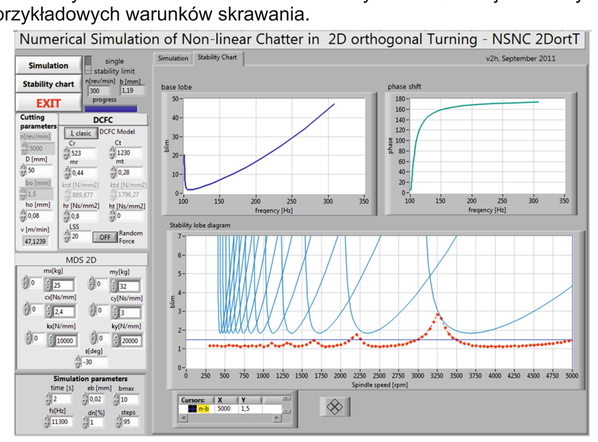
Rys.3. Wykres przemieszczeń narzędzia w płaszczyźnie XZ
Fig.3. The plot of tool movements in XZ plane

$$b_{\lim} = \frac{c\omega}{k_{rd}\sin\varphi} \quad (1)$$

$$\varphi = 2\,arctg\frac{k\left[\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 - 1\right]}{c\omega} \quad (2)$$

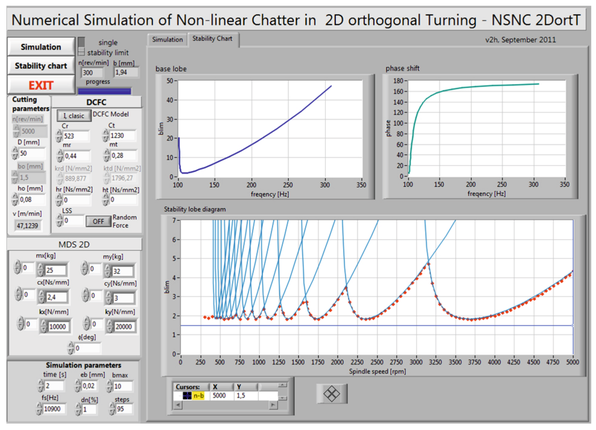
$$n = \frac{60\omega / z}{2\pi N - \varphi} \quad (3)$$

W trzeciej zakładce (Stability Chart) widoczna jest granica stabilności wyznaczona analityczne dla układu liniowego o jednym stopniu swobody (niebieska linia) traktowana jedynie orientacyjnie, jako punkt odniesienia. Jeśli przełącznik z prawej strony klawisza Simulation zostanie ustawiony w położenie dolne (stability limit), wtedy program wykonuje wyznaczenie granicy stabilności w oparciu o kolejne symulacje wg opracowanego algorytmu. Użytkownik ma możliwość obserwowania na bieżąco przebiegów symulacji. Wprowadzona przykładowa szerokość warstwy skrawanej (b=2.12 mm) jest w tej symulacji odległa od granicy stabilności, stąd stosowana jest niska częstotliwość próbkowania (fs=1100Hz) - co wyraźnie widać na wykresach sił i śladów obróbki. Na rys. 4 widoczna jest tak wyznaczona granica dla przykładowych warunków skrawania.



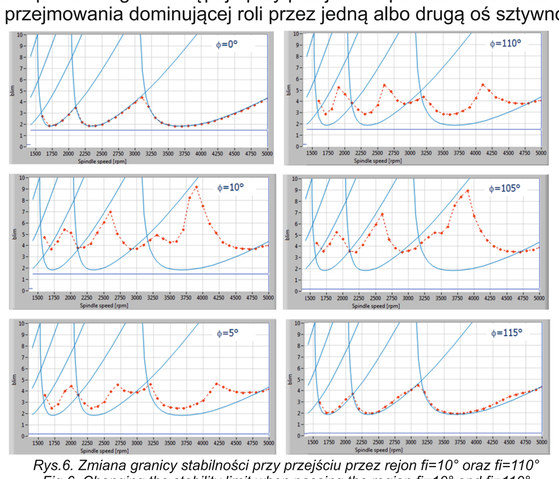
Rys.4. Panel czołowy programu w trybie wyznaczania granicy stabilności
Fig.4. The front panel on the mode of stability boundary determination

Na rys. 5 przedstawiono wynik symulacyjnego poszukiwania granicy stabilności bez tłumienia procesu skrawania (h_r=0 i LSS =0) przy kącie fi=0° – wtedy układ sprowadza się do liniowego o jednym stopniu swobody. Jak widać, granica stabilności wyznaczona metodą symulacji numerycznej jest zgodna z tą wyznaczoną analitycznie, co świadczy o poprawności algorytmu symulacji.



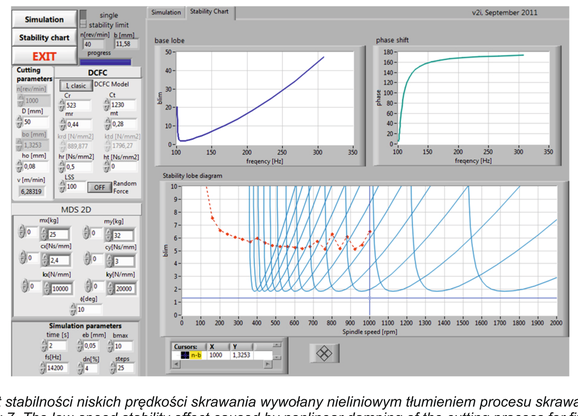
Rys.5. Wygląd ekranu po automatycznym wyznaczeniu granicy stabilności dla układu – widoczna zgodność wyników symulacji i obliczeń analitycznych
Fig.5. The screen after automated determination of the stability limits - compatibility of the simulation results and analytical calculations is visible

Testowanie programu NSNC - toczenie swobodne 2D
W celu sprawdzenia poprawności działania oraz przydatności programu przeprowadzono kilka eksperymentów numerycznych.
Kąt fi określa położenie osi głównych sztywności w stosunku do osi r – kierunku wrażliwego, w którym przemieszczenia powodują zmiany grubości WS. W czasie testów zaobserwowano, iż szybka zmiana postaci drgań następuje przy przejściu w pobliżu fi=10° oraz fi=110°.
Wynika ona z przejmowania dominującej roli przez jedną albo drugą oś sztywności układu.



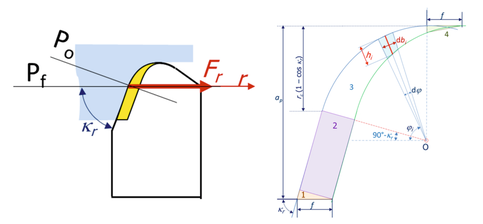
Rys.6. Zmiana granicy stabilności przy przejściu przez rejon fi=10° oraz fi=110°
Fig.6. Changing the stability limit when passing the region fi=10° and fi=110°

Sprawdzono również oddziaływanie nieliniowego tłumienia procesu skrawania na granicę stabilności. Na rys. 7 przedstawiono wyniki zautomatyzowanego poszukiwania granicy stabilności dla warunków podobnych jak na rys. 5, z tym że tu założono h_r=0,5 oraz LSS=100. Wyraźnie widać charakterystyczne zwiększanie się stabilności przy niskich prędkościach obrotowych, czyli tzw. efekt stabilności niskich prędkości LSS – Low Speed Stability.



Rys.7. Efekt stabilności niskich prędkości skrawania wywołany nieliniowym tłumieniem procesu skrawania dla fi=10°
Fig.7. The low-speed stability effect caused by nonlinear damping of the cutting process for fi=10°

Toczenie nieswobodne o dwóch stopniach swobody x-y
Toczenie nieswobodne w układzie o dwóch stopniach swobody w płaszczyźnie x-y przedstawiono na rys. 8. Od swobodnego nieortogonalnego różni się zasadniczo kształtowaniem przekroju poprzecznego WS, który jest tu znacznie bardziej skomplikowany ze względu na udział naroża. Grubość WS nie jest tu stała wzdłuż całej krawędzi, lecz zmienna.

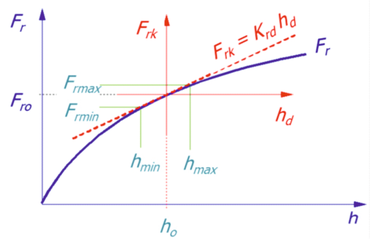


Rys.8. Toczenie nieswobodne o dwóch stopniach swobody (widok w płaszczyźnie P_r)
Fig.8. Model of 2D oblique cutting in the plane P_r

W opracowanym programie zastosowano dwa modele zmiennej składowej siły skrawania pochodzącej od grubości WS:
1) Model I, klasyczny, oparty na linearyzacji zależności potęgowej
Zmienność grubości warstwy skrawanej jest stosunkowo powolna - fala nacinana na powierzchni obrobionej jest bardzo wydłużona, a jej nachylenie nie przekracza praktycznie 2-3 stopni. Stąd można przyjąć, że równanie opisujące zależność siły posuwowej (promieniowej) od grubości warstwy skrawanej ma postać:

$$F_r = C_r b h^{(1-mr)} \quad (4)$$

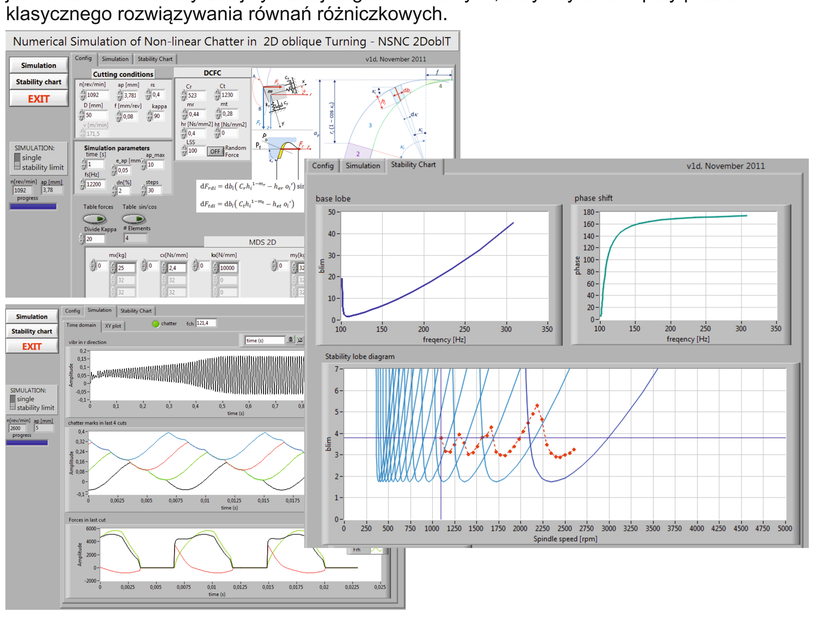
Jeśli drgania układu są niewielkie, zależność zmiennej składowej siły skrawania od zmian grubości warstwy skrawanej można zlinearyzować, czyli zastąpić prostą, styczną do zależności rzeczywistej (linia przerywana na rys. 9). Dzięki temu dynamiczną składową siły skrawania można opisać równaniem prostej (5).



$$F_{rk} = K_{rd} h_d = b\, k_{rd} h_d \quad (5)$$

Rys.9. Linearyzacja dynamicznej składowej siły skrawania
Fig.9. Linearization of the dynamic component of cutting forces

2) Model II, BEZ linearyzacji
W modelu tym chwilowa siła skrawania jest wyznaczana bezpośrednio z zależności (4), co jest możliwe w numerycznej symulacji drgań nieliniowych, a byłoby trudne przy próbie klasycznego rozwiązywania równań różniczkowych.



Rys.10. Wynik symulacji drgań samowzbudnych i granicy stabilności w toczeniu nieswobodnym 2D
Fig.10. Simulation of the chatter vibration in 2D oblique cutting and stability limit obtained by numerical simulation

Wnioski
Conclusions

Opracowano oraz z powodzeniem przetestowano program do symulacji numerycznych przebiegu nieliniowych drgań samowzbudnych przy toczeniu swobodnym i nieswobodnym o dwóch stopniach swobody. Będą realizowane prace nad dalszą optymalizacją algorytmów w celu skrócenia czasu obliczeń.

Algorithms and programs of nonlinear chatter vibration in 2D orthogonal and oblique turning was developed and successfully tested. Further optimization of the algorithms must be done to minimize calculation time.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym
Collaboration with aviation industry

Testy oraz implementacja programów zostaną przeprowadzone w WSK Rzeszów i PZL Mielec / a Sikorsky Company.

Testing and implementation of the programs will take place in WSK Rzeszów and PZL Mielec/ a Sikorsky Company.

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Publikacje
1. Bartosz Powałka, Krzysztof Jemielniak: ***Prediction of chatter stability in milling based on operational modal analysis***, CIRP, Honk Kong 2012

Prace mgr, dr, hab.
Prace inżynierskie planowane

- Piotr Marzęcki: ***Dobór stabilnych parametrów do szybkościowego frezowania aluminium***. Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak, planowany termin obrony: grudzień 2011 r.
- Ewelina Kulik: ***Analiza stabilności obróbki zintegrowana z systemem CAM*** . Promotor: dr inż. Rafał Wypysiński, planowany termin obrony: luty 2012
- Jakub Grzesiuk: ***Modelowanie wykresów stabilności zintegrowane z systemem CAM***. Promotor: dr inż. Rafał Wypysiński, planowany termin obrony: luty 2012

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO