

Symulacja numeryczna drgań samowzbudnych przy frezowaniu ze zmiennymi w czasie parametrami skrawania

Numerical simulation of self-excited vibrations under variable cutting conditions

PIOTR ANDRZEJ BĄK
KRZYSZTOF JEMIELNIAK*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.590

W artykule przedstawiono wykorzystanie symulacji numerycznej nieliniowych drgań samowzbudnych dziedzinie czasu w analizie stabilności procesu obróbki. Łącząc metodykę wykrywania drgań samowzbudnych z odczytem kodów maszynowych powstało narzędzie do symulacji numerycznej i walidacji programu obróbki, które jest tematem niniejszego artykułu.

SŁOWA KLUCZOWE: symulacja, numeryczna, drgania samowzbudne,

The paper presents utilization of numerical simulation of non-linear chatter in the time domain in stability analysis of machining process. By combining all the above in one and enabling G-code reading, a tool for numerical simulation and validation of entire machining operation was created which is a subject of this paper.

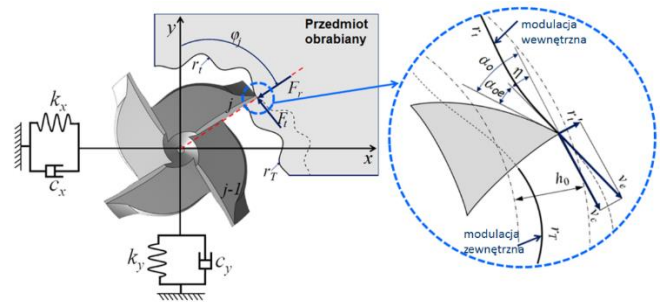
KEYWORDS: numeric simulation, chatter, virtual machining

Wprowadzenie

Drgania samowzbudne są istotnym czynnikiem ograniczającym wydajność, jakość obróbki oraz trwałość narzędzi i obrabiarek [9-11]. Stąd wynika potrzeba określenia granic stabilności obróbki umożliwiając wskazanie parametrów skrawania pozwalających uniknąć drgań samowzbudnych. 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 [1-2]. To w dalszym ciągu bierze pod uwagę główną przyczynę podstawiania drgań samowzbudnych, czyli efekt regeneracji śladu.

Podstawy numerycznej symulacji frezowania

Podstawy symulacji numerycznej drgań samowzbudnych przedstawiono w [5]. W oprogramowaniu wykorzystanym w tym artykule posłużono się metodą Tlustego i Ismaila [13] opartą na fundamentalnych zależnościach opisujących ruch jednostajnie przyspieszony dla układu MDS o jednym stopniu swobody. W rzeczywistości układ MDS ma bardzo złożoną strukturę i wiele stopni swobody. Jednakże przy większości zastosowań można go sprowadzić do układu wielomodalnego o dwóch stopniach swobody [1-3]. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie dwóch podstawowych przyczyn drgań samowzbudnych w obróbce skrawaniem, jakimi są sprzężenie przez przemieszczenie oraz reprodukcja drgań (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat dynamicznego układu OUPN przy frezowaniu [5]

Zmienne (dynamiczne) składowe siły skrawania promieniowej F_r i stycznej F_t , które oddziałują na układ masowo-dysypacyjno-sprężysty (MDS), są spowodowane przemieszczeniami i prędkościami przemieszczeń w kierunku prostopadłym do powierzchni skrawania r_t i r_t' (Rys. 1). Wpływ drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego w kierunku stycznym do powierzchni skrawania t z reguły pomija się. Aktualne przemieszczenia r_t , zmieniające grubość warstwy skrawanej są, tzw. wewnętrzną modulacją tej warstwy. Pozostawiają one na powierzchni skrawania ślad, który w kolejnym przejściu narzędzia również wpływa na grubość warstwy skrawanej, jako jej zewnętrzna modulacja r_t .

W pojedynczej iteracji typowy algorytm symulacji numerycznej składa się z następujących etapów [5]: obliczenie aktualnych przemieszczeń (x , y), i prędkości (x' , y') dla każdej i-tej postaci drgań z osobna (patrz Rys. 2):

$$p'' = (F_{pB} - c_p p_B' - k_p p_B) / m_p \quad (1)$$

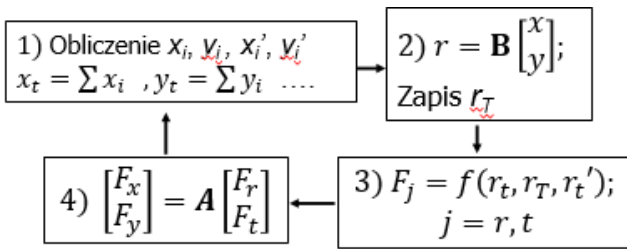
$$p' = p_B' + p'' dt \quad (2)$$

$$p = p_B + p' dt \quad (3)$$

gdzie: $p = x$ lub y , indeks B – siły, przemieszczenia i prędkości z poprzedniej iteracji.

Następnie są sumowane ze sobą. Z kolei przemieszczenia i prędkości w osiach x i y są rzutowane na kierunki promieniowe r i styczne t , osobno dla każdego segmentu krawędzi skrawającej. Przemieszczenia r są zapisane jako zewnętrzna modulacja r_t i wykorzystane w następnym przejściu narzędzia. Zmienne współczynniki sił skrawania F_r oraz F_t są określone we współrzędnych skrawania r oraz t na podstawie wybranego modelu zależności od tych sił r_t , r_t' i r_t . Ostatecznie siły F_r i F_t są rzutowane do F_x and F_y i sumowane wzdłuż krawędzi skrawającej

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



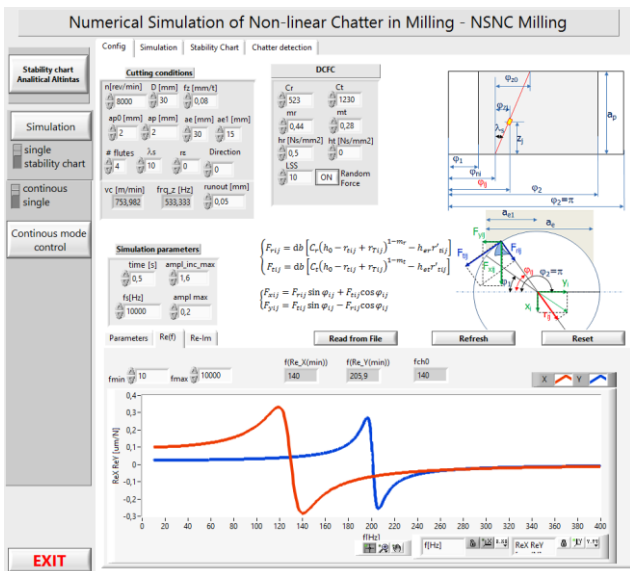
Rys. 2. Pojedyncza iteracja algorytmu symulacji numerycznej [5]

W symulacji numerycznej poniższy model został zastosowany:

$$F_r = b[C_r(h_0 - r_t + r_T)^{1-m_r} - h_{er}r'_t] \quad (4)$$

$$F_t = b[C_t(h_0 - r_t + r_T)^{1-m_r} - h_{er}r'_t] \quad (5)$$

Wykorzystując to podejście opracowano oprogramowanie do symulacji numerycznej nieliniowych drgań samowzбудnych NSNC. Panel czołowy będący interfejsem użytkownika przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Panel czołowy oprogramowania NSNC Milling

Oprogramowanie wymaga jako danych wejściowych określenia parametrów skrawania i symulacji, dynamicznych współczynników sił skrawania oraz parametrów modalnych [7, 8].

W niniejszym artykule poniższe artykuły zostały wykorzystane we wszystkich symulacjach: Parametry modalne n osi X, masa $m_x = 15$ kg, modalne tłumienie $c_x = 2$ Ns/mm, modalna sztywność $k_x = 10$ kN/mm. Na osi Y modalna masa $m_y = 25$ kg, modalne tłumienie $c_y = 1.5$ Ns/mm, modalna sztywność $k_y = 40$ kN/mm.

Dynamiczne współczynniki sił skrawania: $C_r = 523$ N/mm², $C_t = 1230$ N/mm²; $m_r = 0.44$; $m_t = 0.28$; $h_r = 0.5$ Ns/mm². A ustawienia symulacji: czas: zmienny, częstotliwość próbkowania: 10 kHz. Parametry skrawania: średnica narzędzia 10mm, promieniowa głębokość skrawania: full slot, liczba zębów: 2, nachylenie linii śrubowej 10 stopni, promień zaokrąglenia 0,5 mm.

Wykrywanie drgań samowzбудnych przy frezowaniu

Kluczowe z punktu widzenia analizy stabilności jest wykrycie drgań samowzбудnych w czasie obróbki. W sygnale przedmieszczania przy frezowaniu stabilnym występują drgania wymuszone o częstotliwości przechodzenia ostrzy. Ze względu na to, iż amplituda drgań wymuszonych może być znaczna, nie da się wykorzystać przekroczenia granicznego progu jako wskaźnika stabilności (jak w przypadku toczenia).

Ocena stabilności ma na celu rozpoznanie obecności drgań samowzбудnych podczas obróbki rzeczywistej jak i również w czasie 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 oraz obrotu wrzeciona oraz ich harmoniczne. Przy toczeniu, w którym drgania wymuszone procesem skrawania nie występują, można za kryterium stabilności przyjąć przekroczenie przez amplitudę drgań określonego progu. Sposób taki nie może być wykorzystany przy frezowaniu, gdzie wchodzenie ostrzy w materiał powoduje drgania wymuszone układu. Ocena stabilności musi zatem zawierać odróżnienie tych drgań wymuszonych, od drgań samowzбудnych.

Zastosowana tu metoda wykrywania drgań samowzбудnych polega na odfiltrowaniu z widma FFT przebiegu ruchu narzędzia drgań o częstotliwości przechodzenia ostrzy oraz częstotliwości obrotowej wrzeciona. Koniecznie przy tym należy wykryć rzeczywistą prędkość obrotową wrzeciona, ponieważ że może się ona różnić od zadanej, co znacząco wpływałoby na wynik analizy. Opracowany algorytm wykrywa rzeczywistą prędkość obrotową. W tym celu oblicza się nominalną częstotliwość prędkości obrotowej:

$$f_{obr} = n/60 \text{ Hz} \quad (6)$$

gdzie:

n – zadana prędkość obrotowa.

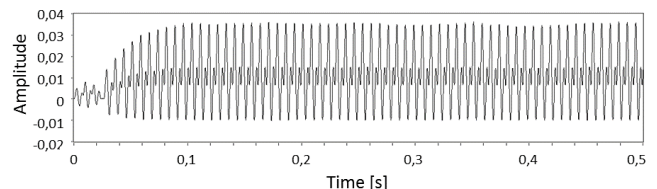
Następnie w zakresie 90% – 110% częstotliwości obrotowej w widmie FFT wyszukiwane jest maksimum, które poprzez przeliczenie na prędkość obrotową wskazuje rzeczywistą prędkość.

Po czym wyznaczone zostają częstotliwości przechodzenia ostrzy oraz ich harmoniczne:

$$f_{ostrzy} = Nz/60 \text{ Hz}, \quad (7)$$

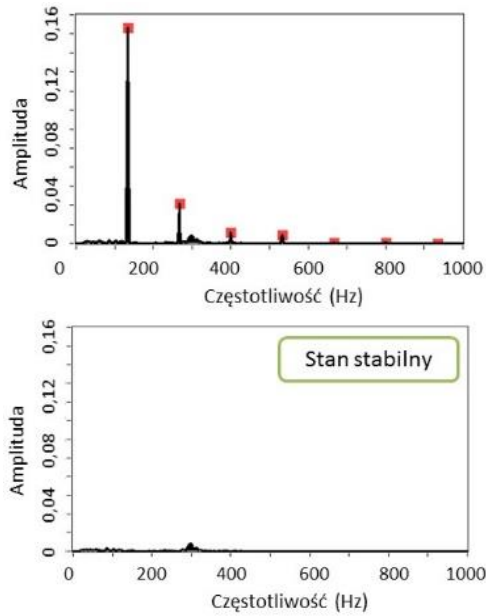
gdzie N – kolejne liczby naturalne począwszy od 1, n – zadana prędkość obrotowa, z – liczba zębów freza.

W celu umożliwienia automatycznego rozpoznania częstotliwości drgań samowzбудnych rozpoznane częstotliwości obrotowe oraz przechodzenia ostrzy usuwa się z widma FFT, co umożliwia ocenę stabilności. Przykład zastosowanej metodyki zaprezentowany jest na Rys.4 oraz Rys. 5 zawiera przykład widma drgań w czasie stabilnej obróbki.



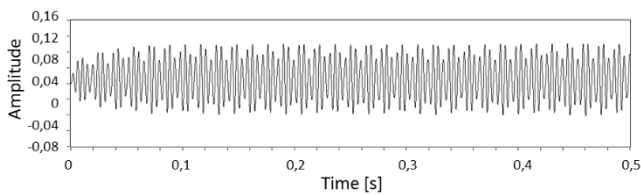
Rys. 4. Przebieg symulowanych drgań – stan stabilny

W widmie po lewej stronie rozpoznano częstotliwości wymuszenia, wyeliminowane na rysunku po prawej. Proces został oceniony jako stabilny.

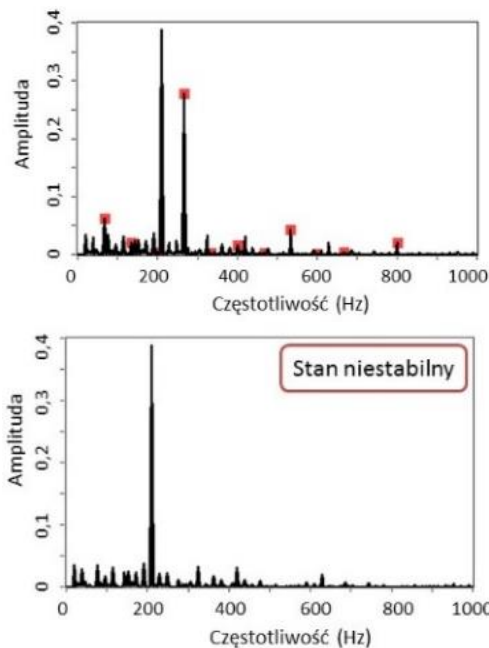


Rys. 5. Rozpoznawanie drgań samowzbudnych w warunkach stabilnych – po lewej oryginalne widmo, po prawej z rozpoznanymi częstotliwościami usuniętymi.

Rysunek 6 i 7 zawierają przebieg czasowy drgań oraz 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. 6. Przebieg symulowanych drgań – stan niestabilny



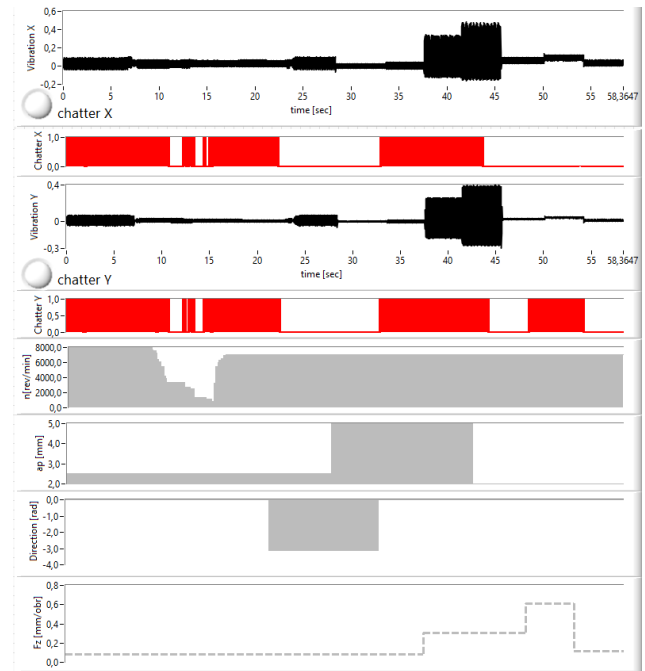
Rys. 7. Rozpoznawanie drgań samowzbudnych w warunkach niestabilnych – po lewej oryginalne widmo, po prawej z rozpoznanymi częstotliwościami usuniętymi.

Ręczna modyfikacja parametrów skrawania w czasie symulacji

Poprzez ręczną modyfikację parametrów skrawania w czasie trwania symulacji możliwe jest sterowanie wirtualną obrabiarką. Symulacja rozpoczyna się z początkowymi ustawieniami. Modyfikacja parametrów dokonywana jest poprzez sterowanie oprogramowaniem w interfejsie użytkownika.

W przypadku ręcznej kontroli możliwa jest modyfikacja następujących parametrów: osiowa głębokość skrawania, prędkość obrotowa, kierunek posuwu, posuw, promieniowa głębokość skrawania,

Okno podglądu pozwala na śledzenie wpływu stosowanych zmian parametrów skrawania na przebieg drgań samowzbudnych – patrz rys 8. Drgania samowzbudne są rozpoznawane na obu osiach niezależnie.



Rys. 8. Drgania na osi X oraz Y w czasie zmiennych parametrów skrawania w trybie manualnym

Obsługa kodów maszynowych w oprogramowaniu symulacji numerycznej

Wprowadzenie obsługi kodów maszynowych ISO pozwala na wykorzystanie programów przygotowanych dla maszyn CNC z rzeczywistej produkcji i symulowanie drgań i sił podczas procesu produkcji. Pozwala to na wirtualną weryfikację programów CNC.

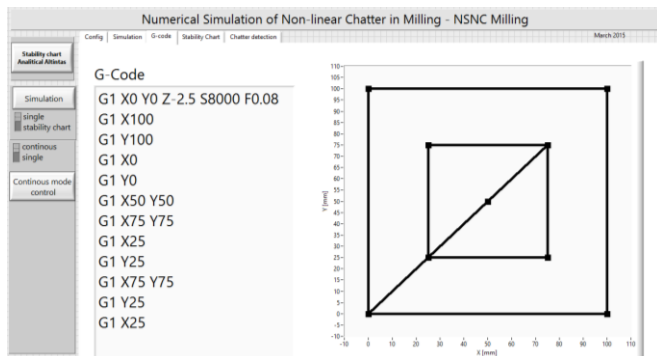
Kody maszynowe, znane także jako kody G lub ISO są wykorzystane do programowania komputerowo sterowanych maszyn numerycznych CNC. Kody te zawierają różne rodzaje informacji między innymi opisują ruch osi maszyny, kierunek posuwu i prędkości obrotowej wrzeciona

Na aktualnym etapie rozwoju oprogramowania jedynie kody interpolacji liniowej G1 z posuwem na ostrze są dostępne. Pojedyncza linia kodu opisuje współrzędne ruchu liniowego do punktu docelowego na przykład G1 X12.43 Y23.23 Z-0.5 S2000 F0.25 oznacza "liniowy ruch do punktu X=12.43, Y=23.23, Z=-0.5 z prędkością obrotową 2000 rpm i posuwem 0.25 mm/ząb. Jeżeli którykolwiek z parametrów nie ulega zmianie, wartości pozostają takie jak w poprzedniej instrukcji, parametr ten może być wtedy pominięty.

Symulacja numeryczna z wykorzystaniem kodu maszynowego

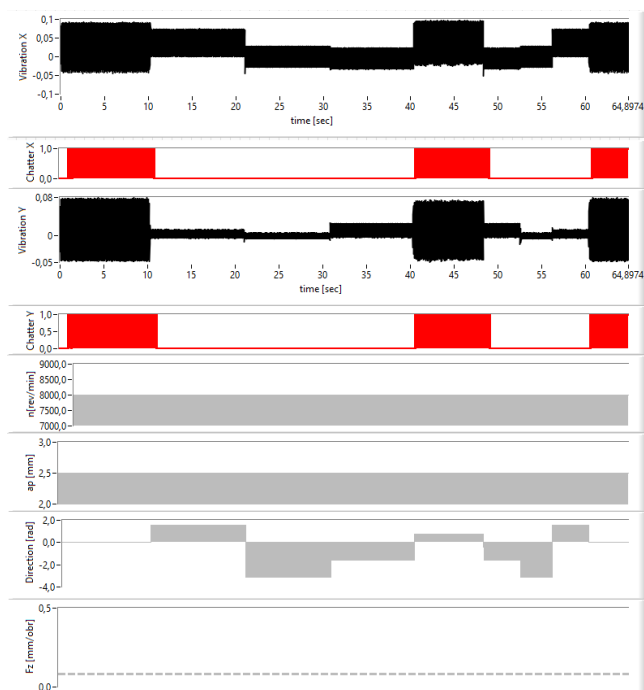
Jako przykład symulacji numerycznej obróbki wykorzystany został prosty program ISO na maszynie CNC. Na rysunku poniżej widać wprowadzony kod ISO do programu

NSNC Milling, oprogramowanie pokazuje trajektorie obliczoną na podstawie kodu.



Rys. 9. Okno obsługi kodów maszynowych

Czas symulacji odpowiada czasowi obróbki obliczonego na podstawie program ISO. Podobnie jak w przypadku ręcznej modyfikacji parametrów możliwe jest obejrzenie wyników symulacji oraz parametrów w osobnym oknie – patrz rysunek 10.



Rys. 10. Zmienne parametry skrawania na podstawie kodu maszynowego

Podsumowanie

Opracowana metodyka I oprogramowanie do dynamicznej modyfikacji parametrów skarania podczas symulacji numerycznej pozwala na symulację dowolnej operacji w przestrzeni 3D włączając obróbkę wykańczającą frezem kulistym. Zaletą symulacji numerycznej i możliwość wykorzystania dowolnej krawędzi skrawającej. Pozwala to na weryfikację kodu maszynowego ISO przygotowanego na maszyny CNC w celu detekcji potencjalnych zagrożeń drganiem samowzbudnymi.

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

- [1] Budak E., Tunc L.T., "Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach", *CIRP Annals*, 59, 2010, 403–408.
- [2] Mahdi E. "Chatter stability of turning and milling with process damping", Phd Thesis, The University Of British Columbia, Vancouver, 2010.
- [3] Jemielniak K., Nejman M., Śniegulska-Grądzka D. "Analytical and numerical determination of stability limit in turning", *Inżynieria Maszyn*, 17, 2012, 81-92.
- [4] Jemielniak K., Widota A. "Numerical simulation of non-linear chatter vibration in turning". *Int. J. Of Mach. Tools & Manuf.*, 29, 1989, 239-247.
- [5] Jemielniak K., Wypysinski 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 October 2013, 2013, 199.
- [6] Altintas Y. "Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations at mal-ubc". *Machining Science And Technology. An International Journal*, 4, 2000, 445-478.
- [7] ALTINTAS Y., EYNIAN M., ONOZUKA H. "Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping". *CIRP Annals*, 57, 2008, 371–374.
- [8] 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 October 2013, 2013, 283.
- [9] Altintas Y., Weck M. "Chatter stability of metal cutting and grinding", *Cirp Annals - Manufacturing Technology*. 2004, 53/2, 619–642.
- [10] Lin S-Y, Chen C-K, "Construction of a dynamic cutting force model for oblique cutting", *Engineering Manufacture, Proc. ImechE* 224 PART B: J., 224, NR 3, 2010, 361-372.