

Krzysztof MARCHELEK, Mirosław PAJOR, Jan TOMKÓW

Politechnika Szczecińska

MODELOWANIE PROCESU SKRAWANIA W ANALIZIE WIBROSTABILNOŚCI
FREZOWANIA NARZĘDZIAMI Z NIERÓWNOMIERNĄ PODZIAŁKĄ OSTRZY

Streszczenie. W pracy przedstawiono zasady modelowania procesu skrawania w analizie wibrostabilności wielowymiarowego dynamicznego układu obrabiarka - uchwyt - przedmiot obrabiany - narzędzie dla przypadku frezowania narzędziami z nierównomierną podziałką ostrzy. Modelowanie oparte jest na metodzie sztywnych elementów skończonych. W analizie wibrostabilności wykorzystano częstotliwościowe kryterium stabilności Nyquista.

CUTTING PROCESS MODELING IN VIBROSTABILITY ANALYSIS
FOR MILLING WITH TOOLS OF NON-UNIFORM PITCH OF EDGES

Summary. The work presents principles of modeling cutting process in analysis of vibration stability of a multidimensional dynamical MCWT (machine tool - chuck - workpiece - tool) system for milling with tools having a non-uniform pitch of cutting edges. Modeling is based on the stiff finite element method. The vibration stability analysis was carried out making use of the frequency Nyquist stability criterion.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА
ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ФРЕЗИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАМИ
С НЕРАВНОМЕРНЫМ РОСПОЛОЖЕНИЕМ ЛЕЗВЕЙ

Резюме. В работе представлен принцип моделированию процесса резания для анализа виброустойчивости многомерной динамической системы спид (станок - предмет - инструмент - державка) в отношении для случая фрезирования инструментами с неравномерным расположением лезвий. Моделирование основывается на принципах метода жестких конечных элементов. В качестве критерия виброустойчивости использован был частотный критерий Найквиста.

1. WSTĘP

Rozwój metod modelowania wielowymiarowych, przestrzennych układów MDS-OUPN (masowo-dyssypacyjno-sprężystych obrabiarka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie) sprawił, że problemy prognozowania wibrostabilności obrabiarek znajdują zainteresowanie wśród konstruktorów, zwłaszcza konstruktorów obrabiarek ciężkich. Dotychczas bowiem oceny odporności obrabiarki na drgania samowzbudne dokonywano zwykle po wykonaniu prototypu obrabiarki.

W Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej opracowano ogólne zasady obliczeniowego prognozowania wibrostabilności wielowymiarowego układu OUPN [1]. Korzystając z kryterium stabilności Nyquista wyprowadzono równanie stabilności w postaci:

$$\det\{I + W_{MDS}(j\omega) \cdot w_{PS}(j\omega) \cdot [1 + e^{-j\epsilon}] \cdot b\} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- I - macierz jednostkowa (6*6),
- $W_{MDS}(j\omega)$ - macierz częstotliwościowych charakterystyk dynamicznych układu MDS w umownym punkcie styku narzędzia i przedmiotu obrabianego (na ogół jest to punkt przebicia powierzchni obrobionej przez oś freza) (6*6),
- $w_{PS}(j\omega)$ - macierz dynamicznych charakterystyk procesu skrawania odniesiona do jednostki szerokości warstwy skrawanej,
- ϵ - kąt przesunięcia fazowego pomiędzy falami tzw. modulacji wewnętrznej i zewnętrznej grubości warstwy skrawanej [1],
- b - szerokość warstwy skrawanej,
- ω - częstotliwość,
- j - jednostka urojona.

Podstawowym elementem procesu obliczeniowego jest wyznaczenie granicy wibrostabilności (granicznej szerokości warstwy skrawanej) $b = b_{11m}$ takiej, że przy $b_{11m} = \min$; $\epsilon \in \langle 0, 2\pi \rangle$ spełnione jest kryterium (1).

2. WIBROSTABILNOŚĆ PROCESU FREZOWANIA

Przedstawiona idea obliczeń ma bezpośrednie zastosowanie dla tych przypadków obróbki, które charakteryzują się niezmiennością struktury modelu układu OUPN w czasie, np. przy toczeniu. W przypadku frezowania czołowego narzędziem z równomierną podziałką ostrzy występuje zmienność w czasie położenia poszczególnych ostrzy narzędzia skrawającego, co utrudnia proces modelowania układu OUPN i prognozowania wibrostabilności. W tym przypadku kryterium (1) można zapisać w postaci:

$$\det\{I + W_{MDS}(j\omega) \cdot b \cdot \sum_{i=1}^m G_{wr1}^T(\varphi) \cdot W_{PS1}(j\omega) \cdot [1 + e^{-j\epsilon}] \cdot G_{wr1}(\varphi)\} = 0 \quad (2)$$

przy czym:

- $G_{wr1}(\varphi)$ - macierz transformacji przemieszczeń względnych narzędzia i przedmiotu obrabianego z umownego punktu styku narzędzia z tym przedmiotem do punktu styku i-tego ostrza z tymże przedmiotem obrabianym,
- φ - kąt chwilowego położenia freza; $\varphi = \varphi(t)$,
- m - liczba jednocześnie skrawających ostrzy freza.

Ze względu na zmienność w czasie macierzy $G_{wr1}(\varphi)$ w analizie wibrostabilności procesu skrawania przyjmuje się założenie upraszczające [2] polegające na "zatrzymaniu" narzędzia w chwilowym jego położeniu. W położeniu tym określa się granicę wibrostabilności $b_{lim}(\varphi)$. Następnie cykl obliczeń powtarza się w innym chwilowym położeniu narzędzia. W ten sposób można wyznaczyć wykres granicy wibrostabilności w funkcji kąta chwilowego położenia narzędzia. Wykres ten stanowi dla konstruktora podstawę do oceny odporności obrabiarki na drgania samowzbudne. Badania wykazują, że kąt przesunięcia fazowego pomiędzy falami modulacji wewnętrznej i zewnętrznej nie zmienia się istotnie wraz ze zmianą położenia kąтового freza. Oznacza to, że wykres dotyczy takiej prędkości obrotowej freza, która odpowiada wyznaczonemu kątowi przesunięcia fazowego.

Uzyskany wykres granicy wibrostabilności przy frezowaniu narzędziem z równomierną podziałką ostrzy charakteryzuje się powtarzalnością przebiegu w dziedzinie podziałki kątowej ostrzy freza, zatem cały cykl obliczeń można ograniczyć do zakresu chwilowych położenia obejmujących podziałkę kątową.

W rozwoju konstrukcji standardowych narzędzi do frezowania czołowego

obserwuje się tendencję do różnicowania podziałek kątowych. Wykazano bowiem doświadczalnie, że powoduje to wzrost granicy wibrostabilności. Zachodzi pytanie, jak w praktyce modelować i analizować wibrostabilność procesu frezowania narzędziem z podziałką nierównomierną. Nierównomierność podziałki kątovej powoduje bowiem, że dotychczas jednakowe dla wszystkich ostrzy, wartości kąta przesunięcia fazowego ϵ (por. wzór [2]) pomiędzy falami modulacji zewnętrznej i wewnętrznej ulegają zróżnicowaniu. Wzór (2) przyjmie wówczas postać:

$$\det\{I + W_{HDS}(j\omega) \cdot b \cdot \sum_{l=1}^m G_{Wr1}^T(\varphi) \cdot W_{PS1}(j\omega) \cdot [1 + e^{-j\epsilon_1}] \cdot G_{Wr1}(\varphi)\} = 0 \quad (3)$$

gdzie:

ϵ_1 - kąt przesunięcia fazowego pomiędzy falą modulacji zewnętrznej i wewnętrznej na i-tym ostrzu, przy czym [4]:

$$\epsilon_1 = 2\pi \left[f \cdot T_1 \cdot \frac{p_1}{p_1} - \text{int} \left(f \cdot T_1 \cdot \frac{p_1}{p_1} \right) \right] \quad (4)$$

gdzie:

f - częstotliwość $f = \frac{\omega}{2\pi}$,

p_1 - podziałka przed i-tym ostrzem,

p_1 - podziałka przed pierwszym ostrzem,

T_1 - stała czasowa regeneracji śladu dla pierwszego ostrza, czas potrzebny na pokonanie przez narzędzie kąta obrotu równego podziałce na pierwszym ostrzu, zależny od prędkości obrotowej wrzeciona,

$\text{int}()$ - część całkowita wyrażenia w nawiasach.

Stosując zasady wyznaczania granicy wibrostabilności przyjęte dla przypadku narzędzia z podziałką równomierną napotyka się trudności, które polegają na tym, że:

- nie ma możliwości jednoznacznego ustalenia takiej kombinacji wartości kątów ϵ_1 spełniającej warunek (4), które byłyby reprezentatywne dla wszystkich położeń kątowych narzędzia $\varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$. Każde położenie charakteryzuje się inną kombinacją ϵ_1 , spełniającą warunek zerowania się wyznacznika (3) (mogą nawet wystąpić takie położenia kątovej, dla których warunek ten nie będzie spełniony dla dowolnej, spełniającej równanie (4) kombinacji wartości ϵ_1).

Można się zatem spodziewać, że uzyskany wykres nie będzie reprezentatywny dla żadnej prędkości obrotowej wrzeciona. Nie ma też podstaw do przyjęcia jednej, ustalonej kombinacji kątów ϵ_1 , która - co prawda - byłaby reprezentatywna dla jednej określonej prędkości obrotowej wrzeciona, lecz nie wiadomo, czy prędkość ta odpowiada minimalnym wartościom wykresu granicy wibrostabilności,

- można się spodziewać, że wskutek istotnego zróżnicowania kątów ϵ_1 sam wykres granicy wibrostabilności, wyznaczony przy założeniu ustalonej prędkości obrotowej wrzeciona, będzie charakteryzował się dużymi wahaniami, zawierając nawet obszary, w których wykres granicy wibrostabilności osiąga wartości równe nieskończoności z jednej strony, z drugiej zaś nie wiadomo, czy minima wykresu nie mogą osiągnąć jeszcze mniejszych wartości przy innej prędkości obrotowej wrzeciona. Spowoduje to, że uzyskany wykres stanie się trudny do interpretacji, a ocena wibrostabilności na jego podstawie ma wątpliwą wartość.

W świetle przedstawionych rozważań celowe jest przyjęcie takich zasad modelowania procesu skrawania, które nie naruszając zasad przyjętych przy modelowaniu dla narzędzi z podziałką równomierną pozwoliłyby na ich rozszerzenie na narzędzia z podziałką nierównomierną.

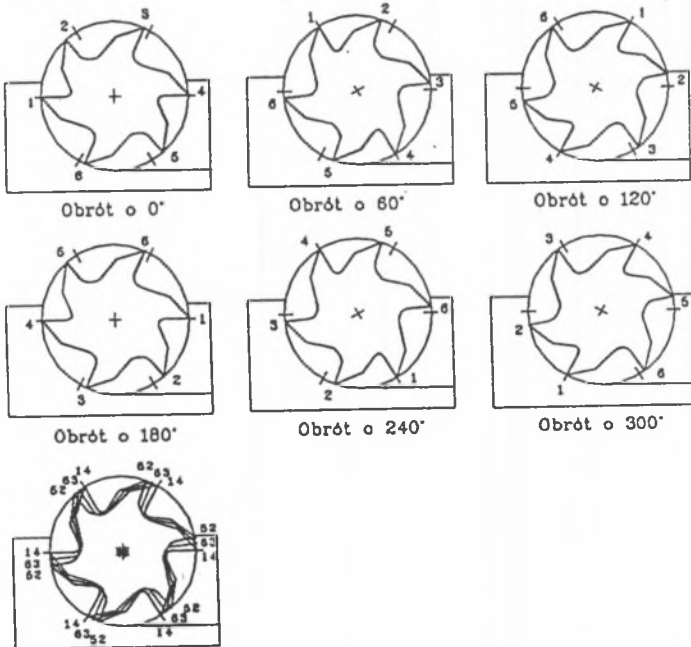
W tym celu przeprowadzono następujące rozumowanie. Utrata wibrostabilności układu OUPN przy frezowaniu frezem z podziałką równomierną następuje wskutek regeneracji śladu powodowanej następstwem po sobie, w odstępach równych podziałce, kolejnych ostrzy freza, co daje jednakowe wartości kąta ϵ dla wszystkich ostrzy. Wskutek nierównomierności podziałki zakłócona zostaje stała dotychczas wartość kąta ϵ - pojawiają się różne, odpowiadające każdemu ostrzu, wartości kąta ϵ_1 . Celowe jest zatem takie uśrednienie wartości kątów ϵ_1 , aby średnia była reprezentatywna dla wszystkich ostrzy narzędzia. Uśrednienie to nie może być zrealizowane wprost przez wyznaczenie średniej arytmetycznej. Proponuje się w tym celu stworzenie narzędzia zastępczego (fikcyjnego), które ze względu na swoją ideę może być użyteczne zarówno do obliczeń wibrostabilności frezowania narzędziami z podziałką równomierną, jak i nierównomierną. Ideę tworzenia takiego narzędzia wyjaśnia rys. 1.

Na rys. 1 (a+f) przedstawiono kolejne położenia, jakie przyjmują ostrza freza z podziałką nierównomierną przy obrocie narzędzia o kąt równy

podziałce średniej ($\psi_{sr}=60^\circ$). Rys. 1 (g) przedstawia narzędzie zastępcze powstałe w wyniku złożenia ze sobą poszczególnych narzędzi składowych. Narzędzie fikcyjne posiada podziałkę "równomierną", przy czym jego makroostrza składają się z kilku podostrzy powstałych w wyniku złożenia. Oczywiście jest, że wskutek k -krotnego "zsumowania" ze sobą poszczególnych narzędzi składowych (rys. 1.) należy wyznaczone w kolejnych położeniach wartości granicy wibrostanbilności pomnożyć przez k .

Wyznaczając na podstawie przedstawionego narzędzia zastępczego granicę wibrostanbilności dla przypadku narzędzia z podziałką równomierną uzyska się wynik identyczny z wynikiem w dotychczas stosowanym sposobie modelowania.

W przypadku narzędzia z podziałką nierównomierną obliczenia prowadzi się w zakresie obejmującym kąt obrotu równy średniej arytmetycznej podziałek - wykres granicy wibrostanbilności ma bowiem w tym przypadku cykl równy średniej podziałce.



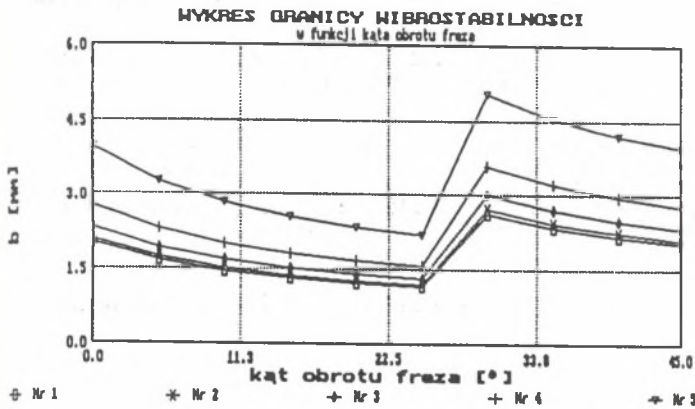
Narzędzie zastępcze

Rys. 1. Idea tworzenia narzędzia zastępczego do analizy wibrostanbilności procesu frezowania narzędziem z podziałką nierównomierną

3. PRZYKŁADY OBLICZEŃ

Przedstawioną powyżej metodę wykorzystano do analizy wibrostabilności modelu uniwersalnej frezarki wspornikowej FWD 32J. Do obliczeń przyjęto tzw. "model-max" z najbardziej wysuniętą belką frezarki. Jako narzędzie skrawające wybrano frez walcowo-czołowy $\phi=63$ mm o ośmiu ostrzach. Przyjęto prawy kierunek obrotów freza oraz wariant frezowania przeciwbieżnego (rys.1). Szerokość frezowania $B=1/3 \cdot \phi$, posuw na ostrze $p_z=0.1$ mm, kolejne położenia freza przyjmowane są co 5° z zakresu równego średniej podziałce ostrzy. Obliczenia wykonano dla pięciu wariantów podziałek ostrzy zwiększając nierównomierność w kolejnych wariantach:

- a) frez z podziałką równomierną, wariant: nr 1 ($p=45.0^\circ$),
 b) frez z podziałką parami nierównomierną, wariant:
 nr 2 ($p_1=44.5^\circ$ $p_2=45.5^\circ$),
 nr 3 ($p_1=44.0^\circ$ $p_2=46.0^\circ$),
 nr 4 ($p_1=43.5^\circ$ $p_2=46.5^\circ$),
 nr 5 ($p_1=43.0^\circ$ $p_2=47.0^\circ$).



Rys. 2. Wykresy granicy wibrostabilności

Rysunek 2 przedstawia wykresy granicy wibrostabilności w funkcji kąta obrotu freza dla poszczególnych wariantów podziałek ostrzy. Z wykresów widać że granica wibrostabilności wzrasta wraz ze wzrostem nierównomierności

podziałki ostrzy. Przy zmianie kąta obrotu freza z 25° na 30° można zaobserwować wyraźny wzrost granicy wibrostabilności wywołany zmianą liczby aktywnych ostrzy.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony sposób modelowania procesu skrawania umożliwia rozwinięcie dotychczasowego sposobu modelowania i oceny wibrostabilności obrabiarki przy frezowaniu narzędziem z podziałką równomierną na przypadki frezowania narzędziami z nierównomierną podziałką ostrzy. Rozszerza to możliwość prognozowania wibrostabilności obrabiarek na przypadki frezowania wszystkimi narzędziami przeznaczonymi do frezowania czołowego.

LITERATURA

- [1] Tomków J.: Podstawy projektowych obliczeń wibrostabilności wielowymiarowego układu OUPN ze szczególnym uwzględnieniem modelowania dynamiki procesu skrawania. Prace Naukowe Pol. Szczec., nr 429, Szczecin 1991.
- [2] Opitz H., Bernardi F.: Investigation and Calculation of the Chatter Behaviour of Lathes and Milling Machines. CIRP Ann. 1970, Vol.18, nr 2, s. 335+343.
- [3] Lisewski W.: Untersuchung der Stabilität der Fräsmaschine FYD-25. Maschinenbautechnik, Jahrgang 26, 1977, nr 9, s. 408+409 i 418.
- [4] Pajor M., Tomków J., Witek A.: Obliczenia wibrostabilności obrabiarek w systemie DOUNO. Prace Naukowe Pol. Szczec. (w druku).

Recenzent: Prof. Eugeniusz Świtoński.

Wpłynęło do redakcji dnia 22. 11. 1992

Abstract

General principles of predicting vibration stability of a multidimensional MCWT system [1], which are based on the frequency Nyquist stability criterion (1), have been developed at the Institute of Mechanical

Technology of Technical University of Szczecin. These principles can be directly applied to those cases where the structure of the MCWT system model remains invariant. In case of milling with a tool having a uniform pitch of cutting edges, i.e. where a change in the model structure occurs, the criterion (1) will assume the form (2). Taking simplifying assumptions [2], which consist in "stopping" the tool in its instantaneous position, it is possible to determine the vibration stability limit $b_{lim}(\phi)$. Through a cycle of calculations for successive instantaneous positions of a cutter, a plot of vibration stability limit versus the angle of instantaneous position of a tool is obtained.

In case of cutters with a non-uniform pitch of edges, the values of phase shift angle between the inner and outer modulation waves become diversified. The criterion (2) will then assume the form (3), whereas the phase shift angles ϵ_i of particular edges will be related by the dependence (4). It is appropriate to so average the values of angles ϵ_i that the mean value would be representative of all edges of a tool. For this purpose, it is proposed to introduce an equivalent (fictitious) tool the creation idea of which is illustrated in Fig.1.

The presented way of modeling cutting process extends considerably the possibilities of predicting the vibrational stability of machine tools.

*Badania zrealizowano w ramach projektu
nr 7 0948 91 01 finansowanego w latach
1991+93 przez Komitet Badań Naukowych.*