

Mirosław PAJOR, Jan TOMKÓW, Krzysztof MARCHELEK
Instytut Technologii Mechanicznej
Politechnika Szczecińska

BADANIA PORÓWNAWCZE WIBROSTABILNOŚCI PROCESU FREZOWANIA Z UWZGLĘDNIENIEM STACJONARNEGO I NIESTACJONARNEGO MODELU PROCESU SKRAWANIA

Streszczenie. Przedstawiono metodę projektowanych badań wibrostanbilności modelu dynamicznego układu OUPN dla przypadku frezowania walcowo-czołowego, opartą na stacjonarnym modelu procesu skrawania oraz metodę uwzględniającą zmienności w czasie parametrów modelu - model niestacjonarny. Zaprezentowano wyniki wstępnych analiz porównawczych obu metod. Badania analityczne przeprowadzono na modelu frezarki wspornikowej FWD-32J.

COMPARATIVE INVESTIGATIONS OF MILLING PROCESS VIBROSTABILITY AND CONSIDERATION OF STATIONARITY AND UNSTATIONARITY OF THE CUTTING PROCESS MODEL

Summary. The methods for design vibrostanbilnity investigation of machine tool system model in face milling is presented. The methods base on both of stationar and unstationar (with time variable parameters) cutting process model as well. The results of preliminary comparative analysis both of methods are presented. The analytical investigation were carried out on the milling machine FWD-32J model.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОУСТРОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ФРЕЗИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Резюме. Представляются методы проектных исследований вброустройчивости модели динамической системы СПИД в случаях торцового фрезирования. Методы основываются на стационарной модели процесса резания и модели нестационарной, учитываемой изменение во времени параметров модели. Представляются результаты первых сравнительных анализ обоих методов. Аналитические исследования нп. ведено на модели фрезерного станка FWD-32J.

1. WSTEP

W Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej prowadzone są badania nad zagadnieniami prognozowania wibrostanbilności w procesie projektowo-konstrukcyjnym dla najczęściej stosowanych metod obróbki skrawaniem (toczenia, frezowania). W

prowadzonych badaniach można wyróżnić dwa podejścia do problemu modelowania procesu skrawania:

- przyjmuje się założenie o niezmienności struktury i parametrów modelu układu OUPN (obrabiarka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie) - model stacjonarny,
- wykorzystuje się model o zmiennej konfiguracji - model niestacjonarny, którego parametry są funkcjami czasu.

W pierwszym przypadku do analizy wibrostabilności wielowymiarowego, dynamicznego układu OUPN wykorzystuje się częstotliwościowe kryterium Nyquiste'a. Metodyka ta pozwala na analizę pełnego modelu układu, bez konieczności dokonywania redukcji liczby stopni swobody. Stosując tę metodę, w pierwszej fazie, wyznacza się granicę wibrostabilności dla typowych reprezentatywnych warunków skrawania. W następnym etapie poszukuje się tzw. słabego ogniwa w dynamicznym układzie OUPN, tzn. elementu odpowiedzialnego za utratę wibrostabilności.

Założenie o stacjonarności modelu wydaje się być dobrze spełnione dla przypadku prognozowania wibrostabilności procesu toczenia. Problem komplikuje się w przypadku procesu frezowania. Frezowanie jest z natury procesem o zmiennej w czasie konfiguracji. Występuje tu bowiem zmienność w czasie położenia ostrzy, zmienność geometrycznych parametrów warstwy skrawanej oraz okresowe przerywanie skrawania poszczególnych ostrzy.

Mając to na uwadze, w celu sprowadzenia modelu procesu frezowania do postaci stacjonarnej, przyjmuje się założenie upraszczające [4], polegające na myślowym zatrzymaniu narzędzia w wybranym, chwilowym położeniu kątowym - tzw. "stop klatka". W położeniu tym opisuje się modele matematyczne procesów skrawania dla poszczególnych ostrzy i dokonuje się syntezy tych modeli do jednego reprezentującego wszystkie ostrza (całe narzędzia) procesu frezowania. Dla tak zdefiniowanego procesu frezowania wyznacza się granicę wibrostabilności (graniczną szerokość warstwy skrawanej lub graniczną głębokość warstwy skrawanej). Prowadząc obliczenia dla kolejnych położenia kątownych freza, otrzymuje się wykres granicznej wartości granicy wibrostabilności (wydaje się, że powinna ona ustalić się między wartością minimalną a maksymalną wynikającą z wykresu), ale pozwala określić skłonność układu do utraty wibrostabilności. Istotną zaletą tego podejścia jest fakt, że jako wynik obliczeń otrzymuje się częstotliwość drgań samowzbudzonych. Okazuje się, że częstotliwość ta nie zmienia się wraz ze zmianą położenia kątownego freza (liczne wyniki badań [3,7] potwierdzają tę tezę), co pozwala jednoznacznie określić postać drgań ujawniającą się, gdy układ OUPN traci wibrostabilność. Tym samym umożliwia to realizację drugiego etapu badań - wskazanie słabego ogniwa w układzie.

Model fizyczny obrabiarki jest jednak z natury modelem niestacjonarnym. Występuje tu bowiem zmienność w czasie parametrów i struktury modelu, wynikającej ze wzajemnego przemieszczenia się zespołów obrabiarki w czasie pracy. Prędkość przemieszczania się tych zespołów w ruchu posuwowym jest z reguły stosunkowo nieduża. Można wówczas przyjąć, że wokół pewnego, wybranego punktu (wybrana konfiguracja wzajemnego położenia zespołów obrabiarki) model jest stacjonarny. Inaczej jest, gdy o zmianach parametrów i struktury modelu decydują ruchy główne. Ruchy te charakteryzują się większymi prędkościami niż ruchy posuwowe, dlatego też trudniejsze jest wówczas do spełnienia założenie o stacjonarności modelu. W takich przypadkach (typowym przykładem tego jest proces frezowania walcowo-czołowego) celowe wydaje się zastosowanie modelu niestacjonarnego o zmiennych w czasie parametrach.

Z powyższych względów prowadzone są równoległe prace nad drugim podejściem do zagadnienia modelowania procesu skrawania dla potrzeb projektowej analizy wibrostabilności dynamicznego układu OUPN, uwzględniającym zmienność w czasie (niestacjonarność) tego procesu. Prognoza wibrostabilności w oparciu o niestacjonarny model układu OUPN napotyka na poważne trudności. Model stacjonarny wymaga bowiem wykorzystania stosunkowo szybkich procedur optymalizacyjnych [6], a komplikowanie modelu poprzez wprowadzenie niestacjonarności potęguje problemy z efektywnością takich obliczeń oraz ich dokładnością numeryczną.

W Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej, wykorzystując metody analizy równań różniczkowo-różnicowych [4], opracowano metodykę prognozowania wibrostabilności dla przypadków frezowania walcowo-czołowego, opartą na niestacjonarnym modelu procesu skrawania. Metodyka ta wymaga jednak redukcji liczby stopni swobody układu. Redukcji tej można dokonać na podstawie wyników uzyskanych w pierwszym podejściu (model stacjonarny). Znając bowiem częstotliwość drgań samowzbudzających można, po przetransformowaniu modelu układu OUPN z układu współrzędnych uogólnionych do układu współrzędnych głównych (rozprężenie równań ruchu układu), wybrać równanie opisujące postać drgań odpowiadającą rezonansowi o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań samowzбудnych (redukcja liczby stopni swobody układu). Następnie, po sprowadzeniu wybranego równania do postaci równania stanu, można przedstawić je w formie równania różniczkowo-różnicowego [5]. Analiza tak zapisanego równania, przy wykorzystaniu procedur optymalizacyjnych, umożliwia wyznaczenie granicy wibrostabilności dla układu OUPN o zredukowanej liczbie stopni swobody.

Stosując drugie podejście, wprawdzie uwzględnia się niestacjonarność modelu procesu frezowania, ale traci się możliwość przeprowadzenia drugiego etapu analizy - poszukiwanie słabego ogniwa w układzie OUPN. Metoda ta bowiem uniemożliwia (z powodu redukcji liczby stopni swobody) przeprowadzenie analizy postaci drgań pełnego modelu układu OUPN.

Oba prezentowane tutaj podejścia wykazują pewne wady i zalety. Wydaje się, że w celu przeprowadzenia pełnej analizy wibrostabilności modelu układu OUPN w procesie frezowania walcowo-czołowego należy wykonać obliczenia przy wykorzystaniu badań porównawczych obu prezentowanych metod. Niniejsza praca prezentuje pierwsze wyniki wstępnych analiz obu metod, mających na celu porównanie uzyskiwanych za ich pomocą prognoz wibrostabilności dynamicznego układu OUPN.

2. MODELE OBLICZENIOWE

Pełny model matematyczny układu MDS (masowo - dyspacyjno - sprężystego) zapisany w konwencji metody SES (sztywnych elementów skończonych), zawierający pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego poprzez proces roboczy (proces skrawania), zapisać można [2] za pomocą równania macierzowo-wektorowego:

$$(\mathbf{M} \cdot s^2 + \mathbf{H} s + \mathbf{K}) \mathbf{u}(s) = \mathbf{k}_p(\theta) \cdot b \cdot (-1 + e^{-sT}) \cdot \mathbf{u}(s), \quad (1)$$

gdzie:

- M** - macierz mas,
- H** - macierz tłumienia
- K** - macierz sztywności,

- $u(s)$ - wektor przemieszczeń uogólnionych,
 b - szerokość warstwy skrawanej,
 T - stała czasowa regeneracji śladu,
 s - operator Fouriera, $s = j\omega$, przy czym j - jednostka urojona, ω - częstość kołowa

Macierz $k_p(\theta)$ wyraża się zależnością

$$k_p(\theta) = N_{wr}^T \cdot k_p'(\theta) \cdot N_{wr}, \quad (2)$$

gdzie:

- $k_p'(\theta)$ - macierz sztywności procesu skrawania odniesiona do jednostki szerokości warstwy skrawania w układzie odniesienia zaczepionym w umownym punkcie styku narzędzia i przedmiotu obrabianego, zależna od kąta chwilowego położenia freza,
 N_{wr} - macierz transformacji przemieszczeń z układu współrzędnych uogólnionych do układu narzędzia [2],
 θ - kąt chwilowego położenia frezu.

Dla tak zdefiniowanego modelu układu OUPN, wykorzystując procedury optymalizacyjne, można [3,7] wyznaczyć (prowadząc obliczenia dla zatrzymanego freza w jego kolejnych położeniach kątowych - model stacjonarny) wykres granicznej szerokości warstwy skrawanej w funkcji kąta obrotu freza.

W celu oszacowania uśrednionej wartości granicy wibrostabilności dla modelu stacjonarnego opisanego równaniem (1) można dokonać uśrednienia macierzy sztywności procesu skrawania. Wówczas wyznaczona graniczna szerokość warstwy skrawanej będzie wielkością stałą (niezależną od kąta chwilowego położenia frezu). Uśrednienie przeprowadza się według następującej zależności:

$$\bar{k}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_p(\theta_i), \quad (3)$$

gdzie n - liczba rozpatrywanych kolejnych położzeń freza.

Aby analiza wibrostabilności uwzględniała niestacjonarność modelu dynamiki procesu skrawania (frezowania), należy model tego układu zapisać za pomocą równań różniczkowo-różnicowych z okresowo zmiennymi parametrami. W tym celu transformuje się model układu OUPN do układu współrzędnych głównych. Równanie (1) przyjmuje wówczas postać:

$$M_G \cdot \ddot{u}_G + H_G \cdot \dot{u}_G + K_G \cdot u_G = k_{PG}(\theta) \cdot b \cdot (-1 + e^{-sT}) \cdot u_G, \quad (4)$$

przy czym:

$$\begin{aligned}
 M_G &= \xi^T \cdot M \cdot \xi, \\
 H_G &= \xi^T \cdot H \cdot \xi, \\
 K_G &= \xi^T \cdot K \cdot \xi, \\
 K_{PG}(\theta) &= \xi^T \cdot k_p(\theta) \cdot \xi,
 \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

- u_G - wektor przemieszczeń w układzie współrzędnych głównych,
- ξ - macierz transformacji przemieszczeń z układu współrzędnych uogólnionych do układu współrzędnych głównych,
- $\xi = [u_1^0, u_2^0, u_3^0, \dots, u_n^0]$; $u_1^0 = \text{col} \{u_{ij}^0\}$ - M-ortonormalizowany wektor i-tej postaci drgań [2].

Dysponując zaś modelem układu zapisanym we współrzędnych głównych można dokonać racjonalnej redukcji liczby stopni swobody układu, tj. wybrać równanie opisujące postać drgań o numerze k , odpowiadającą rezonansowi o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań samowzbudnych. Wybrane równanie można sprowadzić do postaci równania stanu [5, 8] a następnie po drobnych przekształceniach przedstawić je [1] w formie równania różniczkowo-różnicowego o następującej postaci:

$$\frac{d}{dt}r(\theta) = P(v)r(\theta), \quad (6)$$

przy czym:

$$r(\theta) = \text{col} \{u_{Gk}, \dot{u}_{Gk}\}, \quad (7)$$

$$P(v) = \frac{1}{\Omega} [A_0 + A_1(\theta)(-1+v)], \quad (8)$$

natomiast

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m_{Gk}^{-1} \cdot k_{Gk} & -m_{Gk}^{-1} \cdot h_{Gk} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m_{Gk}^{-1} \cdot b \cdot k_{PGk}(\theta) & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

gdzie:

- Ω - prędkość kątowna freza,
- v - jednostka zespolona - parametr związany z kątem przesunięcia fazowego pomiędzy falami modulacji wewnętrznej i zewnętrznej grubości warstwy skrawanej, przy czym $v = \cos \varepsilon + j \sin \varepsilon$; $\varepsilon = 2\pi[fT - \text{int}(fT)]$, f - częstotliwość
- m_{Gk}, h_{Gk}, k_{Gk} - masa, tłumienie i sztywność układu zredukowanego wyrażone we współrzędnych głównych,
- u_{Gk} - przemieszczenie zredukowane w kierunku k-tej współrzędnej głównej,
- $k_{PGk}(\theta)$ - sztywność procesu skrawania zredukowanego w kierunku k-tej współrzędnej głównej.

Dla zredukowanego układu OUPN opisanego równaniem (6), wykorzystując procedury optymalizacyjne, można wyznaczyć [8] wykres granicy wibrostałości w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona (krzywe workowe), uwzględniając zmienność parametrów modelu przy obrocie freza o kąt w zakresie równym podziałce międzyostrzowej - model niestacjonarny.

Aby wyznaczyć absolutną granicę wibrostałości zredukowanego układu OUPN do jednego stopnia swobody, można poddać analizie zredukowane równanie (4) w dziedzinie częstotliwości. W tym celu należy uśrednić sztywność procesu skrawania według zależności:

$$\bar{k}_{PGk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{PGk}(\theta_i) \quad (11)$$

Przyrównując części rzeczywiste i części urojone lewej i prawej strony zredukowanego równania (4), uwzględniając (1), otrzymuje się układ równań:

$$\begin{aligned} -m_{Gk} \cdot \omega^2 + k_{Gk} &= -\bar{k}_{PGk} \cdot \bar{b}_0 [1 - \cos(\varepsilon)], \\ -h_{Gk} \cdot \omega &= -\bar{k}_{PGk} \cdot \bar{b}_0 \sin(\varepsilon), \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie b_0 - graniczna szerokość warstwy skrawanej.

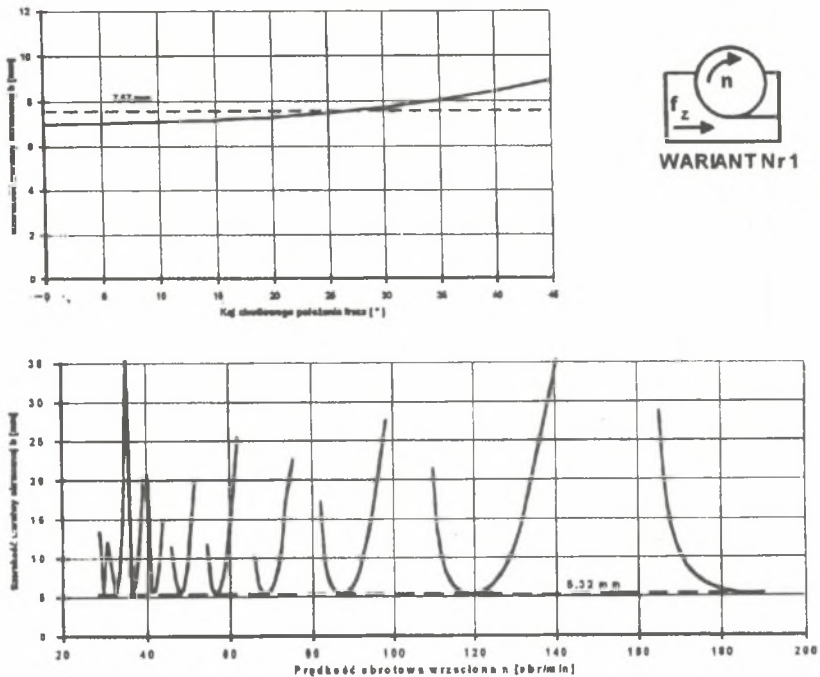
Przyjmując częstość kołową odpowiadającą minimum części rzeczywistej charakterystyki AFC (amplitudowo - fazowo - częstotliwościowej) układ MDS (o jednym stopniu swobody), można rozwiązać układ równań (12) ze względu na niewiadome b_0 oraz ε .

3. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Do analizy przyjęto model frezarki wspornikowej FWD-32J [3]. Jako narzędzie skrawające wybrano frez walcowo-czołowy o średnicy $D=63$ mm i ośmiu ostrzach. Przyjęto następujące parametry frezowania: posuw na ostrze $f_z = 0,1$ mm, szerokość frezowania $B = 2/3D$. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów obróbki przedstawionych na rysunku 1 i 2.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres granicznej szerokości warstwy skrawanej w funkcji kąta chwilowego położenia freza oraz w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona (krzywe workowe) dla wariantu skrawania oznaczonego numerem 1. Pierwszy wykres otrzymano wykorzystując stacjonarny model dynamiczny układu OUPN opisany równaniem (1). Z wykresu tego wynika, że graniczna szerokość warstwy skrawanej rośnie wraz z obrotem narzędzia. Dodatkowo na wykresie tym linią przerywaną zaznaczono graniczną szerokość warstwy skrawanej ($b = 7.57$ mm), wyznaczoną dla uśrednionej macierzy sztywności procesu skrawania (3).

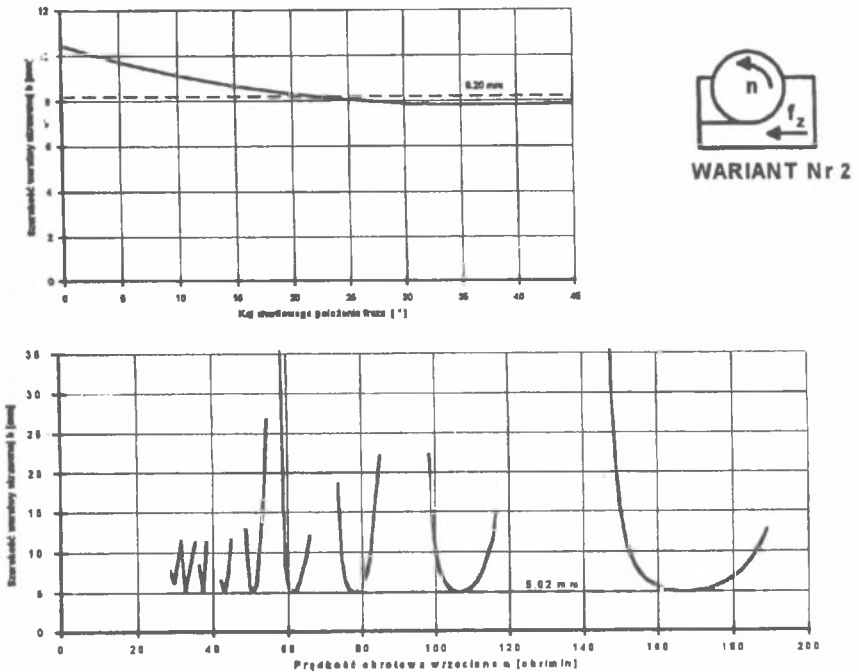
Drugi z wykresów (krzywe workowe) otrzymano wykorzystując niestacjonarny model układu OUPN opisany równaniem (6). Obliczenia były prowadzone w zakresie prędkości obrotowych wrzeciona od 20 do 200 obr./min. Analizowano jedną, wybraną postać drgań odpowiadającą rezonansowi o częstotliwości 43.7 Hz. Częstotliwość ta zbliżona jest do częstotliwości drgań samowzbuźnych, określonej na podstawie pełnego, stacjonarnego modelu układu. Linią przerywaną zaznaczono tutaj absolutną granicę wibrostałości ($b = 5.32$ mm) zredukowanego modelu układu OUPN (jeden stopień swobody), wyznaczoną w wyniku analizy modelu w dziedzinie częstotliwości (12).



Rys. 1. Wyniki obliczeń dla wariantu obróbki nr 1
 Fig. 1. Results of calculation for alternative of cutting No 1

Na rysunku 2 przedstawiono analogicznie wynik obliczeń dla wariantu skrawania oznaczonego numerem 2. Z pierwszego wykresu wynika, że graniczna szerokość warstwy skrawanej wyraźnie maleje wraz z obrotem narzędzia. Uśredniona wartość granicy wibrosterbilności (linia przerywana) wynosi dla tego wariantu $b = 8.2$ mm.

Drugi wykres (krzywe workowe), przedstawiający graniczną szerokość warstwy skrawanej w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona (model niestacjonarny), wyznaczono analizując postać drgań odpowiadającą rezonansowi o częstotliwości 39.2 Hz. Natychmiast absolutna granica wibrosterbilności (linia przerywana) dla tego wariantu wynosi $b = 5.02$ mm.



Rys. 2. Wyniki obliczeń dla wariantu obróbki nr 2
 Fig. 2. Results of calculation for alternative of cutting No 2

4. WNIOSKI

Porównując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że:

1. Absolutna granica wibrostabilności układu OUPN zredukowanego do jednego stopnia swobody jest styczna do krzywych workowych uzyskanych na podstawie modelu niestacjonarnego. Oznacza to, że posługiwanie się modelem niestacjonarnym zredukowanym do jednego stopnia swobody daje podobny wynik, jaki uzyskuje się przy wykorzystaniu modelu stacjonarnego. Stosowanie w tym przypadku modelu niestacjonarnego, jak to proponuje się w pracy [5], wydaje się więc nieuzasadnione.
2. Redukcja liczby stopni swobody związana ze stosowaniem modelu niestacjonarnego o jednym stopniu swobody pociąga za sobą istotną (30%) różnicę wartości granicy wibrostabilności w porównaniu z wynikiem uzyskanym w odniesieniu do pełnego modelu stacjonarnego. Celowe jest zatem podjęcie prac poświęconych badaniu granicy wibrostabilności dla modelu niestacjonarnego, lecz o większej liczbie stopni swobody.

Prezentowana praca wykonana została w ramach projektu badawczego nr 7 S102 003 07, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

- [1] Hahn W.: On Difference-Differential Equation With Periodic Coefficients, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1961, vol. 3, pp. 70-101
- [2] Marchelek K.: Dynamika obrabiarek, wyd. II. WNT, Warszawa 1991
- [3] Marchelek K., Pajor M., Tomków J.: Modelowanie i badania wibrosterbilności frezarki FWD-32J w procesie projektowo-konstrukcyjnym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika, z. 115, Gliwice 1994, ss. 233-239
- [4] Pajor M., Tomków J., Witek A.: Obliczenia wibrosterbilności w systemie DOUNO, Archiwum technologii Maszyn i Automatykacji, 1993, zeszyt 12, ss. 301-321
- [5] Sridhar R., Hohn R. E., Long G. W.: A Stability Algorithm for the General Milling Process, Contribution to Machine Tool Chatter Research - 7, Trans. of ASME, 1968, ser. B, vol. 90, nr 2, pp. 330 - 334
- [6] Tomków J.: Podstawy projektowych obliczeń wibrosterbilności wielowymiarowego układu OUPN ze szczególnym uwzględnieniem modelowania dynamiki procesu skrawania. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 429, ITM nr 7, Szczecin 1991
- [7] Tomków J., Marchelek K., Pajor M.: Prognozowanie wibrosterbilności wielowymiarowego układu OUPN przy toczeniu i frezowaniu. Raport z projektu badawczego nr 709489101 Komitetu Badań Naukowych, 1993 (maszynopis)
- [8] Tomków J., Marchelek K., Pajor M.: Badania wibrosterbilności frezowania z uwzględnieniem zmienności w czasie parametrów procesu skrawania, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 1995, zeszyt 14 (w druku)

Recenzent: prof. dr hab. inż. A. Olędzki

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1994 r.