

WYBRANE PROBLEMY BADAWCZE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH OBRABIARKI DO MIKROSKRAWANIA

MARCIN MATUSZAK, BARTOSZ POWAŁKA

*Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
e-mail: marcin.matuszak@zut.edu.pl, bartosz.powalka@zut.edu.pl*

Streszczenie. W pracy zaprezentowano sposób badania właściwości dynamicznych obrabiarki do mikrofrezowania. Scharakteryzowano proces mikroobróbki i przedstawiono podstawowe różnice między klasyczną obróbką a mikroobróbką. Ze względu na niewielkie wymiary narzędzia do mikrofrezowania przeprowadzenie klasycznego testu impulsowego w pobliżu wierzchołka narzędzia jest bardzo utrudnione. Zaproponowano zatem wykorzystanie metod pośrednich (np. metody receptancji liniowej), które umożliwiają syntezę modeli doświadczalnych i modeli teoretycznych. Zaprezentowano wykorzystanie metody receptancji linowej do wyznaczenia częstotliwościowej funkcji przejścia dla wierzchołka narzędzia zamontowanego w obrabiarce na podstawie funkcji przejścia zmierzonych na końcówce wrzeciona oraz dla narzędzia swobodnie zawieszzonego. Proponowana metodyka badania właściwości dynamicznych obrabiarki, doświadczalnie weryfikowana w skali makro, zostanie wykorzystana do badań właściwości dynamicznych nowo konstruowanej mikroobrabiarki.

1. WSTĘP

Podstawowe różnice między klasyczną obróbką a mikroobróbką wynikają z miniaturyzacji procesu. Przyjmuje się, że obróbkę można uznać za mikroobróbkę, kiedy średnica narzędzia jest mniejsza niż 0,5 mm. Mała średnica narzędzia oraz małe wartości posuwu powodują że grubość warstwy skrawanej jest porównywalna z promieniem zaokrąglenia ostrza narzędzia, co prowadzi do ujemnych kątów natarcia oraz odkształceń plastycznych [1, 2, 3]. Ponadto przy mikroobróbce występują wysokie prędkości obrotowe narzędzia, które mogą przekraczać 100 000 obr./min.

Wymienione cechy mikroobróbki implikują trudności pomiarowe związane z badaniem dynamiki tego procesu. Częstotliwość drgań własnych komercyjnie produkowanych siłomierzy nie przekracza 4 kHz [4, 5], co przy dwóch ostrzach narzędzia oraz prędkości obrotowej narzędzia równej 120 000 obr./min. odpowiada częstotliwości wymuszenia. Uniemożliwia to dokonanie wiarygodnego pomiaru sił skrawania występujących podczas obróbki. Ze względu na małe wymiary końcówki narzędzia bardzo utrudnione jest wykonanie testu impulsowego narzędzia zamontowanego w obrabiarce oraz swobodnego narzędzia.

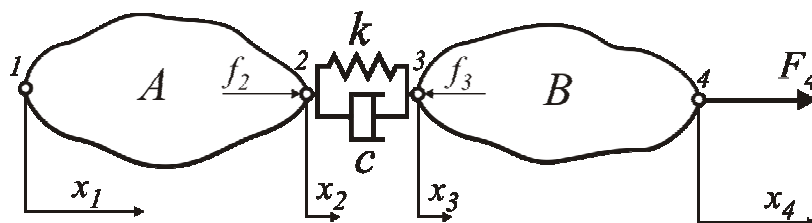
Wymienione problemy badawcze determinują zastosowanie metod pośrednich w celu badania dynamiki procesu mikrofrezowania. W celu wyznaczenia funkcji przejścia można

skorzystać z metody receptancji liniowej [5, 6, 7]. Natomiast do oszacowania sił skrawania można zastosować metody odwrotne [8] lub metodę kompensacji sił skrawania za pomocą filtra Kalmana [7].

Badania zagadnień mikroobróbki w Polsce jak i na świecie są pracami pionierskimi. Nieliczne firmy proponują rozwiązania komercyjne, które są bardzo drogie i mają jednostkowy charakter [9, 10, 11]. W Instytucie Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie realizowana jest konstrukcja mikrofrezarki. Mikrofrezarka obecnie jest konstruowana, dlatego podjęto próbę weryfikacji działania metody receptancji liniowej w skali makro, z wykorzystaniem klasycznej obrabiarki. W tym celu zaproponowano wykorzystanie metody receptancji liniowej do wyznaczenia funkcji przejścia wierzchołka narzędzia zamontowanego w obrabiarce, na podstawie funkcji przejścia swobodnego narzędzia oraz funkcji przejścia zarejestrowanej na wrzecionie obrabiarki.

2. METODA RECEPTANCJI LINIOWEJ

Metoda receptancji liniowej może zostać wykorzystana do wyznaczenia funkcji przejścia złożonego układu dynamicznego na podstawie funkcji przejścia składowych elementów tego układu (rys. 1) [12]. Znając funkcje przejścia rozdzielonych obiektów w punktach 2, 3 oraz 4, można wyznaczyć funkcje przejścia układu złożonego w punkcie 4, co odpowiada w opisywanym przypadku wierzchołkowi narzędzia.



Rys. 1. Ilustracja metody receptancji liniowej.

Przemieszczenia, siły oraz funkcje przejścia występujące w układzie z rys. 1 określone są następującymi zależnościami matematycznymi:

$$\begin{cases} x_4 = H_{44} \cdot F_4 - H_{43} \cdot f_3 \\ f_3 = k(x_3 - x_2) + cj\omega(x_3 - x_2) \\ f_2 = -f_3 \\ x_2 = H_{22} \cdot f_2 \\ x_3 = H_{34} \cdot F_4 - H_{33} \cdot f_3 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$$j = \sqrt{-1}$$

x_1, x_2, x_3, x_4 – przemieszczenia w punktach 1, 2, 3, 4,

$H_{22}, H_{33}, H_{34}, H_{43}$ – funkcje przejścia układów przed połączeniem

k, c – sztywność i tłumienie połączenia między układami

f_2, f_3 – siły wewnętrzne w połączeniu

F_4 – siła zewnętrzna w punkcie 4.

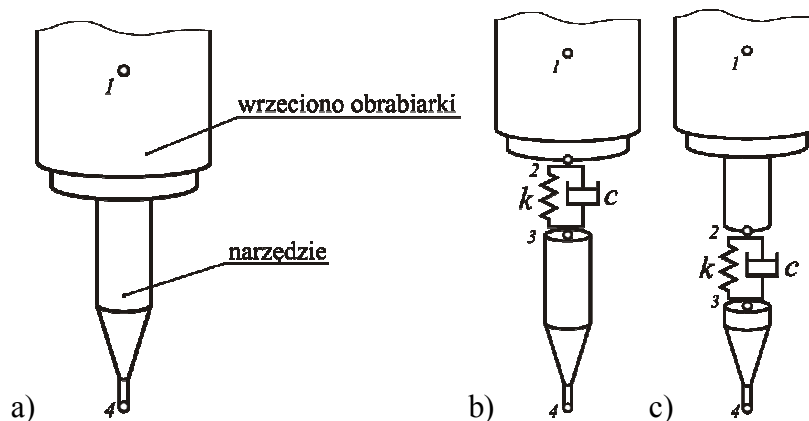
Poszukiwana funkcja przejścia opisuje zależność między siłą a przemieszczeniem w punkcie 4:

$$H_4 = \frac{x_4}{F_4} \quad (2)$$

Rozwiązując układ równań (1) i dokonując podstawienia zależności (2), otrzymuje się zależność, opisującą funkcję przejścia złożonego układu na podstawie znajomości funkcji przejścia układów przed ich połączeniem oraz na podstawie parametrów połączenia układów:

$$H_4 = H_{44} - H_{43} \frac{(k + cj\omega) \cdot H_{34}}{1 + (k + cj\omega)H_{33} - (k + cj\omega)H_{22}} \quad (3)$$

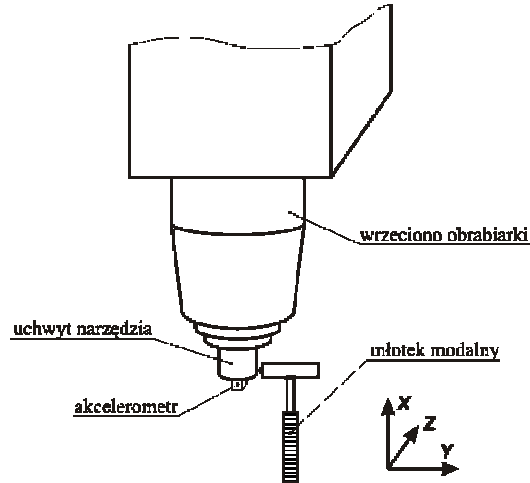
Wierzchołek narzędzia do mikrofrezowania ma bardzo małe wymiary (średnica do 0,5 mm). Małe wymiary wierzchołka narzędzia znacząco utrudniają wykonanie testu impulsowego narzędzia zamontowanego w obrabiarce. Mikroobrabarkę można rozważyć jako jeden układ dynamiczny (rys. 2a), którego funkcję przejścia można wyznaczyć przez wykonanie testu impulsowego na mikrowrzecionie obrabiarki. Narzędzie można rozważyć jako drugi układ dynamiczny, którego funkcja przejścia jest wyznaczona doświadczalnie za pomocą testu impulsowego lub analitycznie. Narzędzie połączone jest z obrabiarką za pośrednictwem uchwytu, który wnosi do układu pewną sztywność oraz tłumienie (rys. 2b). Przepuszczalnie możliwe będzie wykonanie testu impulsowego fragmentu narzędzia zamontowanego w obrabiarce (rys. 2c), w takim przypadku analitycznie należy wyznaczyć funkcję przejścia wierzchołka narzędzia.



Rys. 2. 1-4 – punkty dla których jest wyznaczana funkcja przejścia, k – sztywność połączenia, c – tłumienie połączenia

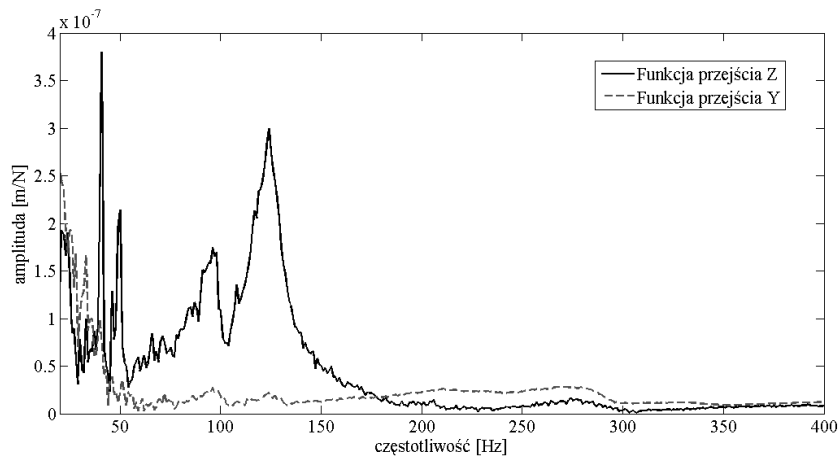
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

W celu weryfikacji metody receptancji liniowej wykonano testy impulsowe uchwytu narzędzia zamontowanego w klasycznej obrabiarce (rys. 3). Testy impulsowe wykonano w kierunkach osi Y i Z .



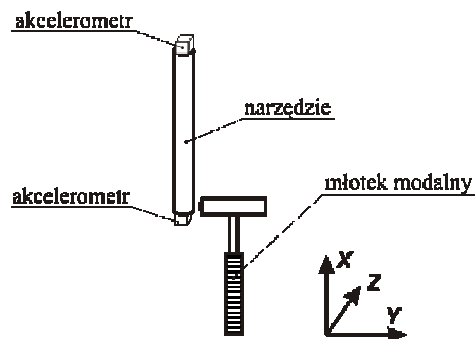
Rys. 3. Schemat testu impulsowego uchwyty narzędzia zamontowanego w obrabiarce.

W wyniku przeprowadzonych testów impulsowych uchwyty narzędzia zamontowanego w obrabiarce otrzymano funkcje przejścia dla kierunków osi Y i Z (rys. 4). Otrzymane funkcje przejścia są różne dla kierunku osi Y i dla kierunku osi Z.



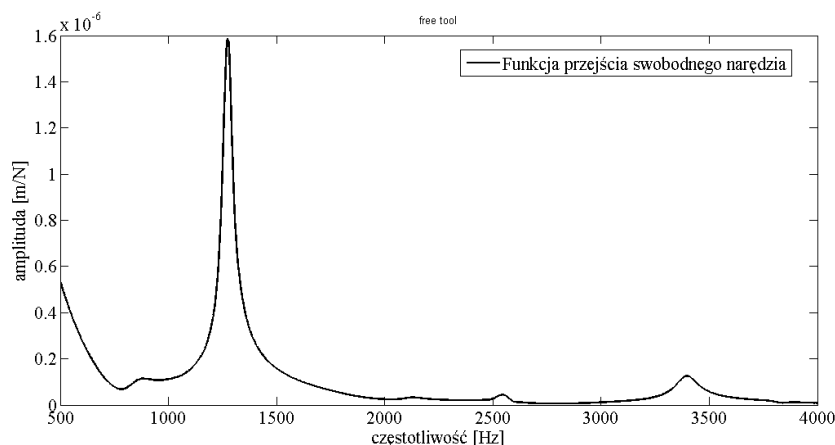
Rys. 4. Funkcje przejścia w kierunkach osi X i Z dla uchwyty narzędzia zamontowanego w obrabiarce.

Do wyznaczenia funkcji przejścia układu złożonego konieczne było także wyznaczenie funkcji przejścia swobodnego narzędzia. Funkcję przejścia swobodnego narzędzia wyznaczono przez zamocowanie narzędzia na żyłce i wykonanie testu impulsowego (rys. 5).



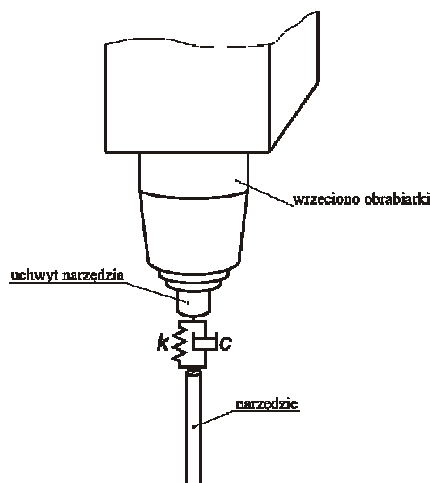
Rys. 5. Schemat testu impulsowego swobodnego narzędzia.

W wyniku testu impulsowego swobodnego narzędzia otrzymano funkcję przejścia dla swobodnego narzędzia (rys. 6).



Rys. 6. Funkcja przejścia dla swobodnego narzędzia.

Istotnym zagadnieniem przy stosowaniu metody receptancji liniowej do wyznaczenia funkcji przejścia złożonego układu jest wyznaczenie parametrów połączenia podukładów (rys. 7).



Rys. 7. Sztywność oraz tłumienie połączenia między narzędziem, a jego uchwytem.

W celu wyznaczenia sztywności oraz tłumienia połączenia między narzędziem a obrabiarką wykorzystano doświadczalne funkcje przejścia swobodnego narzędzia, obrabiarki oraz narzędzia zamontowanego w obrabiarence. Parametry połączenia wyznaczono za pomocą metody regresji, dokonując jak najlepszego dopasowania sztywności i tłumienia. Sztywność oraz tłumienie połączenia wyznaczono, korzystając z funkcji przejścia otrzymanych w wyniku testu impulsowego przeprowadzonego w kierunku osi Y .

Z zależności (3) można wyznaczyć wartości sztywności i tłumienia stosując podstawienia:

$$A = \frac{H_4 - H_{44}}{H_{43}}, \quad B = H_{33} - H_{22} \quad (4)$$

Po podstawieniu (4) do (3) otrzymuje się:

$$A = (k + cj\omega) \cdot (-H_{34} - A \cdot B) \quad (5)$$

Stosując podstawienie:

$$P = -H_{34} - A \cdot B \quad (6)$$

Otrzymuje się:

$$A = (k + cj\omega) \cdot P \quad (7)$$

Wartości podatności otrzymane w wyniku przeprowadzenia testów impulsowych są różne dla każdej z częstotliwości. Można je przedstawić jako wektory kolumnowe zależne od częstości ω :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A(\omega_1) \\ A(\omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ A(\omega_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} -H_{34}(\omega_1) - A(\omega_1)B(\omega_1) & j\omega_1[-H_{34}(\omega_1) - A(\omega_1)B(\omega_1)] \\ -H_{34}(\omega_1) - A(\omega_1)B(\omega_1) & j\omega_2[-H_{34}(\omega_2) - A(\omega_2)B(\omega_2)] \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -H_{34}(\omega_n) - A(\omega_n)B(\omega_n) & j\omega_n[-H_{34}(\omega_n) - A(\omega_n)B(\omega_n)] \end{bmatrix} \quad (8)$$

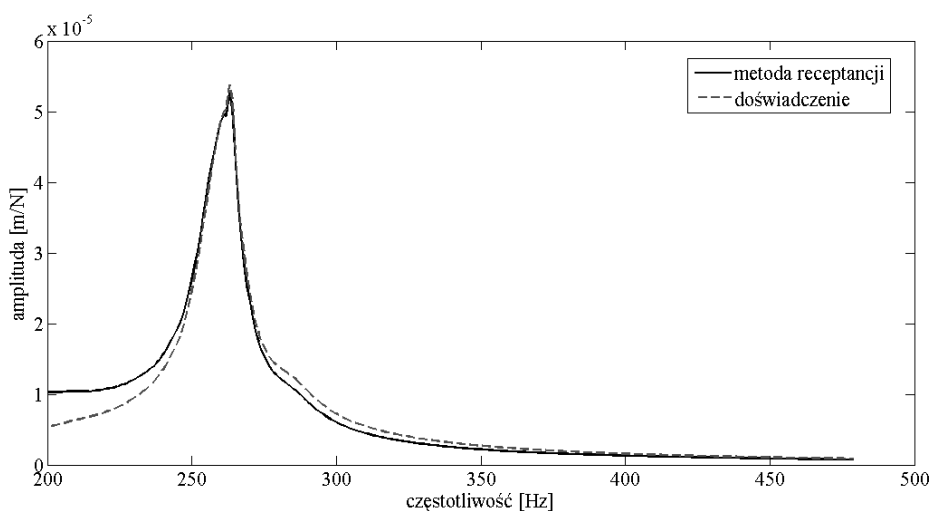
W zapisie macierzowym:

$$\mathbf{A} = \mathbf{P} \cdot \begin{bmatrix} k \\ c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Z równania (9) otrzymuje się zależność, z której bezpośrednio otrzymuje się wartości sztywności i podatności:

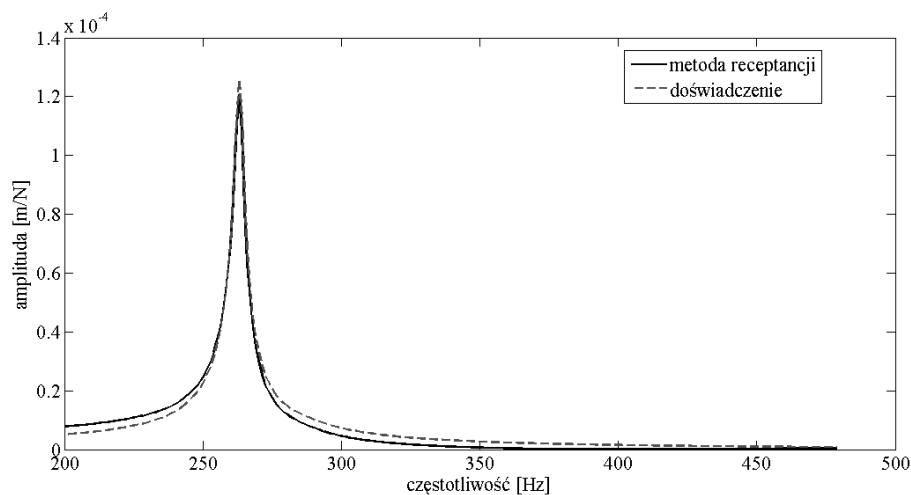
$$\begin{bmatrix} \hat{k} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{A} \quad (10)$$

Analityczną oraz doświadczalną funkcję przejścia w kierunku osi Y , dla narzędzia zamontowanego w obrabiarce przedstawiono na rys 8. W tym kierunku były wyznaczane parametry połączenia, więc przebiegi doświadczalnej oraz wyznaczonej teoretycznie funkcji przejścia muszą być do siebie zbliżone.



Rys. 8. Doświadczalne i analityczne funkcje przejścia narzędzia zamocowanego w obrabiarce dla kierunku osi Y .

W kierunku osi *Z* dokonano weryfikacji wyznaczonych parametrów połączenia, wyznaczając analitycznie funkcje przejścia układu złożonego na podstawie wcześniej określonych parametrów połączenia, funkcji przejścia uchwytu narzędzia zamontowanego w obrabiarce oraz funkcji przejścia swobodnego narzędzia (rys 9). Przebiegi analitycznej i doświadczalnej funkcji przejścia są do siebie zbliżone.



Rys. 9. Doświadczalne i analityczne funkcje przejścia narzędzia zamontowanego w obrabiarce dla kierunku osi *Z*.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania doświadczalne pokazują, że metoda receptancji liniowej może być zastosowana do wyznaczenia funkcji przejścia układu złożonego. W wypadku stosowania metody receptancji liniowej do wyznaczenia podatności dynamicznej narzędzia zamontowanego w uchwycie (rys. 2b, rys. 7) istotne jest wyznaczenie sztywności oraz tłumienia połączenia układów.

Dla przypadku, gdy końcówka narzędzia jest myślowo rozdzielona od pozostałej części narzędzia (rys. 2c), wyznaczenie sztywności i tłumienia połączenia jest ułatwione ze względu na stałość i powtarzalność połączenia.

Weryfikacja doświadczalna parametrów połączenia między układami, wyznaczonych w kierunku osi *Y*, pokazała, że otrzymane parametry połączenia są prawidłowe – doświadczalne funkcje przejścia w kierunku osi *Z* są zgodne z funkcjami przejścia wyznaczonymi przy pomocy metody receptancji liniowej.

Istotnym problemem badawczym podczas próby zastosowania omawianej metody do badań procesy mikroobróbki będzie weryfikacja uzyskanych wyników, które w dużej części będą oparte na modelu.

LITERATURA

1. Chae J., Park S.S., Freiheit T.: Investigation of micro-cutting operations. "International Journal of Machine Tools & Manufacture" 2006, 46, 2006, p. 313-332.
2. Chae J., Park S.S.: High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces. "International Journal of Machine Tools & Manufacture" 2007, 47, p. 1433-1441.

3. Jinsheng Wang, Yadong Gong, Gabriel Abba, Jean Francois Antoine, Jiashun Shi: Chip formation analysis in micromilling operation. "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 2009, Vol.45, No. 5-6 /, p. 430-447.
4. Bissacco G., Gietzelt T., Hansen H. N.: Force analysis in micro milling Al 6082 T6 in various engagement conditions. Proceedings of 4M2008 Conference Multi-Material Micro Manufacture. Cardiff: Whittles Publishing Ltd., 2008.
5. Mohammad Malekian, Simon S. Park. Martin B.G. Jun: Modeling of dynamic micro-milling cutting forces. "International Journal of Machine Tools & Manufacture" 2009, 49, p. 586–598.
6. Chi-Hung Cheng, Schmitz T. L., Nagaraj Arakere, Duncan G. S.: An approach for micro end mill frequency response predictions. Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando: ASME, 2005.
7. Park S.S., Malekian M.: Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces. "CIRP Annals - Manufacturing Technology" 2009, 58, p. 49–52.
8. Powalka B., Dhupia J. S., Galip Ulsoy A., Katz R.: Identification of machining force model parameters from acceleration measurements. "International Journal of Manufacturing Research" 2008, Vol. 3, No. 3, p. 265-284.
9. www.moriseiki.com
10. www.kugler-precision.com
11. www.kern-microtechnic.com
12. Ewins D. J.: Modal testing, theory, practice and application. Philadelphia: Research Studies Press Ltd., 2000.

CHOSEN PROBLEMS IN MICROMILLING MACHINE DYNAMICS INVESTIGATIONS

Summary. Micromilling process is characterized and basic differences between classical milling and micromilling are described in the paper. Due to small dimensions of micromilling tools, making classical impact test near tool tip is difficult. Therefore indirect methods (e.g. receptance coupling method) which make possible synthesis of experimental and theoretical models are proposed. Usage of receptance coupling method for frequency response function estimation for tool tip of tool mounted in milling machine is presented. That frequency response function was obtained from frequency response function measured on spindle tip and frequency response function measured on free tool. Proposed methodology of machine dynamic properties investigation verified in macro scale will be used for investigation of newly constructed micromilling machine.