

Prosta metoda badania błędów dynamicznych w pomiarach skaningowych na maszynach współrzędnościowych

Simple method of dynamic error testing of scanning coordinate measurement

ADAM WOŹNIAK
GRZEGORZ KRAJEWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.519

Przedstawiono nową metodę badań właściwości dynamicznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP). Opracowana metoda może posłużyć do oszacowania wartości oraz identyfikacji błędów dynamicznych w danym zadaniu pomiarowym. Opisano również przykładowe badania doświadczalne na maszynie współrzędnościowej Zeiss ACCURA z głowicami skaningowymi.

SŁOWA KLUCZOWE: współrzędnościowa maszyna pomiarowa, pomiary skaningowe, błędy dynamiczne

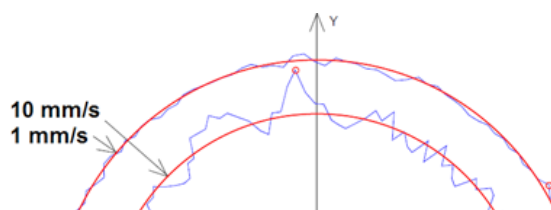
A new method applying a simple master artefact for testing the dynamic performance of coordinate measuring machines (CMM) is proposed. This method is used for identification and evaluation of dynamic errors sources. The validity of the method is experimentally confirmed on a bridge Zeiss ACCURA coordinate measuring machine equipped with scanning probes. KEYWORDS: coordinate measuring machine, scanning measurement, dynamic error

Współrzędnościowa technika pomiarowa jest jedną z najszybciej rozwijających się metod pomiarów geometrycznie złożonych części maszyn. Podstawowym narzędziem pomiarowym jest współrzędnościowa maszyna pomiarowa (WMP lub z ang. CMM). Szczególne popularne są pomiary skaningowe, które umożliwiają wyznaczanie wymiarów geometrycznych, jak również odchyłek kształtu i położenia [1]. Pomiar skaningowy polega na przesuwaniu końcówki pomiarowej po powierzchni mierzonego przedmiotu i rejestrowaniu współrzędnych punktów pomiarowych powierzchni elementu przy użyciu specjalnej głowicy mierzącej, nazywanej również skaningową. Podczas pomiaru wskazania z przetworników pomiarowych głowicy dodawane są do wartości współrzędnych położenia głowicy. Sumy wskazań dla wszystkich trzech osi pomiarowych stanowią wartości współrzędnych położenia końcówki głowicy. Przesuwanie głowicy realizowane jest przez trzy niezależnie sterowane numerycznie osie maszyny XYZ, których głównym celem jest utrzymywanie wskazań głowicy w środku jej zakresu pomiarowego.

Błędy dynamiczne w pomiarach skaningowych WMP i metody ich badania

Dokładność współrzędnościowego pomiaru skaningowego pomiaru zależy w dużej mierze od zmienności mierzonej geometrii, jak również od zadanej prędkości pomiarowej, gdyż jednym z głównych źródeł błędów są błędy dynamiczne powstałe w wyniku przyspieszeń ruchowych zespołów maszyny. Przykładowy wynik pomiaru odchyłki okrągłości

poprzecznego przekroju wałka, wykonany z prędkością skanowania 1 i 10 mm/s, przedstawiono na rys. 1. W przypadku pomiaru z prędkością 10 mm/s ujawniły się błędy dynamiczne pomiaru.



Rys. 1. Fragment wykresu odchyłki okrągłości wałka. Pomiary wykonano z prędkością skanowania 1 i 10 mm/s

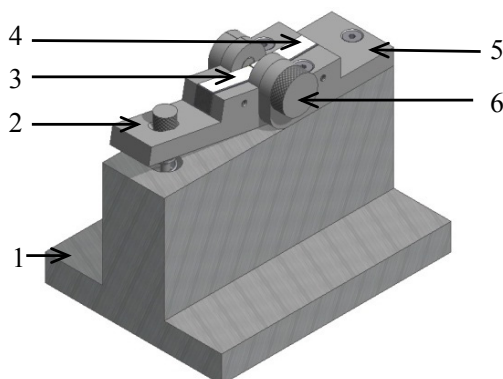
Popularność zagadnień związanych z optymalizacją pomiarów skaningowych w przemyśle jest odzwierciedleniem zainteresowań badawczych ośrodków naukowych w kraju i na świecie. W literaturze można wyodrębnić szereg prac poświęconych badaniom właściwości dynamicznych za pomocą wzorców kształtowych [2–5]. Badania te prowadzą się zazwyczaj do wyznaczenia różnic wyników pomiaru profilu dla dużej i małej prędkości pomiarowej. Drugą ważną grupę prac stanowią metody badań przy użyciu zewnętrznych urządzeń wzorcowych, tj. interferometrów laserowych [6, 7]. Szczególnie duże zainteresowanie badaczy dotyczy również symulacji numerycznych [8, 9]. Jednakże dotychczas nie opracowano jeszcze prostej metody, która umożliwi użytkownikom maszyn WMP oszacowanie i minimalizację błędów dynamicznych w danym zadaniu pomiarowym.

Nowa metoda badań błędów dynamicznych WMP

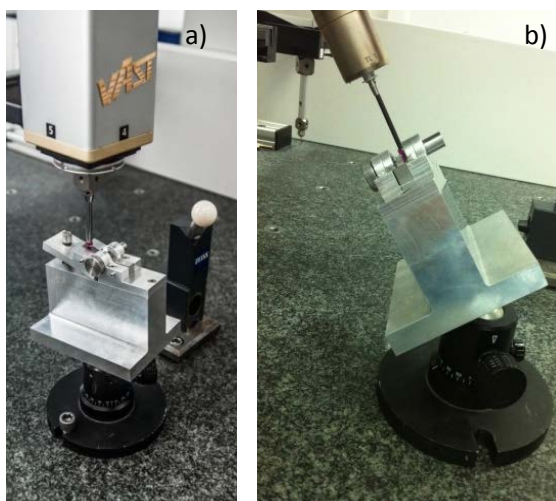
Opracowana metoda badań właściwości dynamicznych WMP polega na pomiarach wzorca kształtowego [10]. Zaproponowany wzorec składa się z dwóch płaszczyzn wzorcowych tworzących regulowany kąt. Technicznie powierzchnie wzorcowe mogą stanowić powierzchnie pomiarowe płytek wzorcowych. Mocowanie płytek oraz precyzyjną regulację kąta zapewnia specjalny uchwyt. Na rys. 2 przedstawiono zespół służący do mocowania i pozycjonowania kątownego płytek wzorcowych o długości nominalnej $L_n = 10$ mm. Zakres regulacji kątowej wzorca wynosi od 0 do 20°. Opracowany zespół jest mocowany bezpośrednio do stołu WMP poprzez podstawę 1 w kształcie teownika lub za pośrednictwem przegubu pozycjonującego, jak na rys. 3. Kostka 5 połączona gwintowo z podstawą jest elementem, na którym osadzona jest jedna z płytek wzorcowych 4. Druga z płytek wzorcowych 3 mocowana jest do drugiej kostki kształtowej 2, mającej możliwość rotacji wokół osi obrotu, zawierającej wspólną krawędź płytek. Blokowanie pozycji kątowej ruchomej kostki jest

* Dr hab. inż. Adam Woźniak prof. PW (wozniaka@mchtr.pw.edu.pl), dr inż. Grzegorz Krajewski – Politechnika Warszawska

realizowane tarciovo za pomocą zacisku 6. Przedstawiona koncepcja uchwytu pozwala z łatwością regulować pozycję kątową powierzchni wzorcowych, jak również umożliwia łatwe orientowanie wzorca w przestrzeni pomiarowej maszyny współrzędnościowej.



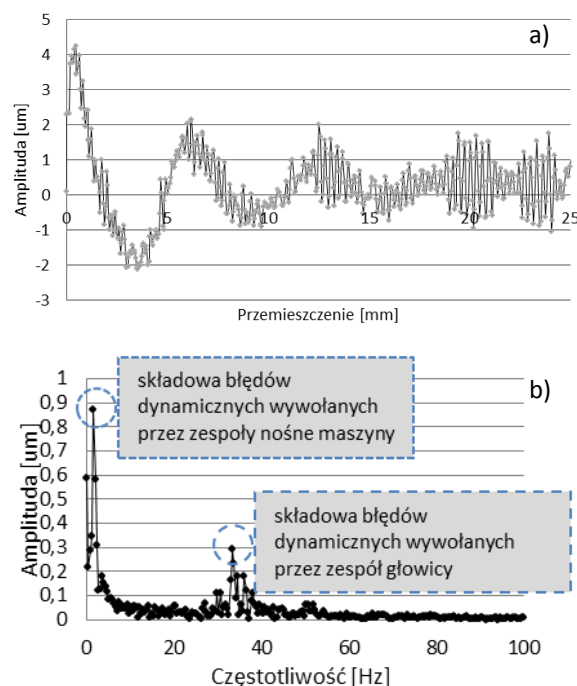
Rys. 2. Widok zespołu wzorca



Rys. 3. Widok różnych orientacji przestrzennych zespołu wzorca: a) ustawienie w płaszczyźnie YZ, b) kątowne ustawienie w płaszczyźnie (XZ) + 45°

Badanie błędów dynamicznych polega na pomiarze skaningowym płaszczyzn wzorcowych, poczynając od płaszczyzny równoległej do osi skanowania, kończąc zaś na płaszczyźnie usytuowanej do niej pod kątem. Nagła zmiana kierunku ruchu stanowi łatwe do zdefiniowania wymuszenie dynamiczne, które może być poddane analizie. W rezultacie pomiarów otrzymujemy wynik skanowania, który zawiera w sobie błędy dynamiczne. Zmiana kierunku ruchu zespołów maszyny powoduje powstanie przyspieszeń, co jest źródłem sił oraz ugięć sprężystych. W efekcie powstają drgania gasnące i niegasnące, jak na rys. 4a, których analiza częstotliwościowa pozwala przyporządkować je do poszczególnych elementów maszyny. Przykładowy wynik badania błędów dynamicznych z rozdzieleniem informacji o dwóch głównych składowych tego błędu przedstawiono na rys. 4b. Zaproponowany wzorec umożliwia oszacowanie błędów dynamicznych pomiarów skaningowych w niezwykle prosty sposób. Regulowany kąt nachylenia powierzchni wzorcowych umożliwia symulację dowolnej zmienności geometrii w szerokim zakresie prędkości skanowania. Badania z zastosowaniem wzorca można przeprowadzić w różnych płaszczyznach przestrzeni pomiarowej maszyny. Opracowana metoda może posłużyć użytkownikom maszyn WMP do oszacowania wartości oraz minimalizacji błędów dynamicznych w danym zadaniu pomiarowym. Dalsze prace w zakresie badania błędów

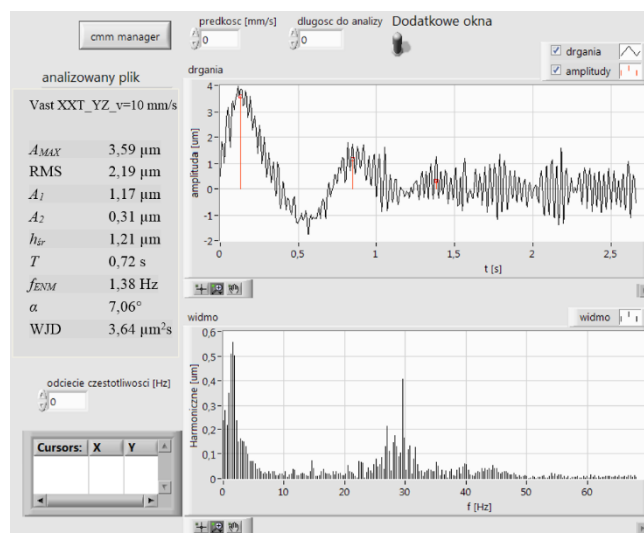
dynamicznych mogą zmierzać w kierunku opracowania modelu teoretycznego w celu zastosowania numerycznej korekcji tych błędów.



Rys. 4. Wyniki badania błędów dynamicznych maszyny Zeiss ACCURA z głowicą pasywną VAST XXT podczas pomiarów z prędkością skanowania 10 mm/s: a) wykres błędów, b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa

Oprogramowanie badawcze

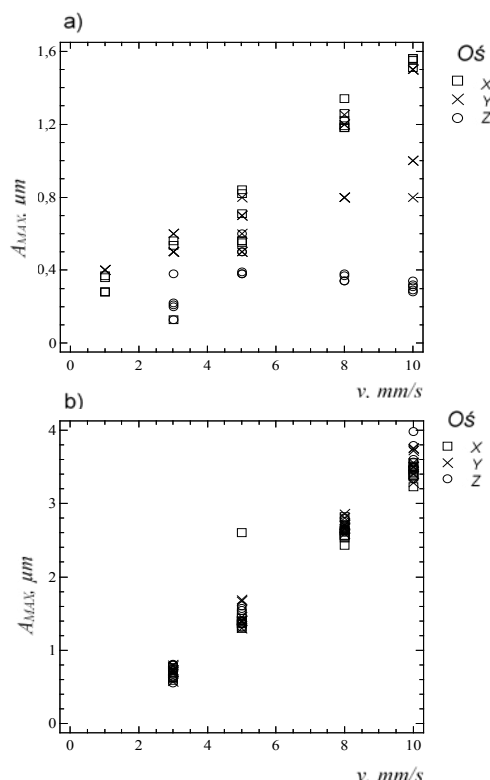
Opracowana metodyka badania właściwości dynamicznych maszyny polega na pomiarze w trybie skaningowym prostoliniowości opracowanego wzorca. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczane są charakterystyki dynamiczne i obliczane parametry ilościowe, reprezentujące błędy dynamiczne WMP. W tym celu został opracowany program umożliwiający analizę wyników tak przeprowadzonego badania. Na rys. 5 przedstawiono główne okno programu do analizy błędów dynamicznych WMP. Widoczne są dwa wykresy. Górny przedstawia różnicę pomiędzy wartością zarejestrowaną przez WMP a elementem wzorcowym.



Rys. 5. Widok ekranu głównego oprogramowania do analizy błędów dynamicznych

TABLICA. Wykaz parametrów wyznaczanych przez oprogramowanie

Oznaczenie i jednostka	Znaczenie parametru
A_{MAX} , μm	największa wartość uzyskanej amplitudy (z reguły z pierwszego okresu)
A_1 , μm	największa wartość uzyskanej amplitudy dla drugiego okresu
A_2 , μm	największa wartość uzyskanej amplitudy dla trzeciego okresu
A_{ZG} , μm	amplituda drgań zespołu głowicy
h_{sr}	średnia wartość tłumienia drgań gasnących
T , s	okres drgań zespołów nośnych maszyny
f_{ENM} , Hz	częstotliwość drgań zespołów nośnych maszyny
f_{ZG} , Hz	częstotliwość drgań zespołu głowicy
α , °	kąt nachylenia pomiędzy płaszczyznami wzorca
WJD , $\mu\text{m}^2\text{s}$	wskaźnik jakości dynamicznej



Rys. 6. Maksymalna amplituda błędów dynamicznych maszyny wyposażonej w: a) głowicę aktywną, b) głowicę pasywną

Otrzymane wykresy odchyłek mogą być przedstawione jako funkcje czasu pomiaru lub drogi (osi pomiarowej). Residua te mają charakter drgań okresowych o kilku wyraźnie rozróżnialnych częstotliwościach. Na dolnym wykresie przedstawiono analizę FFT otrzymanego sygnału czasowego. W tabelicy przedstawiono wykaz parametrów dynamicznych wyznaczanych przez oprogramowanie oraz ich definicje.

Oprogramowanie pracuje na plikach tekstowych zawierających współrzędne zarejestrowanych punktów pomiarowych. Program umożliwia import danych pomiarowych z różnych plików generowanych przez software popularnych dostawców WMP. Są nimi np. Calypso firmy Carl Zeiss oraz CMM Manager firmy LK.

Przykładowe wyniki badań

Na rys. 6 przedstawiono wyniki badań maksymalnej amplitudy błędów dynamicznych maszyny Zeiss ACCURA

wyposażonej zarówno w głowicę aktywną VAST GOLD, jak i pasywną VAST XXT, w zależności od prędkości skanowania i osi pomiarowej.

Badania te powtórzono trzykrotnie dla każdego z kierunku przestrzeni pomiarowej maszyny, gdzie na wykresie oś X oznaczono kwadratem, Y krzyżykiem, a Z kółkiem. Badania te przeprowadzono dla pięciu poziomów prędkości 1, 3, 5, 8, 10 mm/s.

Na rys. 6a przedstawiono wyniki badań maksymalnej amplitudy drgań maszyny wyposażonej w głowicę aktywną VAST GOLD. Pobieżna analiza wykresu wskazuje na zależność amplitudy maksymalnej A_{MAX} od prędkości skanowania, przy czym najsilniejsza zależność występuje dla osi X. W dość niewielkim stopniu zależność prędkości skanowania występuje dla osi Z. Największą amplitudę maksymalną zarejestrowano dla prędkości 10 mm/s w osi X – 1,5 μm . Na rys. 6b przedstawiono w podobny sposób wyniki badań amplitudy maksymalnej wskazań w zależności od prędkości skanowania dla tej samej maszyny, tym razem wyposażonej w głowicę pasywną VAST XXT. Wyniki badań wskazują na bardzo silną zależność pomiędzy prędkością skanowania oraz amplitudą maksymalną A_{MAX} dla każdej z osi przestrzeni pomiarowej WMP. Podobnie jak dla głowicy aktywnej największą wartość amplitudy maksymalnej zarejestrowano dla prędkości skanowania 10 mm/s, z tym że dla osi Z. Maksymalna zarejestrowana wartość amplitudy wynosi 4 μm .

Podsumowanie

Przedstawiono prostą metodę pozwalającą na ilościowe i jakościowe zbadanie błędów dynamicznych w pomiarach skaningowych na maszynach współrzędnościowych. Możliwa jest również identyfikacja głównych źródeł błędów. Opisano dedykowane oprogramowanie do analizy danych pomiarowych, umożliwiające w sposób automatyczny wyznaczanie parametrów związanych z błędami dynamicznymi maszyny. Wyniki badań błędów dynamicznych WMP mogą być archiwizowane zarówno w postaci cyfrowej, jak i w postaci raportów.

LITERATURA

1. Ratajczyk E., Woźniak A. „Współrzędnościowe systemy pomiarowe”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
2. Morse E.P. „Artifact selection and its role in scanning probes evaluation”. The UNC of Carolina at Charlotte, 8/2002.
3. PN ISO 10360-4: 2002. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego.
4. Farooqui S.A., Morse E.P. „Alternative artifacts for evaluating scanning CMM performance”. Department of Mechanical Engineering and Engineering Science, The University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC 28223.
5. Garrard K.P., Dow T.A., Folkert K.F. „Ring gauge for evaluation of CMM dynamics”. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
6. Pereira P.H. „Characterization and compensation of dynamics errors of a scanning coordinate measuring machine”. Ph.D. Thesis, The University of North Carolina at Charlotte, 2001, USA.
7. Woźniak A., Dobosz M., Ratajczyk E. Testing the inaccuracy of CMM scanning probe. IMEKO TC14 International Symposium on Metrology and Quality Control – ISMQC. Cairo (Egypt), 24-27 September 2001. Proc. P.57-62.
8. Van Villiet W.P., Schellekens P.H.J. „Accuracy limitation of fast mechanical probing”. Eindhoven University of Technology, Section Precision Engineering, Eindhoven, The Netherlands.
9. Mu Y.H., Ngoi B.K.A. „Dynamic Error Compensation of Coordinate Measuring Machines for High-Speed Measurement”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 15 (1999): pp. 810–814.
10. Krajewski G., Woźniak A. „Simple master artefact for CMM dynamic error identification”. *Precision Engineering*. Vol. 38 (2014): pp. 64–70. ■