

5 osiowa obrabiarka CNC, systemy diagnostyczne, kalibracja, 3D quickSET, R-test, Precyzyjny analizator błędów osi obrotowych (Precision Spindle Error Analyzer SEA), błędy obrabiarki CNC, współrzędne osi obrotowych, osie sterowane obrabiarek CNC CNC machine tools, diagnostics systems, calibration, 3D quickSET, R-test, Precision Spindle Error Analyzer SEA, errors of CNC machine tool, coordinates of the rotary axes, numerically controlled axis of CNC machine tools

Jerzy JÓZWIK¹
Maciej BYSZEWSKI²

BADANIE DOKŁADNOŚCI RUCHÓW OSI WIRUJĄCEJ WRZECIONA ORAZ POŁOŻENIA ŚRODKÓW OSI OBROTOWYCH OBRABIAREK CNC

W pracy przedstawiono metody i scharakteryzowano urządzenia pomiarowe i diagnostyczne – kalibracyjne osi obrotowych obrabiarek sterowanych numerycznie CNC. W szczególności omówiono takie systemy jak: precyzyjny analizator błędów osi obrotowych (Precision Spindle Error Analyzer SEA), 3D quickSET, R-test. Przedstawiono metody pomiaru osi obrotowych za pomocą autonomicznych urządzeń pomiarowych, takich jak np. R-test, jak również metod polegających na pomiarze wzorca za pomocą wewnątrzobrabiarkowych systemów pomiarowych (sond pomiarowych) np. systemem 3D quickSET.

THE ACCURACY OF THE SPINDLE ROTATING MOVEMENTS AND LOCATIONS OF THE ROTARY AXIS CENTER ERRORS OF CNC MACHINE TOOLS

The following paper presents methods and characterises tools for the measurement, monitoring and calibration of CNC machine tool rotary axis. Particular attention was devoted to the following systems: Precision Spindle Error Analyzer SEA, 3D quickSET and R-test. The paper discusses rotary axis measurement methods involving autonomous measuring tools, such as R-test, and methods consisting in master ball displacement evaluation with measuring probes, e.g. 3D quickSET system.

1. WSTĘP

Na rynku istnieją rozpoznane metody badań osi liniowych w obrabiarkach CNC. Można do nich zaliczyć system diagnostyczny QC20-W ballbar firmy Renishaw, Cross-Grid firmy Heidenhain oraz interferometry laserowe kilku znanych producentów [10, 16, 17]. Są one dość powszechnie stosowane w przemyśle. Inaczej jest w przypadku metod badań osi obrotowych oraz oceny kinematycznych zależności pomiędzy tymi osiami. Metody te nie są jeszcze popularne, a potencjalnym użytkownikom nastęrczają one wielu kłopotów zwłaszcza w interpretacji otrzymanych wyników pomiarów. Najczęściej stosowaną realizacją osi obrotowych są stoły uchylno-obrotowe zamontowane jako uzupełnienie osi liniowych. Zwykle osie obrotowe są równoległe do wybranych osi liniowych maszyny. Występują także obrabiarki, w których oś obrotowa jest usytuowana pod kątem 45 stopni do jednej z osi liniowych maszyny [6, 10, 16].

Osie obrotowe w centrach obróbczych mogą być związane mechanicznie nie tylko ze stołem roboczym. Występują także rozwiązania konstrukcyjne obrabiarek, w których oś wrzeciona ma możliwość realizacji przemieszczeń kątowych.

Metody badawcze związane z oceną dokładności osi obrotowych w centrach obróbczych można podzielić na dwie kategorie. Jedną z nich jest metoda oceny dokładności pozycjonowania osi obrotowej, którą wyznacza się w analogiczny sposób jak w osiach liniowych. Drugą kategorię metod stanowią metody oceny orientacji przestrzennych osi obrotu w stosunku do osi liniowych oraz wyznaczanie rzeczywistej osi obrotu jak również ocenę stabilności położenia środka obrotu. Jeszcze inną grupę systemów stanowią urządzenia pozwalające na ocenę ruchów błędzący osi wrzecion czy stołów obrotowych. Wszystkie te metody służą poprawie ogólnej dokładności obrabiarki i w konsekwencji dokładności wytwarzania [1-19].

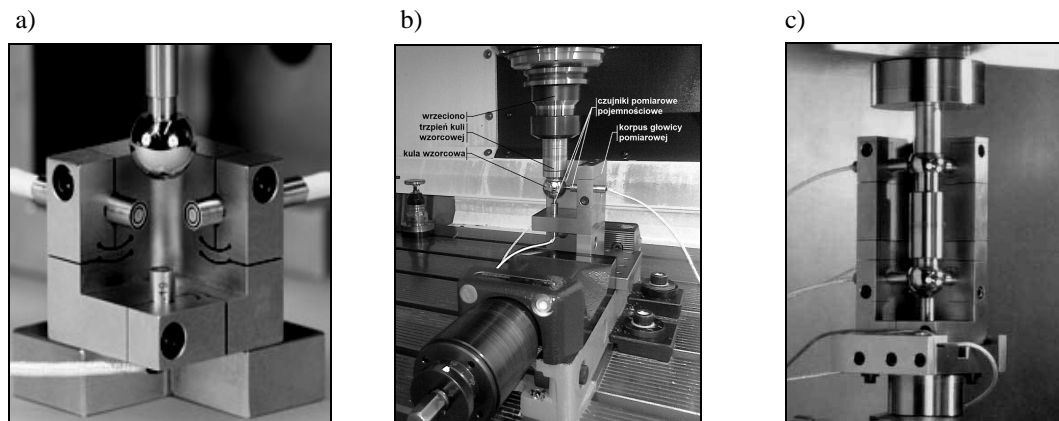
2. BADANIA GEOMETRYCZNEJ DOKŁADNOŚCI RUCHU WIRUJĄCEJ OSI

Badania wykazują, że oś obrotu jest pojęciem teoretycznym. W praktyce możemy mówić o chwilowej osi obrotu, przyjmującej różne położenia w zależności od położenia kąтового, wartości prędkości ruchu obrotowego i sił działających na obracający się stół [1-4, 6-9, 12-14]. Metoda, która została opracowana przez

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra podstaw inżynierii produkcji, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

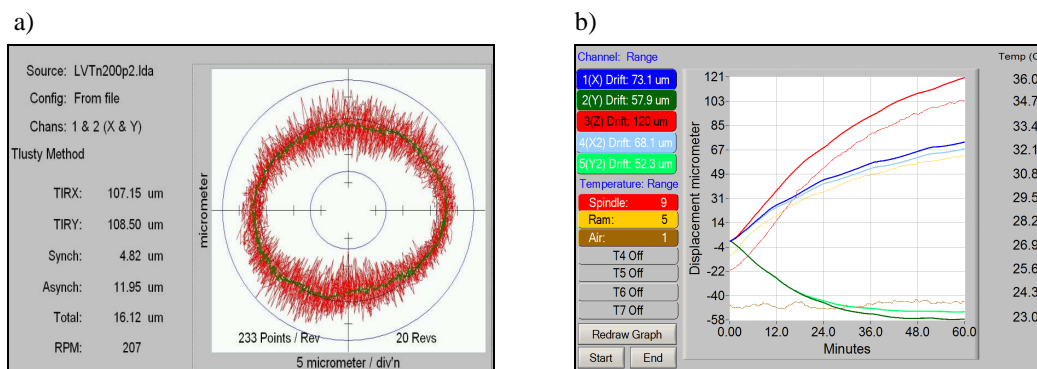
² Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, 02-525 Warszawa, ul. św. Andrzeja Boboli 8

firmę Lion Precision służy w zasadzie do sprawdzania dokładności wrzecion obrabiarek sterowanych numerycznie ale nie tylko. Zaproponowaną przez Lion Precision metodę, można skutecznie zaadoptować do pomiarów stołów obrotowych, których oś obrotu stanowi zazwyczaj oś sterowaną C [20, 21]. Wspomniana metoda pomiaru polega na pomiarze za pomocą trzech bezstykowych czujników pojemnościowych o bardzo dużej rozdzielczości ($0,01 \mu\text{m}$) i dokładności ($<0,05 \mu\text{m}$), względnych przemieszczeń kuli wzorcowej zamocowanej w osi obrotu testowanego stołu. W trakcie ruchu obrotowego osi stołu, następuje rejestracja przemieszczeń kuli wzorcowej w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, dając rzeczywisty obraz przemieszczenia rzeczywistej osi obrotu stołu [6]. Metoda niesie z sobą dużą ilość informacji diagnostycznych, a wyznaczone wskaźniki przekładają się na przewidywaną lepszą dokładność obróbki, lub wskazują na problemy źródłowe pracy osi obrotowych (np. łożysk stołu lub zależnie od obiektu badań - wrzeciona). Rozbudowana analiza wyników pomiarów pozwala na odseparowanie błędów związanych z odchyłką okrągłości kuli wzorcowej oraz mimośrodowi pomiedzy osią obrotu oraz środkiem kuli wzorcowej na drodze numerycznej. Na rysunku 1 pokazano „głowicę pomiarową” do rejestracji błędów dynamicznych i dryftu temperaturowego wrzecion i stołów obrotowych (osi wirujących) analizatora Precision Spindle Error Analyzer. Na rysunku 1a zaprezentowano rozmieszczenie czujników pomiarowych względem trzpienia wzorcowego zamocowanego w osi obrotu zaś na rysunku 1b – ustawienie systemu z 3 sensorami na obrabiarce. Analizator osi obrotowych wrzecion i stołów obrotowych budowany jest w kilku wersjach. Jedną z nich jest wersja 3- czujnikowa zaprezentowana na rysunku 1a oraz wersja 5-czujnikowa przedstawiona na rysunku 1c. Na rysunku 1c przedstawiono ustawienie systemu z 5 sensorami podczas pomiaru na obrabiarce wieloosiowej.



Rys. 1. Głowica pomiarowa analizatora błędów dynamicznych i dryftu temperaturowego wrzecion oraz stołów obrotowych (osi wirujących) Precision Spindle Error Analyzer: a) rozmieszczenie czujników pomiarowych względem trzpienia wzorcowego zamocowanego w osi obrotu [20,21], b) ustawienie systemu z 3 sensorami na obrabiarce, c) ustawienie systemu z 5 sensorami na obrabiarce [20,21]

Na rysunku 2a przedstawiono przykładowe chwilowe położenia osi obrotu w funkcji kąta obrotu we współrzędnych biegunowych dla zadanej prędkości obrotowej (zawarte są pomiędzy okręgiem opisanym zewnętrznym i wewnętrznym względem środka wyznaczonego metodą najmniejszej sumy kwadratów).



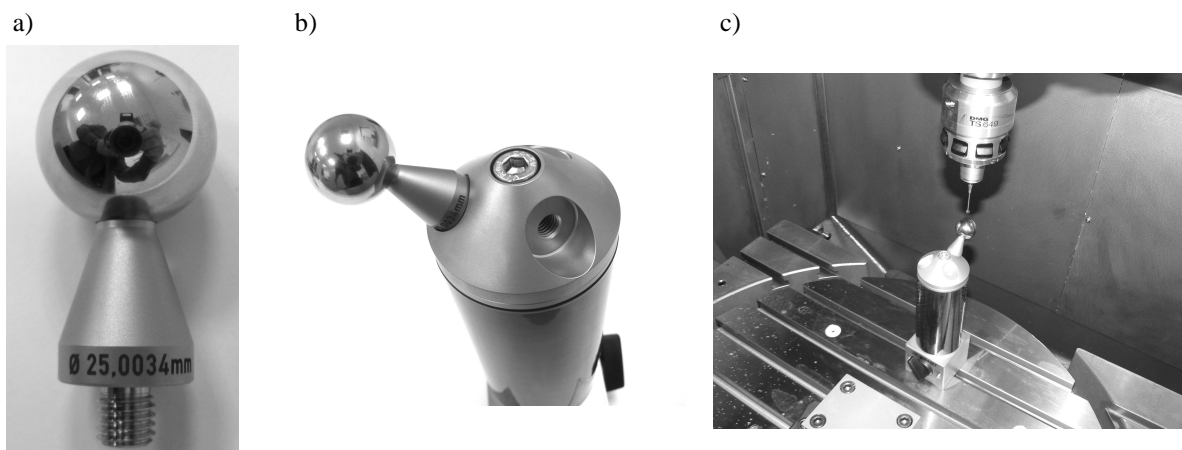
Rys. 2. Wykres promieniowych zmian położenia osi stołu w funkcji: a) położenia kąowego we współrzędnych biegunowych uzyskany na podstawie 20 obrotów z wyznaczeniem analizowanych błędów (synchronicznego, asynchronicznego, TIRX, TIRY, całkowitego oraz zmierzonych obrotów) [21], b) dryftu termicznego [20]

Precyzyjny analizator błędów wrzecion i stołów obrotowych pozwala również na pomiar i analizę dryfu temperaturowego. Przykładowe wyniki pomiaru tego błędu przedstawiono na rysunku 2b.

Przy pomiarach błędów ruchu osi bezpośrednio mierzony jest parametr nazywany TIR (Total Indicator Reading), na podstawie którego wyznaczamy błędy ruchu. Pomocny jest on także do sumarycznej analizy dokładności i diagnostyki wrzecion. Reprezentuje on maksymalne zarejestrowane przemieszczenia na kierunku ustawienia czujnika. Na wartość błędu TIR mają wpływ: amplituda przemieszczeń osi wrzeciona, błędy dynamiczne związane ze sztywnością oraz niewyważeniem dynamicznym osi obrotowej, rezonanse oraz inne. Wyznaczanych jest szereg dodatkowych błędów, takich jak: błąd synchroniczny, asynchroniczny, całkowity, odchyłki kątowe i dryfty temperaturowe, przemieszczenia w kierunkach promieniowym i osiowym, które reprezentują różne źródła błędów analizowanej osi maszyny. Prezentowany w pracy system Precision Spindle Error Analyzer pozwala na prowadzenie testów zgodnie z obowiązującymi normami: ISO230-3, ISO230-7, ANSI/ASME Standard B5.54-2005, ANSI/ASME B5.57-1998, ANSI/ASME B89.3.4-2010, JIS B 6190-7 [1-18].

3. METODA WYZNACZANIE POŁOŻENIA ŚRODKA KINEMATYCZNEGO OSI OBROTOWYCH SYSTEMEM 3D QuickSET

Położenie środka kinematycznego osi obrotowych jest niezwykle ważnym zagadnieniem podczas konstituowania wyrobów na 5 osiowych obrabiarkach sterowanych numerycznie. Zmiana położenia środka obrotu (przecięcia się osi sterowanych numerycznie (X, Y, X)) np. wskutek kolizji czy zużycia w wyniku długotrwałej pracy obrabiarki czy też częstych przecięciań, może powodować istotne błędy wytwarzanych części, szczególnie podczas symultanicznej obróbki 5-osiowej. Jednym z systemów umożliwiających badanie położenia środka kinematycznego osi obrotowej jest system 3D quickSET. 3D quickSET jest specjalistycznym, opracowanym przez DMG urządzeniem do precyzyjnego wyznaczania środków osi obrotowych na maszynach 5 – osiowych (rys. 3) [7].



Rys. 3. Zestaw diagnostyczno-kalibracyjny 3D quickSET firmy DMG: a) kuli wzorcowa ($d=25,0034$ mm) wykorzystywana podczas pomiarów, b) głowica trzpienia systemu z podstawą magnetyczną, c) przebieg pomiaru na obrabiarce

Razem z zestawem 3D quickSET występuje czujnik o niedokładności pomiaru $2\mu\text{m}$ i sile nacisku $0,25\text{N/m}$. Służy on do ustawiania bicia sondy przed pomiarem (skalibrowania sondy). 3D quickSET zakończony jest osadzoną na trzpieniu gwintowanym kulka z opisaną precyzyjnie średnicą równą $25,0034\text{mm}$ (rys. 3a). Kulka z trzpieniem gwintowanym (rys. 3b) łączy się w odpowiednio gwintowanym gnieździe usytuowanym i wykonanym w końcówce korpusu głównego 3D quickSET-a (rys.3b). Położenie otworów gwintowanych korpusu głównego 3D quickSET-a umożliwia zamocowanie kulki w kilku pozycjach: pod kątem 0° (pionowo), 45° , oraz poziomo pod kątem 90° , nadając systemowi w pewnym sensie uniwersalny charakter. Położenie kulki wzorcowej ma istotne znaczenie podczas pomiarów różnych konfiguracji stołów obrotowych i obrotowo-uchyłnych (zakresach kątowych możliwych do realizacji przez oś obrotową).

Nadrzędnym celem testu realizowanego z wykorzystaniem systemu DMG 3D quickSET jest określenie współrzędnych punktu, względem którego system sterowania maszyny przelicza ustawiony fizycznie środek osi obrotowej. Proces ten jest wykonywany po to, żeby maszyna wykorzystując cykl skrętu prawidłowo się skręcała, a przedmiot obrabiany uzyskiwał jak najdokładniejsze wymiary. Ustawiony fizycznie środek osi obrotowej zapewnia zatem wysoką dokładność obróbki, szczególnie symultanicznej obróbki wykańczającej. Użycie DMG 3D quickSET-a jest zatem uzasadnione w przypadku kiedy obrabiamy części o wąskich toleran-

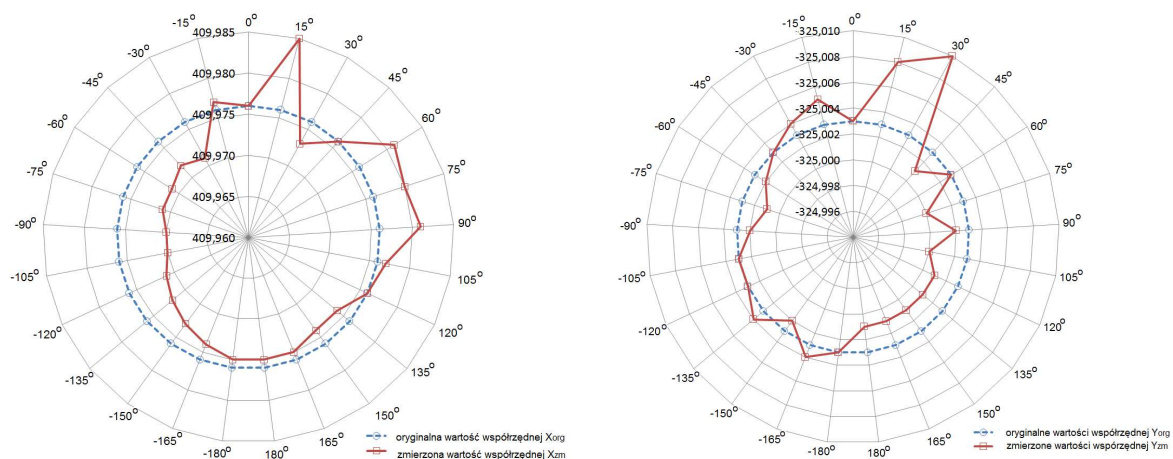
cyjach wymiaru i kształtu, przy często zmieniającym się profilu obróbki (różne materiały – zarówno w sensie rodzaju jak i właściwości mechanicznych, np. twardości, właściwości warstwy wierzchniej), po kolizji wrzeźciana (narzędzia) ze stołem maszyny (przedmiotem obrabianym), po długim okresie użytkowania maszyny, podczas obróbki powierzchni nieciągłych (obróbka przerywana), po relokacji obrabiarki, itp.

Maszyna musi posiadać taki punkt, względem którego transformuje układ podczas obróbki wieloosiowej. Dotychczas, bez systemu 3D quickSET, proces ten realizował serwisant, który z wykorzystaniem czujników i miernika, mierzył i manualnie ustalał takie położenie osi obrotowej. Serwisant ręcznie przypisywał wartości wyników pomiaru do tabel kinematyki maszyny. Do tabel tych nie ma zazwyczaj dostępu użytkownik maszyny, przez co kalibracja osi obrotowej w warunkach użytkowania jest utrudniona i wymaga interwencji serwisu. Dzięki zastosowaniu systemu 3D quickSET wynik pomiaru może być bezpośrednio zapisany w tabeli kinematyki obrabiarki. Użycie 3D quickSET-a wymaga bezwzględnie dokładnej kalibracji sondy pomiarowej przedmiotu obrabianego. Tylko prawidłowo skalibrowana sonda inspekcyjna może być wykorzystana podczas pomiaru z wykorzystaniem 3D quickSET-a, a uzyskany wynik pomiaru przyniesie oczekiwane rezultaty.

Typowy przebieg testu 3D quickSET obejmuje czynności, które należy wykonać w następującej kolejności:

- zamocować kulkę w odpowiednim gnieździe 3D quickSET-a (0° , 45° , 90°), stosownie do badanej osi sterowanej numerycznie i konfiguracji stołu maszyny,
- umieścić urządzenie na stole obrabiarki korzystając ze zintegrowanej z korpusem głównym urządzenia podstawki magnetycznej,
- pobrać z magazynu narzędziowego skalibrowaną (lub skalibrować) sondę pomiarową,
- zgrubnie ustawić inspekcyjną sondę pomiarową w osi kuli 3D quickSET-a, (wskazane jest ustawienie ręczne z wykorzystaniem kółka elektronicznego),
- przygotować program pomiarowy (cykl DM_QSET 3D quickSET) i załączyć sondę,
- wykonać cykl DM_QSET 3D quickSET, polegający na pomiarze kulki skalibrowaną sondą inspekcyjną w kilku pozycjach, z obrotem stołu o 90° lub 180° , (sonda dokonuje pomiaru położenia kulki, znajduje środek kulki i dokonuje ponownie dokładnego pomiaru, następnie stół wraz z głowicą pomiarową 3D quickSET-a obraca się o 90° (lub 180°), sonda ponownie dokonuje pomiaru. Na podstawie tych pomiarów wyznaczany jest środek stołu obrotowego lub uchylnego, a wyniki pomiarów automatycznie zostają przeniesione do tabeli kinematyki maszyny (w miejsce odpowiednich współrzędnych X, Y dla osi C a następnie osi A,
- zrestartować punktu zerowy.

Przykładowe charakterystyki opisujące charakter zmian zmierzonych wartości współrzędnych kalibracyjnych (X_{zm} , Y_{zm}) podczas kalibracji osi C obrabiarki sterowanej numerycznie zaprezentowano na rysunku 4.



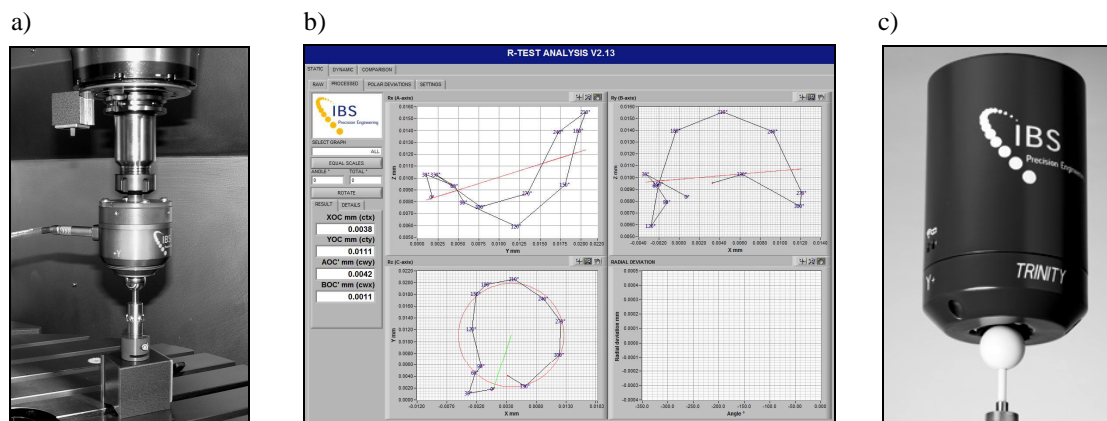
Rys. 4. Przebieg zmian przykładowych wyników pomiarów podczas kalibracji osi obrotowej sterowanej numerycznie C urządzeniem 3d quickSet firmy DMG: a) wartości współrzędnej X_{zm} w funkcji kąta pomiaru α na tle oryginalnej wartości X_{org} z tabeli kinematyki maszyny, b) wartości współrzędnej Y_{zm} w funkcji kąta pomiaru α na tle oryginalnej wartości Y_{org} z tabeli kinematyki maszyny

Na rysunku 4a pokazano charakter zmian zmierzonej wartości współrzędnej X_{zm} w funkcji kąta pomiaru α podczas kalibracji osi obrotowej sterowanej numerycznie C urządzeniem 3d quickSet. Wyniki pomiaru przedstawiono na tle oryginalnej wartości X_{org} z tabeli kinematyki maszyny. Na rysunku 4b pokazano przebieg zmian wartości współrzędnej Y_{zm} w funkcji kąta pomiaru α podczas kalibracji osi obrotowej sterowanej numerycznie C urządzeniem 3d quickSet na tle oryginalnej wartości Y_{org} z tabeli kinematyki maszyny. Test urządzeniem 3d

quickSet jest przykładem systemu diagnostyczno-kalibracyjnego wykorzystującego wewnątrz-obrabiarkowe narzędzia pomiarowe (inspekcyjną sondę przedmiotową). [7]

4. DIAGNOSTYKA OSI OBROTOWYCH ZA POMOCĄ SYSTEMU R-TEST

Bardzo ciekawą metodę badania osi obrotowych dla centrów obróbczych wieloosiowych opracowała firma IBS Precision Engineering. Sercem systemu jest głowica wyposażona w trzy niezależne precyzyjne przetworniki pomiarowe. Głowicę na czas testów mocuje się w oprawce narzędziowej we wrzecionie obrabiarki. Na stole maszyny zaś mocuje się kulę wzorcową w pewnej odległości od środka obrotu. Program pomiarowy uruchamiany na maszynie powoduje najazd głowicy na kulę wzorcową. Kolejnym etapem procesu diagnostycznego jest uruchomienie programu realizującego ruch obrotowy stołu z określoną prędkością, przy jednoczesnym ruchu osi liniowych w trybie interpolacji kołowej. Względna prędkość pomiędzy kulą wzorcową zamocowaną na stole obrotowym oraz głowicą zamocowaną we wrzecionie wynosi 0 [1 – 5, 8 – 9, 13 – 14].



Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów obrabiarki pięcioosiowej za pomocą systemu R-test: a) ustawienie systemu na obrabiarce, b) przykładowe wyniki pomiaru statycznego, c) widok nowej głowicy pomiarowej TRINITY [21]

W efekcie mierzona jest względna różnica pomiędzy położeniem kuli wzorcowej przez przetworniki głowicy w sposób ciągły na całym obwodzie okręgu interpolowanego. Podobne pomiary powtarza się dla różnych konfiguracji przestrzennych osi, co pozwala uzyskać dużą ilość informacji o geometrycznych zależnościach pomiędzy osiami liniowymi oraz obrotowymi [12]. Wynikiem testów jest szczegółowy raport diagnostyczny pozwalający ocenić prostopadłości osi obrotowych w stosunku do osi liniowych, jak również położenie rzeczywistych środków obrotu osi obrotowych w stosunku do współrzędnych globalnych obrabiarki. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że jest to metoda umożliwiająca badania dynamiczne obrabiarki [1 – 5, 8 – 9, 13 – 14].

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono najbardziej znane metody diagnostyki i badania dokładności ruchów osi wirującej oraz położenie środków osi obrotowych. Zaprezentowany w niniejszym opracowaniu opis metod badania osi obrotowych stanowi użyteczny przewodnik w zakresie innowacyjnych i nowoczesnych obecnie systemów i urządzeń diagnostycznych. Pozwoli użytkownikom na sprawną realizację testów a przez to poprawę dokładności wytwarzania podczas obróbki 5-osiowej. W części drugiej niniejszej pracy zaprezentowano metody oceny położenia środków kinematycznych osi obrotowych (względnie błędów położenia osi) zarówno z wykorzystaniem autonomicznych urządzeń pomiarowych, tak jak np. systemu R-test, jak również metody pomiaru położenia osi z wykorzystaniem wzorca (kuli wzorcowej) i wewnątrz-obrabiarkowego systemu pomiarowego (sondy pomiarowej).

Niestety nie da się jednoznacznie porównać opisywanych metod, gdyż każda z nich daje unikalne informacje, które mają wpływ na dokładność pracy obrabiarki.

Pomiary i kalibracja obrabiarek 5-osiowych z zastosowaniem omówionych metod i urządzeń pozwala na utrzymanie wysokiej dokładności geometrycznej i kinematycznej obrabiarki poprzez wprowadzaną korektę błędów kinematycznych. Wykorzystanie omawianych systemów poprzez automatyczny samodzielny pomiar, pozwala zaoszczędzić czas i zmniejszyć koszty usług serwisowych. W sposób pośredni umożliwia utrzymanie wysokich wymagań jakościowych wytwarzanych części oraz utrzymanie wąskich tolerancji konstytuowanych wymiarów geometrycznych obrabianych przedmiotów.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Florussen G.H.J., Spaan H.A.M.: *Dynamic R-Test for rotary tables on 5-axes machine tools*. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Procedia CIRP 1 2012. Available on-line at www.sciencedirect.com: 536 – 539.
- [2] Hong C., Ibaraki S., Oyama Ch.: *Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-Test with separating the influence of squareness errors of linear axes*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2012; 59: 24-33.
- [3] Ibaraki S., Iritani T., Matsushita T.: *Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2013; 68.
- [4] Ibaraki S., Iritani T., Matsushita T.: *Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2012; 58: 44-53.
- [5] Ibaraki S., Oyama Ch., Otsubo H.: *Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2011; 51 (3): 190–200.
- [6] Jastrzębski R., Krajewski, G.: *Metody diagnostyki błędów precyzyjnych stołów obrotowych w obrabiarzach CNC*, XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna “Metrologia w Technologiach Wytwarzania”, Pułtusk 11-14 Września 2011 r.
- [7] Józwick J., Kuric I., Grozav S., Ceclan V.: *Calibration of 5 axis CNC machine tool with 3D quickSET measurement system*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, ISSUE 1/2014, vol. 12.
- [8] Józwick J., Kuric I., Grozav S., Ceclan V.: *Diagnostics of CNC machine tool with R-Test system*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, ISSUE 1/2014, vol. 12, p.52-57.
- [9] Józwick J., Lonkwick P., Sága, M., Kuric, I.: *R-Test Static Measurement of The 5-axis CNC Machining Centre Rotary Axis Kinematic Centre Error*. Manufacturing Technology. ISSN 1213–2489, Vol. 14, No. 2, 2014.
- [10] Majda P.: *Pomiary i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*. Inżynieria Maszyn 2011; 16 (1-2): 126-134.
- [11] Majda P.: *The influence of geometric errors compensation of a CNC machine tool on the accuracy of movement with circular interpolation*. Advances in Manufacturing Science and Technology 2012; 36 (2): 59-67.
- [12] Postlethwaite S.R., Ford D.G., Morton D.: *Dynamic calibration of CNC machine tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 1997; 37 (3): 287-294.
- [13] Spaan H.A.M., Florussen G.H.J.: *Determining the 5-axes machine tool contouring performance with dynamic R-test measurements*, IBS Precision Engineering, Netherlands Proceedings of the 12th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology. Stockholm Sweden 2012; 1, 2..
- [14] Spaan H.A.M., Florussen G.H.J.: *Determining the 5-axes machine tool contouring performance with dynamic R-Test measurements*. Proceedings of the 12th euspen International Conference – Stockholm – June 2012. IBS Precision Engineering, the Netherlands.
- [15] Sztendel S., Pislaru C., Longstaff A.P., Fletcher S., Myers A.: *Five-Axis Machine Tool Condition Monitoring Using dSPACE Real-Time System*. Journal of Physics: Conference Series 364, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering 2012.
- [16] Turek P., Kwaśny W., Jędrzejewski J.: *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn 2010; 5 (1-2): 8-37.
- [17] Turek P., Kwaśny W., Jędrzejewski J.: *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn 2010; 15 (1-2): 7-37.
- [18] Weikert S.: *R-Test, a New Device of Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools*, CIRP Annals 2004; 53: 1:429.
- [19] Woźniak, A., Byszewski, M., Jankowski, M., Krajewski, G.: *Spatial Characteristics of the Triggering Force of Touch Probes for CNC Machine Tools*, 2nd International Conference on Virtual Machining Process Technology, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, May 13-17, 2013.
- [20] <http://www.lionprecision.com/products.html>, Materiały firmy IBS Precision Engineering.