

*5 osiowa obrabiarka CNC, systemy diagnostyczne, kalibracja, AxiSet™ Check-Up, kalibrator osi obrotowych XR-20, LaserTRACER, LaserTRACER-MT, błędy obrabiarki CNC, współrzędne osi obrotowych, osie sterowane obrabiarek CNC CNC machine tools, diagnostics systems, calibration, AxiSet™ Check-Up, LaserTRACER, LaserTRACER-MT, Rotary Axis Calibrator XR20, errors of CNC machine tool, coordinates of the rotary axes, numerically controlled axis of CNC machine tools*

Jerzy JÓZWIK<sup>1</sup>  
Maciej BYSZEWSKI<sup>2</sup>

## **BADANIE DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA OSI OBROTOWYCH WIELOOSIOWYCH OBRABIAREK CNC ORAZ BŁĘDÓW WOLUMETRYCZNYCH**

W pracy przedstawiono metody i urządzenia pomiarowe oraz diagnostyczno - kalibracyjne osi obrotowych i błędów wolumetrycznych obrabiarek sterowanych numerycznie CNC. W szczególności omówiono takie systemy jak: AxiSet™ Check-Up, kalibrator osi obrotowych XR-20 oraz LaserTRACER i LaserTRACER-MT. Przedstawiono metody pomiaru osi obrotowych za pomocą zewnętrznych urządzeń pomiarowych, takich jak np. interferometr laserowy z przystawką do pomiarów osi obrotowych XR-20, jak również metody polegające na pomiarze wzorca za pomocą wewnątrzobrabiarkowych systemów pomiarowych (sond pomiarowych).

### **ANALYSIS OF CNC MACHINE TOOL VOLUMETRIC AND ROTARY AXIS CENTRE POSITIONAL ERRORS**

The following paper presents methods and equipment for the measurement, monitoring and calibration of CNC machine tool rotary axis and volumetric errors. A detailed analysis of three measuring systems was conducted: AxiSet™ Check-Up, XR-20 rotary axis calibrator, LaserTRACER and LaserTRACER-MT. The paper presents rotary axis measurement with tools for conducting external measurements, e.g. the combination of XR20 and a laser interferometer, and methods consisting in master ball displacement evaluation.

## **1. WSTĘP**

Zastosowanie obrabiarek pięcioosiowych w procesach produkcyjnych staje się w ostatnich latach bardzo powszechne, ze względu na możliwości wykonywania coraz to bardziej złożonych geometrycznie wytworów. Najwięcej takich maszyn można spotkać w branży lotniczej oraz energetycznej, gdzie wykorzystanie maszyn pięcioosiowych umożliwia wykonywanie skomplikowanych w sensie geometrycznym np. łopatek turbin silników, generatorów, wirników. Dążenie do produkowania coraz to wydajniejszych i bardziej sprawnych jednostek napędowych wymusza wzrost zapotrzebowania na wieloosiowe centra obróbkowe oraz metody oceny ich dokładności i diagnostyki. Ponadto, wraz z rozwojem technologii zwiększają się wymagania względem dokładności wymiarowo kształtowej – przedmiotów wytwarzanych na obrabiarkach CNC. Na jakość wykonywanych wyrobów wpływ ma między innymi dokładność i powtarzalność pozycjonowania osi sterowanych numerycznie, dokładność przemieszczeń liniowych i kątowych, ustawienie osi względem siebie czy luzu w układzie napędowym. Każda niedokładność wpływa negatywnie na końcową jakość wyrobu [1-23].

Osie obrotowe w centrach obróbkowych mogą być związane mechanicznie, nie tylko ze stołem roboczym. Występują rozwiązania konstrukcyjne obrabiarek, w których oś wrzeczona ma dodatkowo możliwość realizacji przemieszczeń kątowych. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania zespołów obrotowych jest zatem bardzo istotnym czynnikiem oceny obrabiarki CNC i poprawy ich dokładności [1-2]. Okazuje się, że błędy obrabiarki wynikają z niedokładności geometrycznej elementów składowych układu OUPN, zmian temperatury ich pracy (wskutek tarcia zewnętrznego i wewnętrznego, powodując odkształcenia cieplne układu OUPN), odkształceń sprężystych elementów obrabiarki i narzędzi (wskutek obciążeń występujących w procesie skrawania) oraz nastaw układów sterowania z uwzględnieniem zmienności charakteru pracy napędów [3-13].

W normach ISO zawarte są metody i przepisy badania obrabiarek [16-18]. Każdy dostawca obrabiarek dostarcza odbiorcy dokumenty potwierdzające ocenę dokładności maszyny, która w funkcji czasu eksploatacji pogarsza się. Wymagane są zatem badania okresowe potwierdzające bieżący stan techniczny eksploatowanej obrabiarki. Pozwala to między innymi na właściwe harmonogramowanie prac na nich wykonywanych. Do najważniejszych pojęć związanych z procedurami badawczymi i wyznaczaniem poszczególnych błędów, należy zaliczyć: dokładność, powtarzalność, rozdzielczość, niepewność, błąd pozycjonowania liniowego, błąd pozycjo-

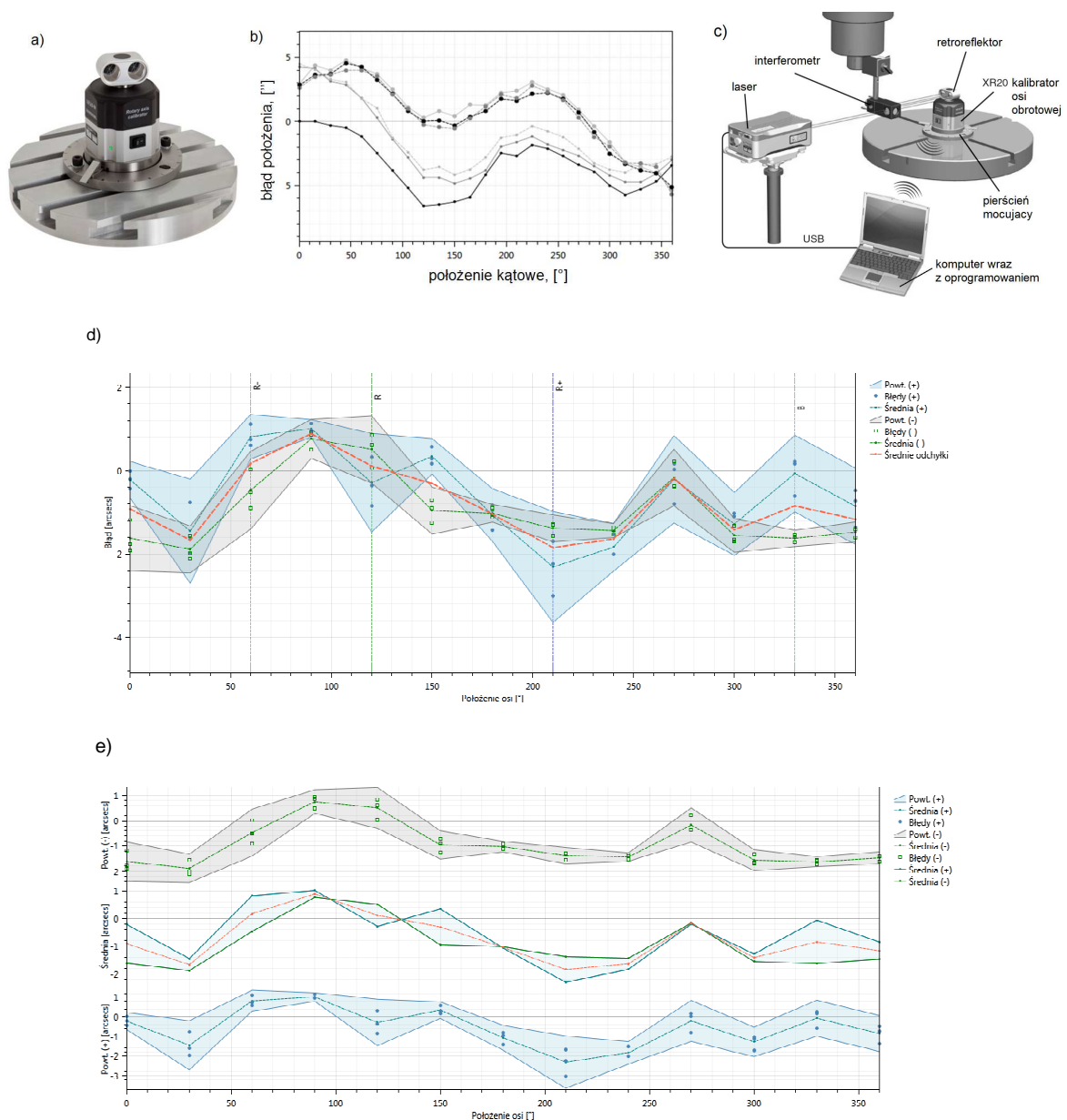
<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra podstaw inżynierii produkcji, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

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

nowania kąowego, błąd położenia środka kinematycznego osi obrotowej, błąd statyczny, błąd kinematyczny, błąd termiczny, błąd rotacji (roll, pitch, yaw), błąd prostoliniowości. Okazuje się, że w odniesieniu do wielu obrabiarek wieloosiowych wyposażonych w osie obrotowe dokładność i powtarzalności pozycjonowania kąowego ma niezwykle ważną rolę [4-6, 8-9].

## 2. BADANIA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA OSI OBROTOWYCH WEDŁUG ISO 230-2

Najpopularniejszą metodą oceny dokładności pozycjonowania osi obrotowych jest metoda z wykorzystaniem interferometru laserowego oraz przystawki Rotary Axis Calibrator firmy Renishaw, przeznaczoną do pomiarów osi obrotowych [25]. Zadaniem tej przystawki jest realizacja ruchów nadążnych za zmianą położenia kąowego osi obrotowej w kierunku przeciwnym do ruchu obrotowego stołu w celu utrzymania wiązki laserowej w kątowym zakresie pomiarowym wynoszącym ok.  $\pm 10^\circ$ . Na rysunku 1a przedstawiono widok przystawki wykorzystywanej do oceny błędów pozycjonowania osi obrotowej C pionowego centrum obróbkowego. Na rysunku 1b za-



**Rys. 1.** Kalibrator osi obrotowej XR20 do pomiarów pozycjonowania kąowego stołów obrotowych: a) widok Ro-tary Axis Calibrator XR20 [25], b) przykładowe wyniki pomiaru pozycjonowania kąowego, c) ustawienie kalibratora XR20 do pomiaru [25], d) powtarzalność wyników pozycjonowania kąowego w trzech próbach, e) wartość średnia z pomiarów oraz wyniki pomiaru w kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu wskazówek zegara

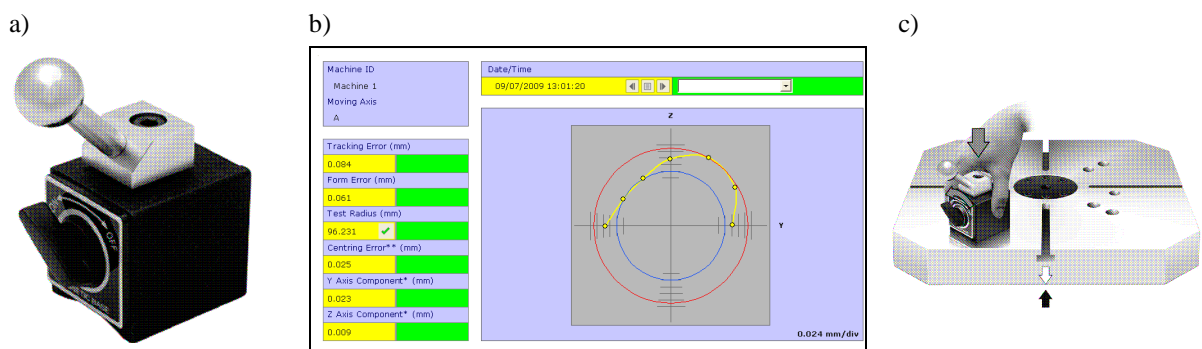
prezentowano wyniki pomiaru osi po wprowadzeniu kompensacji, zaś na rysunku 1c przedstawiono sposób ustawienie kalibratora XR20 do pomiaru na stole obrabiarki CNC, centralnie w jego osi (oś liniowa Z, oś obrotowa C). Na rysunku 1d pokazano powtarzalność wyników pozycjonowania kąowego w trzech próbach, zaś na rysunku 1e wartość średnią z pomiarów oraz wyniki pomiaru w kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

Błąd pomiaru stanowi różnica pomiędzy wartością wzorcową wyznaczoną przez system laserowy, a wartością rzeczywistego zrealizowanego przemieszczenia kąowego testowanej osi maszyny. Dzięki tej metodzie możliwa jest weryfikacja dokładności pozycjonowania osi, która ma kluczowe znaczenie dla dokładności obróbki części. Analiza charakterystyki otrzymanych błędów pozwala także zweryfikować źródła tych błędów, do których najczęściej należy zbyt mało dokładny przetwornik kąta obrotu lub jego niewłaściwy montaż [6]. Dokładność metody pomiarowej wynosi ok.  $\pm 0.5''$ . Omawiana metoda i laserowy system pomiarowy Rotary Axis Calibrator XR20 mogą być wykorzystywane w diagnostyce osi C tokarek sterowanych numerycznie. Diagnostyka pozostałych osi może być utrudniona z powodu trudności precyzyjnego ustalenia i zamocowania kalibratora w kierunku badanej osi (np. osi A lub B wieloosiowych obrabiarek CNC) [6, 7, 11, 12, 20].

Większość współczesnych obrabiarek CNC posiada możliwość kompensacji błędów pozycjonowania zarówno osi liniowych jak również kątowych. Dzięki temu błędy pozycjonowania, o ile są powtarzalne, mogą być zminimalizowane [12, 21].

### 3. METODA POMIARU DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA OSI OBROTOWYCH Z WYZNACZENIEM RZECZYWISTEJ OSI OBROTU STOŁU

Opisana w rozdziale 2 metoda wymaga zastosowania autonomicznego, specjalistycznego urządzenia pomiarowego. Istnieją także metody diagnostyczne, które bazują na pomiarach skalibrowanego wzorca (najczęściej kuli wzorcowej) przy użyciu wewnątrz-obrabiarkowego systemu pomiarowego w postaci przedmiotowej sondy pomiarowej. Wiodący producenci obrabiarek oraz układów sterowania, posiadają własne rozwiązania autorskie służące do tak zwanej autodiagnostyki maszyny [7, 25]. Ogólna idea tej metody sprowadza się do wyznaczenia środka kuli wzorcowej zamocowanej w pewnej odległości od środka obrotu osi (na podstawie kilku punktów pomiarowych). W zależności od opracowanego algorytmu, wykonuje się kilka powtórzeń pomiarów wspomnianej kuli, dla różnych orientacji kątowych testowanych osi obrotowych. Wynikiem pomiarów jest kilka parametrów opisujących dokładność mierzonej kinematyki maszyny. Dzięki tej metodzie można wyznaczyć różnicę pomiędzy rzeczywistym środkiem obrotu osi, a środkiem „widzianym” przez maszynę, ustawionym podczas konfiguracji obrabiarki (tabeli kinematyki obrabiarki). Istnieje także możliwość weryfikacji, jak rzeczywista oś obrotu zmienia się w zależności od położenia kąowego stołu. Wynikiem pomiaru jest zbiór równoodległych położen środków kuli w zależności od przyjętej pozycji kąowej. Ocenie także poddawany może być rozstęp wartości położen środków kuli wzorcowej od wyznaczonego środka obrotu. Przykładem takiego systemu jest AxiSet™ Check-Up firmy Renishaw. Na rysunku 2 przedstawiono typowy wykres pomiaru jednej z osi obrotowych obrabiarki, otrzymany z wykorzystaniem systemu (urządzenia) AxiSet™ Check-Up firmy Renishaw [25].



Rys. 2. Urządzenia AxiSet™ firmy Renishaw: kula wzorcowa, b) przykładowy wykres pomiaru maszyny za pomocą AxiSet™, c) sposób usytuowania systemu AxiSet™ na stole obrabiarki [25]

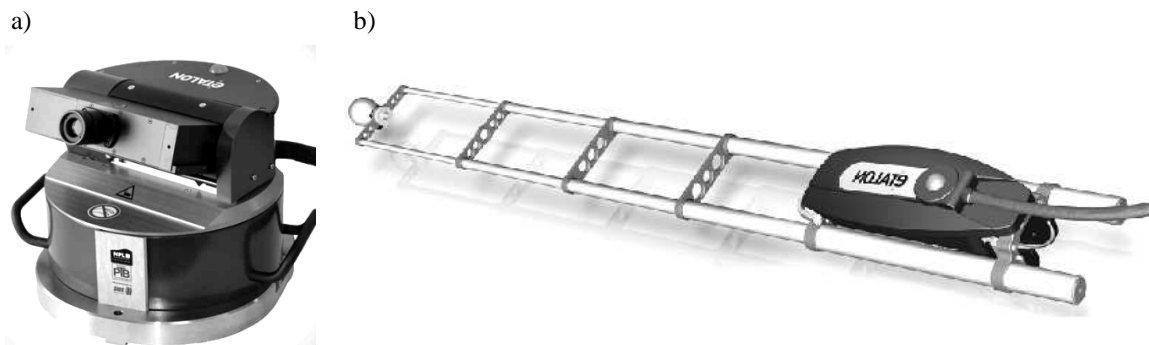
Urządzenie AxiSet™ Check-Up firmy Renishaw umożliwia ocenę stanu technicznego obrabiarek wieloosiowych (pięcioosiowych centrów obróbkowych frezarskich i wielozadaniowych frezarko-tokarek) poprzez estymację błędów położenia środka osi obrotowych sterowanych numerycznie (np. stołów obrotowych, obrotowo-uchyłnych, wrzecion – w przypadku tokarek). Określenie środków węzłów kinematycznych osi obrotowych jest przede wszystkim ważne z punktu widzenia dokładności wymiarowo – kształtowej wyrobów wytwarzanych na obrabiarkach wieloosiowych. Estymowana z wykorzystaniem urządzenia AxiSet™ Check-Up od-

chyłka jest niezwykle istotna podczas obróbki przedmiotów z symultaniczną interpolacją w 5 osiach, którym stawia się wysokie wymagania jakościowe. Jedną z ważnych zalet urządzenia AxiSet™ Check-Up jest krótki czas pomiaru i oceny diagnostycznej oraz możliwość detekcji i raportowania tych błędów. Błędy mogą być raportowane w trybie przyrostowym bądź bezwzględny. Test pomiarowy realizowany za pomocą systemu AxiSet™ Check-Up jest w pełni zautomatyzowany. Zapewnia wysoką dokładność i spójność wyników. Zastosowanie AxiSet™ Check-Up do kalibracji osi obrotowych obrabiarek CNC eliminuje błędy wprowadzane podczas pomiarów i testów realizowanych ręcznie. [7, 25]

#### 4. DIAGNOSTYKA OSI OBROTOWYCH ZA POMOCĄ SYSTEMU LaserTRACER and LaserTRACER-MT

Przykładem bezdotykowego systemu diagnostycznego 5 osiowych obrabiarek CNC jest samonaprowadzający się laser interferometryczny LaserTRACER oraz LaserTRACER-MT firmy Etalon (rys. 3). Systemy te pozwalają na estymację błędów wolumetrycznych – przestrzennych. Dają obraz błędów występujących w całej przestrzeni roboczej obrabiarki a nie jak w większości urządzeń jedynie błędów lokalnych. W systemie tym wiązka lasera automatycznie podąża za zwierciadłem. Powoduje to, że pomiar odległości odbywa się przy jednoczesnym zachowaniu bardzo wysokiej dokładności w każdym kierunku i dużej prędkości pomiaru [7, 24].

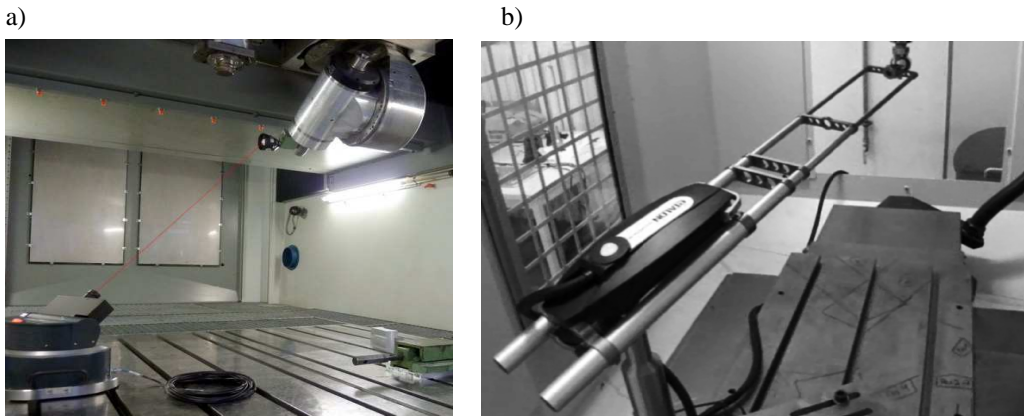
LaserTRACER jest narzędziem do kalibracji i testowania wieloosiowych obrabiarek CNC oraz współrzędnościowych maszyn pomiarowych 3D (rys. 3a). LaserTRACER współpracuje i jest sterowany z poziomu oprogramowania TRACK-CAL oraz TRACK-CHECK [24].



**Rys. 3.** Bezdotykowe systemy diagnostyczne firmy ETALON: a) samonaprowadzający się laser interferometryczny LaserTRACER, b) LaserTRACER-MT [7, 24]

Oprogramowanie TRACK-CHECK oraz LaserTRACER daje możliwość przeprowadzenia testu okrągłości zgodnie z normą ISO 230-4. Posiada bardzo wysoką dokładność środka obrotu, co w stosunku do klasycznych powszechnie stosowanych narzędzi pomiarowych jest ogromną zaletą. Dokładność ta jest wynikiem zastosowania w konstrukcji LaserTRACER-a kuli referencyjnej dającej niezwykle wysoką dokładność środka obrotu. Kula ta posiada odchyłkę kształtu na poziomie kilku nanometrów i stanowi referencję urządzenia. Dzięki temu wszelkie niedokładności obrotu samonaprowadzającego się lasera interferometrycznego są w pełni kompensowane. Dodatkowo LaserTRACER posiada o wiele bardziej zwartą obudowę niż klasyczne urządzenia. Na rysunku 3a zaprezentowano samonaprowadzający się laser interferometryczny LaserTRACER podczas kalibracji osi obrabiarki CNC zaś na rysunku 3b urządzenie diagnostyczne LaserTRACER-MT. Rozszerzona niepewność pomiarowa dla przemieszczenia przestrzennego LaserTRACER przy  $k=2$  wynosi  $0,2\mu\text{m}/\text{m} \pm 0,3\mu\text{m}/\text{m}$ . Pomiary są realizowane z rozdzielczością:  $0,001\mu\text{m}$ . Zakres pomiarowy wynosi  $0,2 \div 15$  metrów. LaserTRACER został opracowany dzięki współpracy National Physical Laboratory – NPL z Wielkiej Brytanii i PTB. Innym przykładem systemu diagnostycznego obrabiarek CNC o małych i średnich gabarytach jest LaserTRACER-MT (Mechanical Tracking) przedstawiony na rysunkach 3b oraz 4b.

LaserTRACER-MT umożliwia: przeprowadzenie rozwijanej obecnie kalibracji wolumetrycznej (objętościowej) maszyn współrzędnościowych i obrabiarek, kalibrację stołów obrotowych, weryfikację maszyn zgodnie z ISO 230-2, ISO 230-6, oraz testem okrągłości ISO 230-4. LaserTRACER-MT wykorzystuje laser wysokiej rozdzielczości. Pomiar odległości jest realizowany pomiędzy dwoma referencyjnymi punktami z wysoką dokładnością. LaserTRACER-MT posiada mechaniczne prowadnice wyposażone w sferyczne łączenia teleskopowe. W LaserTRACER-MT wiązka laserowa He-Ne jest przesyłana światłowodem do systemu. Pozwala to na zachowanie kompaktowej konstrukcji z jednoczesnym zachowaniem wpływu temperatury na system pomiarowy [7, 24].



Rys. 4. Kalibracja osi obrabiarek CNC urządzeniem diagnostycznym: a) LaserTRACER, b) LaserTRACER-MT [24]

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono najbardziej znane metody diagnostyki osi obrotowych 5-osiowych obrabiarek CNC wykorzystywane między innymi do oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania kąтового oraz wolumetrycznej oceny dokładności obrabiarki. Pierwszą grupę omawianych systemów stanowią metody pomiaru osi obrotowych za pomocą zewnętrznych urządzeń pomiarowych, czego przykładem jest interferometr laserowy z przystawką do pomiarów osi obrotowych XR-20. Drugą grupę systemów stanowią metody polegające na pomiarze wzorca np. z wykorzystaniem urządzenia AxiSet™. W systemach drugiej grupy bazuje się na pomiarze wzorca za pomocą wewnętrznych układów pomiarowych maszyny – przedmiotowych sond pomiarowych. Trzecią grupę omawianych systemów tworzą urządzenia pozwalające na pomiary wolumetryczne - przestrzenne obrabiarek. Pomiary i kalibracja obrabiarek 5 –osiowych z zastosowaniem omówionych metod i urządzeń pozwala na utrzymanie wysokiej dokładności geometrycznej kinematycznej oraz szybką korektę błędów kinematycznych. Ponadto wykorzystanie omawianych systemów poprzez automatyczny samodzielny pomiar pozwala zaoszczędzić czas i zmniejszyć koszty usług serwisowych.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bringmann B (2007) *Improving Geometric Calibration Methods for Multi-axes Machining Centers by Examining Error Interdependencies Effects*, 2/664. Fortschritt-Berichte VDI, Dusseldorf.
- [2] Bringmann B, Knapp W(2006) *Model-based 'Chase-the-Ball' Calibration of a 5-Axes Machining Center*. Annals of the CIRP 55(1):531–534.
- [3] Florussen G.H.J., Delbressine F.L.M., Molengraft M.J.G., Schellekens P.H.J. *Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements*. Measurement 2001; 30: 241–255.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] Jastrzębski R., Krajewski, G.: *Metody diagnostyki błędów precyzyjnych stołów obrotowych w obrabiarkach CNC*, XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Metrologia w Technologiach Wytwarzania", Pułtusk 11-14 Września 2011 r.
- [7] Józwick J., Kuric I. *Non-contact diagnostic systems of CNC machine tools*. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina 2013.
- [8] 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.
- [9] Józwick J., Pieško P., Krajewski G.: *Evaluation of QC10 Ballbar diagnostics method for CNC machine*. Maintenance and Reliability 2010; 3(47): 10-20.
- [10] Józwick, J., Krajewski, G., Jacniacka, E., Pieško, P., Włodarczyk, M.: *Prognozowanie dokładności obrabiarki CNC na podstawie szeregu czasowego. Cz. 1. Wybrane urządzenia diagnostyczne obrabiarek CNC*. 10th International Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing“ Zilina 4-6.05. 2009, Slovakia. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina. 2009 r.

- [11] Józwik, J., Kuric, I. Sága, M., Lonkwić, P.: *Diagnostics of CNC Machine Tools in Manufacturing Process with Laser Interferometer Technology*. Manufacturing Technology. ISSN 1213–2489, Vol. 14, No. 1, 2014, p. 23-30
- [12] Majda P.: *Pomiary i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*. Inżynieria Maszyn 2011; 16 (1-2): 126-134.
- [13] 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.
- [14] Pahk H. J., Kim Y.S., Moon J.H.: *A new technique for volumetric error assessment of CNC machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 1997; 37(11): 1583–1596.
- [15] PN-ISO 230-2:1999 *Przepisy badania obrabiarek. Część 2: Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania w osiach sterowanych numerycznie*.
- [16] PN-ISO 10791-4:2001 *Warunki badania centrów obróbkowych. Część 4: Dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osiach liniowych i obrotowych*.
- [17] PN-ISO 10791-5:2000 *Warunki badania centrów obróbkowych. Część 5: Dokładność i powtarzalność pozycjonowania palet do mocowania przedmiotów obrabianych*.
- [18] 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.
- [19] Sztendel S., Pislaru C., Longstaff A.P., Fletcher S., Myers A.Ł *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.
- [20] Turek P., Kwaśny W., Jędrzejewski J.Ł *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn 2010; 5 (1-2): 8-37.
- [21] Veldhuis S.C., Elbestawi M.A.: *A Strategy for the Compensation of Errors in Five-Axis Machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 1995; 44(1): 373–377.
- [22] Weikert S. R.: *Test, a New Device of Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools*, CIRP Annals 2004; 53: 1:429.
- [23] 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.
- [24] [http://etalon-ag.com/\(z dn. 20/10/2014r.\)](http://etalon-ag.com/(z dn. 20/10/2014r.)).
- [25] [http://www.renishaw.pl/pl/1030.aspx \(z dn. 20/10/2014r.\)](http://www.renishaw.pl/pl/1030.aspx (z dn. 20/10/2014r.)).