

Paweł MAJDA¹

POMIARY I KOMPENSACJA BŁĘDÓW GEOMETRYCZNYCH OBRABIAREK CNC

Zwiększenie dokładności wytwarzania przedmiotów obrabianych techniką skrawania można osiągnąć między innymi poprzez kompensowanie błędów. Typowym przykładem takich błędów są niedokładności geometryczne obrabiarki. W artykule przedstawiono ideę kompensowania przestrzennego błędu pozycjonowania obrabiarki CNC ze względu na jej niedokładności geometryczne. Zaprezentowano wybrane metody doświadczalnej identyfikacji błędów oraz przedstawiono przykład ich wizualizacji (mapę błędu) w przestrzeni obróbczej trójosiowej frezarki.

1. IDEA KOMPENSACJI BŁĘDÓW OBRABIAREK CNC

Jednym z podstawowych zadań funkcjonalnych, jakie powinna realizować każda obrabiarka jest zdolność do odtwarzania jednostki długości przez elementy zespołów wykonawczych maszyny. W obrabiarkach sterowanych numerycznie CNC zadanie to musi być dodatkowo realizowane w warunkach dynamicznych tj. podczas wykonywania zaprogramowanej trajektorii ruchu narzędzia względem przedmiotu obrabianego. Poprawność realizacji takiego zadania, można scharakteryzować i ocenić poprzez wyniki znormalizowanych badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania [11] oraz wyniki pomiaru sterowanego numerycznie ruchu z interpolacją liniową, kołową i/lub kątową, czyli tzw. próby kinematyczne. Na szczególną uwagę zasługuje wykonanie testu kołowości [12], czyli próby kinematycznej z interpolacją kołową z użyciem pręta teleskopowo kulowego [8]. Test taki jest stosunkowo prosty w realizacji i dostarcza wyniki na podstawie, których można zidentyfikować słabe ogniwa obrabiarki ze względu na omawiane zadanie funkcjonalne. Oprócz oceny właściwości dynamicznych serwonapędu pozwala on identyfikować także kilka właściwości odnoszących się bezpośrednio do układu konstrukcyjnego obrabiarki np. luzy w nakrętkach śrub pociągowych, prostoliniowości oraz prostopadłości osi, błędy cykliczne śrub pociągowych, błędy pozycjonowania. Omawiany rodzaj badania stanowi dzisiaj podstawę oceny cech użytkowych obrabiarek skrawających

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, ITM, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, e-mail: Pawel.Majda@zut.edu.pl

CNC. Dla konstruktorów obrabiarek jest szczególnie cenny, bo w bardzo krótkim czasie dostarcza oceny szerokiego spektrum właściwości maszyny i pozwala wytyczać kierunki szczegółowych badań jej podzespołów. Przykładem badania szczegółowego obrabiarek CNC jest badanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi. Jest ono uzasadnione w sytuacji, gdzie zminimalizowano podstawowe źródła błędów związanych z funkcjonowaniem serwonapędów. Wyniki takiego badania są podstawą kalibracji układów realizujących przemieszczenia liniowe i/lub kątowe. Kalibrację przeprowadza się poprzez wprowadzenie do układu sterowania obrabiarki tablicy wartości, na podstawie której algorytm w układzie sterowania oblicza skorygowane położenie zadane poprzez dodanie poprawki do wartości nominalnej położenia. Uzyskanie tablicy poprawek i charakterystyk pozycjonowania osi odbywa się najczęściej z wykorzystaniem interferometru laserowego. Urządzenie takie jest drogie, jednak pozwala uzyskać w warunkach przemysłowych wyniki o dużej dokładności. Można na dzień dzisiejszy zaryzykować stwierdzenie, że nie ma na polskim rynku dostępnych innych systemów pomiarowych, które pozwoliłyby uzyskać większe dokładności pomiaru przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia osi obrabiarek.

Po eliminacji błędów związanych z działaniem serwonapędów, co sprowadza się do optymalizacji nastaw regulatorów ze względu na dokładność pozycjonowania w warunkach dynamicznych oraz po kalibracji osi ze względu na luzy zwrotne i dokładność pozycjonowania, można przystąpić do tzw. pełnej kalibracji obrabiarki ze względu na błędy geometryczne. Prace z tego zakresu są aktualnie w obszarze zainteresowań wielu ośrodków badawczych [1-2],[4],[9-10],[13],[17],[21-22]. Pełna kalibracja obrabiarki polega na rozpatrzeniu dla każdej osi liniowej trzech odchyłek translacyjnych tj. pozycjonowanie oraz dwie odchyłki prostoliniowości i trzech odchyłek rotacyjnych pitch, yaw, roll oraz wzajemnych prostopadłości osi. Dla obrabiarki sterowanej w trzech osiach mamy łącznie 21 składowych tzw. błędów kinematycznych [5]. Na podstawie znajomości takich błędów „mapuje się” w całej przestrzeni roboczej maszyny błąd pozycjonowania – tzw. błąd objętościowy (*ang. volumetric error*). Błąd taki jest podstawą kompensacji trajektorii narzędzia względem przedmiotu obrabianego ze względu na niedokładności geometryczne maszyny.

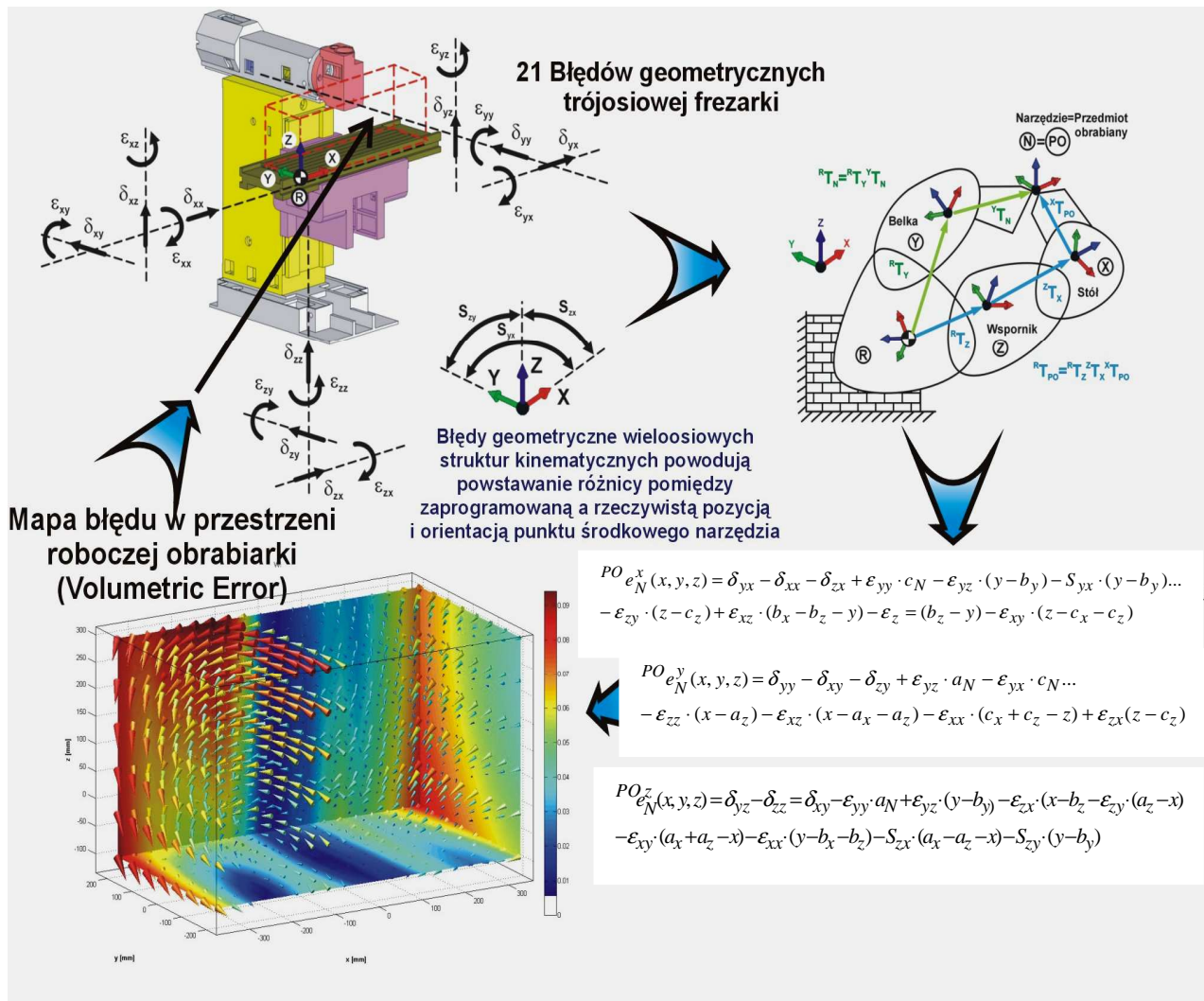
Badania obrabiarki w omawianym zakresie przeprowadza się w następujących etapach:

- analiza struktury kinematycznej obiektu badań. Etap ten powinien być zakończony zbudowaniem matematycznego modelu błędu dla całej przestrzeni roboczej maszyny,
- pomiary doświadczalne, które można przeprowadzić na dwa różne sposoby ze względu na zastosowane metody pomiaru. Bezpośrednie [16] pomiary poszczególnych składowych błędów kinematycznych (najczęściej interferometrem laserowym i poziomnicami elektronicznymi) lub tzw. pośrednie pomiary błędu objętościowego [16] za pomocą różnego rodzaju wzorców materialnych [2-3],[21] lub z wykorzystaniem interferometrów śledzących [14-15],[17],
- wyznaczenie w całej przestrzeni roboczej maszyny błędu objętościowego,
- implementacja systemu kompensacji w obrabiarence.

Ostatni podpunkt powyższej listy, w odniesieniu do kompensacji błędu objętościowego, realizowany jest wg różnych sposobów. Najprostszym podejściem jest modyfikowanie programów obróbkowych. Skomplikowane trajektorie programowanego

ruchu narzędzia względem przedmiotu obrabianego dyskretyzuje się odcinkami prostoliniowymi, których współrzędne końca i początku są korygowane o poprawki wynikające z obliczeń błędu objętościowego. Konkretny egzemplarz obrabiarki wyposaża się opcjonalnie w postprocesor służący do modyfikowania programów obróbkowych [18]. Inne podejścia proponują wykonywanie obliczeń wartości korekcyjnych pozycji zadanej, w układzie sterowania obrabiarki, w czasie rzeczywistym. Algorytmy obliczeniowe bazują na znajomości mapy błędu w wybranych punktach przestrzeni obróbczej [20] lub na znajomości modelu błędu objętościowego wraz z charakterystykami błędów kinematycznych obrabiarki [7].

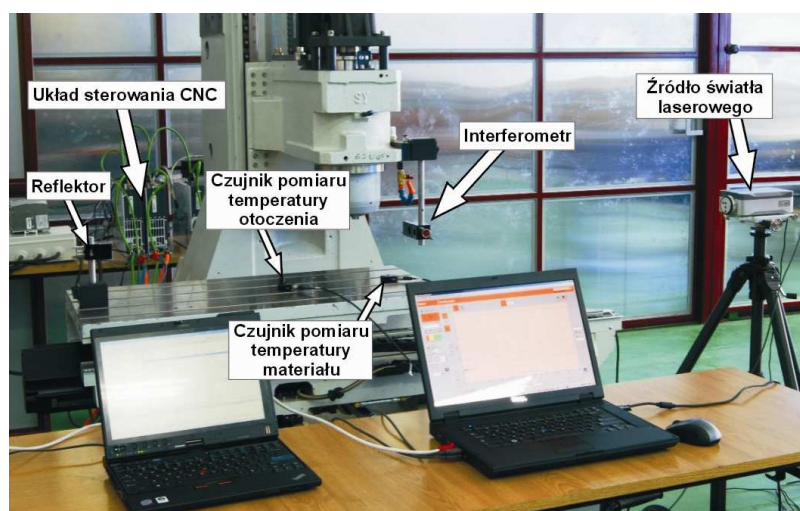
Ideę kompensacji błędów geometrycznych obrabiarki zobrazowano na poniższej ilustracji:



Rys. 1. Idea kompensacji błędów geometrycznych obrabiarki CNC
 Fig. 1. Geometric error of a CNC machine tool compensation idea

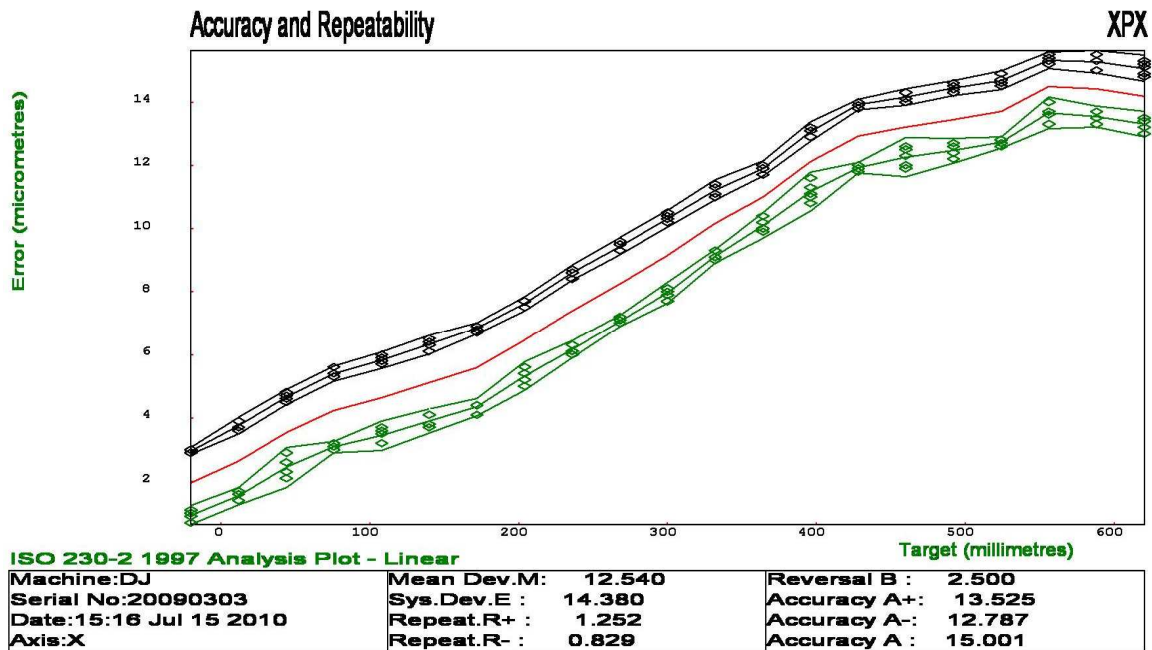
2. PRZYKŁAD MAPOWANIA BŁĘDÓW OBRABIARKI CNC

Najważniejszym etapem poprawnej kalibracji obrabiarki ze względu na jej niedokładności geometryczne jest etap pozyskiwania charakterystyk doświadczalnych poszczególnych błędów kinematycznych, w tym także charakterystyk dokładności pozycjonowania osi. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań doświadczalnych dokładności i powtarzalności pozycjonowania studialnej konstrukcji obrabiarki utworzonej przez korpus trójosiowego centrum frezarskiego z tocznymi połączeniami prowadnicowymi i przestrzeni obróbczej o wymiarach 600x400x400. Badania te przeprowadzono w Instytucie Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego. Studialna obrabiarka jest nowa i po dotarciu. Posiada ona otwarty układ sterowania CNC, co stwarza możliwość badania nowo opracowanych algorytmów kompensacji. Przed badaniami realizowano odpowiedni cykl rozgrzewania obrabiarki, aby ustabilizować ją termicznie. Na podstawie zmierzonych charakterystyk generowano tablicę, którą następnie wykorzystano w układzie sterowania obrabiarki do kompensacji on-line pozycji zadanej w osi. W tablicy kompensacji uwzględniono zwrot realizowanego położenia (pchanie, ciągnięcie), co pozwoliło skompensować także luzy zwrotne w poszczególnych osiach. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania mierzono interferometrem laserowym. Według danych producenta interferometru dokładność pomiaru przemieszczeń liniowych, bez uwzględniania poprawek wynikających z rozszerzalności cieplnej materiału, wynosi $MPE=\pm 0,5\text{ppm}$. Szczegółowa analiza niepewności tego pomiaru pozwala oszacować jego niepewność rozszerzoną ($k=2$) na poziomie ok. $6\mu\text{m}$ na jeden metr długości osi oraz przy różnicy temperatury 5°C w stosunku do temperatury normalnej. Podczas pomiarów zastosowano kompensację długości fali światła laserowego ze względu na temperaturę, ciśnienie i wilgotność powietrza, co pozwoliło zwiększyć dokładność pomiaru. Położenie interferometru i reflektora względem siebie oraz rozmieszczenie czujników temperatury, podczas badania osi X, przedstawia poniższy rysunek.

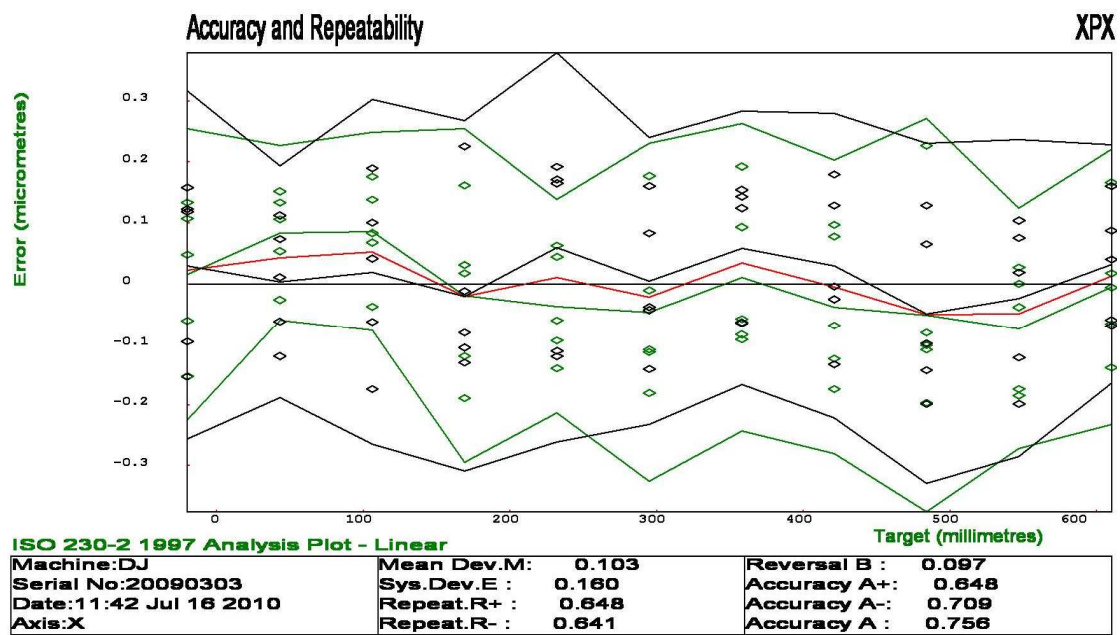


Rys. 2. Widok obrabiarki podczas pomiarów dokładności i powtarzalności osi X
Fig. 2. View of a machine tool at the measurement of accuracy and repeatability of the X axis

Rysunki 3 i 4 przedstawiają przykładowe wyniki pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania. Wykresy sporządzono dla pomiarów przed i po kompensacji położenia zadanego w układzie sterowania obrabiarki. Wskaźniki, widoczne w obszarze rysunków obliczano zgodnie z zaleceniami normy [11].



Rys. 3. Charakterystyka dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi X – przed kompensacją
Fig. 3. Characteristic of the accuracy and repeatability of the X axis before compensation



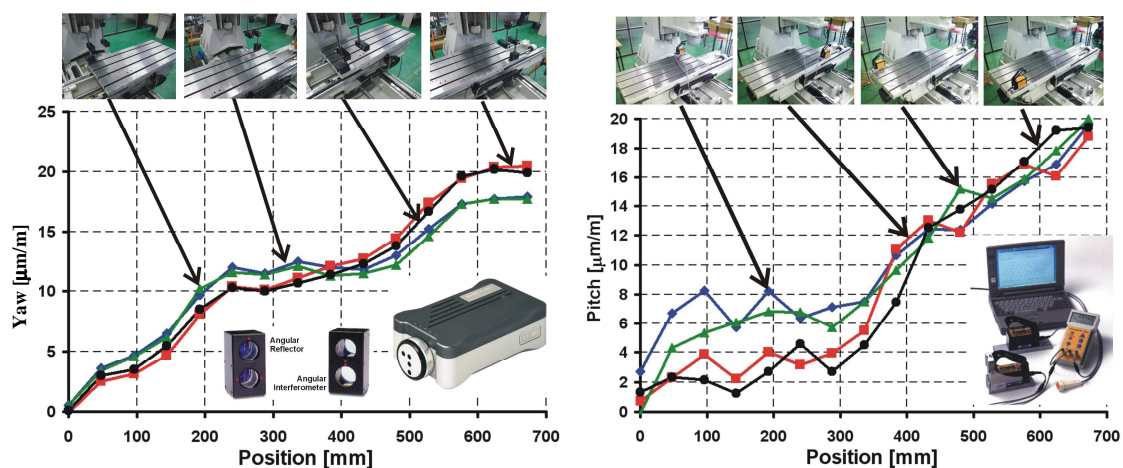
Rys. 4. Charakterystyka dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi X – po kompensacji
Fig. 4. Characteristic of the accuracy and repeatability of the X axis after compensation

Na rys.4 widoczna jest charakterystyka, z której wynika, że średnia dwukierunkowa dokładność pozycjonowania obrabiarki po kompensacji pozycji zadanej jest na poziomie $0,1\mu\text{m}$. Należy podkreślić, że wynik taki możliwy jest do uzyskania tylko w warunkach laboratoryjnych. Badania realizowano w klimatyzowanym pomieszczeniu gdzie utrzymywano stałą temperaturę przed i podczas badań. Ponadto obrabiarka była nowa.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji, chociażby ze względu na oddziaływania temperaturowe i efekty zużycia obrabiarki należy spodziewać się znacznie większych wartości wskaźników, charakteryzujących dokładność jak i powtarzalność pozycjonowania osi.

Do budowania modelu tzw. pełnej kompensacji (*volumetric error*) obrabiarki niezbędna jest znajomość, oprócz odchyłek translacyjnych, także odchyłek prostopadłości osi oraz odchyłek rotacyjnych. Na rys.5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dwukierunkowych odchyłek rotacyjnych typu schodzenie z kursu (*yaw*) otrzymanych z użyciem interferometru laserowego oraz skoku (*pitch*) otrzymanych z użyciem poziomnic elektronicznych. Mierzenie odchyłek kątowych, wg danych producenta interferometru laserowego, odbywa się z dokładnością wskazań $\text{MPE}=\pm 0.2\% \pm 0.5 \pm 0.1\text{M} \mu\text{m/m}$ (gdzie M jest dystansem pomiarowym w metrach). Natomiast ich mierzenie poziomnicami elektronicznymi można przeprowadzić z dokładnością wskazań $\text{MPE}=\pm 0.2\% \pm 2.5 \pm 0.1\text{M}$.

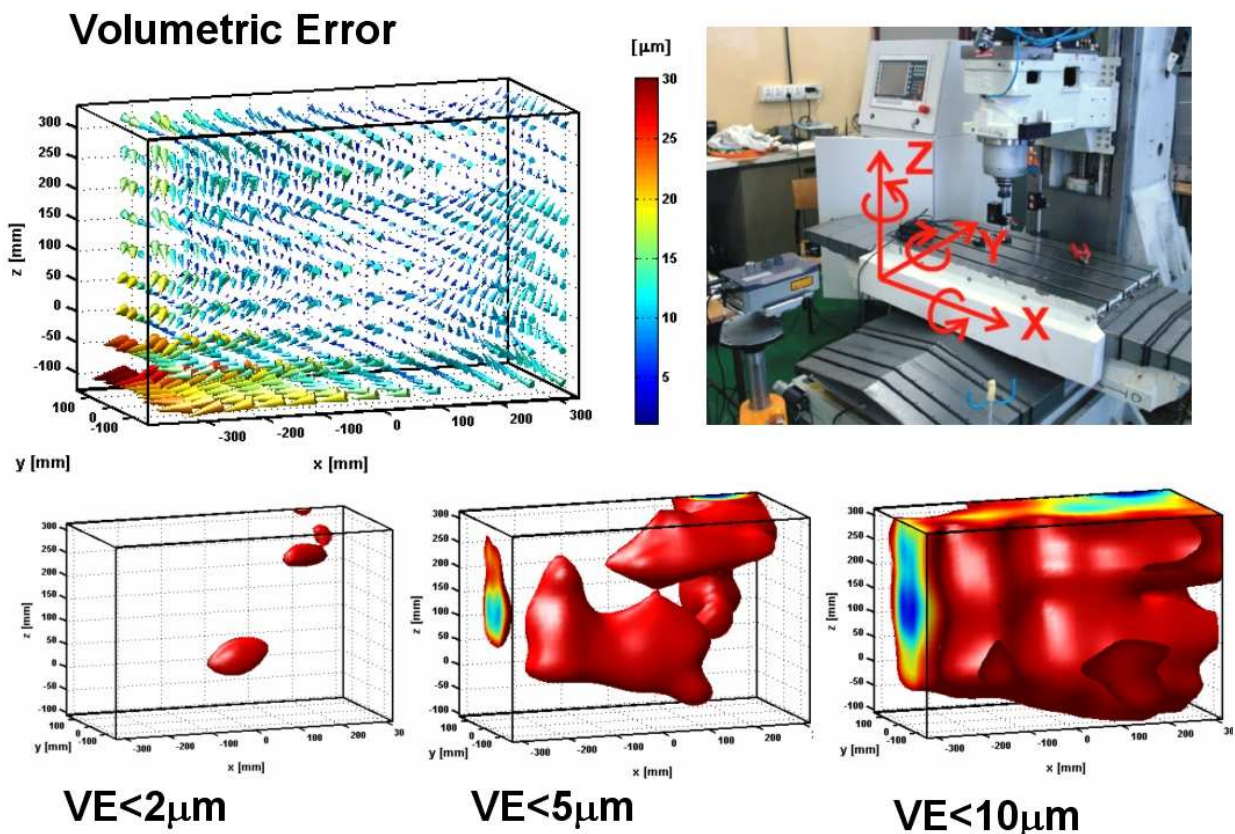
Powtarzalność prezentowanych w niniejszej pracy pomiarów (rozumiana jako przedział 4σ) kształtowała się na poziomie ok. $2\div 6\mu\text{m/m}$ dla interferometru laserowego i $3\div 12\mu\text{m/m}$ dla poziomnic elektronicznych. Wadą poziomnic elektronicznych jest ich tendencja do braku stabilności wskazań. Wykazują przypadkowy dryft „płynięcie” nawet w stabilizowanych termicznie warunkach pomiaru. Zaletą używania poziomnic do badań obrabiarek jest prostota przeprowadzania i krótki czas realizacji pomiarów, gdyż nie wymagają justowania systemu pomiarowego. Każdy z prezentowanych poniżej wykresów przedstawia cztery warianty pomiaru, które wykonano dla różnych pozycji umiejscowienia aparatury pomiarowej na stole obrabiarki podczas badań tj. w czterech narożnikach stołu.



Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów odchyłek rotacyjnych osi X interferometrem laserowym i poziomnicami elektronicznymi

Fig. 5. An example of the measurements of the angular error of the X axis measured with laser interferometer and electrical levels

Mając do dyspozycji model błędu objętościowego oraz wyniki badań dla trzech osi tj. 18 charakterystyk błędów kinematycznych oraz 3 wartości odchyłek prostopadłości osi sporządzono dla badanej obrabiarki mapę błędu w całej przestrzeni obróbczej. Wizualizację tego błędu przedstawiono na rys.6. jako stożki. Stożki te odwzorowują wielkość wektorową, jaką jest błąd objętościowy. Ich wysokość jest proporcjonalna do wartości obliczonego błędu, oś stożka pokrywa się z kierunkiem błędu wypadkowego, natomiast środek podstawy pokrywa się z punktem przestrzeni roboczej, w którym obliczano błąd. Oprócz stożków na rys.6 przedstawiono także wizualizację w postaci powierzchni, która tworzy objętość. Wewnątrz tej objętości wartość błędu jest mniejszy niż arbitralnie przyjęte 2, 5 i 10 μm . Prezentowane na rys.6 wizualizacje błędu objętościowego wygenerowano w konkretnie przyjętych punktach przestrzeni obróbczej. Na takiej samej zasadzie można wygenerować wartości błędu jako poprawki korygujące (dla każdej osi niezależnie) dla dowolnych punktów pozycji zadanej w programie obróbkowym. Czyli można w ten sposób zwiększyć dokładność pozycjonowania obrabiarki w jej przestrzeni obróbczej.



Rys. 6. Wizualizacja błędu objętościowego trójosiowej obrabiarki CNC

Fig. 6. The visualisation of the volumetric error of a three axis CNC machine tool

Obecnie w Instytucie Technologii Mechanicznej ZUT w Szczecinie trwają badania weryfikacyjne, których celem jest ustalenie wpływu kompensowania błędu objętościowego trójosiowej frezarki nie tylko na dokładność ruchu elementów wykonawczych obrabiarki, ale także na dokładność kształtowania przedmiotów obrabianych.

3. WNIOSKI

Opisane działania mają na celu poprawę dokładności przestrzennego pozycjonowania narzędzia względem przedmiotu obrabianego, a co za tym idzie, poprawę dokładności kształtowania przedmiotów obrabianych techniką obróbki skrawaniem. Kompensacja błędu objętościowego jest standardem, jaki się stosuje w celu zwiększenia dokładności pomiaru wielkości geometrycznych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Nadal jednak możliwości układów sterowania obrabiarek skrawających mają ograniczone możliwości w tym zakresie [6]. Przewiduje się, że do roku 2012 od 30 do 50% nowych obrabiarek będzie posiadało możliwość pełnej kompensacji błędu objętościowego [16]. Decydujące znaczenie dla rozwoju rynku i technologii związanej z kompensacją błędu objętościowego będzie miał dostęp do interfejsów wyposażenia metrologicznego oraz dostęp do procedur kompensacji poszczególnych błędów kinematycznych w układach sterowania obrabiarek.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008÷2011 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] BOHEZA E. L.J., ARIYAJUNYAB B., SINLAPEECHEEWAC S. CH., T. M. M., LAPD D. T., BELFORTEE T., 2007, *Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines*, Computer-Aided Design, 39/229–244.
- [2] BRINGMANN B., KNAPP W., 2009, *Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance*, Precision Engineering, 33/524–529.
- [3] CHOI J.P., MINB B.K., LEE S.J., 2004, *Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system*, Journal of Materials Processing Technology, 155–156.
- [4] DHUPIA J., POWAŁKA B., ULSOY G., KATZ R., 2007, *Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47/2, 2007.
- [5] EKINCI T.O., MAYER J.R.R., 2007, *Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47/1997–2004.
- [6] http://www.designnews.com/article/48545_New_Compensation_Method_Improves_Machine_Tool_Accuracy.
- [7] <http://www.designnews.pl/Bledom-obrabiarek-mowimy-NIE>.
- [8] <http://www.renishaw.com.pl/pl/systemy-z-teleskopowymi-pretami-kinematycznymi-kulkowymi-typu-ballbar-6813>.
- [9] LEI W.T., PAUNG I.M., 2009, *Total ballbar dynamic tests for five-axis CNC machine tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49/488–499.
- [10] MAJDA P., 2009, *Symulacyjne badania dokładności geometrycznej trójosiowej obrabiarki skrawającej*, MwTW materiały konferencyjne, ISBN 978-83-89333-30-8, Poznań – Żerków, 263-268.
- [11] PN-ISO 230-2, 1999, *Przepisy badania obrabiarek*, Wyznaczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie.
- [12] PN-ISO 230-4, 1999, *Przepisy badania obrabiarek*, Badanie okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie.
- [13] RAKSIRI CH., PARNICHKUN M., 2004, *Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44/1283–1291.
- [14] SCHNEIDER C.T., 2004, *Lasertracer – a new type of self tracking laser interferometer*, CERN, Geneva, 4-7.
- [15] SCHWENKE H., FRANKE M., HANNAFORD J., 2005, *Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54/1/475-478.
- [16] SCHWENKE H., KNAPP W., HAITJEMA H., WECKENMANN A., SCHMITT R., DELBRESSINE F., 2008, *Geometric error measurement and compensation of machines - An update*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57/660–675.

- [17] SCHWENKE H., SCHMITT R., JATZKOWSKI P., WARMANNA C., 2009, *On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/477–480.
- [18] SHE C. H., CHANG C. C.: 2007, *Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47/537–545.
- [19] TUREK P., MODRZYCKI W., JEŃDRZEJEWSKI J., 2010, *Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek*, Inżynieria Maszyn, 15/1, 130-148.
- [20] WANG S.M., LIU Y.L., KANG Y., 2002 *An efficient error compensation system for CNC multi-axis machines*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42/1235–1245.
- [21] WOODY B. A., SMITH K. S., HOCKEN R. J., MILLER J. A., 2007, *A Technique for Enhancing Machine Tool Accuracy by Transferring the Metrology Reference From the Machine Tool to the Workpiece*, ASME, 636/129, June 2007.
- [22] ZARGARBASHI S.H.H., MAYER J.R.R., 2006, *Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46/1823–1834.

GEOMETRIC ERROR MEASUREMENT AND COMPENSATION OF MACHINE TOOL CNC

The enhancement of machining precision of a workpiece can be achieved in example by error compensation. The typical example of such errors can be geometric inaccuracies of machine tool. This paper presents an idea of volumetric error of CNC machine compensation due to its geometric inaccuracies. The methods of experimental errors identification has been presented, along with its visualization (mapping errors) in tri-axial milling machine workspace.