

KSENIA OSTROWSKA, DANUTA SZEWCZYK, JERZY ŚLADEK\*

## WZORCOWANIE SYSTEMÓW OPTYCZNYCH ZGODNIE Z NORMAMI ISO I ZALECENIAMI VDI/VDE

### CALIBRATION OF OPTICAL SYSTEMS ACCORDING TO ISO STANDARDS AND VDI/VDE RECOMMENDATIONS

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wytyczne odnośnie do wzorcowania wybranych systemów optycznych zgodnie z normą ISO 10360 oraz zaleceniami niemieckiego PTB VDI/VDE 2634. Pokazano różnice w podejściu obu dokumentów do zagadnienia wzorcowania. Ukazano ważną rolę, jaką przy opracowywaniu wyników przy pomiarach geometrycznych odgrywają używane programy do analizy powierzchni, zwracając uwagę na różnice w stosowanych algorytmach. Autorzy podkreślili znaczenie możliwości programów jako czynnika kluczowego przy opracowywaniu danych w odniesieniu do metod wzorcowań. Badania przeprowadzono na Współrzędnościowym Ramieniu Pomiarowym wyposażonym w głowicę optyczną.

*Słowa kluczowe: system optyczny, normy ISO 10360, zalecenia VDI/VDE, metody wzorcowania, oprogramowanie, algorytm*

#### Abstract

The article presents guidelines for the calibration of given optical systems based on the standard from ISO 10360 series and recommendations of German PTB VDI/VDE 2634. Differences in the approach of both documents to the calibration issue have been shown. An important role of used surface analysis softwares in the process of developing the results of geometric measurements have been presented, noting the differences in the used algorithms. Authors stressed the importance of software capabilities as a key factor in the data development in relation to the calibration methods. The researches were done on Coordinate Measuring Arm equipped with an optical probe.

*Keywords: optical system, ISO 10360 standards, VDI/VDE recommendations, calibration methods, software, algorithm*

\* Dr inż. Ksenia Ostrowska, mgr inż. Danuta Szewczyk, dr hab. inż. Jerzy Śladek, prof PK, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## Oznaczenia

$\bar{S}_r$	– średnica
$L_0$	– przekątna
$\Delta l$	– błąd odległości pomiędzy środkami kul
$l_m$	– zmierzona wartość długości
$l_k$	– wywzorcowana wartość długości
$L_p$	– wymiary wzorca
$D_p$	– średnica kul
$F_x^p$	– błąd pomiaru płaszczyzny
$N$	– odległość normalna

## 1. Wstęp

Wraz z rozwojem metod pomiarowych i kontroli dokonywanej przez urządzenia pomiarowe coraz większe wymagania zaczęto stawiać metrologii współrzędnościowej, które dotyczyły dokładności wykonywanych elementów, czasu pomiaru oraz automatyzacji. Spowodowało to dążenie do lepszego wykorzystania aktualnej technologii, jak również rozwijania się nowej. Współrzędnościowa technika pomiarów wielkości geometrycznych przeżywa obecnie dynamiczny rozwój dzięki możliwości automatyzacji pomiarów, integracji z systemami CAD/CAM oraz zastosowania systemów optycznych, które znacznie skracają czas pomiaru [1–4].

Rozwojowi wszelkich gałęzi przemysłu towarzyszą rosnące wymagania dotyczące jakości wyrobów, a wraz z nimi wyzwania dla metrologów w zakresie wyznaczania niepewności pomiaru, wzorcowania i nadzorowania systemów współrzędnościowych. Źródłem informacji w tym zakresie są normy PN-EN ISO 9001: 2009 oraz PN-EN ISO 10012-1 poruszające tematykę regularnego wzorcowania i nadzorowania sprzętu pomiarowego przez akredytowane laboratoria. Dla użytkowników współrzędnościowych maszyn pomiarowych zadaniem bardzo istotnym jest utrzymanie granicznych błędów dopuszczalnych na stałym poziomie. Kluczowe okazują się być w tym zakresie normy z serii ISO 10360. Istotna w świetle zagadnień metrologicznych jest świadomość występowania dwóch ściśle ze sobą związanych, ale odmiennych problemów naukowych: dokładności współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz dokładności pomiarów współrzędnościowych. W niniejszym artykule omówiono pierwszy z nich ściśle związany z zadaniem wzorcowania [5–9].

W metrologii współrzędnościowej systemy optyczne znajdują się na coraz ważniejszej pozycji przez wzgląd na rosnący obszar zastosowań. Współrzędnościowe systemy optyczne to połączenie techniki współrzędnościowej (umożliwiającej dowolne ustawienie mierzonego elementu w obszarze pomiarowym) z bezstykowym sposobem pomiarów optycznych, który zapewnia skrócony czas pomiarów czy możliwości bieżącej wizualizacji procesów produkcyjnych. Wynikiem tego zestawienia jest grupa bardzo efektywnych systemów stanowiących odpowiedź na wymagania dynamicznie rozwijającego się rynku. Należą do nich technologie obrazowania, oparte na skanowaniu powierzchni i całych obiektów z wykorzystaniem techniki optycznej i tomografii komputerowej. Obecnie bez udziału współrzędnościowej techniki pomiarowej trudno wyobrazić sobie zagadnienie szybkiego prototypowania, inżynierii rekonstrukcyjnej, wzornictwa przemysłowego, techniki biomedycznej czy ochrony zabytków. Ciągły rozwój metrologii współrzędnościowej skutkuje nowymi technologiami wzorcowania oraz metodami oceny dokładności pomiaru. W dziedzinie pomiarów optycznych można

wyróżnić systemy działające na zasadzie: światła strukturalnego, fotogrametrii realizującej triangulację laserową, na pomiarze czasu powrotu wiązki detekcyjnej (TOF– *Time of Flight*) oraz systemy tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (RM) [1, 8–14].

W Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej prowadzone są prace nad poprawą dokładności systemów optycznych, co zaowocowało współpracą z Instytutem Mechatroniki Politechniki Warszawskiej i projektem Nr T10C 010 29 pt: „Opto-numeryczny system do pomiaru elementów geometrycznych zintegrowany z Współrzędnościową Maszyną Pomiarową” [P1]. Równocześnie prowadzone są prace na czterech systemach optycznych, tj. Współrzędnościowe Ramie Pomiarowe (WRP) z głowicą optyczną R-Scan (triangulacja laserowa) współpracuje z oprogramowaniem 3D Reshaper, Systemem OGX działającym na zasadzie światła strukturalnego z oprogramowaniem Mesh 3D, Laser Traker (LT) działającym za zasadzie czasu powrotu wiązki z oprogramowaniem PC Dmis, jak również systemem fotogrametrycznym współpracującym z oprogramowaniem PhotoModeler 5.0 [15–20] (rys. 1).



Rys. 1. a) Ramie pomiarowe Omega 2025 firmy Romer wyposażone w głowicę skanującą R-SCAN, b) Laser Tracer, c) system fotogrametrii, d) system działający na zasadzie światła strukturalnego

Fig. 1. a) Measuring Arm Omega 2025 of Romer Company equipped with scanning probe R-SCAN, b) Laser Tracer, c) photogrammetry system, d) system using the principle of structured light

Obecnie istnieją dwa dokumenty przedstawiające wytyczne co do wzorcowania wyżej wymienionych systemów, tj. ISO 10360-8, oraz zalecenia niemieckiego PTB VDI/VDE 2634. W niniejszym artykule przedstawiono różnice w podejściu obu dokumentów do zagadnienia wzorcowania, jak również pokazano jak wielką rolę przy opracowywaniu wyników pomiarów geometrycznych odgrywają użyte programy do analizy powierzchni, zwracając uwagę na różnice w użytych algorytmach. Pokazano jak dużo może zależeć nie od metody wzorcowania, lecz od możliwości oprogramowań.

## 2. Metody wzorcowania systemów optycznych

### 2.1. Zalecenia VDI/VDE [N1]

Zalecenia niemieckiego PTB dla sprawdzania systemów optycznych VDI/VDE 2634 „Systeme-mit-flaechenhafter-Antastung” opisują metody i wzorce do testowania optycznych systemów pomiarowych 3D. Metody te obejmują: akceptację optycznych systemów pomiarowych 3D oraz ich powtórny weryfikację.

Wymagania w stosunku do wzorców służących do akceptacji są ściśle sprecyzowane i zmieniają się wraz z zakresem pomiarowym systemu. Wzorcem jest tu liniowy, dwuwymiarowy lub trójwymiarowy układ cech, który ma zostać zmierzony. Powinny one być skalibrowane ze względu na ich wymiary oraz formę. Bardzo ważne jest, aby wzorcowania systemów optycznych dokonywać w określonych warunkach pracy (np. temperatura, drgania mechaniczne czy warunki oświetleniowe) oraz trybach pracy (np. rodzaj i intensywność oświetlenia czy przestrzeń pomiarowa). Powinny być one tak zaprojektowane, aby nie wywierały wpływu na określone parametry jakościowe (tj. **błąd układu głowicy optycznej, błąd wskazania na długości, błąd płaskości**) (rys. 2).



Rys. 2. Wzorce do testów akceptacji dla: a) błędu układu głowicy optycznej, b) błędu wskazania na długości, c) błędu płaskości

Fig. 2. Standards for acceptance tests for: a) probing error, b) sphere-spacing error, c) flatness measurement error

Przeprowadzenie **testu akceptacyjnego** poprzedza odpowiednie, określone przygotowanie i wykorzystanie badanego optycznego systemu pomiarowego zgodnie z określonymi warunkami operacyjnymi dla celów akceptacyjnych. Należy wówczas uwzględnić niezbędny czas na rozgrzanie systemu, sprawdzić stabilność mocowania, przeznaczyć wystarczająco długi okres na aklimatyzację wzorców, jak również uwzględnić ich refleksyjność.

Pierwszy ze wskazanych parametrów jakościowych, a więc **błąd układu głowicy optycznej**, opisuje charakterystyczny błąd w optycznych systemach pomiarowych 3D opartych na skanowaniu powierzchni w małym zakresie pomiarowym. Aby go wyznaczyć, należy określić tryb pracy systemu. Zgodnie z definicją jest to: „odległość między środkiem sfery wyznaczonej z zastosowaniem kryterium Gaussa (metoda najmniejszych kwadratów) – będącej elementem skojarzonym, opartym na skończonej liczbie punktów pomiarowych skorygowanych, na kulistym wzorcu materialnym wymiaru – a punktem pomiarowym skorygowanym na tym samym kulistym wzorcu materialnym wymiaru” [N1].

Jako wzorzec stosuje się kule z ceramiki, stali lub innych odpowiednio rozpraszających światło materiałów o średnicy:

$$\bar{s}r = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (1)$$

gdzie:

$L_0$  – przekątna najmniejszego prostokątnego równoległoscianu obejmującego przestrzeń pomiarową.

Istotne jest, aby błąd kształtu kuli był mniejszy niż 1/5 charakterystyki wymiarowej wykorzystywanego wzorca kuli. Procedura polega na pomiarze kuli w co najmniej 10 ustawieniach w całej przestrzeni pomiarowej najlepiej w taki sposób, aby rozrzut punktów był w całej przestrzeni pomiarowej.

W kolejnym etapie przeprowadza się kalkulację wyników przez tworzenie kul we wszystkich pozycjach wzorca za pomocą metody najlepszego dopasowania oraz przez obliczenie

odchyłki od promienia kuli dla zmierzonych punktów z każdej pozycji. Dla każdej z pozycji kuli obliczana jest wartość odchyłki promienia kuli. Interpretacja wyników polega na uznaniu, że badany parametr jakościowy jest poprawny, jeśli błąd w żadnym punkcie nie przekroczy maksymalnej dopuszczalnej wartości.

Kolejny parametr jakościowy **błąd wskazania na długości** służy do weryfikacji zdolności systemu do odtwarzania długości. Zgodnie z definicją jest to: „różnica pomiędzy wartością zmierzoną, a wykalibrowaną odległości pomiędzy kulami”.

$$\Delta l = l_m - l_k \quad (2)$$

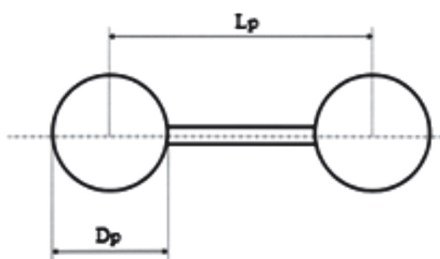
gdzie:

$\Delta l$  – błąd odległości pomiędzy środkami kul,

$l_m$  – zmierzona wartość długości,

$l_k$  – wywzorcowana wartość długości.

Do zbadania błędu odległości między środkami kul stosuje się wzorec, na którym umieszczone są dwie kule zrobione ze stali, ceramiki lub innych, odpowiednich materiałów. Wymiary wzorców dla konkretnych przestrzeni pomiarowych wynikają z poniższych zależności:



Rys. 3. Schemat wzorca

Fig. 3. Schematic of artefact

$$L_p \geq 0,3 \cdot L_0 \quad (3)$$

$$D_p = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (4)$$

gdzie:

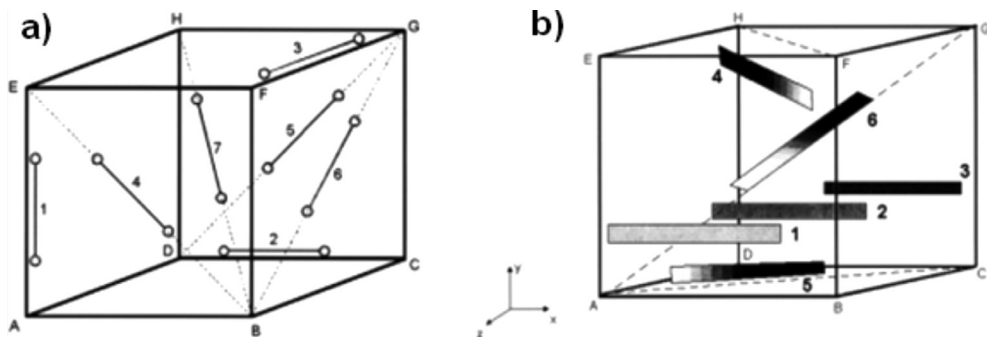
$L_0$  – przekątna sześcianu opisującego zakres pomiarowy,

$L_p$  – wymiary wzorca,

$D_p$  – średnica kul.

Niepewności, jak w przypadku pierwszego parametru, powinny być znane i nie wykraczać poza 1/5 sprawdzanego parametru jakościowego.

W celu zbadania błędu wskazania na długości wykonuje się pomiar wzorca w siedmiu ustawieniach. Na rys. 3a przedstawiono rekomendowane ustawienie. Wzorec powinien być ustawiony równoległe do poszczególnych osi (ust. 1, 2 i 3), zgodnie z przekątnymi płaszczyzn tworzących sześcian (ust. 4, 5 i 6), wzdłuż jednej z przekątnych sześcianu tworzącego przestrzeń pomiarową (ust. 7). Podobnie jak we wcześniejszym przykładzie tworzy się kule (zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów). Do wyznaczania parametru odległości brane są środki kul. Będzie on zgodny (dopuszczalny), jeżeli żaden wynik nie wyjdzie poza zakres maksymalnego błędu SD.



Rys. 4. a) rekomendowane ustawienie przy wyznaczaniu błędu odległości między środkami kul; b) rekomendowane ustawienie przy wyznaczaniu błędu płaskości

Fig. 4. a) recommended arrangement of artefacts for determination of the sphere-spacing error; b) Recommended arrangement of artefacts for determination of the flatness measurement error

Ostatni (trzeci) parametr jakościowy w tych zaleceniach dotyczy weryfikacji **błędu płaskości**, definiowany jako „zakres odległości punktów zmierzonych od płaszczyzny skonstruowanej według metody najmniejszych kwadratów przez najlepsze dopasowanie.” Wykorzystuje się tu wzorce w postaci prostopadłościanów ze stali, ceramiki, aluminium lub innego materiału o niskiej refleksyjności, których szerokości nie mogą być mniejsze od 50 mm, a długości od  $0,5 \cdot L_0$ . Błąd płaskości wzorca nie powinien być większy od  $1/5$  mierzonej charakterystyki. W celu wyznaczenia błędu płaskości należy wykonać pomiar w min. sześciu ustawieniach. Na rys. 3b zostało przedstawione rekomendowane ustawienie: równoległe do płaszczyzny XY, w trzech odległościach (ust. 1, 2 i 3), zgodnie z przekątnymi podstaw prostopadłościanu wyznaczającego przestrzeń pomiarową (ust. 4 i 5), wzdłuż przekątnej prostopadłościanu wyznaczającego przestrzeń pomiarową (ust. 6). Odległość punktów pomiarowych od płaszczyzny wyznaczonej za pomocą najlepszego dopasowania będzie stanowić błąd płaskości  $R_E$ . Zgodność zostaje stwierdzona w przypadku braku przekroczenia maksymalnego błędu.

Zadanie **ponownej weryfikacji** polega na powtórnym jej przeprowadzaniu w celu zapewnienia odpowiedniej jakości systemu optycznego. Wielokrotna weryfikacja pozwala ocenić trend zmian charakterystyk systemu. Niemniej istotne jest zapewnienie bardzo zbliżonych warunków i trybów pracy podczas każdego z pomiarów.

## 2.2. Norma ISO 10360 część 8 [N2]

Zadaniem ISO jest ustanowienie norm we wszelkich dziedzinach życia, a prace nad rozszerzeniem obszaru norm nieustannie trwają. Skutkiem tego działania jest tegoroczna część 8 normy ISO 10360 (Geometryczna specyfikacja produktu (GPS) – Testy akceptacji i weryfikacji dla współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP) dedykowana WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi).

W przypadku ISO 10360-8 prace poczynił Komitet Techniczny ISO/TC 213. Część ISO 10360-8 uważa się za ogólną normę z zakresu GPS (ISO/TR 14638 [N3]). Odpowiednikiem ISO 10360-8 dla systemów stykowych jest część druga niniejszej normy, a więc ISO 10360-2. Metodologia przeprowadzania testów jest w przypadku wskazanych części normy analogiczna.

Dwa podstawowe cele przeprowadzania testów wg. ISO 10360-8 [N2] to:

- 1) zbadanie **błędu wskaźnika skalibrowanego wzorca długości** za pomocą optycznej głowicy pomiarowej oraz
- 2) zbadanie **błędów w układzie optycznej głowicy pomiarowej**.

Testy akceptacji i ponownej weryfikacji podane w tej części ISO 10360 mają zastosowanie jedynie do WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi o konwencjonalnej budowie.

Wzorcowanie optycznych systemów pomiarowych 3D zgodnie z normą obejmuje:

- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing form error*  $P_{F,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing dispersion value*  $P_{95\%,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing size error*  $P_{S,X}$
- wyznaczenie błędu układu głowicy optycznej – *probing size error All*  $P_{S-ALL,X}$
- wyznaczenie błędu wskazania na długości – *length measurement error*  $E_{O,X}$

Następnie porównuje się uzyskane wartości błędów z maksymalnymi dopuszczalnymi wartościami. Jeżeli ich wartości są mniejsze, to dokładność uznaje się za potwierdzoną. W aneksie normy opisane są dodatkowe testy, które są zalecane, tj.: **wyznaczenie błędu płaskości, test odwzorowania głębokości, test odwzorowania nachylenia krawędzi, test odwzorowania kształtów falistych**. Kule stosowane przy pomiarach błędów układu głowicy optycznej muszą być wykonane ze stali, ceramiki lub materiału nierefleksyjnego, a ich średnice powinny znajdować się w zakresie:

$$\text{śr} = (0,1 \dots 0,2) \cdot L_0 \quad (5)$$

gdzie:

$L_0$  – przekątna najmniejszego prostokątnego równoległościanu obejmującego przestrzeń pomiarową.

Istotne jest, aby błąd kuli był mniejszy niż 1/5 z charakterystyki wymiarowej wykorzystanego wzorca kuli, a sama kula posiadała aktualne świadectwo kalibracji.

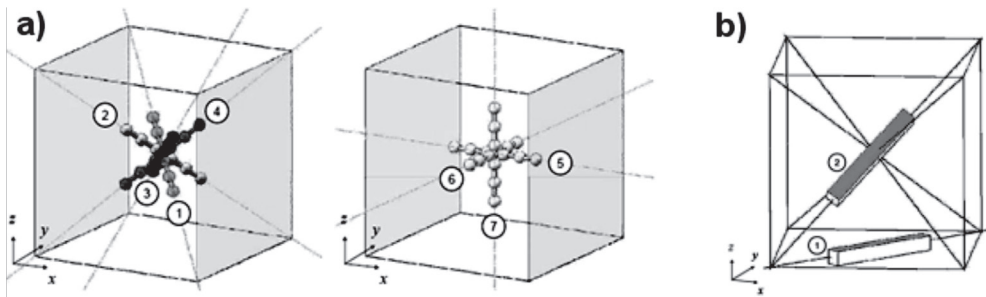
Do weryfikacji parametru płaskości stosuje się natomiast wzorec materialny płaskości, którym jest prostopadłościan ze stali, ceramiki, aluminium lub materiału o niskiej refleksyjności o szerokości nie przekraczającej 50 mm, natomiast długości nie mniejszej niż  $0,5 \cdot L_0$ . Błąd płaskości nie powinien być większy niż 1/5 mierzonej charakterystyki, a wzorec powinien posiadać aktualne świadectwo kalibracji.

Do wyznaczania błędu wskazania na długości stosuje się materialny wzorec długości, na którym umieszczone są kule zrobione ze stali, ceramiki lub innych odpowiednich materiałów. Powierzchnia kul powinna rozpraszać światło. Do weryfikacji tego parametru stosuje się wzorec stopniowy typu Ball Bar, który powinien pokrywać co najmniej 66% przestrzeni pomiarowej.

W przypadku wyznaczenia błędu **układu głowicy optycznej – probing form error**  $P_{F,X}$  należy wykonać pomiar kuli w jednym ustawieniu. Aby wykonać obliczenia należy podzielić punkty zebrane na kuli na 25 obszarów, a następnie zredukować każdy obszar do punktu reprezentatywnego. Metodą najmniejszych kwadratów z tak uzyskanych 25 punktów należy obliczyć promienie kuli. Różnica promieni uzyskanych jest błędem  $P_{F,X}$ . Przy wyznaczeniu błędu **układu głowicy optycznej – probing dispersion value**  $P_{95\%,X}$  postępuje się adekwatnie jak we wcześniejszym pomiarze. Następnie należy znaleźć zakres zmienności promieni mieszczących się w 95% wynikach. Przy wyznaczeniu błędu **układu głowicy optycznej – probing size error**  $P_{S,X}$  metodą najmniejszych kwadratów z 25 punktów oblicza się średnicę kuli. Różnica średnicy uzyskanej do średnicy nominalnej jest błędem  $P_{S,X}$ . Przy wyznaczeniu

błądu **układu głowicy optycznej – probing size error**  $All P_{S-ALL, X}$  metodą najmniejszych kwadratów ze wszystkich punktów oblicza się średnicę kuli. Różnica średnicy uzyskanej do średnicy wywzorcowanej jest błędem  $P_{S-ALL, X}$

Przy wzorcowaniu **błądu pomiaru długości**  $E_{O, X, MPE}$  użytkownik może wybrać siedem różnych miejsc oraz kierunków dla pięciu skalibrowanych długości testowych w ramach ograniczeń określonych przez producenta. Zalecane jest rozmieszczenie jak na rys. 5a. Należy umieścić pięć różnych długości testowych w siedmiu różnych miejscach, kierunkach lub obydwu w miejscu pomiaru WMP z optycznymi głowicami pomiarowymi. Każda z długości testowych mierzona jest trzy razy, w sumie 105 pomiarów. Zalecane umiejscowienie to trzy pozycje wzdłuż osi systemu koordynacji oraz cztery w pozycjach po przekątnej [N2].



Rys. 5. Zalecane umiejscowienie wzorców przy badaniu: a) błędu pomiaru długości, b) błędu płaskości

Fig. 5. Recommended positions of material standards in the assessment of: a) length measurement error) b) flat form measurement error)

W normie ISO 10360-8 dodatkowo znajdują się testy odwzorowania powierzchni, które mówią nam o tym, jak dany system radzi sobie z powierzchniami bardziej skomplikowanymi.

Przy wzorcowaniu **błądu płaskości** użytkownik powinien umieścić urządzenie na płycie wzorcowej  $x, y$  jak najbliżej wzdłuż przekątnej w przestrzeni pomiarowej WMP. Zalecane jest umieszczenie jak na rysunku 5b. Pomiar wzorca płaskości przeprowadza się w dwóch pozycjach: jedna wzdłuż linii przekątnej na płycie wzorcowej  $x, y$ , druga w pozycji ukośnej. Stosując wszystkie zmierzone punkty, oblicza się rozkład Gaussa. Dla każdego pomiaru  $n_F$  obliczyć należy opisaną normalną odległość  $N$ . Następnie oblicza się błąd pomiaru płaskości  $F_{x, y}$  jako zakres  $n_F$ :

$$F_x = N_{\max} - N_{\min} \quad (6)$$

Drugim z nich to **test odwzorowania głębokości** polegający na porównaniu głębokości mierzonej za pomocą czujnika do skalibrowanej głębokości. Kolejny to **test odwzorowania nachylenia krawędzi**, w którym profil krawędzi jest mierzony za pomocą czujnika, a wynik zastosowany jest do określenia rozdzielczości strukturalnej. I ostatecznie **testy odwzorowania kształtów falistych**, gdzie powierzchnia sinusoidalna wzorca mierzona jest za pomocą głowicy optycznej. Długość fali określona jest poprzez czynnik mierzonej amplitudy do skalibrowanej amplitudy większej niż 0,7. Długość fali porównana jest do określonej rozdzielczości.



### 2.3. Zestawienie metod

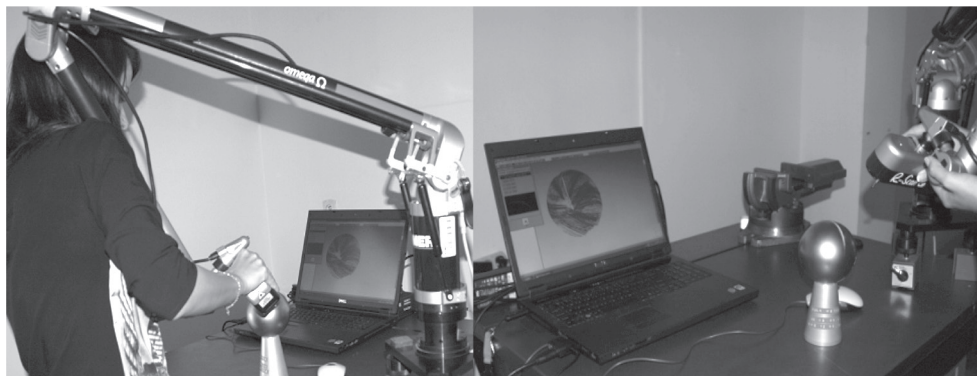
Zalecenia VDI/VDE oraz norma ISO 10360-8 pomimo, że dotyczą tego samego zagadnienia, różnią się od siebie w wielu aspektach. Należy zwrócić uwagę, że część 8 normy ISO 10360 dopiero wchodzi na rynek, podczas gdy VDI/VDE już swobodnie na nim funkcjonuje od dłuższego czasu. Już podczas pobieżnego przeglądu porównywanych wytycznych można zwrócić uwagę na rozbudowany charakter normy ISO 10360-8 w porównaniu z VDI/VDE. W VDI/VDE przedstawione są zalecenia do wyznaczania trzech podstawowych rodzajów błędów: błędu układu głowicy optycznej, błędu wskazania na długości oraz błędu płaskości. Norma ISO również obejmuje swym zakresem wymienione parametry jakościowe, ale w formie rozbudowanej o dodatkowy podział na cztery sposoby obliczania błędów głowicy. Różnice pojawiają się w ostatnim etapie obliczeń, tym sposobem otrzymujemy cztery różne końcowe podejścia, które niestety znacznie wydłużają prace nad wzorcowaniem poprzez konieczność wyeksportowania uzyskanych punktów do innego oprogramowania, podzielenia ich na 25 zbiorów, a następnie znalezienia jednego punktu, który byłby reprezentatywny dla każdego obszaru. Dodatkowo w normie ISO znajdują się trzy rodzaje testów badających odwzorowanie: głębokości, nachylenia krawędzi i kształtów falistych.

Wzorce stosowane w normie ISO oraz VDI/VDE do wyznaczania błędów układu głowicy optycznej oraz błędów płaskości są takie same w obydwóch przypadkach. Różnica, jaką można zaobserwować w przypadku wyznaczania błędu wskazania na długości polega na konieczności pokrycia przez wzorec stopniowy typu Ball Bar co najmniej 66% przestrzeni pomiarowej w normie ISO, czego nie było wcześniej w VDI/VDE. Według normy [N2] istnieje potrzeba zakupienia dodatkowych wzorców, takich jak wzorec sinusoidalny czy wzorec do określenia głębokości szczeliny.

### 3. Wpływ oprogramowania na wynik pomiaru wzorcowania

Zarówno normy [N2], jak i zalecenia [N1] podejmują próby określania liczby punktów przeznaczonych do usunięcia podczas przeprowadzanych filtracji, czyli jaki procent całego zbioru uważać można za tzw. szum, niestety żaden z powyższych dokumentów nie jest w stanie uwzględnić jądra leżącego w programach obsługujących dany system. Aby pokazać, jak dużą rolę odgrywa to zagadnienie, wykonano pomiar wzorcujący systemu optycznego WRP z głowicą R-Scan, zgodnie zaleceniami VDE/VDI [N1] (rys. 6), a następnie opracowano wyniki w czterech różnych dedykowanych programach do analizy powierzchni, tj. 3D Reshaper, Mesh 3D, PolyWorks oraz PowerInspect. **Przedstawione wyniki nie zostały przyporządkowane konkretnym programom zgodnie z wymienioną kolejnością, gdyż autorzy artykułu nie mieli na celu wyrokować, który program jest najskuteczniejszy, lecz w ich intencji było ukazanie wpływu oprogramowania na uzyskane wyniki.**

Zgodnie z zaleceniami [N1] kula pomiarowa została dokładnie oczyszczona i zamocowana w dziesięciu różnych ustawieniach przestrzeni pomiarowej, w celu umożliwienia pełnego pomiaru. Następnie dokonano pomiaru w wyniku czego uzyskano 10 chmur punktów. Te same chmury opracowano w każdym z czterech ww. programów. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 6. Pomiar wzorujący systemu optycznego WRP z głowicą R-Scan, zgodnie zaleceniami VDE/VDI

Fig. 6. Calibration measurement of optical system CMA with R-Scan probe, according to VDI/VDE recommendations

Tabela 1

#### Wyniki wzorcowania systemu optycznego na kuli

Lp. kuli	Oprogramowanie 1 [mm]	Oprogramowanie 2 [mm]	Oprogramowanie 3 [mm]	Oprogramowanie 4 [mm]
1	0,2434	0,2433	0,2303	0,2220
2	0,2041	0,2040	0,1992	0,2011
3	0,1242	0,1241	0,2092	0,2088
4	0,2231	0,2231	0,1122	0,1202
5	0,2102	0,2131	0,2110	0,2298
6	0,2331	0,2331	0,2433	0,2532
7	0,2921	0,2920	0,2720	0,2882
8	0,3065	0,3065	0,2799	0,2662
9	0,2853	0,2852	0,2731	0,2732
10	0,2488	0,2488	0,2201	0,2320

Jak pokazano, dwa programy mają ten sam algorytm tworzenia kuli za pomocą metody najmniejszych kwadratów, natomiast dwa pozostałe różnią się od siebie. Według wyżej przedstawionych wyników dla programów 1 i 2 maksymalna wartość to 0,3065, natomiast dla programów 2 i 3 odpowiednio 0,2799 i 0,2882.

Następnie zmierzony został wzorec długości w siedmiu różnych ustawieniach zgodnie z zaleceniami [N1], tak jak poprzednio te same chmury punktów zostały wyeksportowane do czterech programów.

Wyniki przedstawiono poniżej.

Wyniki wzorcowania systemu optycznego na wzorcu długości

Lp. wzorca długości	Oprogramowanie 1 [mm]	Oprogramowanie 2 [mm]	Oprogramowanie 3 [mm]	Oprogramowanie 4 [mm]
Odległość 1	0,2494	0,4332	0,1461	0,1461
Odległość 2	0,6102	0,5323	0,0019	0,0019
Odległość 3	0,4821	0,4423	0,2869	0,2869
Odległość 4	0,3221	0,3653	0,0711	0,0711
Odległość 5	0,4004	0,4263	0,2331	0,2331
Odległość 6	0,4322	0,4253	0,1921	0,1921
Odległość 7	0,5342	0,5122	0,1321	0,1321

Podobnie jak poprzednio dwa programy mają ten sam algorytm pozwalający określić odległości między środkami kul. Natomiast dwa są całkowicie różne. Zauważyć można również, że programy nr 3 i 4 znacznie lepiej poradziły sobie z wyznaczeniem odległości pomiędzy środkami kul. Według tab. 2 maksymalna wartość odległości zgodnie z oprogramowaniem nr 1 to aż 0,6102, zgodnie z oprogramowaniem nr 2 to 0,5323, natomiast zgodnie z oprogramowaniem nr 3 i 4 to 0,2869. Pozostaje pytanie: dlaczego jeśli dwa pierwsze oprogramowania wyznaczały promień kuli dokładnie tak samo, to odległość pomiędzy środkami kul obliczana jest inaczej, czy możliwe jest aby w takiej sytuacji środki były w innym miejscu?

Ostatnim testem było zmierzenie wzorca płaskości w sześciu pozycjach zgodnie z zalecanymi ustawieniami. Otrzymane w wyniku pomiaru chmury punktów zostały podobnie jak wcześniej przeanalizowane w czterech oprogramowaniach. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki wzorcowania systemu optycznego na wzorcu płaskości

Lp. wzorca	Oprogramowanie 1 [mm]	Oprogramowanie 2 [mm]	Oprogramowanie 3 [mm]	Oprogramowanie 4 [mm]
Płaskość 1	0,2193	0,2193	0,3722	0,2071
Płaskość 2	0,2221	0,2221	0,3751	0,2033
Płaskość 3	0,1700	0,1700	0,3092	0,1924
Płaskość 4	0,2094	0,2094	0,3451	0,1954
Płaskość 5	0,2318	0,2318	0,4613	0,2152
Płaskość 6	0,2109	0,2109	0,3371	0,1098

Zgodnie z wynikami parametr błędu płaskości wg Oprogramowania nr 1 i 2 wynosiłby 0,2318, natomiast wg oprogramowania nr 3 i 4 odpowiednio 0,4613 i 0,2071. Jak widać oprogramowanie nr 3 kompletnie odbiega od pozostałych.

#### 4. Podsumowanie

Dzięki zaprezentowanym wynikom, jak również przeprowadzonemu porównaniu dokumentów można zaobserwować iż wzorcowanie systemu optycznego wg zaleceń niemieckiego PTB [N1] jest znacznie mniej czasochłonne niż wg normy ISO [N2], jednak nie odzwierciedla tak szczegółowo możliwości systemów optycznych. Każdy użytkownik takiego systemu powinien mieć możliwość wyboru według jakiego dokumentu życzy sobie mieć wywzorcowany system, w zależności od zamierzonego obszaru zastosowań.

Jednak do momentu aż wszystkie oprogramowania nie ujednoczą algorytmów pozwalających na odwzorowanie elementu, nawet tak podstawowego jak kula czy płaszczyzna, użytkownik danego systemu nie będzie w stanie porównać jego dokładności z innym systemem. Nie będzie również możliwe jednoznaczne stwierdzenie, który system jest dokładniejszy, ponieważ jak uwidoczniły wyniki, jeden system lepiej radził sobie z wyznaczeniem promienia lub średnicy kuli, a inny z wyznaczeniem odległości lub płaskości. Nie każdy użytkownik jest w stanie określić przyczyny złych wyników pomiaru, mogą one leżeć w oprogramowaniu lub w ograniczonych możliwościach systemów do pracy z danymi elementami. Istotną kwestią dotyczącą wszystkich oprogramowań do analizy powierzchni jest zagadnienie usuwania tzw. szumów, będące następnym punktem badań autorów nad systemami optycznymi.

#### Literatura

- [1] Sładek J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011, 495.
- [2] Sładek J., Gaska A., Kupiec R., Krawczyk M., *Badanie dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej z wykorzystaniem laser tracera*, Mechanik nr 8-9/2012, Warszawa.
- [3] Sładek J., Ostrowska K., Gaska A., *Wirtualne współrzędnościowe ramię pomiarowe (WWRP)*, Proceedings of the 13th National & 4th International Conference Metrology in Production Engineering, 437-444.
- [4] Sładek J., Ostrowska K., Gaska A., *Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with use of metrological model*, Measurement 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.08.026>.
- [5] Sładek J., Gaska A., Olszewska M., Kupiec R., *Virtual Coordinate Measuring Machine Built Using Laser Tracker System and Spherical Standard*, Proceedings of Xth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała 2012.
- [6] Sładek J., Gaska A., *Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method*, Measurement 45, 2012, 1564-1575.
- [7] Sładek J., Ostrowska K., Gacek K., *Kinematic Metrological Model of the Coordinate Measuring Arm (Mcma)*, wydanie Journal IMEKO Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal 2009.
- [8] Sładek J., Ostrowska K., Gaska A., *Wirtualne Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe*, Pomiary-Automatyka-Kontrola, vol. 54, nr 01/2010, 75-77.

- [9] Sładek J., Kupiec R., Gaska A., Krawczyk M., *Badanie dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej z wykorzystaniem laser trójkąta – zgodnie z ISO 10360-2:2009*, XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania” Materiały konferencyjne, Warszawa 2011
- [10] Sładek J., Gaska A., Olszewska M., Ostrowska K., Ryniewicz A., *Metoda oceny dokładności pomiarów realizowanych za pomocą ramion pomiarowych wyposażonych w optyczne głowice skanujące*, Mechanik 02/2012.
- [11] Sładek J., Błaszczak P.M., Kupiec M., Sitnik R., *The hybrid contact-optical coordinate measuring system*, Measurement, Elsevier, 2011, vol. 44, issue 3.
- [12] Sładek J., Gaska A., *Modeling of the CMM probe head errors*, Proceedings of ISMQC 2010, Osaka, Japan.
- [13] McCann D., *Mobile metrology*. Cutting Tool Engineering, nr 10/2008, 60-63.
- [14] Ratajczyk E., Woźniak A., *Nowe trendy w budowie bezstykowy głowic pomiarowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych*, Mechanik, nr 1/2005, Warszawa 2005, 32-35.
- [15] Sładek J., Ostrowska K., Olszewska M., Gaska A., Ryniewicz A., *Metody oceny dokładności pomiarów realizowanych za pomocą ramion pomiarowych wyposażonych w optyczne głowice skanujące*, Mechanik 02/2012.
- [16] Juras B., Sładek J., Szewczyk D., *Możliwość identyfikacji błędów kształtu przy wykorzystaniu skanera optycznego*, PAK, 2012.
- [17] Tabaka M., Szewczyk D., Sładek J., *Dokładność odwzorowania geometrii otworów z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej*, materiały konferencyjne 10 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Współrzędnościowa Technika Pomiarowa 04.2012 Bielsko Biała.
- [18] Juras B., Szewczyk D., *Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym*, Postępy Nauki i Techniki, Politechnika Lubelska, 7/2011.
- [19] Sładek J., Ostrowska K., Gaska A., Gacek K., Kmita A., *Model matematyczny opisu dokładności Współrzędnościowych Ramion Pomiarowych*, Wydanie Inżynieria Maszyn, R.14, zeszyt 2, 2009, 20-3.
- [20] Gaska A., Olszewska M., *Ocena odwzorowania kształtu za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę optyczną*, Postępy nauki i techniki, nr 07/2011, 37-43.
- [21] [N1] VDI-VDE-2634-Systeme-mit-flächenhafter-Antastung
- [22] [N2] ISO 10360-8 Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 8: CMMs with optical distance sensors
- [23] [N3] ISO/TR 14638 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Übersicht;
- [24] [P1] Nr T10C 010 29 pt. „Opto-numeryczny system do pomiaru elementów geometrycznych zintegrowany z Współrzędnościową Maszyną Pomiarową”.