

Wyniki badań dokładności współrzędnościowych ramion pomiarowych

Eugeniusz Ratajczyk

Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Wydział Inżynierii i Zarządzania, ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa

Streszczenie: Na początku krótko opisano budowę ramienia pomiarowego w odniesieniu do głównych jego zespołów. Przedstawiono oprogramowanie pomiarowe PowerINSPECT oraz zaprezentowano element w postaci tzw. kostki szkoleniowej z zaznaczeniem parametrów, które podlegały badaniom. Artykuł zawiera syntetyczny opis procedury pomiarowej, wyniki pomiarów i ich interpretację.

Słowa kluczowe: współrzędnościowe ramię pomiarowe, oprogramowanie PowerINSPECT

1. Wprowadzenie

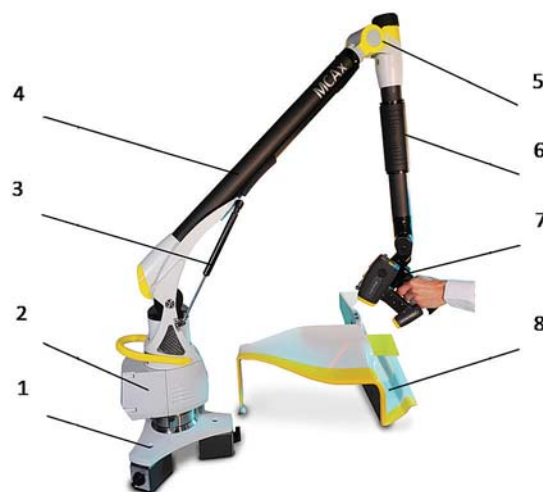
W ostatnich latach pojawiły się nowiej konstrukcji urządzenia pomiarowe pracujące w technice współrzędnościowej, które mogą być stosowane w małych i średnich zakładach produkcyjnych, a nawet w warsztatach prowadzących naprawy, np. naprawy samochodów. Urządzenia te, zwane współrzędnościowymi ramionami pomiarowymi (Coordinate Measuring Arms; Portable CMM's; Articulated Arm CMM's) lub wprost ramionami pomiarowymi, są urządzeniami przenośnymi o stosunkowo nieskomplikowanej konstrukcji, chociaż o bogatym oprogramowaniu.

Ramiona pomiarowe, w odróżnieniu od współrzędnościowych maszyn pomiarowych [1–7], są urządzeniami przenośnymi mogącymi pracować w otoczeniu produkcji, a ponadto – co jest również cechą charakterystyczną – mogą wykonywać pomiary wewnątrz obiektów wielkogabarytowych.

2. Główne zespoły ramienia pomiarowego i ich funkcje

Budowa i działanie ramion pomiarowych opisane zostanie na przykładzie ramienia o symbolu MCAx oferowanego przez firmę Nikon Metrology [8] jako przykład konstrukcji w zasadzie wspólnej dla wszystkich ramion – ramienia, za pomocą którego przeprowadzono badania dokładności. Cechami charakterystycznymi budowy ramion są (rys. 1):

– podstawa **1** (zwana stopką) umożliwia mocowanie ramienia do powierzchni stołu lub statywu przez łączenie magnetyczne, śrubowe lub podciśnieniowe,



Rys. 1. Współrzędnościowe ramię pomiarowe NIKON MCAx
Fig. 1. NIKON MCAx coordinate measuring arm

- korpus **2** zapewnia łączność bezprzewodową (Wi-Fi) oraz zasilanie bateryjne (Li-Ion),
- przeciwwaga Zero-G **3** kompensuje masę ramienia i tym samym zwiększa komfort pracy operatora przy wykonywaniu przemieszczeń kątowych ramienia,
- tuby **4** ramienia wykonane z włókien węglowych zapewniają stosunkowo małą podatność na wpływy temperatury, odznaczają się wysoką sztywnością i małą masą,
- obrotowy przegub **5** zapewnia płynny obrót ramienia w dwóch płaszczyznach,
- obrotowy uchwyt **6** w postaci tulei ułatwia przemieszczanie ramieniem oraz izoluje ramię od ciepła ręki operatora,
- głowica **7** może być wyposażona w laserową głowicę skanującą i głowicę stykową tworząc zintegrowany układ lub najczęściej tylko w głowicę do pomiarów stykowych,
- mierzony przedmiot **8**, w tym przypadku z widoczną linią pomiarową pochodzącą od skanera laserowego.

Autor korespondujący:

Eugeniusz Ratajczyk, erata@mchtr.pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.02.2017 r., przyjęty do druku 27.03.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 2. Głowice pomiarowe: impulsowa (z przetwornikiem elektrostrykowym) i tzw. sztywna (bez przetwornika)
 Fig. 2. Measuring heads: touch-trigger (with electrical switching transducer) and so-called rigid (without transducer)

Poszczególne przeguby ramienia wyposażonego tylko w głowicę stykową umożliwiają wykonywanie obrotów każdego przegubu w trzech płaszczyznach. Każdy przegub wyposażony jest w dwa enkodery. W przypadku ramienia MCAX są to kątowe enkodery kodowe, tj. typu absolutnego.

Ramiona pomiarowe serii MCAX wytwarzane są w sześciu rodzajach zakresu pomiarowego od najmniejszego, wynoszącego 2,0 m do największego 4,5 m, przy czym poszczególne ramiona różnią się zakresem pomiarowym co 0,5 m. Wykonywane są w dwóch opcjach różniących się dokładnością.

W badaniach zastosowano ramię pomiarowe o zakresie 2,4 m, którego błąd dopuszczalny na podstawie testu pojedynczego punktu [3,10] wynosi $\pm 27 \mu\text{m}$, a na podstawie testu przestrzennego – test C $\pm 40 \mu\text{m}$.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem głowicy sztywnej (bez przetwornika) o średnicy końcówki wynoszącej 3 mm oraz za pomocą głowicy z przetwornikiem elektrostrykowym TP20, tzw. głowicy impulsowej produkcji firmy Renishaw [9] z końcówką trzpienia pomiarowego o średnicy 4 mm (rys. 2). W praktyce najczęściej stosowane są głowice bez przetwornika – tzw. sztywne, które doprowadzane są do mierzonego przedmiotu przez operatora. W zależności od szybkości dosunięcia, jak i zmiennego nacisku może powstać błąd pomiaru. Błąd ten nie występuje w przypadku zastosowania głowicy z przetwornikiem elektrostrykowym, ponieważ nacisk pomiarowy jest stały. Dlatego też podjęto badania, by wyjaśnić – czy i jakie różnice w dokładności występują podczas stosowania obu typów głowic.

3. Oprogramowanie pomiarowe

Do współrzędnościowych ramion pomiarowych firmy Nikon Metrology stosowane jest oprogramowanie CMM-Manager i alternatywnie PowerINSPECT. W pracy zastosowano oprogramowanie PowerINSPECT [1].

PowerINSPECT jest kompletnym pakietem przeznaczonym do kontroli mierzonych części, przy czym pomiar może odbywać się z pomocą standardowej maszyny CMM, jako współrzędnościowego ramienia pomiarowego. Możliwe jest porównywanie zgodności zmierzonych punktów z odpowiadającymi im punktami na rysunku CAD, a tym samym możliwa jest ocena jakości wyrobu. Oprogramowanie umożliwia (tak jak inne konwencjonalne pakiety do pomiarów na CMM) zmierzenie pełnego zakresu geometrii, zarówno w przypadku, kiedy dostępny jest plik CAD jak również, kiedy takiego pliku użytkownik nie ma.

PowerINSPECT pracuje w środowisku Windows, a uzyskane wyniki kontroli detalu są generowane w postaci raportu w programie Microsoft Excel lub w formacie HTML. Rezultaty pomiarów są wyświetlane w czasie rzeczywistym. Stworzone plany pomiarowe są zapamiętywane i mogą być zastosowane do kontroli kolejnych detali o tych samych kształtach i wymiarach nominalnych, np. pochodzących z jednej linii produkcyjnej bez potrzeby tworzenia osobnych planów kontroli dla pojedynczych elementów.

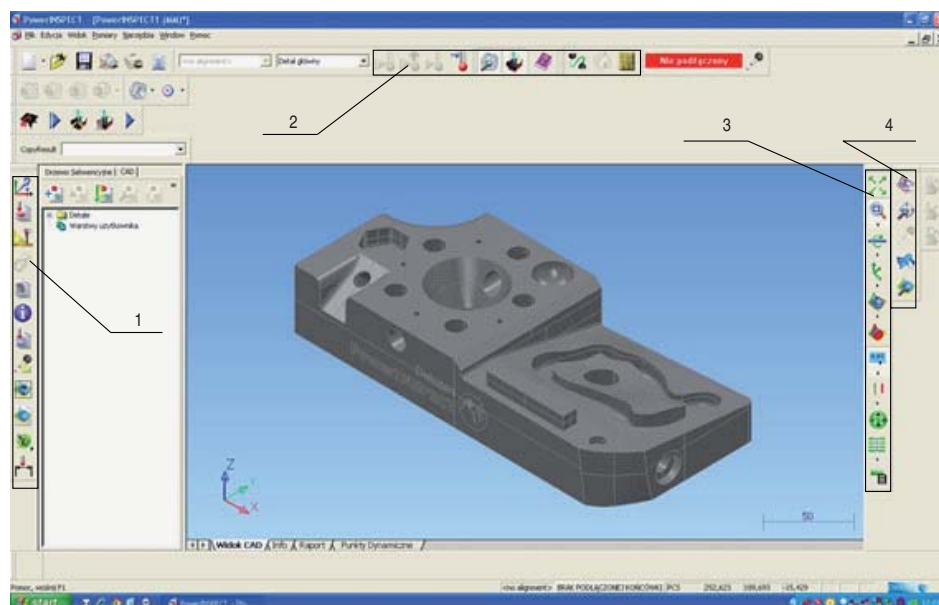
Po uruchomieniu programu i wybraniu nowego planu kontroli (z zakładki *Plik* w menu głównym) wraz z ewentualnym załadowaniem pliku CAD mierzonej części pojawia się główne okno oprogramowania PowerINSPECT zawierające paski zadań i – jeśli został wybrany – widok CAD detalu (rys. 3).

Funkcje pasków zadań znajdujących się w oknie głównym przedstawiono na rys. 4.

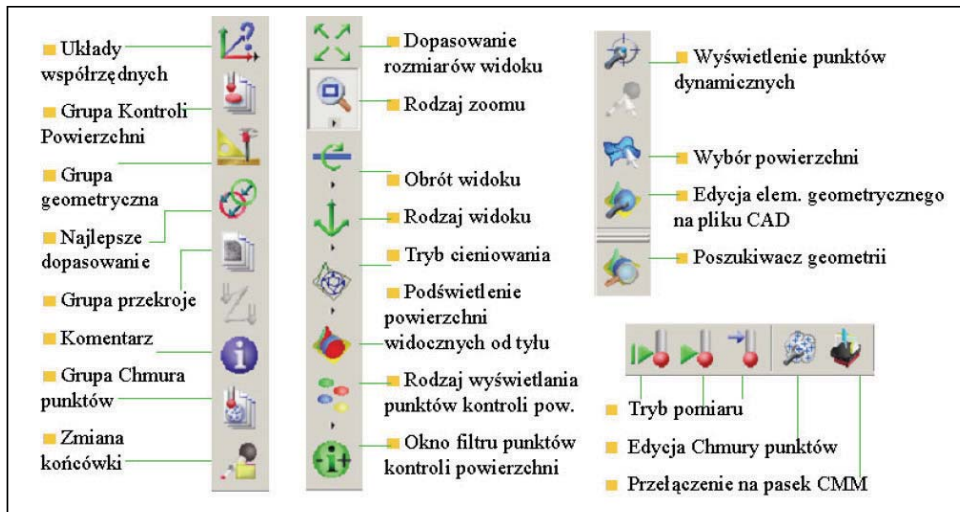
4. Element, na którym przeprowadzono badania

Do badań porównawczych dokładności pomiaru głowicą sztywną i z przetwornikiem elektrostrykowym wybrano kostkę szkoleniową wykonaną z teflonu o wymiarach 250 mm \times 110 mm \times 45 mm i masie 1200 g \pm 5 g, której model CAD przedstawiono na rys. 5.

Plan badań obejmował pięć następujących wymiarów: średnice dwóch otworów O1 i O2, kąt α i dwie płaszczyzny P1 i P2. Kąt



Rys. 3. Okno główne oprogramowania PowerINSPECT z widokiem mierzonego elementu
 Fig. 3. Main window of the PowerINSPECT software with a view of the measured part



Rys. 4. Przykłady pasków zadań programu PowerINSPECT zaznaczone w oknie głównym jako 1, 2, 3 i 4

Fig. 4. Examples of taskbars of the PowerINSPECT software, which are marked on the main window as 1, 2, 3 and 4

α został wyznaczony metodą obliczeniową na podstawie wyniku pomiaru dwóch płaszczyzn P1 i P2.

Układ współrzędnych ustawiono w narożu elementu, jak to ilustruje rys. 5. Zdefiniowanie płaszczyzn oparto na wyznaczeniu trzech punktów na każdej z płaszczyzn.

W oprogramowaniu PowerINSPECT raport z badań tworzony jest automatycznie. Zawiera on wszystkie dane z pomiarów, które można zachować na dysku dla późniejszej analizy danych. Raport jest złożony z trzech części. Pierwsza zawiera nazwę oprogramowania i producenta wraz z danymi kontaktowymi oraz nazwę projektu. Druga to tabela raportu z danymi osoby zlecającej pomiar, opis mierzonego elementu i informacje o osobie wykonującej pomiary. Trzecia część to dane z przeprowadzonych pomiarów w postaci tabeli. Zawiera ona wymiary nominalne mierzonych elementów, ich tolerancje w funkcji odchyłek oraz wartość wyniku pomiaru z podaniem różnicy, jako odchyłki, od wymiaru nominalnego.

5. Procedura pomiarowa w programie PowerINSPECT

Procedura rozpoczyna się od wyboru nakładki *Plik* i *New Session* i po wyborze grupy geometrycznej dokonuje się zapisu pod wybraną nazwą. W celu wczytania modelu elementu mie-

zrzonego dokonuje się zmiany nakładki z *Drzewo Sekwencyjne* na *CAD*. Po wczytaniu okno programu prezentuje widok elementu (rys. 5).

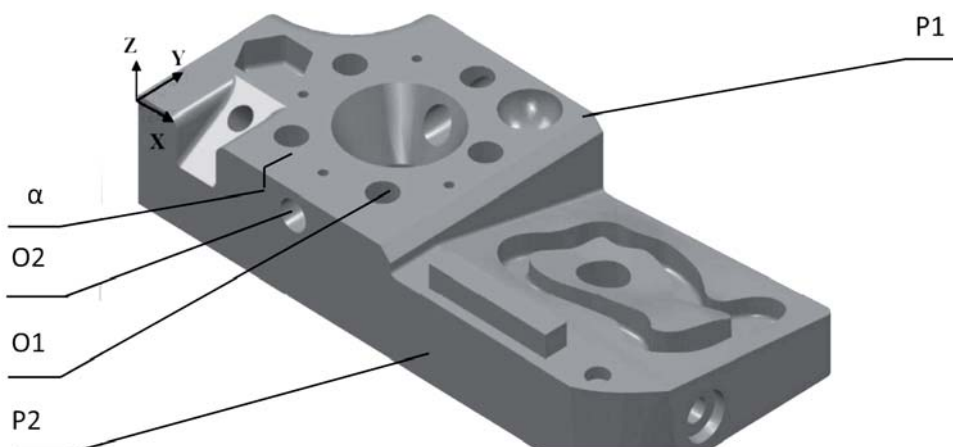
Układ współrzędnych ustala się w górnym narożu na powierzchni modelu CAD przedmiotu i zbiera współrzędne punktów na płaszczyźnie P1 w celu jej zdefiniowania. Następnie przystępuje się do realizacji pomiarów.

Pomiar płaszczyzn P1 i P2 realizuje się po wybraniu ikony *Sprawdzanie siatki*, wskazując w niej opcje *Powierzchnia* w oknie CAD.

W celu wykonania pomiaru okręgu należy wybrać w oknie CAD opcję *Siatka* i wskazać otwór, który ma być mierzony. Program PowerINSPECT wyszczególni go w taki sposób, jak na rys.6.

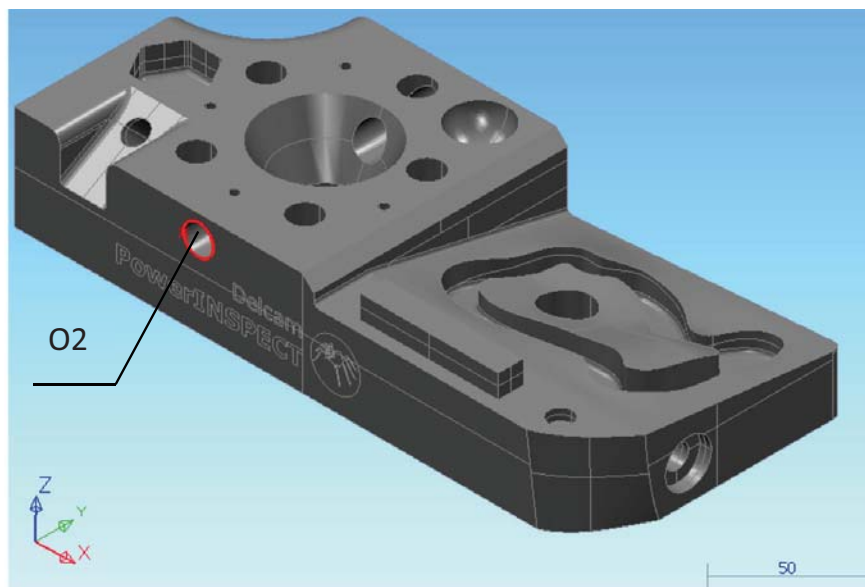
Następnie w oknie *Geometry Explorer* zatwierdza się wybrany otwór wybierając płaszczyznę, na którą ma być rzutowany. W kolejnym oknie zaznacza się wartości nominalne, tolerancje i dane, które umieszczone zostaną w raporcie, po czym można przystąpić do pomiarów. Zbierane punkty są wyświetlane w oknie pomiarowym na ekranie i na tej podstawie obliczane są automatycznie współrzędne środka mierzonego okręgu ($x = 59,7276$, $y = 0,000$, $z = -10,015$) oraz odchyłki kształtu wyznaczonej powierzchni (0,0380).

Po wykonaniu pomiarów płaszczyzn P1 i P2 oprogramowanie PowerINSPECT umożliwia wyznaczenie numeryczne kąta α



Rys. 5. Widok modelu CAD tzw. kostki szkoleniowej z zaznaczonymi elementami do zmiernia

Fig. 5. View of the CAD model of so-called training cube with features to be measured



Rys. 6. Widok modelu CAD z zaznaczonym mierzonym okręgiem otworu O2
Fig. 6. View of the CAD model with marked circle of the hole O2

między nimi. W tym celu wybiera się opcję *Kąt między płaszczyznami*, zaznaczając odpowiednie płaszczyzny z serii pomiarowej oraz *Korzystanie z nominalów od modelu CAD* celem poprawnego zestawienia w raporcie.

PowerINSPECT tworzy raport w sposób automatyczny. Jest on dostępny po wybraniu zakładki *Raport* w oknie głównym programu. W raporcie są wstawiane na bieżąco wszystkie dane z pomiarów, które użytkownik wybrał do zapisu. Celem późniejszej analizy raportu lub wydruku można go zachować na dysku twardym i następnie otworzyć w przeglądarce internetowej. Raport jest złożony z trzech części. Pierwsza z nich zawiera nazwę oprogramowania i producenta wraz z danymi kontaktowymi oraz nazwę projektu. Druga część raportu to tabela z danymi osoby zlecającej pomiar, opis mierzonego elementu i informacja o osobie wykonującej pomiar. Trzecia część obejmuje nazwę grupy geometrycznej i dane z przeprowadzonych pomiarów elementu, które użytkownik wcześniej zatwierdził.

6. Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów głowicą sztywną i impulsową zestawiono w tabelach. Każda z nich zawiera 20 zmierzonych wartości dla poszczególnych wymiarów tj. dwóch otworów O1 i O2 oraz kąta α . Płaszczyzny P1 i P2 miały charakter pomocniczy, bowiem służyły do wyznaczenia kąta α . W niniejszej publikacji, ze względu na objętość, przedstawione zostaną wyniki syntetyczne, tj. otrzymane po obliczeniach, np. średnie z 20 wartości, podobnie rozstęp i wartości średnie kwadratowe s. Wyniki syntetyczne pomiaru średnic otworów zamieszczono w tabelach 1 i 2 a wyniki wyznaczenia wartości kąta α w tabeli 3.

7. Podsumowanie – wnioski

Na podstawie syntetycznych wyników zawartych w tabelach 1–3 wynika, że dla wszystkich mierzonych wymiarów wyższą dokładnością charakteryzują się wyniki uzyskane z pomiarów głowicą impulsową, co poniekąd było do przewidzenia. Natomiast nie była wiadoma skala uzyskanych różnic w dokładności. O ile błąd średni kwadratowy s przy pomiarze otworu O1 głowicą sztywną wynosi $\pm 0,016$ mm, to przy zastosowaniu głowicy impulsowej wynosi $\pm 0,010$ mm, podobnie w przypadku pomiaru średnicy otworu O2 – $\pm 0,014$ mm i $\pm 0,010$ mm.

W wyznaczaniu wartości kąta α bliższe wartości nominalnej wynoszącej 90° są te, które otrzymano z pomiaru głowicą elektrostykową, uzyskując wartość wynoszącą $89,920^\circ$, bowiem za pomocą głowicy sztywnej uzyskano wartość $89,884^\circ$. Wartości odchyłeń średniokwadratowych wynoszą odpowiednio: dla głowicy sztywnej $\pm 0,027^\circ$ oraz $\pm 0,020^\circ$ dla głowicy impulsowej.

Analiza podstawowych danych statystycznych przeprowadzona na podstawie danych zawartych w tabelach 1–3 potwierdza występowanie większych wartości odchylenia standardowego oraz rozstępu dla wszystkich wymiarów mierzonych głowicą sztywną. Średnia arytmetyczna oraz mediana wyników są bliższe wartości nominalnej dla pomiarów głowicą impulsową.

Po wstępnej analizie przeprowadzono serię testów, aby sprawdzić, czy istnieją statystycznie istotne różnice między wynikami pomiarów realizowanych za pomocą głowicy sztywnej i impulsowej. Wykonano cztery testy: *porównanie średnich*, *porównanie odchyłeń standardowych*, *porównanie median* i *test Kołmogorowa-Smirnowa* [11].

Otrzymane wartości P-value dla kolejnych testów wynoszą odpowiednio: dla wyników pomiarów średnicy otworu O1; 0; 0,147; 0; 0 dla wyników pomiarów średnicy otworu O2 oraz 0; 0,222; 0; 0 dla wyników pomiarów kąta α .

Wyniki testów: porównanie średnich, median i test Kołmogorowa-Smirnowa dla wszystkich zmierzonych wymiarów jednoznacznie potwierdziły, że pomiary obiema głowicami są statystycznie istotnie różne.

8. Spostrzeżenia z przebiegu pomiarów i propozycje dalszych badań

Podczas pomiaru głowicą sztywną istotną kwestią było zachowanie w miarę stałego nacisku pomiarowego przy pomiarach wszystkich wymiarów, w każdej z serii pomiarowych. Wymagało to staranności i wprawy podczas wykonywania badań. Dlatego też od operatora mierzącego głowicą sztywną, która w większości przypadków jest stosowana, wymaga się wyjątkowej precyzji i stabilności procesu pomiarowego. Z kolei podczas „zbierania” punktów głowicą impulsową należało delikatnie zbliżać trzpień pomiarowy do mierzonej powierzchni lub (jeśli było to możliwe) przesuwając go po mierzonej powierzchni. Nagły najazd mógłby być przyczyną niechcianych drgań trzpienia i w konsekwencji powodować dodatkowy błąd ostatecznego wyniku pomiaru. W przypadku pomiarów głowicą impulsową należało

Tabela 1. Syntetyczne wyniki pomiaru średnicy otworu O1

Table 1. Synthetic results of O1 hole's diameter measurement

	Parametr	Pomiary głowicą sztywną	Pomiary głowicą impulsową
1.	Wartość nominalna	13,002	13,002
2.	Liczba pomiarów	20	20
3.	Wartość średnia [mm]	13,055	13,009
4.	Wartość minimalna [mm]	13,035	12,989
5.	Wartość maksymalna [mm]	13,082	13,029
6.	Rozstęp [mm]	0,047	0,040
7.	Odchylenie standardowe s [mm]	±0,016	±0,010

Tabela 2. Syntetyczne wyniki pomiaru średnicy otworu O2

Table 2. Synthetic results of O2 hole's diameter measurement

	Parametr	Pomiary głowicą sztywną	Pomiary głowicą impulsową
1.	Wartość nominalna	13,002	13,002
2.	Liczba pomiarów	20	20
3.	Wartość średnia [mm]	13,056	13,009
4.	Wartość minimalna [mm]	13,034	12,989
5.	Wartość maksymalna [mm]	13,087	13,033
6.	Rozstęp [mm]	0,053	0,044
7.	Odchylenie standardowe s [mm]	±0,014	±0,010

Tabela 3. Syntetyczne wyniki wyznaczenia kąta α Table 3. Synthetic results of α angle

	Parametr	Pomiary głowicą sztywną	Pomiary głowicą impulsową
1.	Wartość nominalna	90	90
2.	Liczba pomiarów	20	20
3.	Wartość średnia [°]	89,884	89,920
4.	Wartość minimalna [°]	89,850	89,999
5.	Wartość maksymalna [°]	89,944	89,966
6.	Rozstęp [°]	0,094	0,078
7.	Odchylenie standardowe s [°]	±0,027	±0,020

pamiętać o „dynamicznym” najjeździe na mierzony punkt, gdyż wówczas przetwornik elektrostatyczny najlepiej reaguje na odchylenie trzpienia.

Badania dla wszystkich ustalonych wymiarów zostały wykonane w jednym pomieszczeniu laboratoryjnym, w podobnych warunkach środowiskowych i przy tym samym sposobie mocowania kostki szkoleniowej przy wysokiej staranności przez mgr. inż. K.M. Golasińskiego. Utrzymywano stałą temperaturę w zakre-

sie $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$. Współczynnik rozszerzalności cieplnej teflonu, z którego wykonano kostkę szkoleniową, wynosi $1,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ i przy wstępnych kalkulacjach ustalono, że takie wahania temperaturowe nie mają istotnego wpływu na wyniki pomiarów.

Podobne badania należałoby wykonać dla porównania dokładności pomiaru głowicą sztywną i impulsową z głowicą bezstykową w postaci głowicy laserowej, która coraz częściej znajduje się na wyposażeniu współrzędnościowych ramion pomiarowych.

Bibliografia

1. Ratajczyk E., Woźniak A., *Współrzędnościowe systemy pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2016.
2. Ratajczyk E., *Modyfikacja i nowe rodzaje współrzędnościowych ramion pomiarowych*. „Mechanik”, Nr 8–9/2014, 583–591; Nr 10/2014, 759–767.
3. Ratajczyk E., *Współrzędnościowe ramiona pomiarowe – rodzaje, parametry, zastosowania, testy dokładności*. „Mechanik”, Nr 8–9/2014, 315–325.
4. Śladek J., Ostrowska K., Sokoł G., Kmita A., *Wzorcowanie współrzędnościowych ramion pomiarowych (WRP)*. „Acta Mechanica et Automatica”. Vol. 1, No. 2, 2007.
5. Śladek J., Ostrowska K., Gaska A., *Wirtualne współrzędnościowe ramię pomiarowe (WWRP)*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, R. 56, Nr 01/2010, 75–77.
6. Wojtyła M., *Niepewność pomiaru przewodów metalowych giętych z wykorzystaniem ramienia pomiarowego z głowicą bezstykową typu V*. „Przegląd Mechaniczny”, Nr 9/2007 Supl., 170–174.
7. Ratajczyk E., *Współrzędnościowe ramiona pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, Nr 3/2012, 16–22.
8. Nikon Metrology: www.nikonmetrology.com. Smart-Solutions: www.smart-solutions.pl
9. Renishaw (W. Brytania): www.renishaw.com. Renishaw Sp.z o.o.: www.renishaw.pl
10. Ratajczyk E., Zawacki M., *Accuracy tests of measuring arms – is it possible to compare ASME and ISO standard requirements*. VIII International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique. Bielsko-Biała, April 2008. Proc. (ISBN 978-83-60714-40-9), 137–146.
11. Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2001.

Results of coordinate measuring arms' accuracy testing

Abstract: At first the construction of the measuring arm with reference to its main units was briefly described. The PowerINSPECT measurement software was presented. Also a part in the form of so called training cube with selected for tests parameters was presented. The article contains a synthetic description of the measurement procedure, measurement results and their interpretation.

Keywords: coordinate measuring arm, PowerINSPECT software

prof. zw. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk

erat@mchtr.pw.edu.pl

Związany z Politechniką Warszawską i Wyższą Szkołą Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Były dziekan Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (1996–2002), członek Rady Nauki przy MNiSW – dwie kadencje. Honorowy przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN. Zajmuje się metrologią techniczną, a szczególnie współrzędnościową techniką pomiarową oraz tomografią przemysłową.

