

Stanowisko do sprawdzania dokładności impulsowych sond współrzędnościowych maszyn pomiarowych

Adam Woźniak
Marek Dobosz

W poprzednim numerze zamieściliśmy opis znanych metod testowania sond impulsowych współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP). Alternatywą do przedstawionych tam metod może być nowe, unikatowe, w pełni zautomatyzowane stanowisko do sprawdzania dokładności sond, zbudowane w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych (IMiSP) Politechniki Warszawskiej, znacznie poszerzające dotychczasowe możliwości testowania dokładności sond.

WMP już powszechnie spełniają rolę urządzeń inspekcyjnych kontroli jakości, a ich opcje konstrukcyjne w postaci robotów i centrów pomiarowych są stosowane bezpośrednio w procesie produkcyjnym. Jednak ciągle nie w pełni rozwiązaniem jest ocena dokładności zarówno samych maszyn pomiarowych, jak i ich najważniejszych zespołów, zwłaszcza zespołów wymiennych, np. sond służących do lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchni mierzonego przedmiotu. Dokładność maszyny pomiarowej wiąże się nierozdzielnie z dokładnością stosowanej sondy, jednego z najistotniejszych elementów we współrzędnościowym procesie pomiarowym.

Niepewność pomiaru długości na maszynie współrzędnościowej U zwykle jest określana zależnością liniową: $U = A + B \cdot L$ (np. przestrzenna niepewność pomiaru długości na przedstawionej na rys. 1 maszynie Eclipse firmy Zeiss, wyposażonej w sondę impulsową, wynosi $U_3 = 2,9 + L/250$ m m). Wartość jednego ze składników sumy zależy od długości L (mm) mierzonych elementów. Składnik ten opisuje błędy związane z prostoliniowością i prostopadłością prowadnic oraz błędami liniałów WMP. Drugi składnik, opisujący błędy losowe, jest związany głównie z błędami lokalizacji punktów pomiarowych w przestrzeni maszyny. Powszechnie uważa się, że około 60 % tego składnika stanowią błędy pracy sondy, które do tej pory są traktowane jako błędy losowe [1, 2].

Dotychczas jedyną informacją o dokładności sond jest specyfikacja parametrów sondy podana przez producenta. Najczęściej dane katalogowe dotyczą gabarytów sondy, masy, zakresu regulacji siły nacisku, kierunków pracy, ale również dokładności pracy. Dokładność jest opisywana zwykle dwoma parametrami, tj. niesta-



Rys. 1. Maszyna współrzędnościowa typu Eclipse firmy Zeiss

bilnością drogi przełączenia w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi sondy (*pretravel variation*) będącą różnicą między maksymalną a minimalną wartością drogi przełączenia w płaszczyźnie oraz powtarzalnością jednokierunkową (*unidirectional repeatability*) będącą maksymalną wartością rozrzutu pomiaru drogi przełączenia również w wybranej płaszczyźnie. Droga przełączenia (*pretravel length*) jest rozumiana jako

odległość przebyta przez pinolę maszyny wraz z sondą, pomiędzy punktem rzeczywistego styku końcówki sondy z powierzchnią mierzonego przedmiotu a punktem wyzwolenia impulsu przez sondę. Jest to droga o długości od dziesiątych części mikrometra do kilkunastu mikrometrów. Podawane są również parametry pracy sondy (długość końcówki, prędkość pomiarowa, nacisk pomiarowy), przy których dokładność ta jest zachowana. Przykładowe dane katalogowe dotyczące dokładności pracy oraz warunków sprawdzania sondy TP6 firmy Renishaw zamieszczono w tabeli [3].

Używając maszyny współrzędnościowej do danego zadania pomiarowego, często jesteśmy zmuszeni zastosować inną niż w specyfikacji sondy końcówkę pomiarową; np. dłuższą – do penetrowania głębokich otworów lub przeprowadzić pomiary np. z większą prędkością i naciskiem pomiarowym. W takim przypadku nasuwa się pytanie jaki jest rzeczywisty błąd pracy sondy, a co za tym idzie – w jaki sposób zmienia się niepewność pomiaru na maszynie współrzędnościowej? Producenci podają dokładność pracy sond tylko w jednej płaszczyźnie ich pracy. W praktyce pomiarowej użyt-

*Dr inż. Adam Woźniak – Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechnika Warszawska, Stypendysta Fundacji na rzecz Nauki Polskiej
Dr hab. inż. Marek Dobosz, prof. PW – Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechnika Warszawska*

Przykładowa specyfikacja sondy TP6

Uni-Directional Repeatability	0,35 μm
Pre-travel variation (XY Plane)	$\pm 0,60 \mu\text{m}$
Test conditions	
Stylus length	21 mm 0,83 in
Stylus velocity	480 mm/min 18,90 in/min
Stylus force	0,11–0,13 N 0,38–0,45 oz

kownicy maszyn współrzędnościowych niejednokrotnie dokonują pomiarów geometrii elementów przestrzennych, nie mając pewnej informacji o dokładności stosowanych sond pomiarowych. Podczas pracy maszyny współrzędnościowej sonda jest jednym z najbardziej obciążonych zespołów. Jej konstrukcja musi zapewnić bezawaryjną pracę przy lokalizacji wielu milionów punktów pomiarowych. Jednak właściwości metrologiczne tak obciążonego zespołu mogą ulec zmianie w czasie eksploatacji. Wraz ze zmianą dokładności sondy może ulec zmianie dokładność pomiaru na maszynie współrzędnościowej.

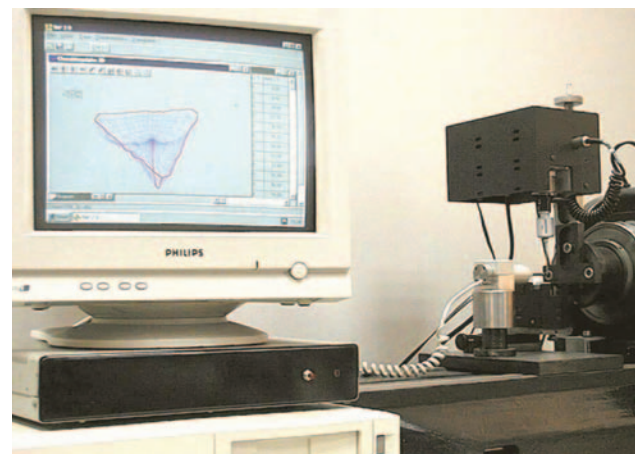
Użytkownik współrzędnościowej maszyny pomiarowej stający przed problemem oceny dokładności zespołu sondującego, może polegać na informacji zawartej w specyfikacji produktu lub dokonać sprawdzenia przy użyciu znanych metod testowania sond. Większość dotychczas stosowanych metod sprawdzania sond impulsowych polega na pośrednim sprawdzaniu sondy poprzez pomiar elementu wzorcowego (płytki wzorcowa, pierścień, kula) na maszynie współrzędnościowej [4–8]. Technika ta jest mało dokładna, gdyż niepewność maszyny jest w większości przypadków porównywalna z niepewnością sondy. Zatem wyznaczone w ten sposób charakterystyki metrologiczne sond są w znacznej mierze zdeformowane błędami samej maszyny, a negatywny wynik testowania nie rozstrzyga, co zostało uszkodzone: sonda czy maszyna. Znacznie precyzyjniejszy opis właściwości sond może dać ich bezpośrednie badanie na specjalnych stanowiskach poza WMP. Jednak dotychczasowe osiągnięcia w tym zakresie nie są w pełni satysfakcjonujące. Istniejące metody charakteryzują się nie zawsze wystarczającą dokładnością, wymagają skomplikowanego oprzyrządowania pomiarowego, są trudne do automatyzacji, co jest przyczyną znacznego wydłużenia czasu sprawdzania. Opis znanych metod testowania sond znajdzie czytelnik w PAR 12/2003. Alternatywą do przedstawionych w tamtym artykule metod może być nowe, unikatowe, w pełni zautomatyzowane stanowisko do sprawdzania dokładności sond impulsowych WMP, zbudowane w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych (IMiSP) Politechniki Warszawskiej. Stanowisko znacznie poszerza dotychczasowe możliwości testowania dokładności sond. Pozwala np. na pomiar nieznanymi dotychczas przestrzennymi charakterystykami wartości drogi przełączania oraz histerezy w funkcji dowolnego kierunku dochodzenia do styku końcówki sondy z powierzchnią mierzonego przedmiotu – z dokładnością znacznie przewyższającą dokładność dotychczas stosowanych metod.

Opis stanowiska pomiarowego

Do wyznaczania charakterystyk dokładności sond impulsowych WMP zaproponowano nową metodę pomiarową wykorzystującą niskonaciskowy przetwornik przemieszczeń z interferometrem siatkowym [9–11]. Pomiar jest realizowany na specjalnym stanowisku pomiarowym bez udziału maszyny współrzędnościowej – sonda jest mocowana w stabilnym uchwycie. Testowanie sondy polega na symulowaniu procesu pomiarowego sondy przez wychylenie jej końcówki z różnych kierunków pomiarowych (podobnie jak podczas pomiaru elementów przestrzennych na maszynie współrzędnościowej), rejestrowaniu i analizie sygnału pomiarowego. Droga przełączania jest mierzona zgodnie z definicją, czyli jako przemieszczenie końcówki sondy pomiędzy punktem styku z przedmiotem a momentem wyzwolenia impulsu. Rozkład przestrzenny punktów otrzymanych w pomiarach, w których wyzwolenie sondy następuje z różnorodnych kierunków w przestrzeni XYZ, niesie informacje o niedokładności działania sondy.

Realizacja przyjętej koncepcji wymaga precyzyjnego (z powtarzalnością na poziomie setnych części mikrometra) i niezależnego od kierunku ruchu ustalenia momentu rzeczywistego styku. Można to zrealizować przez zastosowanie niskonaciskowego przetwornika przemieszczeń.

Przetwornik taki, stykając się w sposób ciągły z końcówką sondy, może wykryć z wysoką rozdzielczością moment poruszenia się końcówki i mierzyć drogę przełączania sondy. Przed pomiarem końcówka przetwornika styka się z końcówką sondy. Aby styk ten nie wywołał wzbudzenia sondy, wprowadzony nacisk musi być co najmniej o rząd wielkości mniejszy niż nacisk sondy. Na wstępie rejestrowane jest położenie trzpienia pomiarowego przetwornika w stanie spoczynkowego styku z końcówką sondy. Po mechanicznym wyzwoleniu sondy (zewnętrznym układem wymuszającym) rejestrowany jest stan przetwornika w momencie pojawienia się impulsu wyjściowego. Zmiana wskazań przetwornika jest miarą drogi przełączania. Ponieważ niezbędna rozdzielczość pomiaru jest na poziomie 10–20 nm, dodatkową trudnością jest tutaj zachowanie



Rys. 2. Zbudowane w IMiSP stanowisko do testowania dokładności sond impulsowych WMP

odpowiednio dużej stabilności mechanicznej układu pomiarowego.

Na rys. 2 przedstawiono widok prezentowanego stanowiska do testowania dokładności impulsowych sond WMP. Głównym elementem stanowiska jest interferencyjny przetwornik przemieszczeń o wysokiej rozdzielczości i małym nacisku pomiarowym. W zbudowanym stanowisku zastosowano czujnik z wychylną dźwignią opisany w [12, 13]. Ze względu na zastosowaną długość ramienia pomiarowego zakres jego pracy wynosił 4 mm przy rozdzielczości ok. 0,015 m m. Nacisk pomiarowy wynosił ok. 5 mN, a jego zmienność nie przekraczała kilku procent w całym zakresie pomiarowym. Tak mały nacisk pomiarowy uzyskano poprzez: zastosowanie precyzyjnego tocznego łożyskowania dźwigni pomiarowej przetwornika, wykonanie elementów ruchomych ze stopu magnezu, co gwarantuje małą bezwładność dźwigni, oraz poprzez jej precyzyjne wyważenie. Ponieważ zastosowany nacisk pomiarowy przetwornika przemieszczeń jest kilkadziesiąt razy mniejszy niż nacisk potrzebny do przełączenia sprawdzanej sondy (minimum ok. 100 mN), można przyjąć, że wzajemne oddziaływanie końcówki głowicy mierzącej i końcówki testowanej sondy jest do pominięcia.

Zespół wymuszający przemieszczenie końcówki badanej sondy składa się z łożyskowanej karetki oraz jej napędu sterowanego numerycznie przez komputer. Powierzchnie płaskie karetki nie oddziałują bezpośrednio na końcówkę badanej sondy, ale przez wychylną dźwignię interferencyjnej głowicy mierzącej (rys. 2). Dźwignia ma z jednej strony powierzchnię płaską, z drugiej półkulę. Dzięki temu może ona współpracować jednocześnie z kuliścią końcówką sprawdzanej sondy oraz z płaską powierzchnią zespołu wymuszającego przemieszczenie. W ten sposób pośredniczy w przekazywaniu ruchu końcówce sprawdzanej sondy. Kierunek wykonywane ruchy posuwisto-zwrotne, przełączając sprawdzaną sondę. W momencie wyzwolenia przez sondę impulsu informującego o styku, zapamiętywana jest informacja o drodze przebytej przez końcówkę od miejsca spoczynku do punktu przełączenia. Wyniki są rejestrowane w komputerze.

Stanowisko badawcze z niskonaciskowym przetwornikiem przemieszczeń ma dwie opcje testowania stykowych sond impulsowych. Pierwsza polega na badaniu charakterystyk drogi przełączania oraz jej niestabilności i powtarzalności. Druga opcja umożliwia dodatkowo wyznaczenie charakterystyk histerezy oraz obliczenie wartości histerezy punktu spoczynkowego, punktu przełączenia i drogi przełączania.

Kluczowym elementem powyższego systemu pomiarowego jest niskonaciskowy przetwornik przemieszczeń. Musi on spełniać następujące wymagania:

- nacisk pomiarowy powinien być istotnie mniejszy niż minimalny nacisk stosowany w sondach (zwykle 100 mN),
- element ruchomy powinien mieć możliwie małą bezwładność,
- rozdzielczość powinna być co najmniej dziesięciokrotnie mniejsza od błędów lokalizacji punktu przez

sondę (w praktyce rozdzielczość ta powinna być na poziomie setnych części mikrometra),

- minimalny zakres pomiarowy – rzędu 0,5 mm.
- Spełnienie powyższych warunków wymusiło przyjęcie następujących założeń konstrukcyjnych przetwornika:

- zastosowanie uchylnej dźwigni pomiarowej (zamiast liniowo-przesuwnej);
- toczne łożyskowanie dźwigni w celu zminimalizowania oporów tarcia;
- zastosowanie lotniczych stopów magnezu do konstrukcji dźwigni pomiarowej w celu zmniejszenia jej masy, a więc i momentu bezwładności;
- zastosowanie siatkowego interferometru laserowego do przetwarzania ruchu dźwigni na impulsy elektryczne, w celu uzyskania wysokiej rozdzielczości;
- ustawienie płaszczyzny pracy przetwornika w poziomie w celu uniknięcia wpływu grawitacji;
- zastosowanie wielozwojowej sprężyny spiralnej do generacji stałego nacisku.

Budowę przetwornika oparto na opracowanej wcześniej w IMiSP interferencyjnej głowicy profilometrycznej [12, 13]. Uzyskano następujące parametry metrologiczne przetwornika:

- nacisk pomiarowy ok. 5 mN (zmienność nacisku nie przekracza kilku procent w całym zakresie pomiarowym),
- rozdzielczość 0,015 m m,
- zakres pomiarowy 5 mm.

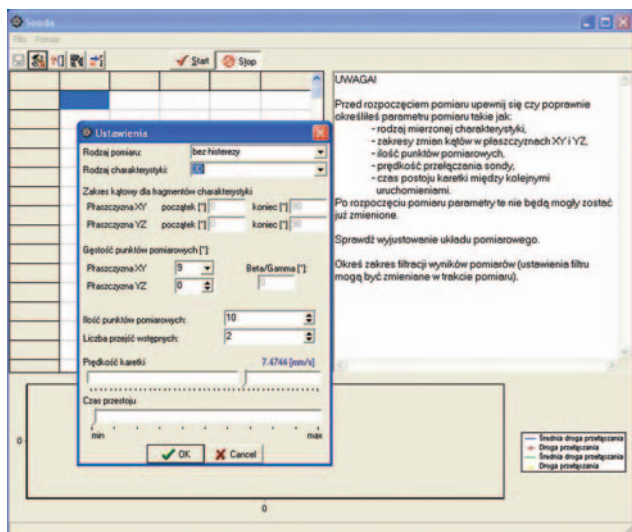
Opis programu komputerowego

Program komputerowy, który stanowi integralną część prezentowanego stanowiska, składa się z dwóch modułów: sterowania pomiarem oraz analizy, wizualizacji i archiwizacji wyników testowania sond. Pierwszy moduł – na podstawie nastaw wprowadzonych przez operatora – steruje urządzeniami wejścia/wyjścia, realizując wybrane zadanie pomiarowe. Formularz główny tego modułu aplikacji przedstawiono na rys. 3. Wszystkie procedury pomiarowe oraz opcje sterowania są dostępne bezpośrednio na toolbarze, w menu rozwijanym ekranu podstawowego oraz menu kontekstowych niektórych obiektów programu. Widoczne na rys. 3 menu kontekstowe umożliwia wybór i konfigurację określonego zadania pomiarowego. Program umożliwia pomiar:

- drogi przełączania sondy stykowej (oznaczenie w programie – rodzaj pomiaru: bez histerezy);
- histerezy drogi przełączania sondy stykowej (rodzaj pomiaru: z histerezą).

Każda z wymienionych charakterystyk może być zmierzona jako:

- charakterystyka płaska zmierzona w płaszczyźnie XY dla pełnego zakresu od 0° do 360° (rodzaj charakterystyki: 2DXY);
- charakterystyka płaska zmierzona w płaszczyźnie XY dla dowolnego zakresu kątownego mieszczącego się w zakresie od 0° do 360° (rodzaj charakterystyki: 2DXY – fragment);



Rys. 3. Widok ekranu programu do sterowania pomiarem i akwizycji danych

- charakterystyka płaska zmierzona w płaszczyźnie YZ dla pełnego zakresu od 0° do 90° (rodzaj charakterystyki: 2DYZ);
- charakterystyka płaska zmierzona w płaszczyźnie YZ dla dowolnego zakresu kąтового mieszczącego się w zakresie od 0° do 90° (rodzaj charakterystyki: 2DYZ – fragment);
- charakterystyka przestrzenna zmierzona w płaszczyźnie XY dla pełnego zakresu od 0° do 360° i w płaszczyźnie YZ dla pełnego zakresu kąтового od 0° do 90° (rodzaj charakterystyki: 3D);
- charakterystyka przestrzenna zmierzona w płaszczyźnie XY dla dowolnego zakresu kąтового mieszczącego się w granicy od 0° do 360° i w płaszczyźnie YZ dla dowolnego zakresu kąтового mieszczącego się w zakresie od 0° do 90° (rodzaj charakterystyki: 3D – fragment).

Dla każdej ze mierzonych charakterystyk możemy dobrać prędkość przełączania sondy w zakresie od 3 mm/s do 10 mm/s. Nastawiana prędkość symuluje często regulowaną prędkość pomiarową na maszynie współrzędnościowej. Stanowisko umożliwia zmianę kierunku przełączania sondy z krokiem będącym wielokrotnością 1,8°.

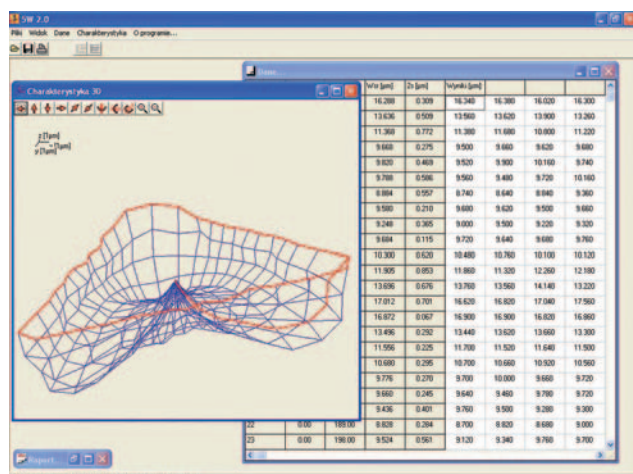
Sam pomiar odbywa się automatycznie według wcześniej zadeklarowanych parametrów. Włączenie procedury pomiarowej powoduje uruchomienie czytania przez komputer sygnałów z przetworników i rysowanie na ekranie wykresu obrazującego chwilowe wartości wielkości mierzonej. Po zebraniu wszystkich punktów pomiarowych i ich zapisaniu w pliku do dalszej analizy wyników pomiarowych można użyć typowych narzędzi w postaci: arkuszy kalkulacyjnych (np. MS Excel), programów statystycznych (np. Statistica, Statgraphics) lub drugiego modułu programu specjalnie dedykowanego wizualizacji i archiwizacji wyników testowania sond.

Drugi moduł programu na podstawie danych bezpośrednio z pomiaru lub wczytanych z pliku oblicza parametry i charakterystyki metrologiczne sprawdzanych sond oraz archiwizuje dane na dysku twardym lub w postaci drukowanych protokołów. Na rys. 4 przedstawiono

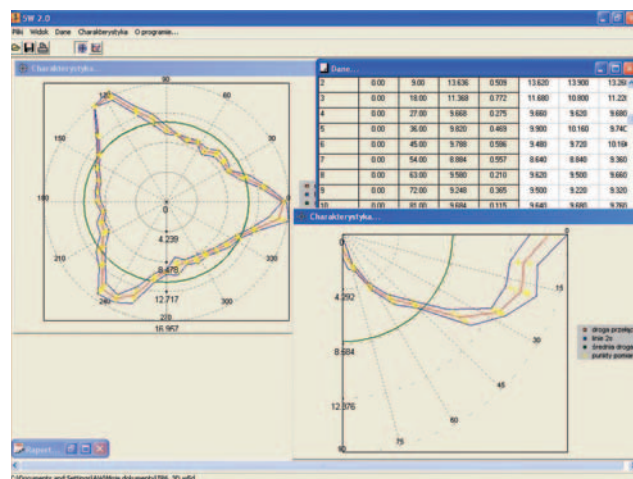
przykładowy przestrzenny wykres drogi przełączania powszechnie stosowanej sondy impulsowej TP6 angielskiej firmy Renishaw (oprócz charakterystyki na formularzu widoczny jest również jej układ współrzędnych reprezentowany przez trzy wektory XY i YZ). Charakterystyka może być dowolnie powiększana i obracana, co pozwala dokładnie obejrzeć i określić miejsca występowania największych błędów sondy. Takie punkty charakterystyki można zaznaczać na ekranie myszką, a następnie oglądać w postaci płaskich wykresów wybranych przekrojów. Charakterystyki mogą być wykreślane w postaci wykresów w układzie biegunowym (jak na rys. 5) lub w układzie kartezjańskim. Użytkownik również ma możliwość wyboru, co zostaje umieszczone na wykresie: poszczególne punkty pomiarowe czy wartości średnie z przedziałem plus/minus dwukrotne odchylenie standardowe kierunków powtórzeń dla poszczególnych kierunków pomiarowych.

Oprócz formularzy wykresów w module do analizy danych pomiarowych dostępne są jeszcze dwa formularze potomne: arkusz z danymi oraz protokół.

Na formularzu potomnym *dane* są umieszczone wszystkie liczbowe wyniki sprawdzania sondy. Liczby znajdujące się na białym polu edycyjnym są wartościami drogi przełączania sondy, uzyskanymi podczas pomiaru.



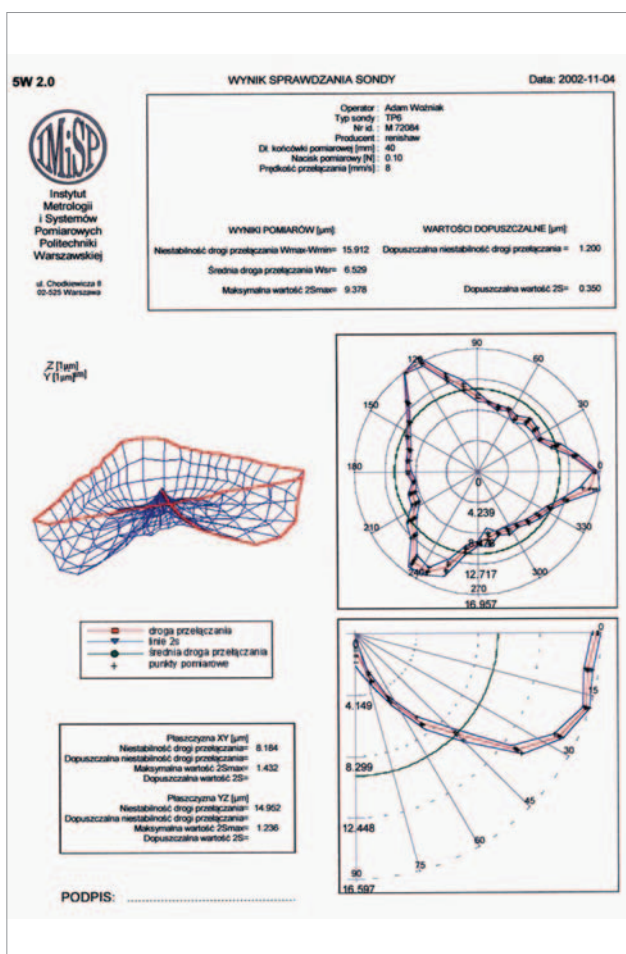
Rys. 4. Prezentacja wyników testowania pełnej przestrzennej charakterystyki sondy TP6



Rys. 5. Przykładowe przekrojowe charakterystyki sondy TP6

W tym miejscu istnieje możliwość usuwania niektórych wyników pomiarowych w przypadku błędów grubych. Jednak każda zmiana wartości liczbowych formularza wymaga potwierdzenia przez użycie funkcji *zatwierdź zmiany* menu głównego lub menu kontekstowego formularza. Liczby umieszczone na szarym polu edycyjnym są wartościami wynikowymi lub opisowymi. Formularz z danymi jest zgodny z powszechnie stosowanymi standardami, zatem wyniki można również w prosty sposób przenosić do dowolnego arkusza kalkulacyjnego lub programu do analiz statystycznych.

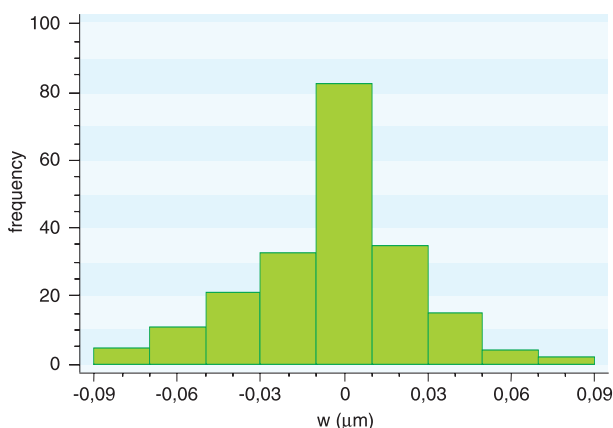
Program umożliwia drukowanie protokołów zawierających wyniki pomiarów, charakterystyki, wyliczone parametry opisujące dokładność pracy testowanej sondy, wartości dopuszczalne poszczególnych parametrów oraz niezbędne dane służące do identyfikacji sondy. W przypadku badania dokładności pracy sondy dla dowolnego kierunku pomiarowego w przestrzeni, oprócz charakterystyki przestrzennej (3D), drukowane są dwa wybrane przez użytkownika programu ortogonalne przekroje (przekrój w płaszczyźnie XY – prostopadły do osi sondy i YZ – w osi sondy). Jeżeli użytkownik nie wyodrębnił przekrojów, drukowane są przekroje domyślne. Użytkownik ma również możliwość wpływania na konfigurację wykresów prezentowanych na arkuszu protokołu. Przykładowy arkusz protokołu ze sprawdzania dokładności sondy impulsowej typu TP6 przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Protokół sprawdzenia dokładności sondy TP6

Oszacowanie niepewności metody

Droga przełączania sprawdzanej sondy mierzona jest w sposób bezpośredni przez wysokiej rozdzielczości głowicę interferencyjną. Głowica pracuje w małym zakresie pomiarowym (do 15 m m), co powoduje, że jej błąd systematyczny wskazań nie przekracza błędu dyskretyzacji, czyli 0,015 m m. Powtarzalność zastosowanego przetwornika przemieszczeń, określona poza stanowiskiem, wynosiła ok. 0,05 m m. Inne błędy pomiaru drogi przełączania w opisywanym stanowisku mogą wynikać z trudnego do oszacowania oddziaływania końcówki głowicy mierzacej na końcówkę sprawdzanej sondy oraz z drgań występujących w układzie.



Rys. 7. Histogram wyników badania rozrzutu stanowiska

W celu oszacowania stabilności i powtarzalności stanowiska przeprowadzono badania rozrzutu wskazań. Test obejmował odczyty ok. 200 wyników w ciągu 5 minut pracy stanowiska. W przebiegu obserwacji nie zauważono systematycznego trendu. Charakter i zakres rozrzutu wyników przedstawia załączony na rys. 7 histogram. Testy statystyczne (Chi-kwadrat oraz Shapiro-Wilks'a) nie wykazały zgodności wyników z rozkładem normalnym, ani z żadnym ze standardowo stosowanych rozkładów prawdopodobieństwa. Otrzymany rozstęp wynosi $\pm 0,09$ m m. Można jednak zauważyć wyraźną koncentrację obserwacji w obszarze $\pm 0,06$ m m. Ustalono, że zaobserwowany rozrzut spowodowany jest drganiami mechanicznymi układu pomiarowego pochodzącymi z otoczenia oraz generowanymi częściowo przez układ napędowy karetki. Obserwowany rozrzut stanowiska nie wpływa jednak istotnie na wartości mierzonych parametrów sond.

Podsumowanie

Przedstawione nowe, skomputeryzowane, w pełni automatyczne stanowisko umożliwia wyznaczenie wszystkich parametrów i charakterystyk dokładności sond impulsowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych. Metoda umożliwia pomiar nie tylko podawanych przez producentów sond: niestabilności i powtarzalności drogi przełączania w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi sondy, ale również rzeczywistej war-

tości drogi przełączania sond. Możliwy jest pomiar dotychczas nieznannej histerezy sond, w tym: histerezy punktu spoczynkowego, histerezy punktu przełączania i histerezy drogi przełączania. Wszystkie wymienione parametry mogą być zmierzone dla pracy sondy w przestrzeni XYZ (takie charakterystyki były dotąd nieznanne) lub w wybranych przekrojach.

Już pierwsze testy przeprowadzone na opisanym stanowisku wykazały, że testowanie sond tylko w jednej płaszczyźnie XY prostopadłej do osi (takie charakterystyki podają producenci sond w specyfikacjach) nie pozwoli wykryć najbardziej istotnych błędów. W przypadku sond z przetwornikiem piezoelektrycznym, np. typu TP200, błędy przestrzenne są blisko 5-krotnie większe od błędów w płaszczyźnie XY [9]. Stanowisko umożliwiło również badanie istotności wpływu większości parametrów pracy w danym zadaniu pomiarowym (tj.: długości, sztywności i masy końcówki pomiarowej oraz nacisku i prędkości pomiarowej) na dokładność sond zarówno w przestrzeni XYZ, jak również w wybranych płaszczyznach [9, 11, 14].

W pełni automatyczne stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzanie testowania sond z dokładnością znacznie przewyższającą dotychczas znane metody, nie zajmując przy tym cennego czasu pracy samej maszyny współrzędnościowej. Program komputerowy steruje pomiarem, umożliwia graficzną wizualizację wyników oraz ich archiwizację zarówno w wersji elektronicznej, jak również w postaci drukowanych raportów. Badania potwierdziły przydatność i konkurencyjność opracowanej metodyki testowania sond. Stanowisko znajduje zastosowanie w pracach badawczych, podczas zajęć dydaktycznych oraz w usługach sprawdzania sond dla innych laboratoriów pomiarów współrzędnościowych.

Bibliografia

1. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
2. Butler C.: An investigation into the performance of probes on coordinate measuring machines. *Industrial Metrology* 2, (1), 1991, pp. 59-70.
3. Renishaw, Probing systems for co-ordinate measuring machines, Renishaw plc, United Kingdom, 1996.
4. VDI/VDE 2617, Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Part 3, Düsseldorf, 1989.
5. ISO 10360-2, Coordinate metrology, Parts 1-6, ISO, Switzerland, 1994.
6. Roland P. Johnson et al.: Dynamic error characteristics of touch trigger probes fitted to coordinate measuring machines. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 47, No. 5, pp. 1168-1172, 1998.
7. Chan F. et al.: Some performance characteristics of a multi-axis touch trigger probe, *Meas. Sci. Technol.* 8 (1997) 837-848.

8. Miguel Cauchick P. et al.: A review on methods for probe performance verification. *Measurement* 23 (1998), pp. 15-33.
9. Woźniak A., Dobosz M.: Strategia sprawdzania stykowych sond impulsowych WMP. *Krajowy Kongres Metrologii*, Warszawa, VI 2001, Referaty, t. 3 s. 79-84.
10. Woźniak A., Dobosz M.: CMM probe testing by means of a low force sensor. *XVI World Congress IMEKO 2000*, Sept. 25-28, 2000, Vienna, Austria, Proceedings Vol. VIII, p. 341-344.
11. Woźniak A., Dobosz M.: The tests of the influence of the measuring velocity on CMM touch triggering probe pretravel. *IV International Conference Coordinate Measuring Technique*, Poland, Bielsko-Biała 2000, Proceedings No. 53/2000, p. 273-281.
12. Dobosz M.: Application of a divergent laser beam in a grating interferometer for high resolution displacement measurements, *Opt. Engineering* 33 (3) (1994) 897-90.
13. Dobosz M.: New stylus probe with interferometric transducer for surface roughness and form profiling, *Opt. Engineering* 33 (3) (1994) 902-908.
14. Woźniak A., Dobosz M.: Influence of the measuring object parameters on CMM touch trigger probe performance. *V International Conference Coordinate Measuring Technique*, Poland, Bielsko-Biała 2002, Proceedings. ■

REKLAMA



<http://www.APS.pl/>

AUTOMATYKA POMIARY STEROWANIE SPÓŁKA Z O.O.

automatyzacja procesów technologicznych

systemy sterowania, zbierania danych, wizualizacja procesów

projektowanie, dostawa AKPIA, ... serwis, naprawa

















Drives Alliance Partner
w dystrybucji
przemiennej częstotliwości

ul. Mickiewicza 95F *15-257 Białystok * tel. (85) 748 34 00; (85) 748 34 01 * fax (85) 748 34 19
dział handlowy: (85) 748 34 13 do 16