

**Sabina ŻEBROWSKA-ŁUCYK**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Czynniki wpływające na niepewność wyznaczania odchyłek geometrycznych za pomocą FMM

Dr hab. inż. Sabina ŻEBROWSKA-ŁUCYK

Ukończyła Wydział Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (obecnie Mechatroniki), tam też doktoryzuje się i uzyskuje habilitację. Od 1971 roku pracuje w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Jej zawodowe zainteresowania dotyczą pomiarów wielkości geometrycznych, zwłaszcza badań dokładności kształtu elementów konstrukcyjnych, a także zastosowań metod statystycznych w inżynierii jakości.



e-mail: szl@mchtr.pw.edu.pl

### Streszczenie

Omówiono ważniejsze czynniki decydujące o dokładności pomiarów odchyłek kształtu i położenia, wykonywanych przy użyciu uniwersalnych urządzeń pomiarowych z wzorcową osią obrotu. Przedstawiono główne źródła niepewności pomiarów, a następnie zarysowano zakres badań okresowych sprawdzających dokładność tych urządzeń i wskazano najważniejsze metody badań.

### Abstract

The most important factors that influence the accuracy of form and position deviations measurement by means of Form Measuring Machines using radial method were described. The main sources of measurement uncertainty were discussed. Then a scope of necessary periodical tests and methods of accuracy verification were outlined.

## 1. Wprowadzenie

Urządzenia do pomiaru odchyłek kształtu i położenia, oznaczane dalej skrótem FMM (od angielskiej nazwy Form Measuring Machines), należą do specjalistycznego wyposażenia wielu laboratoriów przemysłowych i badawczych. Większość z tych urządzeń jest przeznaczona do pomiarów bardzo wysokiej dokładności. Ich producenci deklarują niepewność pomiarów rzędu kilkudziesięciu bądź kilkuset nanometrów. Praktyka dostarcza mniej optymistycznych obserwacji. Podawane w dokumentacji technicznej wartości niepewności pomiaru odnoszą się do przyrządów nowych, przy tym użytkowanych w warunkach najkorzystniejszych, jakie w rzeczywistości spotyka się rzadko. W trakcie eksploatacji urządzeń ich dokładność obniża się, co można stwierdzić przeprowadzając badania okresowe.

Przed kilku laty kilkanaście placówek z różnych krajów Europy podjęło międzylaboratoryjne badania porównawcze, które miały na celu ustalenie stopnia odtwarzalności pomiarów odchyłki okrągłości. W raporcie końcowym stwierdza się, że rozrzuty wyników pomiaru znacznie przekraczają wartości, jakie wynikałyby z niepewności deklarowanych przez producentów urządzeń [1, 2]. Nie pisze się natomiast nic na temat badań porównawczych, które dotyczyłyby pomiarów prostoliniowości, walcowości czy odchyłek położenia. Biorąc pod uwagę większy poziom trudności związany z wykonywaniem takich pomiarów, można się spodziewać, że wyniki porównań nie byłyby lepsze.

Ze względu na bardzo dużą masę urządzeń (od dziesiątków do tysięcy kilogramów) oraz wrażliwość ich parametrów metrologicznych na warunki otoczenia, sprawdzanie dokładności FMM powinno się odbywać w miejscu ich stałego użytkowania. Bez wątpienia dobrze jest, jeśli użytkownik potrafi sam zaplanować i przeprowadzić badania.

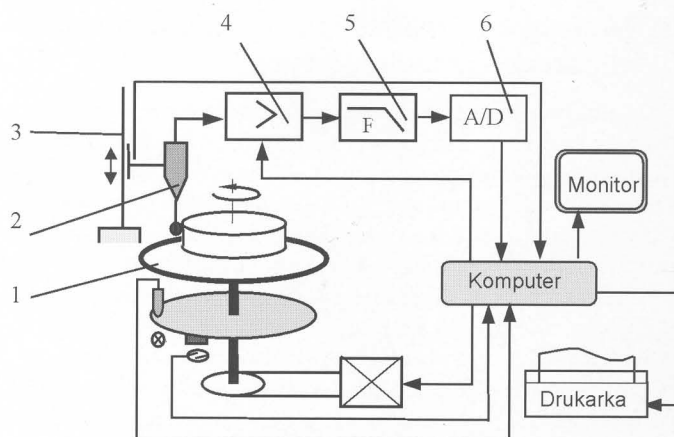
Na temat sprawdzania dokładności FMM i wyznaczania niepewności pomiarów nie tylko nie ma dokumentów normalizacyjnych, ale również brakuje materiałów opisowych. Liczba prac o charakterze naukowym dotyczących tych kwestii jest także znikoma.

Celem artykułu jest wskazanie głównych źródeł niepewności pomiarów i powiązania pomiędzy nimi, co powinno pomóc laboratoriom w ustalaniu zakresu sprawdzeń okresowych i doborze właściwych metod ich przeprowadzania. Potrzebę uzyskania informacji z tego zakresu zgłaszają zwłaszcza laboratoria przygotowujące się do akredytacji, które muszą się wykazać posiadaniem udokumentowanych procedur sprawdzania aparatury pomiarowej.

## 2. Główne źródła niepewności pomiarów wykonywanych za pomocą FMM

Istnieje duża różnorodność uniwersalnych przyrządów do pomiaru odchyłek kształtu i położenia. Różnice dotyczą wymiarów przyrządów, ich dokładności i stopnia automatyzacji pomiarów. Najprostsze z przyrządów pozwalają mierzyć tylko odchyłki okrągłości i współosiowości, a bardziej rozbudowane mierzą również odchyłki walcowości, płaskości, równoległości, prostopadłości, współosiowości oraz bicie osiowe i promieniowe (w wybranym przekroju i całkowite). Cechą wspólną przyrządów o przeznaczeniu uniwersalnym jest to, że zawierają precyzyjny układ obrotowy, umożliwiający wykonywanie pomiarów metodą promieniową, zwaną również bezodniesieniową [3].

Najważniejszymi kryteriami podziału przyrządów są: typ układu kinematycznego realizującego obrót i sposób przetwarzania sygnału pomiarowego. Stosowane są dwa układy kinematyczne: a) układ zawierający obrotowy stół, na którym ustawia się badany element, oraz pionową kolumnę z wzorcową prowadnicą, wzdłuż której przesuwa się czujnik, b) układ, w którym element mierzony spoczywa na nieruchomym stole, natomiast głowica wykonuje ruch obrotowy, a ponadto może przesuwać się ruchem prostoliniowym wzdłuż prowadnicy pionowej. Biorąc pod uwagę sposób przetwarzania i przedstawiania wyników pomiaru, można wyróżnić przyrządy z rejestratorami analogowymi i urządzenia zawierające komputer. Te pierwsze nie są już produkowane, a niektóre z wcześniej wytworzonych są poddawane komputeryzacji [4]. Dla ustalenia uwagi dalsze rozważania będą koncentrować się na urządzeniach z obrotowym stołem zawierających komputer (rys. 1).



Rys. 1. Schemat maszyny do pomiaru odchyłek kształtu z obrotowym stołem: 1- stół obrotowy, 2 - czujnik, 3 - prowadnica czujnika 4 - układ wzmacniaczy, 5 - filtry, 6 - przetwornik analogowo-cyfrowy

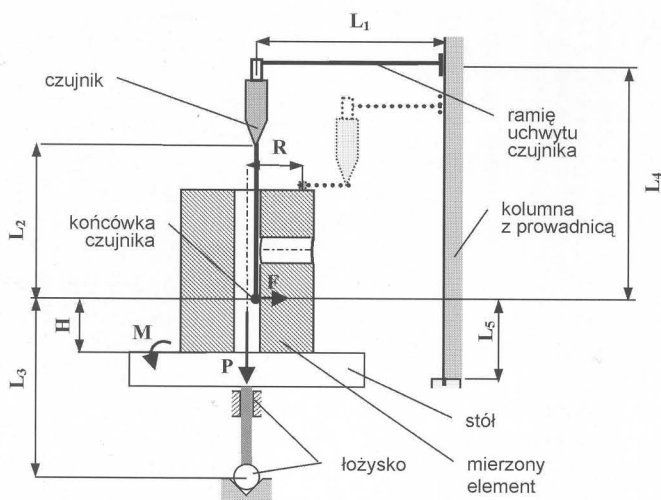
Na całkowitą niepewność pomiarów odchyłek kształtu i położenia wykonywanych przy użyciu FMM wpływają następujące czynniki:

- 1) błędy wskazań czujnika i toru przetwarzania sygnału pomiarowego,
- 2) przemieszczenia promieniowe i wzdłużne osi układu obrotowego stołu pomiarowego lub wrzeciona czujnika (zależnie od konstrukcji urządzenia)
- 3) błędy kształtu prowadnicy pionowej, wzdłuż której przesuwa się czujnik podczas pomiaru prostoliniowości,
- 4) nierównoległość prowadnicy pionowej do osi obrotu,
- 5) niewspółosiowość osi mierzonej powierzchni i osi obrotu,
- 6) niepoprawne ustawienie końcówki czujnika względem powierzchni elementu,
- 7) warunki otoczenia.

W artykule, z uwagi na jego ograniczoną objętość, omówiono tylko kilka z wymienionych wyżej przyczyn. Więcej na ten temat (m.in. o wpływie położenia elementu i końcówki czujnika) można znaleźć w pracy [3].

Wartość niepewności składowych i ich udział w całkowitym budżecie niepewności zależy od parametrów mechanicznych urządzenia i geometrii badanego elementu – jego wymiarów, sprawdzanych powierzchni, rozkładu masy względem osi obrotu.

Ważniejsze wymiary i obciążenia wpływające na niepewność pomiarów, mające związek z geometrią badanego elementu, pokazano na rys. 2.



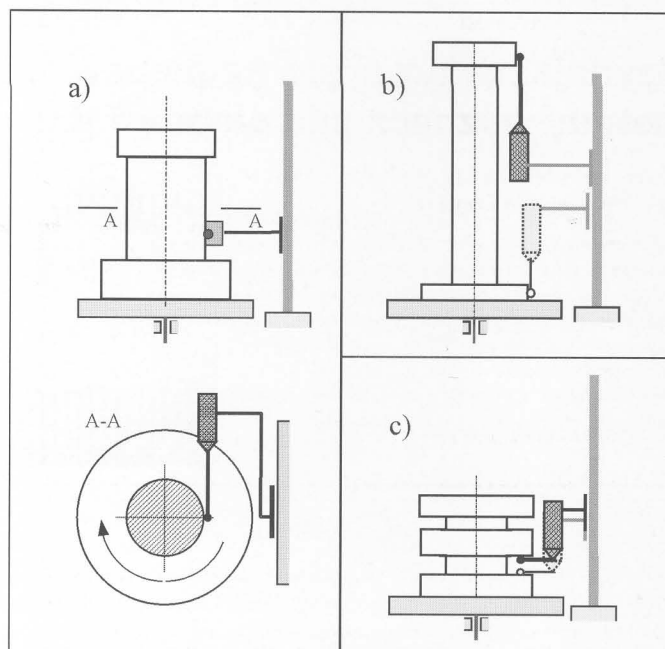
Rys. 2. Wymiary i obciążenia wpływające na niepewność pomiaru odchyłek geometrycznych w maszynach z obrotowym stołem

### 3. Właściwości metrologiczne czujników przemieszczeń promieniowych

Czujniki stosowane w FMM charakteryzują się m.in. regulowanym naciskiem pomiarowym (do 0,25 N), wymiennymi długimi dźwigniami o dużej podatności na odkształcenia, stopniowanym zakresem pomiarowym (od 2  $\mu\text{m}$  do 2 mm). Właściwości metrologiczne czujników zależą od warunków, w jakich pomiar jest wykonywany (rys. 3). Badania dokładności urządzeń powinny więc uwzględniać różne konfiguracje czujnika i jego rozmaite położenia względem mierzonego elementu.

W pierwszej kolejności należy sprawdzić dostępne wzmocnienia sygnału pomiarowego. Niepoprawne ustalenie długości wymiennego ramienia dźwigni czujnika lub błędne zinterpretowanie przez operatora nastaw programu komputerowego prowadzi nieraz do bardzo dużych błędów pomiaru.

Jeżeli podczas pomiarów czujnik pracuje w dużym zakresie, może ujawnić się nieliniowość jego charakterystyki. Sytuacja taka zachodzi m.in. wtedy, gdy mierzony zarys poprzeczny jest mocno przesunięty względem środka obrotu. W takim wypadku nieliniowość czujnika przejawia się jako pozorna nieokrągłość zarysu (nałożona na nierówności, które na zarysie mierzonym rzeczywiście



Rys. 3. Przykłady różnych położenia czujnika: a) ustawienie typowe przy pomiarze powierzchni zewnętrznych, b) pomiar skrajnie wysoko i nisko położonych powierzchni zewnętrznych, c) pomiar powierzchni czołowych

występują). Przy pomiarach profili nominalnie prostoliniowych, nachylonych względem linii przesuwu czujnika, nieliniowość charakterystyki ujawnia się w odwzorowaniu jako składowa ogólna nieprostoliniowości. Błąd pomiaru odchyłek kształtu spowodowany nieliniowością charakterystyki czujnika może nawet przekraczać wartość mierzonej odchyłki.

Sprawdzanie wskazań czujnika może odbyć się przez wyznaczenie jego charakterystyki na specjalnym stanowisku przez porównanie wskazań czujnika z wskazaniami przetwornika wzorcowego, przy użyciu wzorców kształtowych lub za pomocą metody polegającej na wykonaniu pomiaru zarysu wzorca okrągłości przesuniętego względem osi obrotu i analizie harmonicznej widma otrzymanego sygnału pomiarowego [5].

### 4. Niestabilność wzorcowej osi obrotu

Przemieszczenia osi łożyska układu obrotowego (stołu lub wrzeciona uchwyty czujnika) wpływają bezpośrednio na wyniki pomiaru parametrów makrogeometrii badanych powierzchni. Z tego powodu, wymagania dotyczące łożysk są niezwykle wysokie. Stosuje się więc łożyska o specjalnej konstrukcji - aerostatyczne, ślizgowe z tarciami półsuchym oraz toczone.

W czasie obrotu wrzeciona jego oś doznaje niepożądanych mikroprzemieszczeń, zakreślając powierzchnię o nieokrągłych przekrojach poprzecznych. Promieniowe przemieszczenia osi są źródłem błędów pomiaru przekrojów poprzecznych, a przemieszczenia wzdłużne zwiększają niepewność pomiaru powierzchni czołowych oraz kulistych i stożkowych.

Przemieszczenia promieniowe osi można, w ustalonych warunkach pracy, wyrazić jako liniową funkcję odległości mierzonego przekroju od łożyska podporowego (wymiar  $L_3$  na rys. 2) lub od płaszczyzny stołu ( $H$ ). Według informacji podawanych przez producentów [7] bicie promieniowe osi większości urządzeń zawiera się w przedziale od  $(0,025 + 0,0005H) \mu\text{m}$  do  $(0,1 + 0,002H) \mu\text{m}$ , gdzie  $H$  oznacza odległość płaszczyzny pomiarowej od płaszczyzny stołu, wyrażoną w milimetrach. W niektórych urządzeniach z obrotowym stołem wartość bicia promieniowego osi wrzeciona wyraża się jako funkcję ciężaru mierzonego elementu  $P$  i momentu zginającego oś  $M$ , np.  $(0,1 + 8 \cdot 10^{-4}H + 1,5 \cdot 10^{-4}P) \mu\text{m}$  - przy obciążeniu symetrycznym, oraz  $(0,1 + 8 \cdot 10^{-4}H + 4 \cdot 10^{-4}M) \mu\text{m}$  - gdy obciążenie jest niesymetryczne, gdzie  $P$  jest wyrażone w niutonach, zaś  $M$  w N·mm.

Przemieszczenia osi obrotu wyznacza się mierząc profil poprzeczny wzorca okrągłości. Typowe wzorce mają postać szklanej lub ceramicznej półkuli, osadzonej w walcowej podstawie. Odchyłka okrągłości w poszczególnych przekrojach wynosi zwykle  $0,03 \div 0,1 \mu\text{m}$ . Wzorce takie można więc stosować do bezpośredniego sprawdzania urządzeń o stosunkowo małej dokładności. Zaniedbując nieokrągłość wzorca, uznaje się obserwowane różnice promieni profilu za skutek chwilowych promieniowych przemieszczeń osi obrotu.

Użytkownik powinien przeprowadzić pomiary sprawdzające w warunkach skrajnie różniących się od siebie – przy małym symetrycznym obciążeniu i przy obciążeniu największym dopuszczalnym momentem, w małej i dużej odległości od łożysk wrzeciona obrotowego, po nastawieniu filtra na różne wartości granicznej liczby fal, np.: 15, 50, 150, 500 fal/obrót.

Podczas pomiarów profili zamkniętych niekiedy zauważa się wyraźny uskok promienia wykresu, którego nie można przypisać geometrii elementu. Najczęściej uskok taki występuje pomiędzy pierwszym i ostatnim punktem wykresu (stąd nazwa angielska: closure error). Może to być wynik niestabilności ruchu wrzeciona, zbyt słabego zamocowania mierzonego elementu, nie dość sztywnego zamocowania korpusu czujnika lub jego dźwigni pomiarowej, pełzania sygnału w wyniku zmian termicznych. Przyczyna takiego zjawiska powinna być rozpoznana i usunięta.

Przy identyfikacji źródeł błędu uskoku przydatne są dwie reguły. Jeśli uskok narasta ze wzrostem odległości od powierzchni stołu, to przyczyn występowania błędu należy upatrywać w niedostatecznie stabilnym mocowaniu elementu. Jeśli zaś uskok nie zależy od odległości mierzonego przekroju od powierzchni stołu i rośnie ze wzrostem nacisku, to przyczyny uskoku są związane z czujnikiem, najczęściej z niedostatecznie sztywnym osadzeniem zewnętrznego ramienia dźwigni obrotowej.

Jeśli sprawdza się przyrządy przeznaczone do pomiarów najwyższej dokładności, to odchyłek kształtu wzorca nie można zaniedbać i wtedy należy sygnał uzyskany podczas pomiaru wzorca okrągłości traktować jako superpozycję trzech składowych: a) nieokrągłości profilu wzorca, b) przemieszczeń osi obrotu, c) niewspółśrodkowości sprawdzanego zarysu względem osi obrotu. W celu wyodrębnienia poszczególnych składników wiodące światowe laboratoria stosują rozmaite metody: odwrócenia (inaczej Donaldsona), wielostopniową [6] lub wieloczujnikową.

Bicie osiowe (wzdłużne) wrzeciona wykonującego wzorcowy obrót jest jednym z głównych źródeł błędów pomiaru odchyłki płaskości powierzchni czołowych elementów o wysokiej dokładności kształtu. Bicie osiowe zależy od wartości parametru R (rys. 2) - odległości punktu styku końcówki czujnika z elementem od osi obrotu. Typowe wartości bicia, podawane przez producentów, określają wzory  $(0,05 + 2 \cdot 10^{-3}R) \mu\text{m}$  czy  $(0,05 + 8 \cdot 10^{-3}R) \mu\text{m}$ , gdzie R jest wyrażone w milimetrach. Bicie osiowe dla  $R = 0$  można wyznaczyć przy użyciu wzorca półkulistego, stykając końcówkę czujnika z najwyższym punktem wzorca. Do wyznaczenia bicia osiowego w innych odległościach od osi należy użyć elementu z wzorcową płaską powierzchnią czołową.

## 5. Wpływ nacisku pomiarowego na wyniki pomiarów

Nacisk pomiarowy czujników do pomiaru odchyłek kształtu - choć mały w porównaniu z naciskiem czujników do pomiaru przemieszczeń o przeznaczeniu ogólnym (zwykle nie przekracza 0,25 N) - może być źródłem zaskakująco dużych błędów, niekiedy całkowicie podważających wiarygodność uzyskanych wyników.

Można wyróżnić dwa rodzaje niepożądanych skutków nacisku. Oba występują podczas ruchu badanego obiektu i czujnika względem siebie. Pierwszy - to wpływ nacisku na położenie obiektu, drugi - wpływ na położenie końcówki czujnika.

Efekt pierwszy wynika z niestabilnego położenia elementu. Ujawnia się zwykle w ostrej formie podczas pomiaru elementów smukłych i lekkich, albo jako owalność profilu, albo jako niezamy-

kanie się profilu. Można temu zapobiec, stosując zamiast elastycznego mocowania elementu do stołu (powszechnie stosowany sposób unieruchomiania) mocowanie sztywne w uchwycie.

Drugi efekt jest trudniejszy do wykrycia. Nie występuje on, kiedy dźwignia czujnika jest ustawiona prostopadle do osi obrotu (rys. 3a) i jest podczas obrotu rozciągana. Może natomiast pojawić się wtedy, gdy oś dźwigni czujnika leży w tej samej płaszczyźnie co oś obrotu (rys. 3b i 3c) i na skutek tarcia, występującego podczas obrotu, dźwignia podlega skręcaniu. Dźwignia ma budowę dzieloną, znaczna jest długość ramienia zewnętrznego i mały jego przekrój poprzeczny. Siła tarcia może więc powodować przemieszczenia końcówki czujnika w kierunku prostopadłym do pomiarowego, co wpływa na odwzorowanie profilu. Poziom błędów jest szczególnie wysoki w pomiarach otworów o niewielkiej średnicy, zwłaszcza głębokich, kiedy to stosowanie długich dźwigni jest nieuniknione.

Zagadnienie nacisku pomiarowego nie znajduje odbicia w nielicznych publikacjach, omawiających wpływ warunków pomiaru odchyłek kształtu na dokładność pomiarów. Również normy nie podają wskazówek na temat doboru nacisku, a producenci urządzeń pomiarowych nie ostrzegają użytkowników przed dużymi błędami, jakie mogą się w pewnych warunkach pojawić.

## 6. Wpływ warunków otoczenia

Chociaż zwykle w pomiarach wielkości geometrycznych czynnikiem bardzo silnie wpływającym na niepewność pomiarów jest niestabilność termiczna, to jednak podczas pomiaru odchyłek kształtu pojedynczych przekrojów wpływ temperatury na wyniki pomiaru jest na ogół zupełnie nieistotny. Wynika to stąd, że mierzone wartości są bardzo małe a czas pomiaru krótki (od kilku do kilkunastu sekund). Dlatego podczas sprawdzania przyrządów i pomiarów można dopuścić duży przedział temperatury pracy (nawet od 15C do 25C). Wyjątkiem są dłużej trwające badania, jak np. pomiary odchyłki walcowości, współosiowości czy sprawdzanie ustawienia prowadnicy względem osi, kiedy to trzeba temperaturę otoczenia stabilizować. Wahania temperatury nie powinny w takim wypadku przekraczać 2C/h.

Nie stwierdzono, aby wilgotność wywierała zauważalny wpływ na błędy pomiaru. Dlatego w warunkach normalnej pracy można zaakceptować wilgotność względną od 30% do 80%.

Do warunków otoczenia zaliczają się też drgania występujące w bezpośrednim otoczeniu urządzenia pomiarowego lub przenoszące się przez konstrukcję nośną budynku. Ten czynnik jest jednym z najważniejszych źródeł niepewności podczas pomiarów i sprawdzania dokładności FMM. Wpływ drgań na rozrzuty wyników daje się zaobserwować zwłaszcza podczas pomiarów wykonywanych bez użycia filtrów górnoproporowych.

## 7. Podsumowanie

Zapewnienie odtwarzalności w pomiarach odchyłek kształtu i położenia jest jednym z ważniejszych wyzwań współczesnej metrologii geometrycznej. O poziomie techniki osiąganym w tym zakresie decydują nie tylko producenci, ale również praktyka setek laboratoriów. Operatorzy urządzeń powinni więc rozumieć zjawiska zachodzące podczas pomiaru, znać główne źródła niepewności i dbać o minimalizację wpływu czynników zakłócających wyniki pomiaru. Okresowe sprawdzanie FMM musi być elementem normalnej praktyki laboratoryjnej.

Sprawdzanie dokładności FMM nie jest jednak zadaniem łatwym i to z kilku powodów. Po pierwsze – zakładana dokładność pomiaru jest tak wysoka, że proste metody sprawdzania mają zastosowania ograniczone, pozwalają jedynie stwierdzić, czy podawane przez producenta parametry nie zostały jaskrawo naruszone. Na szczęście, w większości przypadków „zapas dokładności” FMM jest na tyle duży, że takie stwierdzenie może być wystarczające.



Drugą ważną przyczyną trudności jest bardzo duża zmienność niepewności pomiaru w zależności od warunków pomiaru. Dlatego użytkownik danej maszyny FMM, biorąc pod uwagę typy mierzonych obiektów i powierzchni powinien przeprowadzić sprawdzanie dokładności w podobnych warunkach, w jakich zwykle pomiary wykonuje. Ten postulat dobrze koresponduje z zaleceniem walidowania metod pomiarowych, a więc badania ich wiarygodności w odniesieniu do określonych, ściśle sprecyzowanych celów.

## 8. Literatura

- [1] O. Jusko, J. Salesbury, H. Kunzmann, H.: Results of the CIRP form intercomparison 1996-1998, *Annals of the CIRP* Vol.48/1, 1999
- [2] B. Hemming, D. Flack, M. Frennberg, O. Jusko, R. Thalmann: Euro-met Project 533, High Precision Roundness
- [3] Żebrowska-Lucyk S.: Bezodniesieniowa metoda badania makrogeometrii powierzchni obrotowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2001

- [4] Adamczak S., Janecki D.: Modernizacja przyrządów do oceny struktury geometrycznej powierzchni. Seria artykułów w czasopiśmie *Mechanik* 5/2001-12/2001
- [5] Żebrowska-Lucyk S.: New approach for examination of the displacement sensor characteristics. *Measurement*, vol. 28, No 4, 2000, 261-267.
- [6] King-Fu Hii, R. Ryan Vallance, Robert D. Grejda and Eric R. Marsh „Error motion of a kinematic spindle”. *Precision Engineering*, V 28, I. 2, April 2004, p. 204-217
- [7] Katalogi firm Taylor Hobson, Mitutoyo, Mahr-Perthen

Artykuł powstał w związku z realizacją grantu KBN 5 T07D 008 25 „Opracowanie metod badania dokładności uniwersalnych urządzeń do pomiaru odchyłek kształtu i położenia elementów mechanicznych”

**Title:** The major factors influencing accuracy of measurement of geometrical deviations by means of FMM

*Artykuł recenzowany*

## RECENZJE

# Measurement Systems and Sensors

(SYSTEMY POMIAROWE I CZUJNIKI)

Waldemar Nawrocki

Artech House, Boston, USA 2005

Powyższa monografię o systemach pomiarowych i wybranych czujnikach wydało znane wydawnictwo amerykańskie Artech House specjalizujące się na anglojęzycznym międzynarodowym rynku wydawniczym w literaturze naukowo-technicznej z telekomunikacji i elektroniki. Jest to duży sukces autora, profesora Politechniki Poznańskiej, znanego w środowisku metrologów z prac badawczych m.in. z termometrii szumowej i z kilku wcześniejszych pozycji książkowych, w tym skryptu *Systemy pomiarowe i sensory* tejże Uczelni z 2001r. i monografii *Komputerowe Systemy Pomiarowe* wydanej przez wydawnictwo WKiŁ Warszawa w 2002r. W omawianej książce istotnie rozszerzono i uaktualniono tematykę obu tych pozycji.

Treść książki, licząc 325 stron, podzielono na 11 rozdziałów. W pierwszym z nich zdefiniowano podstawowe pojęcia komputerowych systemów pomiarowych, podano ich konfiguracje i struktury oraz opisano funkcje interfejsowe urządzeń w systemie. Omówiono także rolę komputera i wpływ jego magistral wewnętrznych służących do podłączenia zewnętrznego systemu pomiarowego. W rozdziałach 2 i 3 opisano czujniki do pomiarów elektrycznych temperatury i naprężenia mechanicznego oraz ich podstawowe układy pomiarowe. W rozdziale 4 opisano kondycjonery sygnałów, a w rozdz. 5 - przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe oraz zestawiono w tabelach reprezentatywne parametry przetworników scalonych. W rozdziałach od 6 do 10 omówiono rozwiązania interfejsów systemów pomiarowych z ich podziałem na szeregowe i równoległe oraz przewodowe i bezprzewodowe. W rozdz. 6 przedstawiono systemy pomiarowe z interfejsem szeregowym. Szczegółowo opisano podstawowe interfejsy ogólnego przeznaczenia (RS-232 oraz RS-485) oraz specjalizowane standardy systemów przemysłowych: PROFIBUS i CAN. Opisano też wykorzystanie czujników inteligentnych (amer. *smart sensors*) w rozproszonych systemach monitoringu. Duży fragment poświęcono mało znanej technice PLC, czyli wykorzystaniu sieci elektroenergetycznej do transmisji danych cyfrowych. W rozdz. 7 omawia się systemy pomiarowe z bezprzewodową transmisją danych, w tym bardzo gruntow-

nie wykorzystanie sieci telefonii komórkowej GSM do przesyłania danych pomiarowych. Oceniono wpływ wprowadzanych nowych technologii telekomunikacyjnych (UMCS) na parametry systemów pomiarowych. Opisano też inne techniki transmisji bezprzewodowej, tj. łącza: radiowe z radiomodemami i typu „Bluetooth” oraz pracujące na promieniowaniu podczerwonym IrDA. Ostatnie dwa mogą służyć do zestawiania krótkich, kilkumetrowych połączeń między urządzeniami systemu pomiarowego. W rozdz. 8 szczegółowo omówiono najważniejszy obecnie standard pomiarowy - interfejs równoległy IEEE-488, znany także jako IEC-625, HPIB lub GPIB. Podano sposoby poprawy jego podstawowych parametrów, tj.: zwiększenia szybkości transmisji i liczby urządzeń w systemie oraz tworzenia systemów rozproszonych. Rozdz. 9 opisuje kasetowe i modułowe systemy pomiarowe o wielkiej szybkości przetwarzania danych, począwszy od CAMAC-a, przez VXI, aż do systemów modułowych PXI. Rozdz. 10 poświęcono zaś wykorzystaniu sieci komputerowych LAN oraz interfejsu LAN do budowy systemów pomiarowych. Przedstawiono nową technikę - interfejs LXI, obejmującą wyposażanie przyrządów w interfejs LAN i bezpośrednie ich dołączanie do tej sieci. W ostatnim, 11-tym rozdziale opisano komputerowe karty pomiarowe DAQ z przetwornikami a/c i c/a oraz wirtualne przyrządy pomiarowe. Jako przykład przedstawiono parametry kart pomiarowych dwóch typów.

Monografia obejmuje całość obszernego materiału dotyczące bezprzewodowych systemów pomiarowych oraz systemów sieci LAN. Wyróżnił ją pozytywnie, gdyż nie spotkałem książek, w których ta najnowsza technologicznie tematyka byłaby omówiona tak gruntownie. Systemy pomiarowe opisane są tu kompleksowo - od czujników, poprzez interfejsy aż do komputera sterującego. Dlatego byłoby niezmiernie pożyteczne, by znów ukazała się kolejna polskojęzyczna monografia autora o tak rozszerzonej i uaktualnionej treści jak omówiona powyżej pozycja angielska.

Zygmunt Lech Warszawa  
Polskie Towarzystwo Metrologiczne