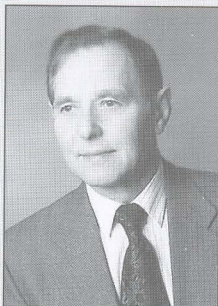


## Eugeniusz RATAJCZYK

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

# Tendencje w rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz RATAJCZYK



Profesor zwyczajny w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Autor 54 monografii, rozpraw i artykułów naukowych, 4 podręczników, 102 referatów naukowych (w tym 94 publikowanych), 19 artykułów przeglądowych oraz 18 referatów związanych z procesem dydaktycznym. Autor lub współautor 6 patentów. Kierownik lub główny wykonawca 5 projektów badawczych KBN w latach 1991-2004. Promotor 11 przewodów doktorskich (w tym 2 cudzoziemców). Zainteresowania naukowe związane są ze współrzędnościową techniką pomiarową. Autor 360 stronicowej monografii z tego zakresu pt.: „Współrzędnościowa Technika Pomiarowa” wydanej w 2005 r. Przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury PAN. Członek Rady Nauki przy Ministrze Nauki i Informatyzacji.

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

### Streszczenie

Podjęta została próba przedstawienia tendencji w rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej. Odniesiono się do kierunku rozwoju maszyn pomiarowych wskazując na ich rozwój osobno dla zastosowań przemysłowych oraz pod kątem wysokiej dokładności - do zastosowań laboratoryjnych. Scharakteryzowano rozwój optoelektronicznych inkrementalnych układów pomiarowych oraz głowic pomiarowych. Na końcu, w podsumowaniu, zwrócono uwagę na ewentualne kierunki rozwoju oprogramowań pomiarowych.

### Abstract

A trial has been undertaken to present trends in development of coordinate measuring techniques. The direction of the development related to their use in industry and from the point of view of high accuracy in laboratory applications has been discussed. The development of incremental measuring systems and measuring heads have been characterized. Finally the attention has been paid to possible directions in the development of measuring software.

## 1. Wprowadzenie

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM) i takie ich opcje jak centra i roboty pomiarowe pozwalają na wykonywanie pomiarów złożonych i skomplikowanych elementów w czasie dostosowanym do rytmu produkcji, dzięki temu możliwe jest bezpośrednie oddziaływanie na jakość procesu wytwarzania. Maszyny pomiarowe znajdują liczne zastosowanie w procesach pomiarowo-kontrolnych przemysłu motoryzacyjnego w pomiarach części silników, części zawieszni i części układów jezdnych oraz części karoserii.

Częste zmiany konstrukcyjne i technologiczne w przemyśle motoryzacyjnym wymuszają rozwój współrzędnościowych technik pomiarowych, na tle którego można się pokusić o zarysowanie trendów tego rozwoju. Natomiast prognozowanie w szerszym okresie np. w aspekcie XXI wieku jest niezwykle trudne, zwłaszcza, że jesteśmy na początku tego wieku. Można mieć nadzieję, że rozważania podjęte w tym artykule zainspirują przemysłowców dotyczące rozwoju tej techniki.

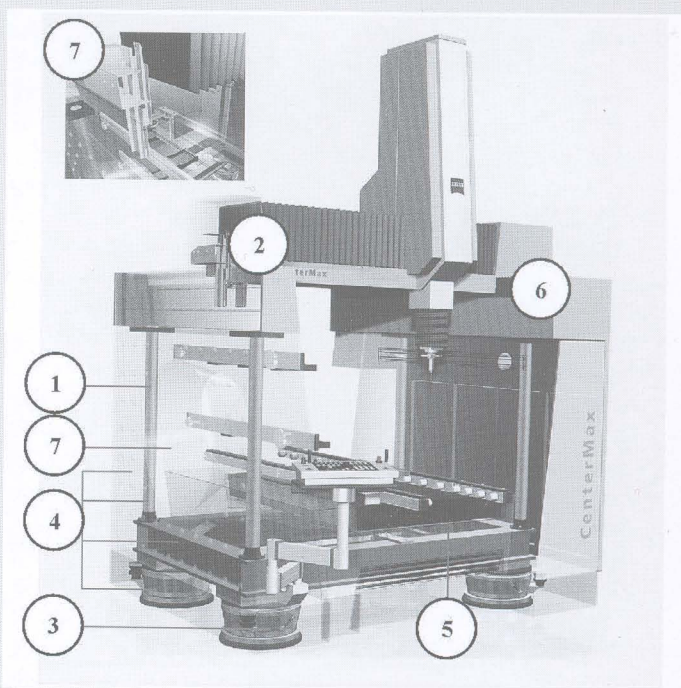
## 2. Tendencje w budowie maszyn pomiarowych

Od maszyn pomiarowych zwłaszcza od takich ich opcji jak roboty pomiarowe oczekuje się udoskonaleń, tak by można je było stosować bezpośrednio w produkcji. Wymagane jest, poza zwiększoną dokładnością pomiarów, zwiększenie prędkości pomiarowych i przyspieszeń zespołów ruchomych. O ile prędkości pomiarowe klasycznych maszyn CMM osiągają najwyżej 0,2m/s to roboty pomiarowe 0,5m/s, a przyspieszenia odpowiednio 0,5m/s<sup>2</sup> i 4m/s<sup>2</sup>. Dlatego niezbędna jest budowa części ruchomych z materiałów

o małych masach w stosunku do objętości i stosunkowo dużej sztywności oraz o małej podatności na wpływy temperatury i drgań podłoża. Przykładem takiego podejścia są nowe rodzaje zespołów ruchomych wykonywanych w technice CARAT [1,2], materiałów z włókien węglowych lub z inwaru [1]. Ponadto obserwowana jest tendencja do zwiększonej elastyczności pozwalającej na wykonywanie pomiarów zmieniających się różnorodnych przedmiotów poprzez automatyczne dostosowywanie procedur sterujących, pomiarowych i transportowych. Główną tendencją jest więc „przeniesienie” maszyn pomiarowych z laboratoriów do hal produkcyjnych z zachowaniem nadal ich wysokiej dokładności. Przykładem takich rozwiązań są maszyny zwane centrami pomiarowymi takie jak CenterMax i GageMax produkcji firmy C.Zeiss.

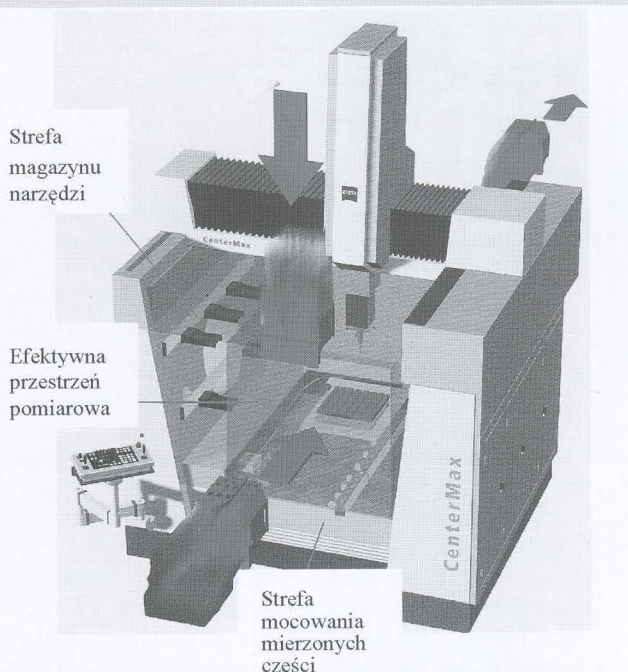
Na rys.1 przedstawiono schemat budowy CenterMax, a na rys.2 widok z zaznaczonymi strefami funkcjonalnymi. W budowie CenterMax zastosowano dźwigary z inwaru 1 (rys.1), które wraz z łożem wykonanym ze stopu mineralnego, stanowią twarde jądro maszyny. Inwar, charakteryzujący się niskim współczynnikiem rozszerzalności liniowej, zmniejsza podatność na wpływy temperatury. Osłony 2, o ukształtowaniu labiryntowym, chronią łożyska i linały pomiarowe, przed zapyleniem i mgłą olejową. Aktywny układ tłumienia 3 składa się z czterech tłumików drgań, a specjalny układ kontrolny nadzoruje działanie systemu, wyrównując ewentualne różnice ciśnień. Dodatkowo zastosowano układ tłumienia dynamicznego i termicznego 4 (temperature resistant frame) zbudowany ze stopu mineralnego połączony z dźwigarami ze stali niklowej. Przewidziano również zbiorniki 5 do odprowadzania cieczy technologicznych, np. wody, oleju, chłodziwa, itp. Prowadnice 6 umiejscowiono wysoko, by zmniejszyć wielkość przemieszczanych mas - zrezygnowano tym samym z podpór podtrzymujących belkę portalu, jak to występuje w maszynach portalowych. Osłony 7 wykonane ze stopu mineralnego, oprócz nadania odpowiedniego kształtu maszynie, chronią Centrum przed zewnętrznymi zaburzeniami dynamicznymi, termicznymi i przed zapyleniem.

CenterMax ma zakres pomiarowy wynoszący 900x1200x700mm. Graniczny błąd dopuszczalny wskazania  $MPE_E$  wynosi  $1,6+L/300$  ( $\mu\text{m}$ ), a wg VDI/VDE  $U_1=1,3+L/300$  ( $\mu\text{m}$ ),  $U_3=MPE_E$ . Graniczny błąd dopuszczalny zespołu głowicy



Rys. 1. Schemat budowy CenterMax





Rys. 2. Strefy funkcjonalne CenterMax

pomiarowej dla pomiarów punktowych  $MPE_p$  wynosi  $1,7\mu\text{m}$ , (wg VDI/VDE  $V_2=1,0\mu\text{m}$ ), a dla pomiarów skaningowych  $MPE_{THP}$   $3,1\mu\text{m}$  (72s). Wymienione niedokładności mogą być zachowane nawet gdy temperatura otoczenia zawiera się w przedziale od 8 do  $40^\circ\text{C}$ . Dopuszczalne gradienty temperaturowe wynoszą  $2\text{K/h}$ ,  $8,0\text{K/d}$  i  $2,0\text{K/m}$ .

Centrum CenterMax jest konstrukcyjnie dostosowane do warunków produkcyjnych m.in. poprzez (rys.2):

- zbudowanie przestrzeni pomiarowej umożliwiającej wielo-variantowe wypełnianie strefy mocowania przedmiotów bądź przez zastosowanie stołu pomiarowego w postaci płyty granitowej lub stołu obrotowo-pomiarowego lub palet,
- możliwość dostarczania części do pomiaru z trzech stron przestrzeni pomiarowej,
- zastosowanie automatycznego magazynu narzędzi znajdującego się poza przestrzenią pomiarową, umiejscowionego na bocznej ścianie maszyny o pojemności zawierającej maksymalnie 24 gniazda narzędziowe.

Zbudowane Centrum pomiarowe dało podstawy do opracowania mniejszych jednostek do podobnego stosowania w otoczeniu produkcji z możliwością integracji z centrami produkcyjnymi. Przykładem nowego kompaktowego centrum jest GageMax [1,2]. GageMax ma zakres pomiarowy wynoszący  $700\times 500\times 500\text{mm}$ . Zastosowana głowica pomiarowa  $VAST_{XT}$  pozwala wykonywać pomiary, do wyznaczenia wymiarów kontrolowanych części, z pojedynczych punktów lub dużej liczby punktów na drodze skaningu.

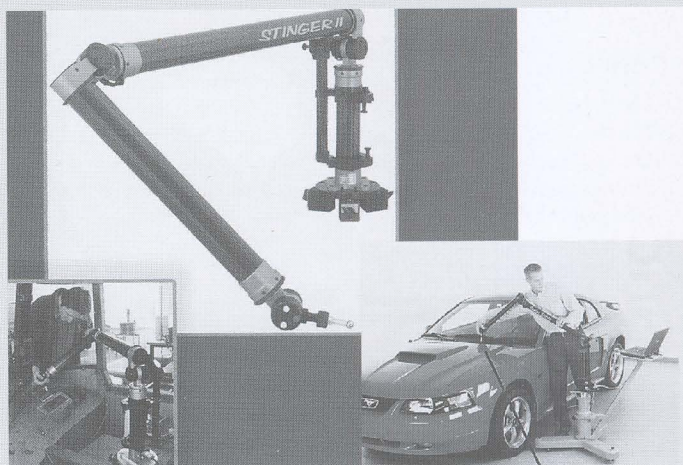
GageMax jest przewidziane do zastosowania bezpośrednio w warunkach produkcyjnych i może być stosunkowo łatwo włączone w centrum obróbkowe, do jego miejsc transportowych, bowiem dostęp do przestrzeni pomiarowej maszyny jest możliwy z jednego z trzech kierunków. Ponadto możliwe jest zamocowanie w podstawie maszyny stołu o dowolnej konfiguracji. Może to być stół granitowy, obrotowy stół pomiarowy lub paleta z opcją przesuwu np. na rolkach, itp. Instalowanie tych elementów nie zmniejsza zakresu pomiarowego w osi Z, gdyż montowane są w głębi podstawy maszyny. Dla zachowania stałej przestrzeni pomiarowej również magazyn z gniazdami do wymiany głowic i trzpieni pomiarowych montowany jest poza obszarem przestrzeni pomiarowej.

Inną tendencją jest budowa maszyn pomiarowych nawiązująca do robotów przemysłowych, w których w miejsce chwytaka mocowana jest głowica pomiarowa. Przykładem takiego podejścia są maszyny pomiarowe **Vectorarm** [1] firmy amerykańskiej o tej samej nazwie. Niestety nie osiągnięto zadawalającej dokładności, bowiem ich błędy pomiaru osiągały nawet  $\pm 0,1\text{mm}$ .

Ostatnio obserwuje się zainteresowanie techniką współrzędnościową przez małe firmy, m.in. zajmujące się naprawą aut, zwłaszcza karoserii po wypadkach. Dla takich zakładów naprawczych powstały konstrukcje przenośne stosunkowo tanich urządzeń pomiarowych pracujących w technice współrzędnościowej o nazwie „ramiona pomiarowe”.

**Ramiona pomiarowe** wytwarzane są m.in. przez firmy amerykańskie FARO Technologies Inc. i ROMER CimCore oraz niemiecką Zett Mess. Na rys.3 przedstawiono ramiona pomiarowe CimCore serii Stinger II.

Urządzenia te stosowane są do przenośnego ustawiania i mierzenia różnych elementów, w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, zwłaszcza elementów karoserii. Konstrukcja pozwala na nieograniczony obrót podstawowych osi ramion. Ramiona wykonane z włókien węglowych zapewniają wymaganą sztywność i stabilność temperaturową. W urządzeniach zastosowano system automatycznego rozpoznawania końcówek pomiarowych bez każdorazowej ich kalibracji. Ramiona pomiarowe wyznaczają wymiary na podstawie wartości współrzędnych punktów pomiarowych przy zastosowaniu oprogramowania PowerINSPECT 3.05 pracującego pod systemem Windows. Oprogramowanie umożliwia porównanie mierzonego detalu z plikiem CAD (3D) i wyświetlenie rozbieżności pomiędzy wymiarem nominalnym, a zmierzonym w postaci odchylek i wielokolorowej grafiki. Ramiona pomiarowe wytwarzane są w różnych zakresach pomiarowych, np CimCore serii 3000i obejmują zakresy pomiarowe od 1,2 do 3,6m, a CimCore serii Singer II od 1,8 do 4,6m. Ich niedokładności pomiaru zawierają się w przedziale od  $\pm 0,005\text{mm}$  dla najmniejszego zakresu pomiarowego i grupy dokładnościowej A do  $\pm 0,05\text{mm}$  dla zakresu 3,6m (CimCore serii 3000i).



Rys. 3. Ramiona pomiarowe serii Stinger II produkcji firmy CimCore

Kolejna tendencja w rozwoju współrzędnościowych maszyn pomiarowych odnosi się do maszyn laboratoryjnych i dotyczy prac nad uzyskaniem możliwie największej dokładności poprzez zastosowanie nowych materiałów na ich budowę, nowych o wyższej rozdzielczości i dokładności układów pomiarowych i sond, z zaawansowanymi procedurami pomiarów skaningowych. Rozwiązania te zapewniają wysoką odporność na wpływy temperatury, przy uwzględnieniu zaawansowanej kompensacji tego wpływu. Przykładem maszyn pomiarowych, które charakteryzują się najwyższą dokładnością na poziomie  $\pm 0,5\mu\text{m}$  (plus składnik zależny od mierzonej długości L) są maszyny serii UPMC produkcji firmy C.Zeiss, PMM produkcji firmy Leitz Messtechnik, LEGEX firmy Mitutoyo. Na uwagę zasługują maszyny o podobnej wysokiej dokładności szwajcarskiej firmy SIP o symbolu CMM, w które wyposażane są urzędy miar. W maszynach UPMC tak wysokie dokładności uzyskano m.in. poprzez zastosowanie specjalnego materiału typu CARAT (Coated Aging Resistant Aluminium Technology) charakteryzującego się wysoką twardością powierzchni, małą masą w stosunku do objętości oraz dużą przepuszczalnością cieplną, co



zapobiega ewentualnej deformacji termicznej. W konstrukcji zastosowano napęd centralny portalu, co zapobiega skokowym jego przemieszczaniom, jak to może występować w przypadku napędu bocznego. Zastosowane układy pomiarowe oparto na liniałach wykonanych z Zeroduru, które charakteryzują się zerowym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej ( $\alpha=0\pm 0,05\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ ) i dużą odpornością na starzenie. W innych dokładnych maszynach stosuje się materiały oparte na włóknach węglowych, układy pomiarowe z siatkami dyfrakcyjnymi, przy czym dla przeciwdziałania błędom wynikającym z skokowego przemieszczaniu portalu stosuje się podwójne układy pomiarowe mocowane po obu stronach prowadnic portalu. Na dokładność i funkcjonalność maszyn pomiarowych, nie tylko tych laboratoryjnych, zasadniczy wpływ ma postęp w rozwoju układów i głowic pomiarowych, a wśród nich szczególnie głowic optoelektronicznych pracujących bezstykowo. Na podkreślenie zasługują maszyny serii GLOBAL Performance i GLOBAL Advantage produkcji włoskiej firmy DEA, których graniczne dopuszczalne błędy wskazań są na poziomie  $\text{MPE}_E=1,5+L/333$  ( $\mu\text{m}$ ), przy temperaturze od 18 do 22°C.

### 3. Postęp w budowie głowic i układów pomiarowych

Stosownie układów pomiarowych o coraz wyższej rozdzielczości i mniejszych błędach wskazań, jeśli ma mieć odbicie w dokładności maszyn pomiarowych, musi iść w parze z postępowaniem w budowie głowic (sond) pomiarowych. Podane więc zostaną w tym rozdziale tendencje w rozwoju obu rodzajów urządzeń i przykłady najnowszych rozwiązań.

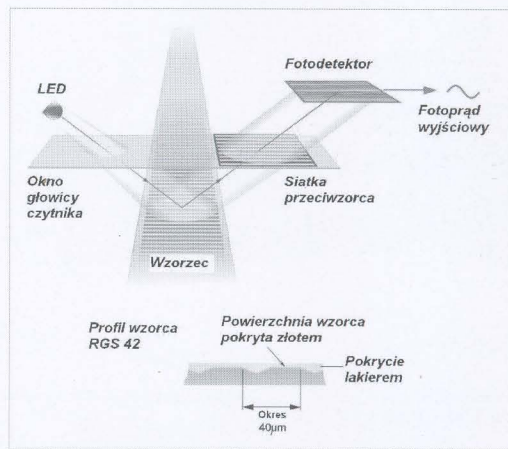
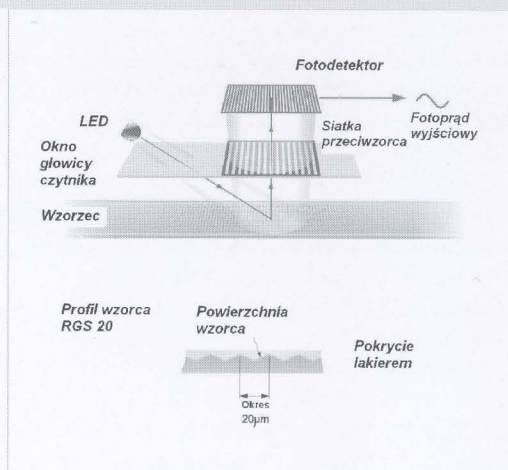
W maszynach o najwyższej dokładności stosowane są najczęściej optoelektroniczne inkrementalne układy pomiarowe oparte na liniach z materiałów o małej podatności na wpływy temperatury, których przykładem jest wymieniony wyżej ZERODUR. Mają one rozdzielczości 0,1 $\mu\text{m}$  a nawet 0,05 $\mu\text{m}$  lub 0,01 $\mu\text{m}$ .

Interesującym rozwiązaniem jest produkowany przez firmę MITUTOYO układ pomiarowy serii LSH (Laser Holo Scale), w którym wykorzystuje się zjawisko dyfrakcji promienia laserowego. Pozwala to na osiągnięcie rozdzielczości 0,05  $\mu\text{m}$  lub nawet 0,01  $\mu\text{m}$ . Innymi układami pomiarowymi tej firmy są, pracujące w świetle odbitym, układy o symbolach ST 31A, 32A, w których jako źródło światła wykorzystuje się diodę laserową oraz układy o symbolach ST 41A/B, 42A/B i 52B, wykorzystujące diodę świecącą. Mają one zakresy pomiarowe od 100 mm do 1000 mm, a w przypadku ST 52B nawet do 1500 mm. Uzyskiwane rozdzielczości wynoszą dla ST 31,32 0,02  $\mu\text{m}$ , 0,04  $\mu\text{m}$  lub 0,05  $\mu\text{m}$ , dla ST 41A i ST 42A 0,1  $\mu\text{m}$ , 0,2  $\mu\text{m}$  lub 0,25  $\mu\text{m}$ , dla ST 41B i ST 42B 0,5  $\mu\text{m}$  lub 1  $\mu\text{m}$  oraz dla ST 52B 5  $\mu\text{m}$ .

Również wartym podkreślenia jest układ pomiarowy RG2 firmy RENISHAW. W układzie tym liniałem może być stalowa taśma mocowana w aluminiowym uchwycie (RGS-T) lub podobna, samoprzylepna taśma rozwijana z bębnow (RGS-S), która może być naklejana bezpośrednio w osiach pomiarowych maszyny. Jednostka odczytowa może być wykonana w wersji cyfrowej bądź analogowej. W pierwszym przypadku sygnał wyjściowy jest przekazywany bezpośrednio do wyświetlacza, a w drugim przechodzi przez przetwornik analogowo-cyfrowy z interpolatorem.

Firma RENISHAW oferuje szereg liniałów pomiarowych, które ze względu na swoje parametry zostały podzielone na kilka grup. Jedną z najpopularniejszych jest grupa RG2. Układy pomiarowe z tej grupy znalazły szerokie zastosowanie jako liniały pomiarowe we współrzędnościowych maszynach pomiarowych. RG2 jest otwartym, bezstykowym, optycznym systemem eliminującym tarcie oraz zużycie, pozwalającym na osiągnięcie stosunkowo dużych prędkości oraz rozdzielczości wskazań. W skład grupy wchodzi liniały RGH22, RGH24, RGH25 oraz RGH25UHV. Wszystkie liniały zostały wyposażone w optyczny filtr zapewniający dobrą stabilność sygnału nawet podczas użytkowania w środowisku przemysłowym.

Wartość podziałki siatki dyfrakcyjnej na liniale wynosząca 20  $\mu\text{m}$  umożliwia uzyskanie, po interpolacji na wyjściu, cyfrową rozdzielczość od 0,05 $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Dioda elektroluminescencyjna (LED) – rys.4 emitująca podczerwień, oświetla pod kątem powierzchnię wzorca w postaci fazowej odbiciowej siatki dyfrakcyjnej utworzonej na liniale o okresie 20 $\mu\text{m}$  w przypadku układu pokazanego na rys.4a i o okresie 40 $\mu\text{m}$  w przypadku układu ilustrowanego na rys.4b.



Rys.4. Schematy układów pomiarowych RGS 20 i RGS 40 firmy Renishaw

Światło ugięte w pierwszy rząd dyfrakcyjny przechodzi przez transmisyjną siatkę przeciwwzorca. Zdudnienie częstości przestrzennych wzorca i przeciwwzorca generuje w płaszczyźnie fotodetektora sinusoidalne prążki interferencyjne.

Układ optyczny uśrednia sygnał z ponad 80 pól liniału skutecznie go filtrując. Zapewnia to stabilność sygnału nawet podczas gdy liniał jest zanieczyszczony czy nawet lekko zniszczony.

Charakterystyka termiczna często gra istotną rolę w ustalaniu dokładności pomiarowej, dlatego liniał RGS20 jest sztywno ograniczony przez swoje końce, dopasowując się do termicznego zachowania podłoża, eliminując tym samym potrzebę kompensacji innego współczynnika rozszerzalności.

Niski poziom krótkookresowego błędu interpolacji stałej siatki wzorca wynoszący mniej niż  $\pm 0,15 \mu\text{m}$  jest zapewniony przez odpowiednią konstrukcję optyczną układu odczytowego. Błąd nieliniowości wynosi  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  na każde 60 mm lub  $\pm 0,75 \mu\text{m}$  w całym zakresie 1 metra.

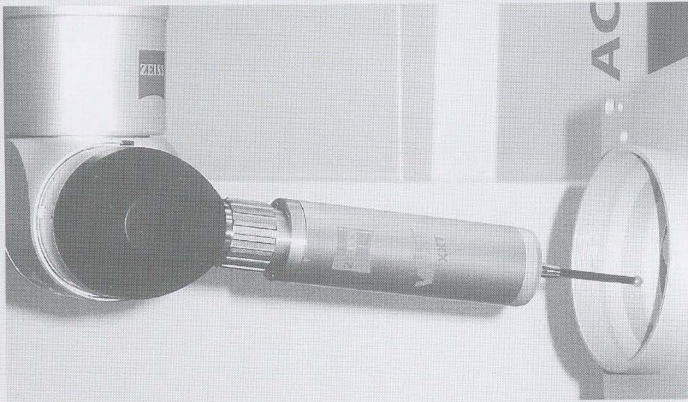
Połączana taśma RGS20 liniału jest pokryta lakierem w celach ochronnych oraz w celu łatwiejszej konserwacji. Samoprzyczepny spód umożliwia szybką i łatwą instalację z minimalną potrzebą przygotowania osi. Kontynuowanie długości jest zapewnione przez odwijaną ze szpuli taśmę, która może być ucięta na odpowiednią długość i dopasowana do miejsca mocowania.

W ostatnich latach najbardziej widoczny jest postęp w rozwoju



głowic pomiarowych. Dotychczas stosowane powszechnie w maszynach pomiarowych głowice z przetwornikiem elektrostatycznym wzbogacone zostały w dodatkowy przetwornik piezoelektryczny, co poprawiło ich charakterystykę metrologiczną. Przykładem głowic z podwójnym przetwornikiem elektrostatycznym i piezoelektrycznym są głowice RST i ST firmy C. Zeiss oraz głowice o budowie modułowej TP200 i TP800 firmy Renishaw. Jeszcze większy postęp obserwuje się w budowie głowic mierzących przeznaczonych do pomiarów skaningowych. Głowice mierzące umożliwiają nie tylko wyznaczenie punktów styku, ale również wyznaczenie wartości współrzędnych, korzystając z przetwornika pomiarowego głowicy, którym najczęściej jest przetwornik indukcyjny lub optoelektroniczny. Przykładem głowic z przetwornikiem indukcyjnym są głowice VAST i VAST<sub>XT</sub>, które są głowicami sześciokierunkowymi [3]. Pomiaru obu typami głowic mogą się odbywać z prędkością do 2 punktów na sekundę, a skaningowo z prędkością do 200 punktów na sekundę. Rozdzielczość indukcyjnych układów pomiarowych głowic wynosi 0,05µm. Zakres pomiarowy głowic zawiera się w przedziale od ±0,3mm do ±1mm i zależy od nastawionej rozdzielczości i szybkości skaningu.

Powstała również nowa konstrukcja głowicy zminiaturyzowanej przeznaczona do pasywnego skaningu VAST XXT [4], przewidziana do łączenia z głowicą obrotowo-uchyłną, np. RDS firmy C.ZEISS. Widok głowicy VAST XXT przedstawia rys.5.



Rys. 5. Głowica pomiarowa VAST XXT w połączeniu z głowicą obrotowo-uchyłną RDS firmy C. Zeiss

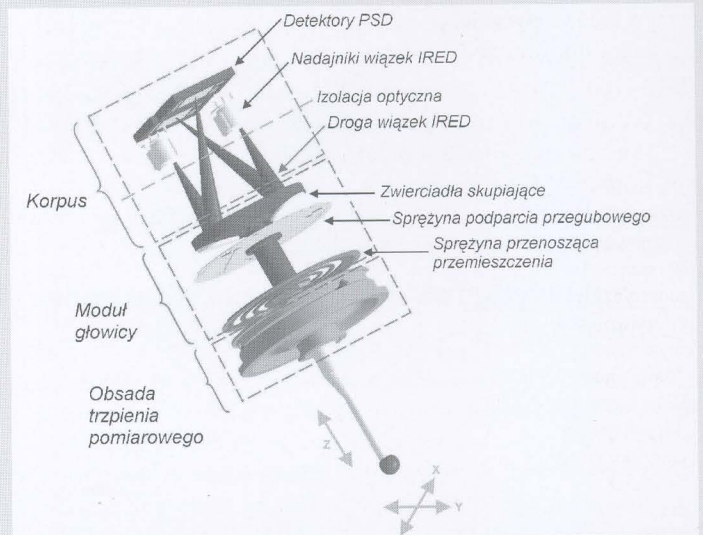
Głowica VAST XXT jest głowicą pasywną o układzie kinematycznym umożliwiającym wyposażenie jej w trzpienie pomiarowe o długościach od 50mm do 250mm. Zastosowanie kontrolera MCC800 umożliwia stosowanie jej do maszyn, które dotąd używały głowic przełączających.

Na uwagę zasługują głowice skaningowe firmy Renishaw. Jedną grupę stanowią głowice zminiaturyzowane o symbolu SP25M przewidziane do łączenia z głowicami pomiarowymi obrotowo-uchyłnymi serii PH10M/MQ oraz głowice SP80 do bezpośredniego mocowania w pinoli maszyny. Składa się one z trzech podzespołów: korpusu, modułu kinematycznego i modułu skanującego.

Korpus głowicy o średnicy 25mm zawiera układ elektroniczny oraz dwie z trzech części składowych, które tworzą system przetwornika optoelektronicznego. Górna część korpusu zawiera złącze pozwalające na połączenia z głowicą pomiarową obrotowo-uchyłną. Wymiana zespołów nie wymaga powtórnej kalibracji. Natomiast dolna część korpusu umożliwia mocowanie trzech rodzajów modułów kinematycznych (SM25-1, SM25-2 i SM25-3, do których można przyłączać moduły skanujące w postaci obsady, do których przykręca się trzpienie pomiarowe za pomocą gwintu M3. Moduły kinematyczne są dobierane dla określonej długości trzpieni pomiarowych, stanowiąc zestawy. Moduł skanujący mieści w sobie pozostałą część przetwornika z układem kinematycznym opartym na dwóch sprężynach tarczowych pokazanych na rys.6. Jedna sprężyna (tzw. podparcia przegubowego) przenosi

się przemieszczenie we wszystkich kierunkach, natomiast druga – podpierająca, sztywna dla kierunków X i Y, przenosi przemieszczenia wzdłuż osi Z.

Przetwornik optoelektroniczny składa się z dwóch nadajników wiązek podczerwieni IRED, które generują wiązki w kierunku dwóch zwierciadeł skupiających. Wchylenia kątowe zwierciadeł dokonywane w takt przemieszczenia trzpienia pomiarowego odbijają wiązki skierowując je do dwóch detektorów PSD, które wykrywają i mierzą wychylenie trzpienia pomiarowego dając informację ilościową o współrzędnych pomiarowych podczas skaningu.



Rys. 6. Schemat budowy i działania głowicy pomiarowej SP25M firmy Renishaw

Trzy moduły zostały skonstruowane w taki sposób, aby największe odchylenie kątowe zapewniało maksymalną efektywność przetwornika dla najkrótszego przewidzianego do zastosowania trzpienia pomiarowego, a także by przy maksymalnej dopuszczalnej długości trzpienia parametry głowicy utrzymywane były na optymalnym poziomie. Zakres roboczy wychylenia trzpienia każdego modułu wynosi 0,5mm we wszystkich kierunkach i dla wszystkich orientacji przestrzennej głowicy.

Ostatnio firma Renishaw przedstawiła nowy typ głowicy **REVO™** do pomiarów skaningowych, pozwalającą na skanowanie z prędkością do 500mm/s, powiązaną z techniką skaningu w pięciu osiach o nazwie RENSAN5.

W grupie **głowic bezstykowych** duży postęp w ich rozwoju obserwuje się zarówno w grupie głowic pracujących w systemie triangulacyjnym jak i wykorzystujących kamery CCD.

Przykładem nowych rozwiązań głowic laserowych są głowice AutoScan i Eagleeye firmy C. Zeiss oraz OTP6M firmy Renishaw.

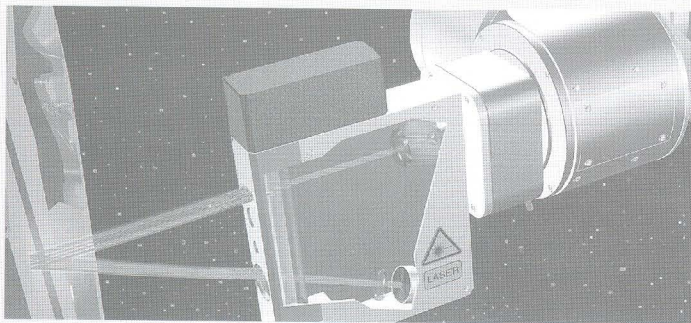
Głowicami laserowymi są mierzone takie elementy, które nie mogą być mierzone za pomocą głowic stykowych, np. przedmioty o powierzchni podatnej na naciski pomiarowe (profile cienkościennie, części z tworzyw sztucznych, inne materiały miękkie), otwory o małych średnicach, czy też zarysy o małych promieniach zaokrąglenia.

Głowice te szczególnie przydatne są w skaningowych pomiarach odtwarzających kształt powierzchni tworzonych na modelu miękkim, np. modeli karoserii samochodowych lub też miękkich niemetalicznych elementów samochodów, np. deski rozdzielczej wykonanej z tworzyw sztucznych lub obić tapicerskich drzwi, a nawet foteli. Uzyskane profile przestrzenne, jako wynik pomiarów skaningowych, są przedstawiane na wydruku graficznym, na którym możliwe jest zaznaczenie wielokolorowo odchylen linii i zarysów od linii i zarysów nominalnych. Wartości tych odchylen podawane są także w jednostkach długości w poszczególnych osiach pomiarowych.

Przykładem nowych rozwiązań konstrukcyjnych jest laserowa głowica triangulacyjna firmy C. Zeiss pod nazwą **AutoScan**, której widok przedstawiono na rys.7. Dioda laserowa wysyła wiązkę światła na optyczny rotujący element, który odchyła ją w kierunku



równoległym. Pozwala to laserowi skanować na szerokości 10mm. Niepodobny do konwencjonalnych rozwiązań układ wychwytuje kilka linii na swojej drodze pomiarowej. Odległość między liniami i punktami może być zmieniana z typową odległością 1mm w celu próbkowania powierzchni w możliwie krótkim czasie.



Rys. 7. Laserowa głowica triangulacyjna AutoScan firmy C.Zeiss

Głowica ta spełnia rolę skanera laserowego. Może ona skanować powierzchnie, krawędzie i linie konturowe z prędkością ok. 400 punktów na sekundę. Elektronika kontrolna dopasowuje moc lasera, w funkcji współczynnika odbicia powierzchni, tak że jest możliwe mierzenie powierzchni różnych materiałów zarówno metalowych jak i materiałów miękkich, jak np. materiały tapicerskie, skóra, a nawet powierzchnie mocno odbijające światło jak powierzchnie lakierowane.

Innym rozwiązaniem jest głowica **EAGLEEYE Navigator** firmy C. Zeiss [6]. Jest ona także oparta na zasadzie triangulacji. W odróżnieniu od typowej głowicy triangulacyjnej, która generuje plamkę świetlną ta głowica generuje linię świetlną, umożliwiającą uzyskanie ponad 20 000 wartości punktów na sekundę. Możliwe jest więc wykonywanie skaningu pomiarów takich elementów jak otwory okrągłe, otwory podłużne, otwory kwadratowe oraz elementy walcowe, krawędzie, itp. Dlatego też głowica ta znajduje szczególne zastosowanie do pomiaru części karoserii, jak np. drzwi samochodowych oraz całych karoserii. Dotychczas pomiary elementów karoseryjnych przebiegały w ten sposób, że ich wymiary wyznaczano poprzez pomiary elementów kulistych, które wkładane były w otwory bazowe wyznaczając w wyniku przetworzenia danych pomiarowych współrzędne ich osi. Pomiary odbywały się za pomocą stykowych głowic impulsowych. W przypadku średniej wielkości auta stosowano od 100 do 150 takich sferycznych elementów. Głowicą **EAGLEEYE Navigator** pomiar ten odbywa się na tzw. zasadzie przemiatania po powierzchni karoserii bez potrzeby mocowania elementów bazowych.

Drugą grupę głowic bezstykowych stanowią te, które wykorzystują kamery CCD. Dotychczas prezentowana była głowica **OPTAS** firmy C.ZEISS, która łączona była dodatkowo w jednym zespole ze stykową głowicą impulsową. Rozwój przetworników wykorzystujących zespoły światłoczułe o coraz większej liczbie pikseli doprowadził do powstania nowych głowic. Przykładem jest głowica **ViSCAN** [1,2,6]. Jest ona przeznaczona do mierzenia w zakresie 2D, po zainstalowaniu w głowicy pomiarowej obrotowo-uchylnej maszyny współrzędnościowej, przedmiotów o małych wymiarach. Można nią mierzyć powierzchnie obwodów drukowanych, różnego rodzaju powłoki; elementy z miękkich materiałów, m.in. z gumy i materiałów syntetycznych. Pomiary mogą być przeprowadzane wymiennie głowicą **ViSCAN** jak i głowicą impulsową, które mocowane są do głowicy obrotowo-uchylnej RDS i wymieniane automatycznie z magazynka ramowego w trybie CNC. Operator może wybrać opcje view lub CAD view. Powiększenie układu optycznego może być zmieniane skokowo od 0,14x do 8x.

Podobny typ głowicy o symbolu **QVP** [1,6] wytwarza firma Mitutoyo. W głowicy tej zastosowano kamerę CCD o wymiarze 1/2' i kołowe oświetlenie typu LED. Powiększenia obiektywów wynoszące 1x, 3x (standard), 5x i 10x pozwalają na uzyskanie pola obserwacyjnego wynoszącego odpowiednio 9,6x12,8mm, 3,2x4,3mm (standard), 1,9x2,2mm i 1x1,3mm. Dystans pomiarowy

wynosi dla wymienionych obiektywów odpowiednio 59mm, 72,5mm (standard), 59,5mm oraz 44mm.

Głowicą **QVP** można mierzyć otwory, szczeliny i rowki o wymiarach nawet mniejszych od 1mm z powtarzalnością na poziomie ufności  $\pm 3s$  wynoszącą  $\pm 1\mu m$ . Można także mierzyć automatycznie lub ręcznie zarysy, kontury i krawędzie różnych powierzchni niekoniecznie metalowych. Masa głowicy wynosi 310 gramów lub 385g z uchwytem do automatycznego jej mocowania lub 385g z uchwytem cylindrycznym. Głowica przewidziana jest do współpracy z głowicą obrotowo-uchylną np. **PH10M** firmy Renishaw i z oprogramowaniem **VISIONPAK** stanowiącego pakiet oprogramowania podstawowego **GEOPAK-WIN** firmy Mitutoyo.

#### 4. Podsumowanie

Ciągły postęp w wytwarzaniu części i urządzeń, szczególnie w przemyśle samochodowym, pociąga za sobą konieczność dostosowania maszyn pomiarowych do ich kontroli wymiarowej. Nowoczesne narzędzia pomiarowe muszą charakteryzować się przede wszystkim automatyzacją pomiarów łącząc szybkość zbierania punktów pomiarowych z zachowaniem wysokiej dokładności. Takie właśnie trendy obserwowane są w budowie zarówno samych współrzędnościowych maszyn pomiarowych jak również ich zespołów w postaci głowic pomiarowych. Ciągły postęp jaki dokonuje się w konstrukcji głowic pomiarowych ma na celu przystosowanie ich do spełniania skomplikowanych zadań pomiarowych z wysoką dokładnością i prędkością pomiarów. Doskonalone są oprogramowania sterujące, a zwłaszcza oprogramowania procedur pomiarowych. Dominujący trend to rozwój oprogramowań typu CAD, jak np. program **CALYPSO** (wciąż doskonalony) firmy C. Zeiss, **PC DMIS** firm zgrupowanych w **HEXAGON METROLOGY** oraz **METROLOG XG** będący uniwersalnym oprogramowaniem opracowanym przez francuską firmę **Metrologic Group**. W najbliższym czasie należy przewidywać modernizacje wszystkich oprogramowań w związku z zapowiedzią wprowadzenia przez Microsoft nowego oprogramowania systemu operacyjnego **Windows Vista** i szerszego stosowania 64 bitowych procesorów. Rozwijane są dodatkowe pakiety, związane z podstawowymi oprogramowaniami, przeznaczone do pomiarów specjalnych złożonych elementów maszynowych jak koła zębate, łopatki turbin, ale i do pomiarów digitalizacyjnych przestrzennych elementów, których przykładem jest pakiet **HOLOS** firmy C. Zeiss oraz pakiet **VAST-Navigator** przeznaczony do pomiaru kształtu np. elementów walcowych po spirali [7]. Rozwijane są oprogramowania do analizy statystycznej mierzonych przedmiotów przeznaczone do analizy jakości procesów wytwarzania i jakości wyrobów, których przykładem jest oprogramowanie **qs-STAT** stające się oprogramowaniem standardowym stosowanym przez większość liczących się firm produkcyjnych przemysłu motoryzacyjnego.

#### 5. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa Technika Pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2005.
- [2] Neumann H.J.: Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten. Expert Verlag, Renningen, 2004.
- [3] Nocuń M.: VAST rewolucjonizuje technikę pomiarów współrzędnościowych. *Mechanik* nr 1/1996.
- [4] Boucky O.: VAST XXX – The „other” scanning Probe Head from Carl Zeiss. *Innovation (Special Metrology C.Zeiss)* nr 6/2004, p.25.
- [5] Ratajczyk E., Woźniak A.: Nowe trendy w budowie stykowych głowic pomiarowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych. *Mechanik* nr 12 /2004, s.797-803.
- [6] Ratajczyk E., Woźniak A.: Nowe trendy w budowie bezstykowych głowic pomiarowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych. *Mechanik* nr 1/2005, s.32-36.
- [7] Nocuń M.: VAST-Navigator – skaning trzeciej generacji. *Mechanik* nr 3/2004, s. 140-142

**Title:** Trends in development of coordinate measuring techniques

Artykuł recenzowany