

6

Pomiary współrzędnościowe

Zbigniew Humienny

Zakres i cel ćwiczenia:

- Celem ćwiczenia jest praktyczne poznanie koncepcji pomiarów współrzędnościowych na przykładzie pomiaru części typu korpus. Ćwiczenie obejmuje zapoznanie się z głównymi zespołami współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP), Coordinate Measuring Machines (CMM), kluczowymi grupami poleceń rozwijalnego menu głównego oprogramowania maszyn pomiarowych (pomiar podstawowych elementów geometrycznych, przyporządkowanie układu współrzędnych, konstruowanie podstawowych elementów geometrycznych, wyznaczanie charakterystyk geometrycznych) oraz programowaniem pracy maszyny w trybie uczącym przez operatora bez modelu CAD wyrobu lub z modelem CAD wyrobu.
- Podstawowymi elementami korpusów są zazwyczaj dokładnie obrobione otwory oraz płaszczyzny. W ćwiczeniu kontrolowane jest wzajemne położenie tych powierzchni określone przez tolerancje kierunku lub położenia (m. in. równoległości, prostopadłości, współosiowości, pozycji) i wyznaczane są wartości średnic oraz odchyłki kształtu (okrągłości, walcowości, płaskości). Poza wiadomościami podanymi w instrukcji obowiązuje znajomość oznaczeń i interpretacji wymiaru oraz tolerancji geometrycznych (rozdział 4 skryptu Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów (GPS) S. Białas, Z. Humienny, K. Kiszka, OWPW, 2014)

Konieczne przyrządy i materiały:

- Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Altera firmy Nikon, z przegubem obrotowo-uchyłnym i głowicą skanującą SP25 firmy Renishaw, o zakresie pomiarowym 1000 mm \times 700 mm \times 600 mm i błędach granicznych dopuszczalnych $MPE_P = 1,6 \mu\text{m}$ i $MPE_E = (1,8 + 2,5L/1000) \mu\text{m}$ gdzie L jest mierzoną długością wyrażoną w mm. MPE_P – błąd graniczny dopuszczalny wymiaru głowicy pomiarowej. MPE_E – błąd graniczny dopuszczalny pomiaru długości. Wymienione wartości błędów podano dla pracy w temperaturze od 18 °C do 22 °C. Oprogramowanie pomiarowe CMM Manger firmy Nikon.
- Mierzony element typu korpus.

6.1 Wymagane wiadomości:

Istotą pomiarów współrzędnościowych realizowanych za pomocą współrzędnościowych systemów pomiarowych [1-5] jest wyznaczenie wartości współrzędnych poszczególnych punktów powierzchni mierzonego przedmiotu w przyjętym układzie współrzędnych (rys. 6). Przestrzenny przedmiot jest interpretowany jako kombinacja prostych elementów geometrycznych (płaszczyzna, walec, stożek, sfera, torus) oraz powierzchni swobodnych o złożonym kształcie (np. karoseria samochodu). Podczas pomiarów poszczególne elementy geometryczne są identyfikowane jako zbiory punktów w wybranym układzie współrzędnych – początkowo w układzie współrzędnych systemu, który po zlokalizowaniu powierzchni bazowych przedmiotu zostaje zastąpiony układem współrzędnych przedmiotu. Następnie oprogramowanie współrzędnościowego systemu pomiarowego przyporządkowuje poszczególnym zbiorom punktów odpowiednie elementy skojarzone (płaszczyznę, walec, stożek,...) zdefiniowane przez wektor położenia, wersor kierunku oraz wymiar lub zapamiętuje zbiory punktów w przypadku powierzchni swobodnych. Elementy skojarzone domyślnie są wyznaczone jako elementy średnie metodą najmniejszych kwadratów. Wyznaczone wartości liczbowe charakteryzujące elementy skojarzone wykorzystywane są w kolejnym etapie pomiaru do obliczeń weryfikujących zgodność wymiarów i geometrii sprawdzanego przedmiotu z podaną specyfikacją (np. rysunkiem). Gdy wyznaczenie danego elementu poprzez jego pomiar nie jest możliwe (np. punkt przecięcia osi otworu z płaszczyzną korpusu) stosowane są operacje konstruowania, które tworzą elementy (punkty, linie, okręgi, itp.) z wcześniej zmierzonych lub skonstruowanych elementów.

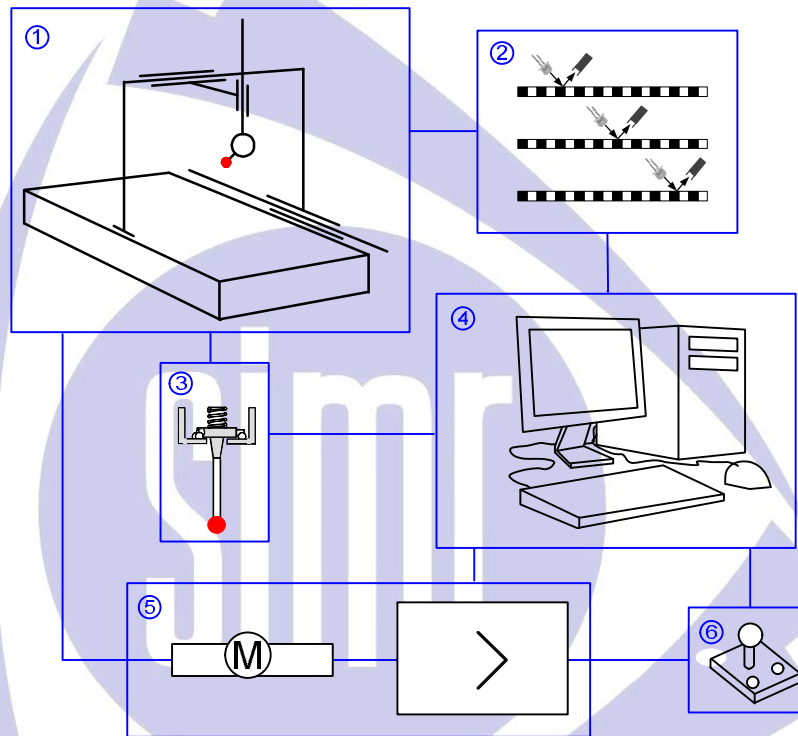
Na rys. 1 pokazano podstawowe zespoły funkcjonalne współrzędnościowej maszyny pomiarowej:

- (1) – zespół nośny z układem prowadnic i stołem pomiarowym (maszyny portalowe – rys. 5, wysięgnikowe, mostowe, kolumnowe). W skład zespołu nośnego każdej WMP wchodzi

m.in. pinola (rys. 5) tj. ruchoma część WMP, najczęściej belka o przekroju kwadratowym, do której przymocowany jest zespół głowicy pomiarowej;

- (2) – układy pomiarowe przemieszczeń wzdłuż osi x, y, z (najczęściej wzorce inkrementalne – rys. 2, 3, z czujnikami optoelektronicznymi);
- (3) – zespół głowicy pomiarowej stały lub coraz częściej z systemem zmiany położenia głowicy pomiarowej (przegubem obrotowo uchylnym) pozwalającym na optymalne ustawienie głowicy pomiarowej względem mierzonej powierzchni, przykładowo możliwy jest obrót głowicy wokół osi pinoli w zakresie $\pm 180^\circ$ oraz odchylenie głowicy od pionu do 105° z krokiem dyskretyzacji $7,5^\circ$ co daje 720 położenia głowicy; głowica pomiarowa impulsowa z przetwornikami tensometrycznymi/piezoelektrycznymi i elektrostykowym lub głowica skanująca z przetwornikami indukcyjnymi, trzpienie pomiarowe i przedłużacze. Na granitowym stole pomiarowym coraz częściej jako wyposażenie dodatkowe mocowany jest magazynek trzpieni, co umożliwia automatyczną wymianę trzpieni pomiarowych w trakcie realizacji cyklu pomiarowego. Trzpienie pomiarowe zakończone są najczęściej kulistymi końcówkami pomiarowymi wykonanymi z syntetycznego rubinu;
- (4) – komputer, urządzenia peryferyjne i oprogramowanie pomiarowe tj. oprogramowanie do obliczeń geometrycznych zintegrowane z oprogramowaniem sterującym zespołami napędów (maszyny CNC);
- (5) – sterowniki zarządzające pozycjonowaniem zespołów maszyny i zespoły napędowe realizujące przesuw portalu, wózka pinoli oraz pinoli;
- (6) – manipulator sterowania ręcznego.

Szacuje się, że od roku 1963, gdy firma DEA zaprezentowała pierwszą współrzędnościową maszynę pomiarową wyprodukowano ponad pół miliona maszyn. Obecnie większość produkowanych maszyn to maszyny mogące pracować w cyklu automatycznym (ze sterowaniem CNC pozwalającym wielokrotnie uruchamiać wcześniej napisany program pomiarowy).



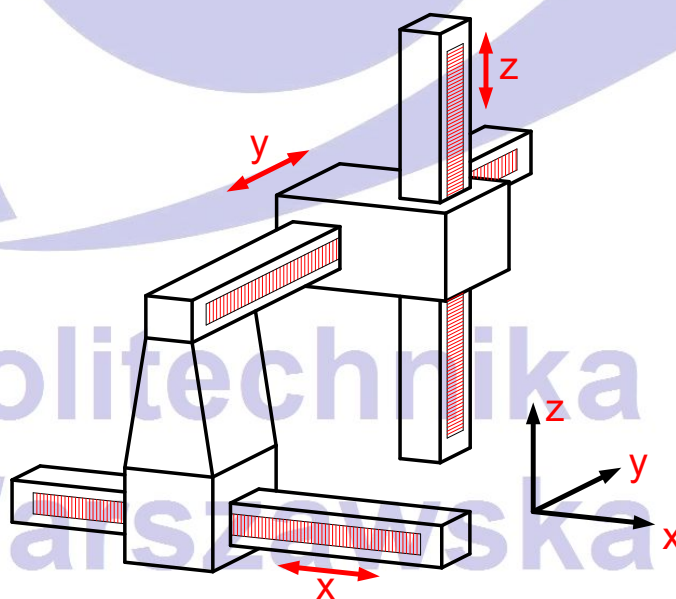
Rysunek 1. Podstawowe zespoły funkcjonalne współrzędnościowej maszyny pomiarowej:

(1) zespół nośny z układem prowadnic i stołem pomiarowym; (2) układy pomiarowe przemieszczeń wzdłuż osi x, y, z; (3) głowica pomiarowa; (4) komputer z oprogramowaniem sterującym i pomiarowym; (5) sterowniki i zespoły napędowe; (6) manipulator sterowania ręcznego

WMP mogą mieć różną strukturę i rozplanowaniem głównych zespołów. Maszyny o konstrukcji portalowej (rys. 5) są najpopularniejsze. Potrzeba stosowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn wynika m.in. z wymaganych zakresów pomiarowych i dostępności do przestrzeni pomiarowej, a także dopuszczalnego obciążenia stołu (masa i wymiary mierzonego elementu) oraz żądanego błędu granicznego dopuszczalnego pomiaru długości MPE_E . Niezależnie od typu WMP w każdej z nich można zastosować tę samą głowicę pomiarową. Innymi słowy dowolny typ głowicy pomiarowej można zastosować prawie w każdej WMP po zainstalowaniu odpowiednich sterowników i oprogramowania. Zarówno zastosowany rodzaj głowicy

pomiarowej, jak i wybrany typ rozwiązania konstrukcyjnego WMP zależy przede wszystkim od przedmiotu będącego obiektem badań i parametrów w zleconym pomiarze (np. jakie są wymiary i geometria przedmiotu, jaka jest żądana niepewność rozszerzona pomiaru, jaka powinna być wydajność pomiaru).

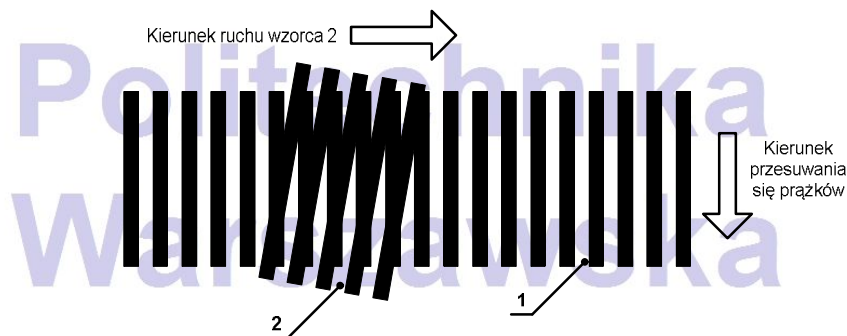
W konstrukcji współrzędnościowych maszyn pomiarowych, bardzo rozwiniętej w ostatnich kilkunastu latach, stosowane są różne oryginalne rozwiązania, z których przykładowo można wymienić prowadnice pneumatyczne (na zasadzie „poduszki powietrznej”) ciężkich zespołów, jak portal maszyny o schemacie wg rys. 2 i rys. 5; prowadnice te mają przy tym wystarczającą sztywność, ponadto nie występuje w nich tarcie i nie ulegają zużyciu. Jako materiał na stoły pomiarowe i prowadnice maszyn często stosowany jest granit, zapewniający znaczną trwałość, małe odkształcenia temperaturowe i stabilność wymiarów. Na stole znajdują się rowki lub gwintowane otwory nieprzelotowe do mocowania mierzonego przedmiotu. W najnowszych maszynach portal (kolumny portalu i belka portalu) oraz pinola są wykonywane z ceramiki.



Rysunek 2. Inkrementalne wzorce długości WMP

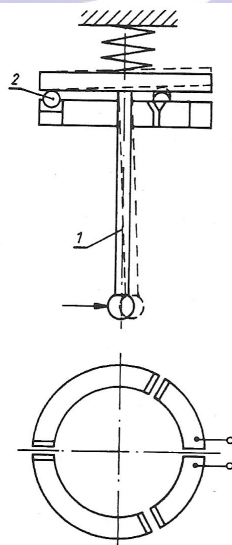
Maszyna jest wyposażona we wzorce długości dla każdej współrzędnej, z których odczyt współrzędnych (x, y, z) jest dokonywany po zetknięciu końcówki pomiarowej głowicy z powierzchnią badanego wyrobu. Tak więc głowica służy do lokalizacji punktów mierzonego przedmiotu w przestrzeni pomiarowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej, natomiast pomiar ich położenia jest realizowany za pomocą liniałów pomiarowych znajdujących się w każdej z osi maszyny (rys. 2).

W maszynach jako wzorce wykorzystywane są na ogół różne odmiany wzorców kreskowych, które należą do grupy wzorców inkrementalnych, z optoelektronicznymi urządzeniami odczytowymi. Wzorec inkrementalny to wzorec z na przemian aktywnymi i pasywnymi polami. Przykład zasady urządzenia odczytowego (systemu Moire'a) pokazuje rys. 3. Dwa rastry o podziałce rzędu 0,01 mm umieszczone są jeden nad drugim; raster 1 stanowi właściwy wzorec i jest zamocowany do nieruchomej prowadnicy, raster 2, skreślony pod małym kątem, jest połączony z ruchomym zespołem maszyny. Na skutek nakrywania się obu rastrów tworzą się ciemne prążki przesuwające się wzdłuż kresek rastrów w czasie ruchu rastra 2. Przesuwające się poprzecznie prążki są liczone za pomocą urządzenia fotoelektrycznego, a ich liczba jest analogiem długości przesunięcia ruchomego zespołu maszyny. We wzorcu inkrementalnym pracującym w świetle odbitym (wzorec 1) kolejne pola odbijają lub tłumią światło. We wzorcu inkrementalnym pracującym w świetle przechodzącym (wzorec 2) kolejne pola przepuszczają lub tłumią światło. Liniały o podziałce 0,02 mm, dzięki interpolacji sygnału zapewniają błąd odczytu pozycji $\pm 0,0001$ mm.



Rysunek 3. Schemat pokazujący położenie wzorców inkrementalnych podczas pomiaru na WMP

Maszyny współrzędnościowe są wyposażone w głowice pomiarowe stykowe lub (rzadziej) – bezstykowe. Głowica stykowa impulsowa (rys. 4) przypomina zasadą działania czujnik elektrostrykowy. Wychylenie, w dowolnym kierunku, końcówki pomiarowej 1 zawieszanej w trzech punktach 2 powoduje rozwarcie styków (przerwanie obwodu) i przesłanie odpowiedniego impulsu do układu pomiarowego, po czym następuje automatyczne odczytanie aktualnych współrzędnych (x, y, z) odniesionych do położenia końcówki pomiarowej. Kolejną istotną rolą głowic pomiarowych stykowych impulsowych jest wykorzystanie generowanego sygnału do zatrzymania napędów WMP we wszystkich osiach maszyny w momencie styku z powierzchnią mierzona. Przesyłanie informacji o styku z przedmiotem mierzonym do komputera sterującego współrzędnościową maszyną pomiarową, powoduje zatrzymanie ruchu WMP, przy czym następuje odczyt zarejestrowanej pozycji, a następnie realizowane jest automatyczne wycofanie głowicy (odsunięcie końcówki pomiarowej głowicy impulsowej od mierzonej powierzchni). Powtarzalność pomiaru jednokierunkowa dla elektronicznych głowic impulsowych z przetwornikami tensometrycznymi lub piezoelektrycznymi jest rzędu $0,5 \mu\text{m}$ przy nacisku pomiarowym rzędu $0,02 \text{ N}$ w kierunkach prostopadłych do osi głowicy oraz $0,07 \text{ N}$ w kierunku osi głowicy.



Rysunek 4. Głowica impulsowa elektrostrykowa (schemat)

Oprócz głowic impulsowych coraz częściej stosowane są głowice mierzące, wyposażone w mikroprzetworniki indukcyjne lub optoelektroniczne. Przetworniki pomiarowe pracują oddzielnie dla każdej z osi, a nacisk pomiarowy może być proporcjonalny do wychylenia trzpienia pomiarowego głowicy (głowice pasywne) lub może być stały (głowice aktywne dynamicznie utrzymujące stałą wartość nacisku bez względu na wychylenie trzpienia). Wartość współrzędnych punktów jest sumą sygnału z indukcyjnego systemu pomiarowego głowicy oraz współrzędnych położenia głowicy zarejestrowanych przez komputer maszyny. Proces ten odbywa się równocześnie dla każdej z trzech osi. Maszyny z głowicami mierzącymi należą do najdokładniejszych i mogą pracować zarówno w trybie impulsowym (gdy sygnałem odczytu współrzędnych jest zerowy stan głowicy), jak i w trybie skanowania, mierząc w sposób ciągły zarys krzywoliniowy przy stałym styku końcówki pomiarowej z mierzoną powierzchnią. Zalety pomiarów skaningowych są oczywiste – zdecydowanie większa liczba punktów pomiarowych uzyskana w krótszym czasie, co pozwala m.in. na lepszą ocenę wymagania powłoki dla wałków i otworów oraz odchyłek geometrycznych, w szczególności odchyłek kształtu wyznaczonego profilu/powierzchni.

Czołowym producentem głowic impulsowych i mierzących jest firma Renishaw dostarczająca głowice oraz systemy zmiany położenia głowic (przeguby obrotowo-uchylne) i magazynki trzpieni oraz głowic praktycznie wszystkim producentom maszyn.

Niektóre zadania pomiarowe nie mogą być wykonane przy użyciu głowic pomiarowych stykowych. Najczęściej przyczyną jest mała sztywność materiału, z którego wykonana jest część (np. fotele samochodowe), konieczność szybkiego zebrania dużej liczby punktów pomiarowych (np. podczas pomiaru blach karoseryjnych przy ich masowej produkcji), bardzo małe wymiary elementu, lub obawa, iż surowa powierzchnia wyrobu może uszkodzić kulkę pomiarową. W głowicach bezstykowych (optycznych) wykorzystuje się różne układy fotooptyczne. W konstrukcji laserowych głowic triangulacyjnych wykorzystano znaną w geodezji zasadę triangulacyjnego wyznaczania odległości. Nowoczesne głowice laserowe w odróżnieniu od typowej głowicy triangulacyjnej generującej pojedynczą plamkę świetlną, generują wiązkę świetlną o długości rzędu 100 mm, umož-

liwiająca uzyskanie ponad 75 tys. wartości współrzędnych punktów na sekundę. Głowica laserowa z wiązką znajduje zastosowanie do pomiaru części karoserii, np. drzwi samochodowych oraz całych karoserii. Błędy pomiaru głowic laserowych z wiązką świetlną są rzędu 0,02÷0,01 mm.

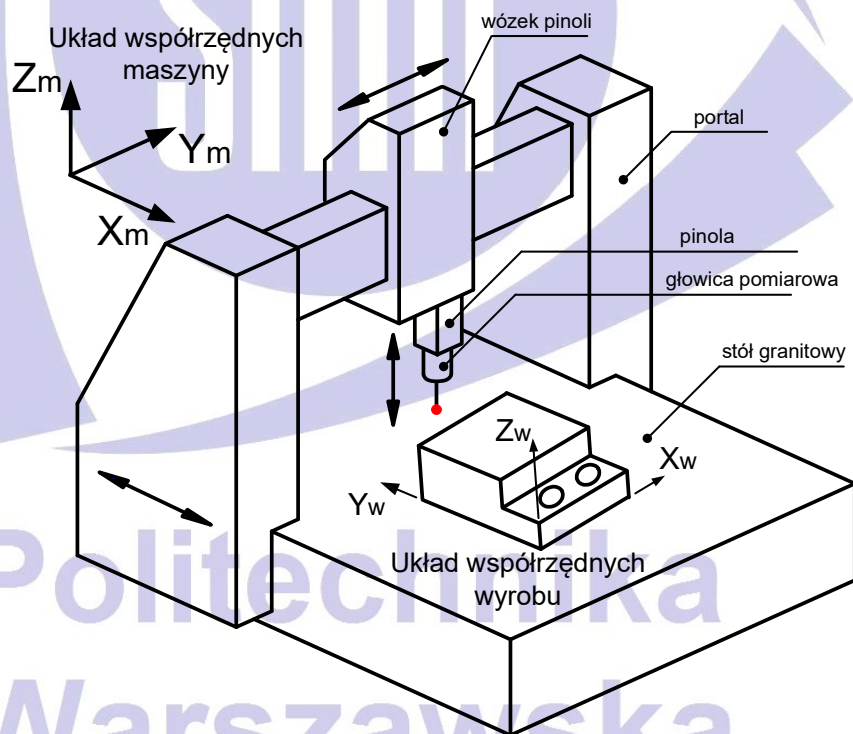
Najnowsze rozwiązania głowic optycznych – głowice rejestrujące obraz zawierają automatyczne układy analizowania obrazu otrzymywanego z kamer o dużej rozdzielczości i są wykorzystywane przede wszystkim do pomiarów elementów o dużej powierzchni i niewielkiej wysokości (np. płytki układów elektronicznych).

Każda współrzędnościowa maszyna pomiarowa musi być wyposażona we wzorzec – kulę wzorcową posiadającą świadectwo wzorcowania wystawione przez laboratorium akredytowane. Kula wzorcowa służy do kwalifikacji, czyli określenia aktualnej dynamicznej średnicy rubinowej kulki pomiarowej stanowiącej końcówkę trzpienia pomiarowego zamocowanego w głowicy pomiarowej oraz ustalenia współrzędnych przestrzennych środka tej kulki. Średnica kulki pomiarowej wyznaczona w procesie kwalifikacji jest automatycznie uwzględniana w algorytmach obliczeniowych wykorzystywanych do wyznaczenia wymiarów oraz odchyłek geometrycznych w sprawdzanym wyrobie. Jeśli na maszynie zainstalowano system zmiany położenia głowicy pomiarowej (przegub obrotowo-uchyłny) to należy skalibrować wszystkie potrzebne położenia kątowe głowicy. Analogicznie przy końcówkach wielotrzpieniowych należy dokonać kwalifikacji wszystkich końcówek. Współrzędne punktów styku na powierzchni przedmiotu są wyznaczane przez oprogramowanie maszyny poprzez uwzględnienie wektora korekcji obliczonego automatycznie na podstawie wyników kwalifikacji, kierunku najazdu końcówki pomiarowej na mierzoną powierzchnię wyrobu oraz typu mierzonej powierzchni. Niektórzy dystrybutorzy i użytkownicy współrzędnościowych maszyn pomiarowych zamiast terminu *kwalifikacja zespołu głowicy pomiarowej* przyjętego w normie PN-EN ISO 10360-1 stosują termin *kalibracja zespołu głowicy pomiarowej*.

Po wnikliwej analizie wymagań geometryczno-wymiarowych podanych w dokumentacji wyrobu, a przed rozpoczęciem pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej należy:

- wybrać sposób ustalenia i mocowania przedmiotu na stole maszyny;
- wybrać konfigurację trzpieni pomiarowych (długość trzpieni, usytuowanie katowe trzpieni, średnice końcówek trzpieni);
- określić przebieg pomiaru w tym strategię pomiarowe dla poszczególnych elementów geometrycznych wyrobu oraz sposób opracowania wyników, obejmujący m.in. wybór kryteriów kojarzenia elementów zastępczych z zaobserwowanymi chmurami punktów reprezentującymi mierzone elementy geometryczne.

Pomiary na WMP zawsze należy rozpocząć od wyznaczenia układu współrzędnych wyrobu (rys. 5).



Rysunek 5. Podstawowe zespoły konstrukcyjne WMP portalowej oraz układ współrzędnych wyrobu określony wirtualnie w układzie współrzędnych maszyny

Właśnie w tym układzie w modelu CAD konstruktor określił geometrię wyrobu i tolerancje geometryczne definiujące granice na ile wyrób rzeczywisty może odbiegać od geometrii nominalnej, tak aby nadal spełniał oczekiwane wymagania funkcjonalne. Układ współrzędnych wyrobu jest określany przez próbkowanie punktów, które definiują układ współrzędnych wyrobu. Należy mieć świadomość, że pomiary współrzędnych punktów na powierzchni wyrobu dokonywane są cały czas w układzie współrzędnych maszyny zdefiniowanym przez osie wzorców inkrementalnych. Procesor komputera oblicza odpowiednie ścieżki pomiarowe w układzie współrzędnych maszyny i tylko wartości odpowiednich charakterystyk geometrycznych (np. odchyłki pozycji osi otworu względem układu trzech baz) w ostatecznym raporcie pomiarowym są podane w układzie współrzędnych wyrobu.

Warto podkreślić, że przy pomiarach współrzędnościowych różne strategie próbkowania dają na ogół różne wyniki pomiarów dla tej samej powierzchni. Związane jest to z pomiarem skończonej liczby dyskretnych punktów na mierzonej powierzchni (Tab. 1), zdefiniowanej w rzeczywistości przez nieskończoną liczbę punktów.

Tabela 1. Parametry definiujące podstawowe elementy geometryczne oraz teoretyczna (matematycznie minimalna) i zlecana liczba punktów pomiarowych

ELEMENT	Wektor położenia $P (X_o, Y_o, Z_o)$	Wersor kierunku $E (E_x, E_y, E_z)$	Wymiar	Teoretyczna minimalna liczba punktów	Zalecana minimalna liczba punktów
<i>Płaszczyzna</i>	<i>Punkt na płaszczyźnie</i>	<i>Normalny do płaszczyzny</i>	—	3	4
<i>Walec</i>	<i>Punkt na osi</i>	<i>Kierunek osi</i>	<i>Średnica</i>	5	8
<i>Stożek</i>	<i>Punkt na osi</i>	<i>Kierunek osi</i>	<i>Kąt stożka</i>	6	12
<i>Sfera</i>	<i>Środek kuli</i>	—	<i>Średnica</i>	4	6
<i>Prosta</i>	<i>Punkt na prostej</i>	<i>Kierunek prostej</i>	—	2	3
<i>Okrąg</i>	<i>Środek</i>	<i>Normalny do płaszczyzny</i>	<i>Średnica</i>	3	4

W wyniku pomiaru otrzymuje się jedynie przybliżony obraz powierzchni. Ustalenie strategii pomiarowej obejmuje m. in.

określenie liczby i usytuowania punktów pomiarowych. Przykładowo przy pomiarze otworu głowicą impulsową należy określić liczbę mierzonych przekrojów i liczbę punktów pomiarowych w każdym przekroju. Na ogół przekroje rozmieszcza się równomiernie na długości otworu. Również równomiernie rozmieszcza się punkty w każdym przekroju. Przy pomiarach otworu głowicą skanującą po linii śrubowej należy ustalić skok tej linii. Kolejną wielkością wpływającą na wynik pomiaru jest średnica kulistej końcówki pomiarowej, która pełni rolę filtra mechanicznego o asymetrycznej charakterystyce. Końcówki o większej średnicy częściowo "wygładzają" mierzoną powierzchnię ponieważ nie penetrują wszystkich wgłębień w powierzchni natomiast wykrywają nawet najostrejsze wzniesienia.

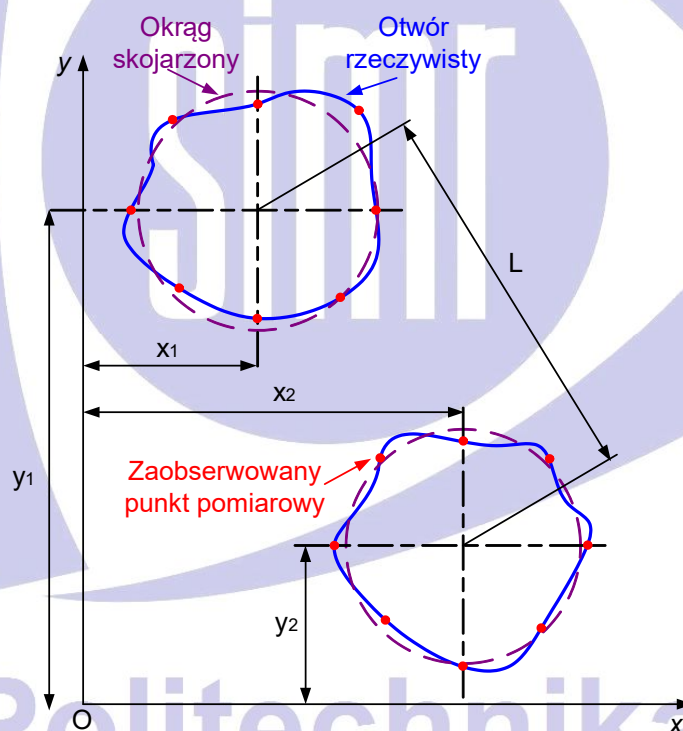
Oprogramowanie WMP służy do sterowania procesem pomiarowym oraz akwizycji, analizy i archiwizacji wyników. Oprogramowanie realizuje następujące funkcje:

- komunikację operatora z systemem;
- kwalifikację i konfigurację trzpieni pomiarowych;
- definiowanie układu współrzędnych związanego z mierzonym przedmiotem;
- wyznaczanie poszczególnych elementów geometrycznych przedmiotu i ich charakterystyk geometrycznych (np. średnic i odchyłek kształtu);
- wyznaczanie wzajemnych relacji między elementami przedmiotu (pomiary odchyłek kierunku, położenia, bicia i kształtu wyznaczonego zarysu/powierzchni);
- opracowanie i drukowanie wyników pomiaru;
- tworzenie przebiegów CNC w trybie uczenia przez operatora podczas pomiaru wyrobu z wykorzystaniem manipulatora lub w oparciu o przestrzenny model CAD wyrobu.

Podstawowe oprogramowanie WMP umożliwia łatwe pomiary odległości osi otworów (rys. 6), pomiary odchyłek kształtu, kierunku położenia i bicia, oraz elementarne pomiary złożonych brył (np. uzębień). Procedura pomiarowa obejmuje zebranie wartości współrzędnych pewnej liczby punktów mierzonej powierzchni rzeczywistej, a następnie identyfikację elementu za-

stępczego. We metrologii współrzędnościowej elementem zastępczym jest najczęściej domyślnie element średni, przy czym w przypadku elementów bazowych elementem zastępczym jest z reguły domyślnie element przylegający. Współczesne oprogramowanie maszyn współrzędnościowych umożliwia operatorowi wybór odpowiedniego elementu zastępczego.

Oprogramowanie WMP ma charakter uniwersalny, bądź specjalny, przystosowany do pewnego szczególnego zadania pomiarowego np. pomiary łopatek silników lotniczych i turbin, uzębień, wielowypustów, blach karoserii samochodowych.



Rysunek 6. Zasada procedury pomiaru odległości osi dwóch otworów

Procedura pomiaru odległości osi dwóch otworów walcowych o niewielkiej głębokości obejmuje następujące kroki:

- a) wykonanie pomiarów współrzędnych (x, y) kilku (minimum 4) punktów powierzchni pierwszego otworu;
- b) analogiczne pomiary dla drugiego otworu;

- c) identyfikacja pierwszego okręgu skojarzonego (okręgu średniego) – istotne jest jedynie wyznaczenie współrzędnych (x_1, y_1) jego środka;
- d) identyfikacja drugiego okręgu skojarzonego (okręgu średniego) – współrzędne (x_2, y_2) jego środka;
- e) wyznaczenie odległości środków obu okręgów średnich z zależności

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

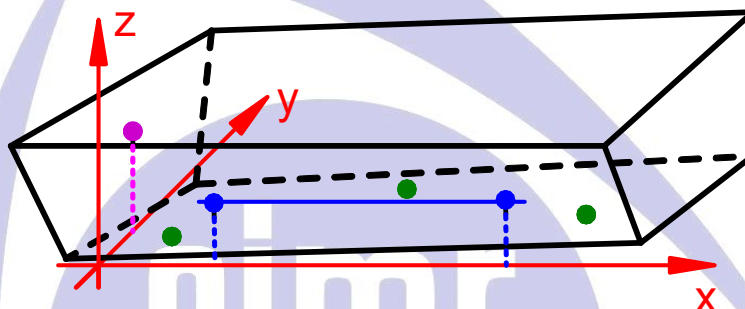
Kroki a) i b) obejmują właściwe czynności pomiarowe, kroki c) – e) zawierają automatyczne opracowanie wyników pomiaru.

Uwaga: Pokazana procedura umożliwia jedynie wyznaczenie odchyłki wzajemnej pozycji dwóch otworów. Dla tolerancji pozycji względem układu baz pomiaru należy rozpocząć od ustalenia układu współrzędnych wyrobu zgodnie z podanym układem baz.

Na rys. 7 pokazano konstruowanie układu współrzędnych wyrobu metodą 3-2-1. Wymieniony ciąg liczb określa liczbę stopni swobody wyrobu odbieranych w kolejnych krokach. Przy stosowaniu minimalnej liczby punktów ciąg liczb określa również liczbę punktów zbieranych w kolejnych krokach tej metody. W metodzie 3-2-1:

- baza główna odbiera trzy stopnie swobody, zbierane są trzy punkty pomiarowe z powierzchni nominalnie płaskiej bazy głównej wyrobu (na rysunku podstawa płytki). Jeżeli wyrób stoi na stole pomiarowym współrzędnościowej maszyny pomiarowej to trzy punkty zbiera się z granitowej powierzchni stołu. Trzy punkty wyznaczają płaszczyznę xy oraz kierunek osi z układu współrzędnych wyrobu;
- baza drugorzędna odbiera kolejne dwa stopnie swobody, zbierane są dwa punkty z powierzchni nominalnie płaskiej bazy drugorzędnej wyrobu (na rysunku dłuższa ścianka boczna płytki). Punkty te wyznaczają prostą. Rzut tej prostej na uprzednio wyznaczoną płaszczyznę xy wyznacza oś x układu współrzędnych wyrobu;
- baza trzeciorzędna odbiera ostatni szósty stopień swobody, zbierany jest jeden punkt z powierzchni nominalnie płaskiej

bazy trzeciorzędnej wyrobu (na rysunku krótsza ścianka boczna płytki). Rzut punktu zebranego z bazy trzeciorzędnej na oś x wyznacza jej punkt zerowy, a więc początek układu współrzędnych $Oxyz$ wyrobu.



Rysunek 7. Konstruowanie układu współrzędnych wyrobu metodą 3-2-1

Punkty próbkowania powinny być rozmieszczone możliwie daleko od siebie, aby odchyłki kształtu powierzchni bazowych i przypadkowe błędy pomiaru miały nieznaczny wpływ na określenie układu współrzędnych wyrobu.

Metoda 3-2-1 jest często stosowana jako szybka i prosta. Niestety ze względu na małą liczbę punktów przy wyrobach o znacznych odchyłkach kształtu i kierunku powierzchni bazowych układ baz jest wyznaczany mało dokładnie. Dlatego zaleca się na każdej ze ścianek wyrobu zebrać większą liczbę punktów i bazy konstruować kolejno jak płaszczyzny:

- baza główna płaszczyzna przylegająca do powierzchni nominalnie płaskiej wskazanej jako baza główna wyrobu. Baza główna wyznacza płaszczyznę xy oraz kierunek osi z układu współrzędnych wyrobu;
- baza drugorzędna płaszczyzna prostopadła do bazy głównej (płaszczyzny przylegającej) i stykająca się z powierzchnią nominalnie płaską wskazaną jako baza drugorzędna wyrobu. Prosta będąca przecięciem tych płaszczyzn jest osią x układu współrzędnych wyrobu;
- baza trzeciorzędna płaszczyzna prostopadła do bazy głównej oraz bazy drugorzędnej i stykająca się z powierzchnią nominalnie płaską wskazaną jako baza trzeciorzędna wyrobu;

bu. Przecięcie tych trzech płaszczyzn wyznacza początek układu współrzędnych Oxyz wyrobu.

Pomiar maszyną współrzędnościową w najprostszym przypadku jest „ręczny”; operator przesuwając kolejno głowicę pomiarową wykorzystując dźwignię manipulatora (mierząc np. współrzędne punktów wg rys. 6), układ pomiarowy zbiera odpowiednie wartości współrzędnych, po czym komputer oblicza wynik wg przyjętej procedury. Współczesne maszyny współrzędnościowe zapewniają jednak pomiary w pełni automatyczne, wg odpowiedniego programu wpisanego do pamięci komputera maszyny. Programy takie mogą być przygotowane dla wszystkich wyrobów produkowanych w danym zakładzie. Często programy pomiarowe pisane są w trybie off-line jedynie w oparciu o model CAD wyrobu. Podczas pomiaru automatycznego cały cykl, po uruchomieniu przez operatora, przebiega dalej bez jego ingerencji; zespoły maszyny przesuwają się napędzane silnikami sterowanymi odpowiednim programem.

O niepewności pomiaru za pomocą maszyny decyduje suma błędów głowicy i błędów układów odczytu przemieszczeń zespołu głowicy pomiarowej oraz szereg innych czynników. M.in. konstrukcja maszyny (maszyny portalowe, maszyny wysięgnikowe, ...), oprogramowanie pomiarowe, warunki środowiskowe pomiaru (temperatura, gradient przestrzenny temperatury, gradient czasowy temperatury, wilgotność, ...), wyrób (odchyłki kształtu mierzonych powierzchni – ich charakter i wartości, materiał, wymiary, masa, zanieczyszczenia, właściwości optyczne powierzchni wyrobu, ...), operator (orientowanie i mocowanie wyrobu, układ trzpieni pomiarowych, wyposażenie pomocnicze, skrupulatność, zachowanie czystości, ...), strategia pomiarowa (metoda próbkowania, liczba punktów pomiarowych, rozmieszczenie punktów pomiarowych, metody oceny, filtracja, elementy zastępcze, ...). Praktyka pokazała, iż bardzo istotny wpływ na wynik pomiaru mają decyzje podjęte przez operatora w szczególności: poprawna interpretacja wymagań geometryczno-wymiarowych podanych na rysunku, wybór strategii pomiarowej oraz sposobu ustalenia i mocowania wyrobu.

Producenci współrzędnościowych maszyn pomiarowych opisują ich charakterystyki metrologiczne m.in. poprzez podanie błędów granicznych dopuszczalnych pomiaru długości MPE_E oraz

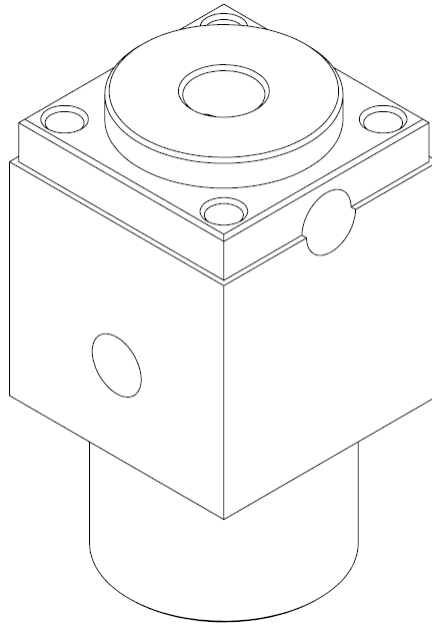
błędu granicznego dopuszczalnego głowicy pomiarowej w trybie próbkowania punktowego MPE_p . Wszystkie współrzędnościowe maszyny pomiarowe, tak jak całe wyposażenie pomiarowe firmy powinny być wzorcowane. Wzorcowanie to działanie, które w określonych warunkach ustala zależność pomiędzy wskazaniami przyrządu pomiarowego wraz z ich niepewnościami, a wartościami wielkości odwzorowywanymi przez wzorzec pomiarowy wraz z ich niepewnościami pomiaru.

Badanie maszyny należy rozpocząć od wyznaczenia błędu głowicy pomiarowej. Błąd głowicy pomiarowej jest wyznaczany na podstawie pomiaru 25 punktów o zalecanym rozmieszczeniu na połowie kuli badawczej i obliczenia rozstępu odległości promieniowych dla 25 punktów od środka kuli wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów. Błąd pomiaru długości jest wyznaczany na podstawie 135 pomiarów wywzorcowanych długości (najczęściej reprezentowanych przez płytki wzorcowe lub wzorce schodkowe). Badanie odbiorcze i okresowe WMP obejmuje pomiar pięciu wywzorcowanych długości badanych umieszczonych wzdłuż czterech przekątnych przestrzennych przestrzeni pomiarowej WMP oraz równoległe do każdej z osi WMP. Każdą długość należy zmierzyć 3 razy, co daje w sumie 105 pomiarów bez offsetu końcówki pomiarowej. Ponadto wykonuje się 30 pomiarów długości przy offsecie 150 mm końcówki trzpienia względem osi pinoli (w dwóch położeniach każdą z pięciu wywzorcowanych długości mierzy się trzykrotnie). Szczegółowe procedury badań odbiorczych i okresowych współrzędnościowych maszyn pomiarowych i ich głowic podano w normach PN-EN ISO 10360-2:2009P oraz PN-EN ISO 10360-5:2010P.

6.2 Mierzony element:

Na rys. 8 pokazano mierzony element. Przed przystąpieniem do laboratorium należy wykonać rysunek 2D wyrobu i zaznaczyć na odpowiednich widokach/przekrojach dla wybranych powierzchni: wymaganie powłoki oraz tolerancje okrągłości, walcowości, płaskości, prostopadłości (różne przypadki m. in. oś-płaszczyzna, oś-oś, płaszczczyzna-płaszczyzna, płaszczczyzna-

układ dwóch płaszczyzn, ...), równoległości (różne przypadki m. in. płaszczyzna-płaszczyzna, oś-układ dwóch płaszczyzn, ...), współosiowości, pozycji otworu względem układu trzech baz, pozycji szyku 4 otworów względem układu trzech baz, bicia obwodowego promieniowego, bicia całkowitego promieniowego, bicia obwodowego osiowego, bicia całkowitego osiowego.



Rysunek 8. Mierzony element (przykład)

Literatura

1. Białas S., Humienny Z., Kiszka K.: Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów (GPS), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
2. Humienny Z. (red.): Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podręcznik europejski. WNT Warszawa, 2004.
3. Jakubiec W. Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. WNT, Warszawa, 2004.
4. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
5. Hocken R.J., Pereira P.H.: Coordinate Measuring Machines and Systems. Taylor & Francis, 2012.