

**Dr inż. Elżbieta Jacniacka**

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

E-mail: [e.jacniacka@pollub.pl](mailto:e.jacniacka@pollub.pl)

**Dr inż. Leszek Semotiuk**

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

E-mail: [l.semotiuk@pollub.pl](mailto:l.semotiuk@pollub.pl)

## **Doświadczalne metody wyznaczania niepewności pomiaru sondami przedmiotowymi**

**Słowa kluczowe:** *niepewność pomiaru, obrabiarki CNC, sonda przedmiotowa.*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki wyznaczania niepewności pomiaru sondą przedmiotową na frezarkach pionowych sterowanych numerycznie. Do pomiarów zaadaptowano metody opracowane dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dla systemu pomiarowego składającego się z centrum obróbkowego FV580A i sondy OMP 60 wyznaczono niepewność pomiaru: współrzędnych punktu, jednowymiarowego pomiaru długości, dwuwymiarowego pomiaru długości oraz pomiaru długości z zastosowaniem przedmiotu niekalibrowanego.

### **1. Wstęp**

Sondy przedmiotowe zwane także sondami inspekcyjnymi, coraz częściej są standardowym wyposażeniem obrabiarek CNC. Wykorzystuje się je przede wszystkim do określania położenia przedmiotu w przestrzeni roboczej obrabiarki oraz międzyzabiegowej kontroli wymiarowej. Jednakże rozwój oprogramowania oraz specjalnego wyposażenia obrabiarek zwiększa możliwości eksploatacyjne wewnątrzobrabiarkowych systemów pomiarowych. Integracja programów pomiarowych z systemami sterowania obrabiarek pozwoliła na stworzenie specjalnych interfejsów programowych takich jak PC-DMIS NC GAGE lub STEP-NC. Systemy te pozwalają na tworzenie cykli pomiarowych bezpośrednio na obrabiarence, bez wykorzystania postprocesorów. Pozwalają też na tworzenie raportów z przeprowadzonych pomiarów. Rozwój nowoczesnego oprogramowania (OMV) umożliwia też kontrolę zgodności wymiarowej obrabianego przedmiotu w porównaniu z modelem CAD. Możliwe też jest zastosowanie inżynierii odwrotnej.

Eksploatacja obrabiarki wyposażonej w przedmiotową sondę pomiarową bez względu na sposób jej wykorzystania wymaga określenia niedokładności pomiaru takiego systemu. Wykorzystanie sondy pomiarowej do lokalizacji punktu zerowego w przypadku obróbki w kilku zamocowaniach może kumulować błędy pomiarowe, co w konsekwencji może prowadzić do niezgodności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów.

### **2. Niedokładność pomiaru sondami przedmiotowymi**

Wyznaczenie niepewności pomiaru sondą przedmiotową jest zagadnieniem złożonym. Producenci sond przedmiotowych, jako parametr charakteryzujący niedokładność podają zazwyczaj powtarzalność jednokierunkową ( $2\sigma$ ). Jest to tylko jeden z wielu składników budżetu niepewności. Innymi składnikami związanymi z sondą jest jej kalibracja, kierunek dojazdu końcówki do przedmiotu mierzonego [2], czy też powtarzalność mocowania [9].

Na dokładność pomiarów sondami przedmiotowymi ma wpływ cały układ OUPN. Dlatego dokładności: geometryczna i kinematyczna obrabiarki, stosowanych wzorców i pozycjonowania mają znaczący wpływ na dokładność pomiarów [2, 13, 14]. Nie opracowano dotąd jednolitych metod wyznaczania niepewności pomiaru systemu pomiarowego z zastosowaniem sondy inspekcyjnej. W pracach [13] i [14] autorzy do oceny niedokładności pomiaru wykorzystują różnicę pomiędzy wynikiem pomiaru średnicy otworu sondą i maszyną współrzędnościową. Zaobserwowane różnice przyjmują bardzo duże wartości, dochodzące nawet do 1mm. W pracy [2] na podstawie wyników pomiaru dokładności geometrycznej obrabiarki interferometrem laserowym i pomiaru certyfikowanej kuli wzorcowej sporządzono mapę błędów uwzględniającą niestabilność drogi przełączania w zależności od kierunku dojazdu. Autorzy [5] wykorzystują różnicę pomiędzy zmierzonymi sondą wymiarami przed i po pierwszym i drugim przejściem narzędzia obróbkowego. Przedstawione w [2, 5, 13, 14] wyniki pomiarów i ocena niedokładności systemu pomiarowego z sondą inspekcyjną, służyły, po zastosowaniu wybranych metod matematycznych, do korekcji toru narzędzia, co według autorów dało spodziewane rezultaty poprawy jakości wyrobu. Jednak zaprezentowane metody wyznaczania niedokładności nie mogą być stosowane do oceny niedokładności kontroli wymiarów między zabiegami i po zakończeniu obróbki. Takie zastosowanie może znaleźć opisana w [11] metoda oparta na pomiarze końcowych wzorów długości, według procedur przeznaczonych do sprawdzania współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Źródłem błędów pomiaru oprócz systemu pomiarowego (błędy instrumentalne) jest przedmiot mierzony [1]. Istotne znaczenie w przypadku wewnątrzobrabiarkowych systemów pomiarowych odgrywa niepewność systematyczna pochodząca od temperatury mierzonego przedmiotu. Znaczne ilości ciepła generowanego w trakcie procesu obróbki (nawet do 20% [6]), akumulowane są wewnątrz przedmiotu obrabianego i powodują wzrost jego temperatury. Rozkład temperatury w objętości obrabianego przedmiotu jest nierównomierny, co skutkuje nierównomiernymi odkształceniami [6]. Również w [3] analizowany jest problem odkształceń cieplnych powstających w trakcie obróbki profilu cienkościennego. Obserwowano zmianę w czasie rozkładu temperatury i odkształceń cieplnych. W obydwu przypadkach rozkłady były nierównomierne, a obszary maksymalnych odkształceń w niewielkim stopniu odpowiadały obszarom, na których zaobserwowano maksymalną temperaturę. Po zakończeniu obróbki zanotowano dalszy wzrost odkształceń. Jest to bardzo istotne ze względu na zastosowanie sond pomiarowych. Niestety eksperyment przerwano po 5 sekundach od zakończenia obróbki. Czas potrzebny na wymianę narzędzia na sondę przedmiotową oraz trwania samego cyklu pomiarowego jest przeważnie znacznie dłuższy. Dlatego też kolejnym istotnym zagadnieniem dotyczącym niepewności pomiaru jest określenie, jak zmieniają się wymiary przedmiotu po zakończeniu obróbki w czasie stygnięcia.

### 3. Metodyka i wyniki pomiarów

System pomiarowy składał się z centrum obróbkowego FV 580A z systemem sterowania Fanuc 0iMC wyposażonego w bezpośredni układ pomiarowy oraz ze stykowej sondy przedmiotowej OMP 60 firmy Renishaw. Maksymalne przesuwu stołu i wrzeciona obrabiarki wynoszą dla: osi X – 580 mm, osi Y – 420 mm i dla osi Z – 520 mm. Obrabiarka znajduje się na wyposażeniu Katedry Podstaw Inżynierii Obróbki i wykorzystywana jest do prowadzenia prac badawczych przez pracowników Katedry oraz na potrzeby prowadzonych prac dyplomowych. Parametry techniczne sondy przedmiotowej zamieszczono w tab.1.

Tab. 1. Specyfikacja techniczna sondy OMP 60.

Kierunki działania	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Typ transmisji	optyczna - podczerwień 360°

Zakres transmisji	6m
Powtarzalność jednokierunkowa (2 $\sigma$ z typowym trzpieniem)	$\pm 1\mu\text{m}$
Nacisk pomiarowy płaszczyzna XY minimum płaszczyzna XY maksimum w kierunku osi +Z	0,75 N 1,4 N 5,3 N
Droga przełączania Płaszczyzna XY w kierunku osi +Z	$\pm 18^\circ$ 11mm

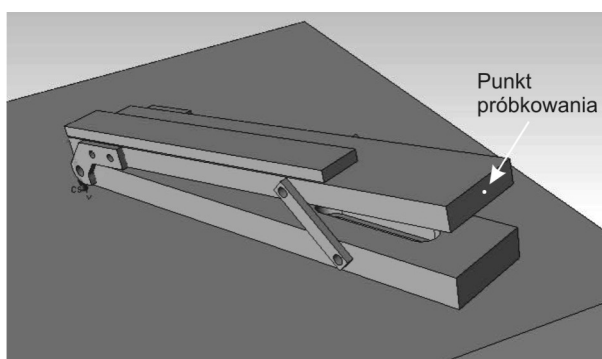
Sondy inspekcyjne wykorzystują współrzędnościową technikę pomiarową. Dotychczas nie opracowano standardów wyznaczania niepewności pomiarów dla sond inspekcyjnych. W pracy zaadaptowano metody opracowane dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dla systemu pomiarowego składającego się z centrum FV 580 A i sondy OMP 60 wyznaczono niepewność pomiaru:

- współrzędnych punktu,
- jednowymiarowego pomiaru długości,
- dwuwymiarowego pomiaru długości,
- pomiaru długości z zastosowaniem przedmiotu niekalibrowanego.

Wyznaczając niepewność pomiaru współrzędnych punktu, jednokierunkowego oraz dwukierunkowego pomiaru długości wykorzystano algorytmy obliczeniowe stosowane dla wzorcowania przyrządów i systemów pomiarowych opisane w [4]. Natomiast wyznaczanie niepewności długości z zastosowaniem przedmiotu niekalibrowanego w oparciu o wytyczne z [8].

### 3.1. Niepewność pomiaru współrzędnych punktu

Na powtarzalność pomiaru współrzędnych punktu ma wpływ powtarzalność pozycjonowania oraz stabilność drogi przełączania. Pomiary współrzędnych punktu wykonano dla punktu leżącego na płaszczyźnie pomiarowej płytki wzorcowej klasy 1. Płytkę umieszczono w specjalnie zaprojektowanym uchwycie, który umożliwił ustawienie płytki tak, aby jej płaszczyzny pomiarowe nie były równoległe do żadnej z płaszczyzn bazowych obrabiarki. Na rys. 1 zaprezentowano model uchwytu.



Rys 1. Model uchwytu wykorzystanego do pomiaru współrzędnych punktu

Współrzędne składowych wektora normalnego do płaszczyzny pomiarowej wynosiły  $[-0,8924; -0,4462; -0,0667]$ . Wykonano po 10 powtórzeń pomiaru współrzędnych, zmieniając drogę przejazdu. Sonda przemieszczała się ruchem ustawczym z prędkością  $v_f=1000$  mm/min, natomiast prędkość ruchu pomiarowego wynosiła  $v_f=50$  mm/min.

Na niepewność standardową pomiaru współrzędnych składają się niepewność wynikająca z rozrzutu wartości pomiarowych  $u_A$  oszacowana metodą typu A oraz niepewność wynikająca z rozdzielczości systemu pomiarowego  $u_R$ . Jako niepewność standardową  $u_a$

przyjmuje się odchylenie standardowe średniej arytmetycznej [4] obliczone wg zależności (1):

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

gdzie:  $u_a$  – niepewność standardowa,  $\bar{x}$  - średnia arytmetyczna,  $n$  – liczba pomiarów,  $x_i$  – współrzędna  $x$  uzyskana w  $i$ -tym pomiarze.

Rozdzielczość układu pomiarowego wynika z kodowych wzorców długości w jakie została wyposażona obrabiarka i wynosi  $r=0,001$ . Wpływ rozdzielczości oszacowano metodą typu B, przyjmując prostokątny rozkład prawdopodobieństwa:

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_R^2} = \sqrt{u_a^2 + \frac{r^2}{3}} \quad (2)$$

gdzie:  $u$  – złożona niepewność standardowa,  $u_a$  – niepewność standardowa,  $u_R$  – niepewność wynikająca z rozdzielczości,  $r$  - zmienność wskazań.

Do oceny właściwości przyrządów i systemów pomiarowych przyjmuje się niepewność rozszerzoną obliczaną ze wzoru:

$$U = k \cdot u \quad (3)$$

gdzie:  $U$  – niepewność rozszerzona,  $k$  – współczynnik rozszerzenia,  $u$  – złożona niepewność standardowa.

Współczynnik rozszerzenia  $k$  dobiera się w zależności od założonego poziomu ufności. Dla pomiarów technicznych poziom ufności przyjmuje się 0,95, a współczynnik rozszerzenia  $k = 2$  [4] przy założeniu, że składowe budżety niepewności podlegają rozkładowi normalnemu. W przypadku niepewności pomiaru współrzędnych punktu sondą przedmiotową przynajmniej jeden składnik nie spełnia tego warunku. Na podstawie analiz zaprezentowanych w [7] przy szacowaniu niepewności typu B można przyjąć  $k = 2$ , również dla rozkładu jednostajnego. W tab. 2 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń.

Tab. 2. Wyniki pomiaru współrzędnych punktu.

Droga przejazdu	100 mm			200 mm			300 mm		
Współrzędna	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Niepewność standardowa $u_a$ [mm]	0,0003	0,0001	0,0000	0,0003	0,0003	0,0000	0,0011	0,0004	0,0001
Złożona niepewność standardowa $u$ [mm]	0,0007	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007	0,0006	0,0012	0,0007	0,0006
Niepewność rozszerzona $U$ [mm]	0,0014	0,0012	0,0012	0,0014	0,0014	0,0012	0,0024	0,0014	0,0012

Można zauważyć, że droga przejazdu ma wpływ na wartość niepewności, jednak jest on niewielki. Długość drogi przejazdu została określona wzdłuż kierunku wyznaczonego przez wektor normalny do płaszczyzny, tak więc przemieszczenie sondy wzdłuż poszczególnych osi ma różne wartości, co jest przyczyną zróżnicowania niepewności  $u_a$ .

### 3.2. Niepewność jednowymiarowego pomiaru długości

Mimo, że współrzędnościowa technika pomiarowa opiera się na pomiarze współrzędnych punktów, a następnie poprzez zastosowanie algorytmów obliczeniowych wyznacza się odpowiednie wartości, nie jest jednak możliwe określenie niepewności pomiaru długości na podstawie niepewności pomiaru współrzędnych. Wyznaczenie jednokierunkowej

niedokładności pomiaru sondą przedmiotową dla poszczególnych osi wykonano przy pomocy końcowych wzorców długości – płytek wzorcowych klasy 1. Szczegółowy opis badań znajduje się w [11]. Równie pomiaru przybiera postać:

$$L = \bar{L} + P_{Ex} + P_t + P_r \quad (4)$$

gdzie:  $L$  – długość płytki,  $\bar{L}$  – średnia arytmetyczna,  $P_{Ex}$  – poprawka wynikająca z systematycznego błędu wskazania,  $P_t$  – poprawka na różnicę temperatur płytki wzorcowej i wzorca systemu pomiarowego,  $P_r$  – poprawka na zmianę długości płytki wynikającą z nierównoległości ustawienia płytki względem osi obrabiarki.

Systematyczny błąd wskazania obliczany jest z zależności (5), natomiast poprawka  $P_{Ex}$  z zależności (6)

$$E_x = \bar{L} - L_N \quad (5)$$

gdzie:  $E_x$  – systematyczny błąd wskazania,  $L_N$  – długość nominalna płytki wzorcowej.

$$P_{Ex} = -E_x \quad (6)$$

Przyjęto, że poprawki  $P_t = 0$  i  $P_r = 0$  [11]. Złożona niepewność standardowa wyznaczona została z zależności:

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_L^2 + u_R^2} = \sqrt{u_a^2 + \frac{te^2}{6} + \frac{r^2}{3}} \quad (7)$$

gdzie:  $u$  – złożona niepewność standardowa,  $u_a$  – niepewność standardowa wynikająca z rozrzutu,  $u_L$  – niepewność długości płytki wzorcowej,  $u_R$  – niepewność wynikająca z rozdzielczości,  $te$  – graniczna odchyłka długości płytki wzorcowej,  $r$  – zmienność wskazań.

Za rzeczywistą długość płytek wzorcowych przyjmuje się długość nominalną definiując granicę tolerancji wymiarowej jako górną i dolną granicę przedziału zmienności długości [16]. Graniczne odchyłki długości  $te$  wynoszą: płytka  $L = 50$  mm –  $te = \pm 0,4$   $\mu$ m,  $L = 100$  mm –  $te = \pm 0,6$   $\mu$ m,  $L = 150$  mm –  $te = \pm 0,8$   $\mu$ m,  $L = 200$  mm –  $te = \pm 1$   $\mu$ m,  $L = 300$  mm –  $te = \pm 1,4$   $\mu$ m oraz  $L = 400$  mm –  $te = \pm 1,8$   $\mu$ m [16]. Założono trójkątny rozkład prawdopodobieństwa ze środkiem w wymiarze nominalnym płytki. Rozdzielczość systemu pomiarowego wynosi 0,001 mm. Zmienność wskazań oszacowano na  $r = \pm 0,0005$  mm przy założeniu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa. Złożona niepewność standardowa wyznaczona została z zależności (7), natomiast niepewność rozszerzona wg zależności (3) zakładając, że współczynnik rozszerzenia  $k = 2$ . W tab. 3 zamieszczono wyniki pomiarów długości płytek wzorcowych i wyniki obliczeń niedokładności.

Tab.3. Wyniki pomiaru długości płytek wzorcowych.

Wymiar płytki, [mm]	Oś X				Oś Y				Oś Z		
	100	150	200	300	100	150	200	300	50	100	150
Średnia, mm	100,002	150,004	200,003	300,010	100,007	150,009	200,001	300,001	50,006	100,010	150,017
Niepewność standardowa $u_a$ , [mm]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001
Złożona niepewność standardowa $u$ , [mm]	0,0006	0,0006	0,0007	0,0008	0,0005	0,0005	0,0006	0,0007	0,0004	0,0005	0,0005
Niepewność rozszerzona $U$ , [mm]	0,0012	0,0012	0,0014	0,0016	0,0010	0,0010	0,0012	0,0014	0,0008	0,0010	0,0010
Systematyczny błąd wskazania, [mm]	0,002	0,005	0,003	0,010	0,007	0,009	0,001	0,001	0,006	0,010	0,017
Poprawka $P_{Ex}$ , [mm]	-0,002	-0,005	-0,003	-0,010	-0,007	-0,009	-0,001	-0,001	-0,006	-0,010	-0,017

Analizując wyniki zaprezentowane w tabeli 3 można zauważyć, że we wszystkich przypadkach systematyczny błąd pomiaru przyjmuje znacznie większe wartości, niż niepewność pomiaru. Na taki wynik ma wpływ równoległość ruchu głowicy do liniałów kodowych i prostoliniowość tego ruchu.

### 3.3. Niepewność dwuwymiarowego pomiaru długości

Jak pokazały liczne publikacje na temat współrzędnościowej techniki pomiarowej np.: [12] wyznaczenie niepewności jednowymiarowego pomiaru długości nie może służyć do oceny dokładności wymiarów, które nie są równoległe do osi obrabiarki lub do pomiaru średnic. Dwuwymiarową niepewność pomiaru długości wyznaczono w oparciu o pomiary pierścienia wzorcowego oraz płytek wzorcowych klasy 1 ustawionych pod kątem  $28^0$  do osi X obrabiarki. Dokładny opis znajduje się w [10]. Równanie pomiaru dla płytek przybiera postać:

$$L = \bar{L} + P_{Ex} + P_t + P_r \quad (8)$$

gdzie:  $L$  – długość płytki,  $P_{Ex}$  – poprawka wynikająca z systematycznego błędu wskazania,  $P_t$  – poprawka na różnicę temperatur płytki wzorcowej i wzorca systemu pomiarowego,  $P_r$  – poprawka na zmianę długości płytki wynikającą z nierównoległości ustawienia płytki do wyznaczonego kierunku pomiaru.

Poprawkę temperaturową można pominąć, ze względu na długi czas przeznaczony na wyrównanie temperatury płytek i zespołów obrabiarki. Poprawkę długości wzorca wynikającą z ustawienia względem kierunku pomiaru przyjęto  $P_r = 0$ , natomiast oszacowano jej niepewność według schematu przedstawionego w [10]. Poprawkę  $P_{EX}$  obliczono według zależności (5) i (6). Złożona niepewność standardowa została obliczona według zależności (9)

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_L^2 + u_R^2 + u_{\cos\alpha}^2} \quad (9)$$

gdzie:  $u$  - złożona niepewność standardowa,  $u_a$  - niepewność standardowa,  $u_L$ - niepewność długości wzorca,  $u_R$ - niepewność wynikająca z rozdzielczości,  $u_{\cos\alpha}$ - niepewność ustawienia wzorca.

Niepewność długości wzorca i niepewność wynikającą z rozdzielczości obliczono jak przy wyznaczaniu niepewności jednowymiarowej. W tab. 4 zamieszczono wyniki wyznaczenia dwuwymiarowej niepewności pomiaru długości z użyciem płytek wzorcowych, a w tabeli 5 z użyciem pierścienia wzorcowego o średnicy  $\phi 50^{+0,0005}$ . Przy pomiarach pierścienia nie ma potrzeby uwzględniania dokładności ustawienia.

Tab. 4. Dwuwymiarowa niepewność pomiaru długości płytek wzorcowych [10]

Długość płytki [mm]	50	100	150	200	300
Średnia [mm]	50,0091	100,0014	150,0116	200,0236	299,9990
Niepewność standardowa $u_a$ [mm]	0,0004	0,0004	0,0003	0,0005	0,0004
Niepewność długości wzorca $u_L$ [mm]	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0006
Niepewność rozdzielczości układu $u_R$ [mm]	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Niepewność wynikająca z błędu cosinusa $u_{\cos}$ [mm]	0,0002	0,0004	0,0006	0,0008	0,0013
Złożona niepewność $u$ [mm]	0,0007	0,0007	0,0006	0,0008	0,0009
Niepewność rozszerzona $U$ [mm]	0,0014	0,0014	0,0012	0,0016	0,0018
Poprawka $PEX$ [mm]	-0,0091	-0,0014	-0,0116	-0,0236	0,0010

Tab. 5. Dwuwymiarowa niepewność pomiaru średnicy pierścienia [10]

Średnia [mm]	49,9480
Niepewność standardowa $u_a$ [mm]	0,0010

Niepewność długości wzorca $u_L$ [mm]	0,0002
Niepewność rozdzielczości układu $u_R$ [mm]	0,0006
Złożona niepewność $u$ [mm]	0,001
Niepewność rozszerzona $U$ [mm]	0,002
Poprawka $P_{EX}$ [mm]	+0,0552

Dla przedmiotów wykonanych na obrabiarce składnik niepewności wynikający z dokładności ustawienia może nie być brany pod uwagę, ponieważ zgodność położenia mierzonych płaszczyzn z założonym modelem, zależna jest od dokładności wykonania. Powtarzalność badanego systemu pomiarowego dla obydwu przypadków jest na zadowalającym poziomie, natomiast systematyczny błąd wskazania przyjął duże wartości.

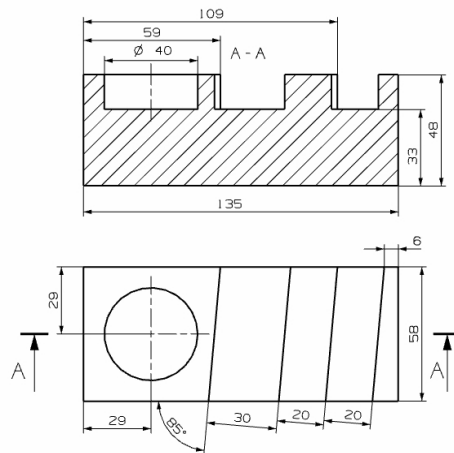
### 3.4. Niepewność pomiaru długości z zastosowaniem przedmiotu niekalibrowanego

Wyznaczenie niepewności pomiaru współrzędnościową maszyną pomiarową w oparciu o pomiar przedmiotu niekalibrowanego jest jeszcze na etapie opracowywania standardów. Wytyczne można znaleźć w projekcie normy ISO/CD TS 15530-2 Geometrical Product Specification (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 2: Use multiple measurement strategies [8]. Według projektu dowolnie wybrany przedmiot z serii produkcyjnej mierzy się w różnych położeniach, przy czym w każdym położeniu pomiar powinien być prowadzony z różnymi strategiami. Z tego pomiaru wyznaczone zostają następujące parametry niepewności:  $u_{rep}$  - niepewność uzyskanej powtarzalności pomiaru związanej z pomiarem tego samego elementu w różnych orientacjach oraz  $u_{geo}$  - składowa niepewności związana z dokładnością geometryczną przedmiotu. W podobny sposób dokonuje się pomiarów wzorca długości. Wzorce te należy mierzyć w tej samej przestrzeni pomiarowej, w której mierzony był przedmiot. Pomiar należy wykonać trzykrotnie, w trzech różnych kierunkach, za każdym razem z różnym rozmieszczeniem punktów pomiarowych. Niepewność standardową oblicza się wg zależności (10):

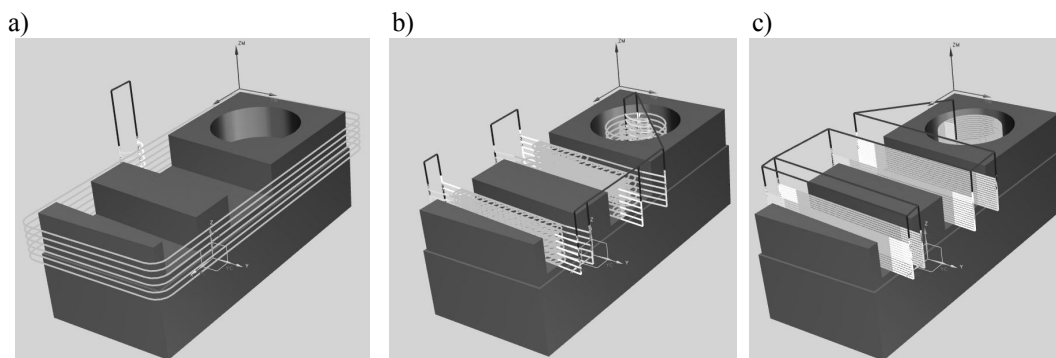
$$u = \sqrt{s_{wz}^2 + s_p^2} \quad (10)$$

gdzie:  $u$  - niepewność pomiaru,  $s_p$  - odchylenie standardowe przedmiotu,  $s_w$  - odchylenie standardowe wzorca.

W celu wyznaczenia niepewności pomiaru wyżej opisaną metodą zaprojektowano przedmiot pokazany na rys. 2. Przedmiot wykonany został na pionowym centrum obróbkowym FV580A ze sterowaniem numerycznym Fanuc 0iMC. Program sterujący pracą pionowego centrum obróbkowego wygenerowano z systemu NX6. W tym celu wykonano model 3D oraz opracowano plan obróbki, którego poszczególne fazy pokazano na rys. 3. Do obróbki wykorzystano frez pełnowęglkowy dwuostrzowy o średnicy 16 mm. Parametry skrawania dla obróbki zgrubnej wynosiły: prędkość obrotowa frezu  $n = 4500$  obr/min, posuw  $v_f = 1200$  mm/min, a dla obróbki wykończeniowej odpowiednio  $n = 6000$  obr/min,  $v_f = 800$  mm/min. Podczas obróbki przedmiot chłodzony był emulsją olejową.



Rys. 2. Wymiary przedmiotu niekalibrowanego



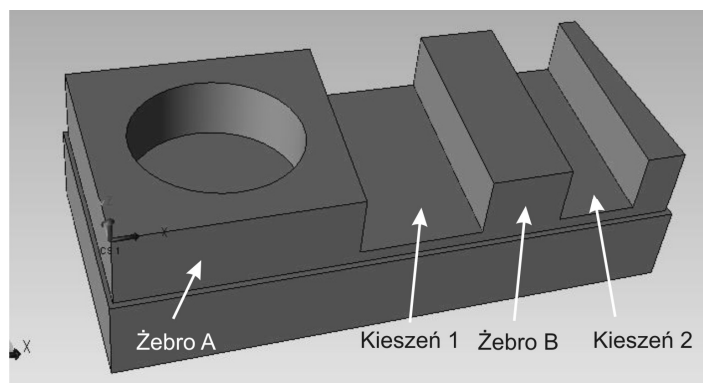
Rys. 3. Wygląd ścieżek obróbkowych w poszczególnych fazach obróbki: a) profilowanie powierzchni zewnętrznej, b) obróbka zgrubna żeber oraz kieszeni kołowej, c) profilowanie żeber oraz kieszeni kołowej

Pomiary przedmiotu przeprowadzono w dwóch etapach, co miało na celu lepsze zobrazowanie i wychwycenia różnic pomiędzy wymiarami poszczególnych elementów przedmiotu oraz wyeliminowanie błędów wynikających z rozszerzalności. Pierwszy etap przeprowadzony został natychmiast po zakończeniu frezowania, gdy przedmiot posiadał podwyższoną temperaturę po obróbce, etap ten w dalszej części artykułu określana jest jako „pomiar na gorąco”. Drugi etap badań odbył się po 24 godzinach, gdy temperatura przedmiotu oraz węzłów ruchomych obrabiarki została wyrównana do temperatury otoczenia wynoszącej 20°C.

Pomiar na gorąco obejmował trzy serie pomiarowe, natomiast w każdej serii inspekcji podlegały następujące elementy przedmiotu (rys. 4):

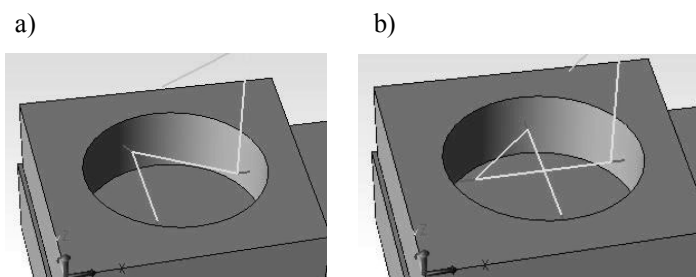
- Średnica otworu (wymiar nominalny – 40 mm),
- Długość (wymiar nominalny – 135 mm),
- Żebro A (wymiar nominalny – 58 mm),
- Żebro B (wymiar nominalny – 58 mm),
- Kieszeń 1 (wymiar nominalny – 30 mm),
- Kieszeń 2 (wymiar nominalny – 20 mm).



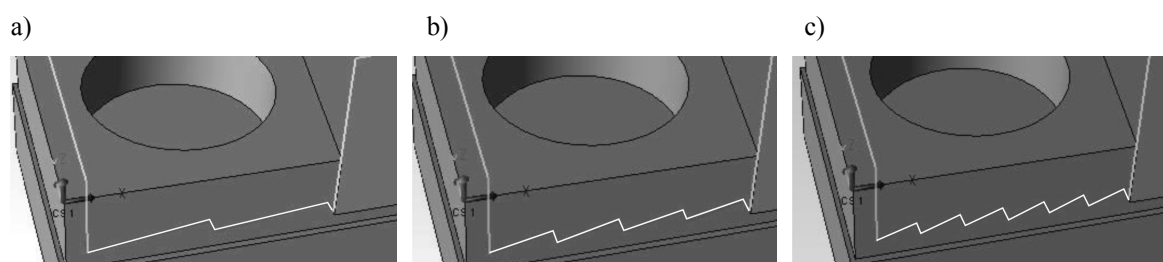


Rys. 4 Cechy geometryczne mierzonego przedmiotu

Do wspomagania procesu pomiaru na obrabiarce wykorzystano program Priductivity+. Do pomiaru cech charakterystycznych przedmiotu (otwór, kieszeń, żebro) wykorzystano dedykowany do tego cykl pomiarowy. Zmiana strategii pomiaru polegała na wykorzystaniu trzech i czterech punktów próbkowania w przypadku pomiaru otworu (rys. 5) oraz wykonaniu pomiarów na trzech różnych poziomach określonych od przyjętego punktu zerowego (górnym, lewym, przednim narożnikiem mierzonego przedmiotu). Wykorzystanie tych zmiennych pozwoliło na uwzględnienie wpływów pochodzących od odchyłek kształtu badanego elementu (np. owalności) oraz uwzględnienie wpływów pochodzących od narzędzia i jego ewentualnych odkształceń. Kieszenie oraz żebra mierzone wykorzystując zmienną liczbę punktów próbkowania (3, 5 i 7) na poziomie 5 mm od górnej płaszczyzny przedmiotu (rys. 6).



Rys. 5. Strategia pomiaru otworu: a) pomiar z wykorzystaniem 3 punktów próbkowania, b) pomiar z wykorzystaniem 4 punktów próbkowania



Rys. 6. Strategia wykorzystana w przypadku pomiaru elementów typu żebro i kieszeń: a) pomiar z wykorzystaniem 3 punktów próbkowania, b) pomiar z wykorzystaniem 5 punktów próbkowania, c) pomiar z wykorzystaniem 7 punktów próbkowania

Taki dobór punktów jest wynikiem pewnego rodzaju kompromisu, gdyż ze względu na dokładność pomiaru optymalnym rozwiązaniem jest dobór jak największej liczby punktów próbkowania (ponieważ wraz ze wzrostem liczby punktów maleje niepewność oceny zarysu). Jednak nadmierne zwiększanie liczby punktów pomiarowych może wpływać niekorzystnie na

niepewność pomiarową, ponieważ każdy punkt próbkowania obarczony jest błędem układu pomiarowego, który ma wpływ na współrzędnościowy wynik pomiaru. Ważne jest to w przypadku pomiarów na obrabiarkach oraz, ale już w mniejszym stopniu, dla pomiarów laboratoryjnych. Liczba punktów pomiarowych oprócz wpływu na dokładność pomiaru kształtu przedmiotu, ma także istotny wpływ na długość cyklu pomiarowego.

Program Productivity+ wyniki pomiarów zapisywał w zadeklarowanej komórce pamięci systemu Fanuc. Wyniki te przeniesione zostały do arkusza kalkulacyjnego, w którym wykonano niezbędne obliczenia. Jako wzorce długości zastosowano dla wymiarów 58 mm, 30 mm i 20 mm płytkę wzorcową klasy 1 o długości 50 mm, dla wymiaru 135 mm płytkę wzorcową klasy 1 o długości 150 mm, dla otworu  $\phi$  40 mm – pierścień wzorcowy  $\phi$  50 mm. W tabeli 5 zamieszczono wyniki pomiarów i obliczeń niepewności pomiaru.

Tab. 6. Wyniki pomiarów przedmiotu niekalibrowanego.

Czas rozpoczęcia pomiaru	po 1min						po 24 h					
	Wymiar	Otwór	Długość	Żebro A	Żebro B	Kiesz. 1	Kiesz. 2	Otwór	Długość	Żebro A	Żebro B	Kiesz. 1
Średnia, [mm]	39,908	135,035	58,030	58,023	29,952	19,952	39,909	135,034	58,034	58,030	29,944	19,946
Odchylenie standardowe wymiaru $s_p$ [mm]	0,0016	0,0035	0,0007	0,0027	0,0009	0,0031	0,0027	0,0005	0,0025	0,0012	0,0009	0,0022
Odchylenie standardowe wzorca $s_{wz}$ [mm]	0,0004	0,0015	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0004	0,0015	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009
Niepewność standardowa $u$ , [mm]	0,0017	0,0039	0,0012	0,0029	0,0013	0,0032	0,0028	0,0016	0,0026	0,0015	0,0013	0,0024
Niepewność rozszerzona $U$ , [mm]	0,0034	0,0078	0,0024	0,0058	0,0026	0,0064	0,0056	0,0032	0,0056	0,0030	0,0026	0,0048

W celach porównania przedmiot próbny zmierzono współrzędnościową maszyną pomiarową o podanej przez producenta niepewności pomiaru  $u_I = \pm(2,5 + L/250) \mu\text{m}$ , gdzie  $L$  było długością mierzoną w mm. Otrzymano następujące wyniki

- Średnica otworu - 39,911 mm,
- Długość -135,042 mm,
- Żebro A – 58,017 mm,
- Żebro B - 58,019 mm,
- Kieszeń 1- 29,951 mm,
- Kieszeń 2 – 19,945 mm.

#### 4. Analiza wyników i wnioski

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki pomiarów są niejednoznaczne. Zaprezentowane w tab. 2 wyniki niepewności pomiaru współrzędnych punktu pokazują, że w większości przypadków niepewność standardowa  $u_a$  jest mniejsza od podanej przez producenta powtarzalności jednokierunkowej. Jedynie w przypadku niepewności pomiaru współrzędnej X nieznacznie przekracza tę wartość dla drogi przejazdu 300 mm. Tak więc główną przyczyną rozrzutu wyników jest rozdzielczość układu pomiarowego. Na uwagę zasługuje stabilność wyników pomiaru współrzędnej Z. Związane jest to z konstrukcją sondy. Zauważyć można to również analizując wyniki wyznaczenia niepewności jednokierunkowego pomiaru długości zamieszczone w tabeli 3. Dla płytek ustawionych równoległe do osi Z niepewność standardowa  $u_a$  przyjmuje wartości mniejsze, niż dla pozostałych przypadków. Analizując wyniki zaprezentowane w tabeli 3 można zauważyć, że niepewność standardowa  $u_a$  wewnątrzobrabiarkowego systemu pomiarowego z zastosowaniem sondy przedmiotowej OMP 60 jest znacznie mniejsza od systematycznego błędu wskazania. Duże wartości systematycznego błędu wskazania spowodowane są nierównoległością ruchu głowicy do liniałów kodowych, natomiast znaczne różnice w wartościach tego błędu nieprostoliniowością

tego ruchu. Związane jest to z dokładnością geometryczną obrabiarki i stanem jej zespołów napędowych.

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 4 można zauważyć, że niepewność standardowa typu A (wynikająca z powtarzalności pomiarów) przyjmuje małe wartości i dla całego badanego zakresu pomiarowego nie przekracza  $0,5 \mu\text{m}$ . Natomiast złożona niepewność standardowa zależy od długości mierzonej płytki wzorcowej. Jest to wynikiem dwóch składowych – niepewności długości wzorca  $u_L$  i niepewności wynikającej z dokładności ustawienia  $u_{\cos\alpha}$ . Dla przedmiotów wykonanych na obrabiarce składnik niepewności wynikający z dokładności ustawienia może nie być brany pod uwagę, ponieważ zgodność położenia mierzonych płaszczyzn z założonym modelem, zależna jest od dokładności wykonania. Powtarzalność badanego systemu pomiarowego jest na zadowalającym poziomie, natomiast błąd systematyczny przyjął duże wartości. Porównując wyniki zaprezentowane w tab. 4 z wynikami wyznaczania niepewności jednokierunkowej (tab. 3) można stwierdzić, że dla płytek o długościach 50, 100, 150 i 300 mm takie wartości poprawek wynikają z dokładności geometrycznej obrabiarki, natomiast dla płytki o długości 200 mm taka duża wartość błędu systematycznego jest spowodowana prawdopodobnie nie dość dokładnym ustawieniem.

Zaprezentowane w tabeli 5 wyniki pomiarów pierścienia wzorcowego pokazują, że niepewność standardowa typu A jest prawie dwukrotnie większa niż dla płytki o długości 200 mm (najgorszy przypadek). Również poprawki dla pierścienia wzorcowego mają znacznie większe wartości niż dla płytek wzorcowych. Wynika to z różnicy w sposobie kompensacji promienia kulki innej przy pomiarach płaszczyzn i okręgów.

Porównując wyniki pomiarów przedmiotu niekalibrowanego zamieszczone w tabeli 6, można zauważyć, że wymiary przedmiotu próbnego zmierzone bezpośrednio po zakończeniu obróbki i po 24 godzinach można (poza wymiarami kieszeni 1 i kieszeni 2) uznać za równe. Cykl pomiarowy trwał około 30 minut. W tym czasie następowało stygnięcie przedmiotu. Kieszenie 1 i 2 były mierzone na początku cyklu pomiarowego czyli wówczas, gdy wpływ rozszerzalności temperaturowej wynikającej z przebiegu procesu obróbki był największy. Te czynniki były przyczyną różnic w wynikach pomiarów bezpośrednio po zakończeniu obróbki i po 24 h. Zmiana wymiarów spowodowana występowaniem odkształceń cieplnych uwidoczniła się także w wartościach odchyłek standardowych przedmiotu. Porównując odchylenie standardowe „długości” (wymiar nominalny 135), które po zakończeniu obróbki wynosiło 0,0035 a po 24 h 0,0005 mm, można stwierdzić, że spadek temperatury w trakcie cyklu pomiarowego spowodował zmianę wymiarów i co za tym idzie większy ich rozrzut. W przypadku pomiaru otworu można zaobserwować sytuację odwrotną: większy rozrzut wyników pomiaru średnicy występuje po 24 h. Jak wykazał pomiar otworu maszyną współrzędnościową, otwór ma odchyłkę walcowości 0,006 mm - stożkowość (zmniejszenie średnicy wraz z głębokością). Pomiar otworu sondą były wykonane na trzech głębokościach, zaczynając od największej. Skompensowało to częściowo zmniejszenie wymiaru średnicy otworu spowodowane spadkiem temperatury. Wewnątrzobrabiarkowy system pomiarowy z zastosowaniem sondy OMP 60 i współrzędnościowa maszyna pomiarowa mają różne oprogramowanie sterująco-pomiarowe. Wiąże się to z koniecznością zastosowania nieco odmiennych strategii pomiaru, co w połączeniu z występowaniem odchyłek geometrycznych przedmiotu (odchyłek równoległości i płaskości płaszczyzn, odchyłki walcowości) może powodować różnice w wynikach pomiarów przekraczające dopuszczalne różnice wynikające z właściwości metrologicznych systemów pomiarowych.

W niniejszej pracy przedstawiono różne metody wyznaczania niepewności pomiaru wewnątrzobrabiarkowego systemu pomiarowego z zastosowaniem sondy OMP 60. Przedstawione metody różnią się pracochłonnością. Najbardziej pracochłonne są metody oparte na pomiarze końcowych wzorców. Dodatkowo wymagają interpolacji poprawek na

błąd systematyczny dla wymiarów innych, niż miały użyte do wzorcowania płytki czy pierścienie wzorcowe. Natomiast zaletą tych metod jest to, że raz wykonane wzorcowanie można wykorzystać przy pomiarach różnych przedmiotów. Metoda z zastosowaniem przedmiotu niekalibrowanego jest mniej pracochłonna, ale wyznaczona niepewność pomiaru ma większe wartości, niż niepewność wzorcowania. Wadą tej metody jest to, że przeznaczona jest do konkretnego wyrobu.

Na podstawie wyników pomiarów i ich analizy można stwierdzić że:

- wybór metody wyznaczania niepewności pomiaru powinien być zdeterminowany jego celem,
- jeżeli celem pomiaru jest lokalizacja punktu zerowego, należy wyznaczyć niepewność pomiaru współrzędnych punktu,
- jeżeli celem jest kontrola międzyzabiegowa, kontrola po obróbce lub inżynieria odwrotna to można zastosować metodę z wykorzystaniem przedmiotu niekalibrowanego pod warunkiem, że technologia obróbki pozwala na minimalizację odkształceń cieplnych,
- jeżeli obróbka generuje duże ilości ciepła, to należy wyznaczyć: dla wymiarów równoległych do osi jednokierunkową niepewność pomiaru, dla wymiarów leżących w płaszczyźnie XY dwukierunkową z użyciem płytek wzorcowych, dla otworów dwukierunkową z zastosowaniem pierścienia wzorcowego.

## 5. Literatura

1. Arendarski J. Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
2. Cho M W, Kim G H, Seo T I, Hong Y C, Cheng H H. Integrated machinig error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006; 46: 1417–1427.
3. Deneka B, Schmidt C, Krüger M. Experimental investigation and modeling of thermal and mechanical influens on shape deviation in machining structural parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2010; 50: 1015-1021.
4. Dokument EA-4/02. Wyrażanie niepewności przy wzorcowaniu. GUM. Warszawa 1999.
5. Guissa R., Mayer JRR. Predictive compliance based model for compensation i multi-pass milling by on-machine probing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2011; 60(1): 391-394.
6. Hang Y., Hoshi T.: Optimizatón of fixture design consideration of thermal deformation in face milling. *Journal of Manufacturing System in face milling* 2000; 19.
7. Horálek V. Analysis of basic probability distributions, their properties and use in determining type B evaluation of measurement uncertainties. *Measurement* 2012; 46: 16-23.
8. ISO/CD TS 15530-2 Geometrical Product Specification (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 2: Use multiple measurement strategies.
9. Jacniacka E., Semotiuk L.: Powtarzalność mocowania jako składnik budżetu niepewności pomiaru sondą przedmiotową na obrabiarkach CNC. *Mechanik* 2012; 5-6: 456-459.
10. Jacniacka E., Semotiuk L., Babkiewicz M.: Wyznaczenie dwuwymiarowej niepewności pomiaru wewnątrzobrabiarkowego systemu pomiarowego z zastosowaniem sondy OMP60. *Pomiary, Automatyka, Robotyka* 2012; 10: 68-73.

11. Jacniacka E., Semotiuk L., Pieśko P.: Niepewność pomiaru wewnątrzobrabiarkowego systemu pomiarowego z zastosowaniem sondy OMP 60. *Przegląd Mechaniczny* 2010; 69(6): 36-42.
12. Jakubiec W.: Analityczne wyznaczanie niepewności pomiaru we współrzędnościowej technice pomiarowej. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała 2008.
13. Kwon Y, Jeonng M. K., Omitaomu O. A.: Adaptive support vector regresion analysis of closed-loop inspection accuracy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006; 46(6): 603-610.
14. Kwon Y., Tseng T.-Z., Ertekin Y.: Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2006; 22: 288-296.
15. Pakiet oprogramowania Inspection Plus. Podręcznik programowania. Renishaw 2003.
16. PN EN ISO 3650:2000. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Wzorce długości – Płytki wzorcowe.