

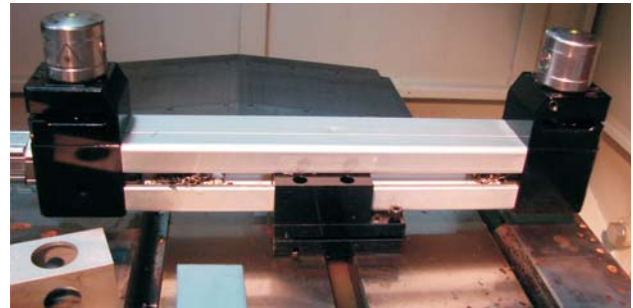
Niepewność wyniku pomiaru średnicy frezów laserową sondą narzędziową NC4

► Jerzy Józwik

Przedmiotem artykułu jest określenie niepewności pomiaru średnicy eksploatowanych frezów za pomocą bezdotykowego systemu pomiarowego NC4 frezarskiego centrum obróbczego CNC FV580a. Podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy wyniki pomiarów uzyskiwane w warunkach przemysłowych na obrabiarce mogą być podstawą do orzekania o zgodności wymiaru? Aby udzielić odpowiedzi na tak postawione pytanie, przeprowadzono badania doświadczalne oraz określono niepewność pomiaru średnicy frezu w tychże warunkach. Wyznaczono niepewność standardową oraz rozszerzoną pomiaru średnicy frezu. Z uwagi na to, że rzeczywista wartość wielkości mierzonej nie jest dokładnie znana, estymator wielkości mierzonej przyjęto jako średnią arytmetyczną.

Niepewność pomiaru (*uncertainty*) jest parametrem nierozdzielnie związanym z wynikiem pomiaru, ale także w sposób pośredni – z procedurami pomiarowymi [1–4]. Dotyczy ona również wszelkich pomiarów realizowanych na obrabiarkach CNC. Obrabiarki takie, to złożone układy masowo-dyssypacyjno-sprężyste, w których dostarczana energia jest przetwarzana, zamieniana na pracę mechaniczną i w części rozpraszana. Realizowany na maszynie proces pomiaru odbywa się podczas pracy zespołów funkcjonalnych maszyny (wrzeciono wirujące podczas pomiaru, przemieszczenia liniowe stołu itp.), często w zmieniających się w czasie warunkach otoczenia. Z literatury [5–8] wynika jednoznacznie, że warunki pomiaru determinują wartość wielkości mierzonej. Ponadto niedokładności związane z realizacją ruchów przez mechanizmy napędowe i wykonawcze obrabiarki podczas pomiaru, w sposób istotny obciążają wartość mierzonych wielkości. Nasuwa się pytanie, czy wynik uzyskany podczas pomiaru sondą na maszynie CNC (obarczony jakąś niepewnością) można uznać za wiarygodny i użyteczny. Jeśli tak, to kiedy można go tak traktować? Odpowiedź na tak sformułowane pytanie wymaga określenia przedziału, wewnątrz którego znajduje się wartość zaobserwowana wielkości mierzonej. Tak określona wartość staje się wówczas wynikiem, co do którego można mieć zaufanie. Wyznaczenie przedziału odbywa się zwykle z założoną wiarygodnością, a zatem zależy od przyjętego poziomu ufności. Warunkiem uzyskania wiarygodnych wyników podczas pomiarów na obrabiarce CNC z wykorzystaniem sond narzędziowych jest wnikliwa analiza wszystkich składowych niepewności pomiaru i ich źródeł.

Żle przeprowadzona analiza budżetu niepewności może doprowadzić do sytuacji, w której może zostać zaakceptowany wynik niepoprawny lub może zostać



Rys. 1 Sonda narzędziowa pionowego centrum obróbczego FV-580A

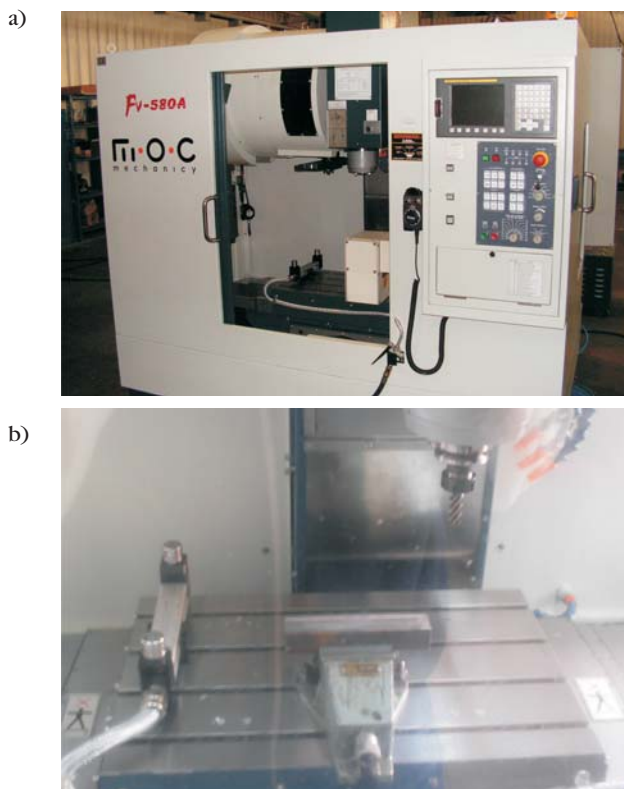
odrzucony wynik poprawny. Jedynie wyniki otrzymane przy wysokim poziomie ufności – wiarygodne i użyteczne (związane z poprawnym określeniem dopuszczalnej niepewności pomiaru) mogą być wykorzystane do estymacji średnicy narzędzia (w przypadku sond narzędziowych) lub oceny poprawności wykonania wyrobów (w przypadku sond przedmiotowych).

Metodyka i zakres badań

Celem badań jest ocena niepewności pomiaru średnic eksploatowanych frezów sondą narzędziową NC4 (rys. 1). System NC4 jest zwartym, dwuosowym bezdotykowym systemem ustawiania narzędzi na obrabiarkach CNC. Pozwala na pomiar średnicy narzędzia przy obracającym się wrzecionie i detekcję uszkodzeń narzędzi o średnicy minimalnej $d=0,2$ mm. Wyposażony jest w tryb eliminacji kropli, pozwalający na odrzucenie sygnałów pochodzących od przypadkowych kropli chłodziwa padających na wiązkę laserową. Próby badawcze realizowano na pionowym centrum obróbkowym CNC FV580a, przedstawionym na rys. 2.

Prowadzone badania eksperymentalne (pomiaru i analizy) mają dać odpowiedź na pytanie, czy wyniki pomiarów uzyskiwane w warunkach przemysłowych na obrabiarce mogą być podstawą do orzekania

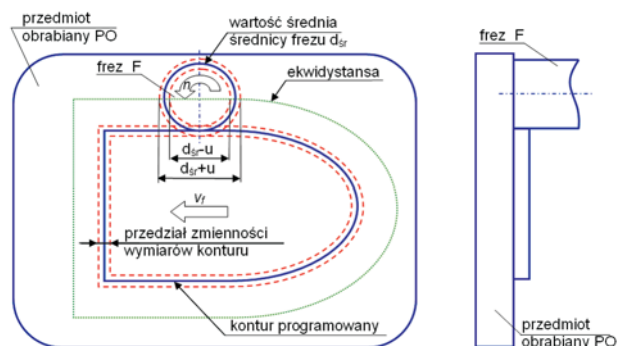
► dr inż. Jerzy Józwik – Politechnika Lubelska



Rys. 2. Pionowe centrum obróbcze CNC FV-580A : a) widok ogólny, b) przestrzeń robocza wraz z sondą narzędziową NC4

o zgodności wymiaru średnicy frezu, uwzględnianej w trakcie kompensacji promienia narzędzia podczas obróbki konturów na frezarkach CNC. Mając na względzie, że każdy wynik pomiaru jest obarczony niepewnością, istnieje zatem ryzyko, że wymiar zaobserwowany zmierzony laserowym systemem pomiarowym NC4 wpłynie na kształt i wymiary konturu kształtowanego. W celu określenia przedziału, w którym znajduje się wynik pomiaru średnicy frezu, wyznaczono niepewność standardową oraz rozszerzoną. Określono również, w jakim stopniu wyznaczona niepewność ma wpływ na zmienność wymiaru konturu uzyskiwanego podczas obróbki skrawaniem.

Do badań użyto frezów palcowych pełnowęglkowych o średnicach nominalnych z przedziału $d_F = 3 - 25$ mm (tab. 1). Z uwagi na to, że rzeczywista wartość wielkości mierzonej nie jest dokładnie znana, tzn. każde narzędzie jest wykonane z pewną tolerancją lub znajduje się w określonym stadium zużycia, a pomiar jest wykonywany w zmiennych warunkach otoczenia oraz przy pełnej kinematyce (wirujące wrzeciono), jako estymator wielkości mierzonej przyjęto średnią arytmetyczną. Przy błędnie określonej niepewności pomiaru lub przy zbyt dużych jej wartościach ryzyko błędnej oceny średnicy narzędzia może być na tyle duże, że ze względu na skutki użytkowe złych decyzji wynik pomiaru staje bezużyteczny. Ma to szczególne znaczenie podczas oceny średnicy i długości narzędzi frezarskich wykorzystywanych na centrach obróbkowych CNC. Wartości te są kodowane w odpowiednich rejestrach układu sterowania nu-



Rys. 3. Wpływ niepewności pomiaru średnicy frezu uwzględnianej podczas kompensacji promienia na wartość błędu konturu uzyskanego podczas obróbki na obrabiarkę CNC

merycznego i są wykorzystywane w trakcie obróbki podczas procesu kompensacji (na prawo lub lewo od konturu).

Z przedstawionego schematu (rys. 3) wynika, że z punktu widzenia dokładności obróbki, podczas szacowania średnicy frezu sondą narzędziową najbardziej pożądanym jest wynik pomiaru określony z jak najmniejszą niepewnością. Należy jednak pamiętać, że zawężanie niepewności pomiaru pociąga za sobą wzrost kosztów. Należy zatem racjonalnie określać wymaganą niepewność pomiaru. Normy międzynarodowe ISO mówią, że powinna być ona taka, aby na podstawie wyniku pomiaru można było osiągnąć założony cel. Jak wspomniano powyżej, pomiary realizowane za pomocą sond narzędziowych przy dużych niepewnościach mogą prowadzić do błędów konturu przedmiotu obrabianego podczas skrawania. Na tę niepewność pomiaru składa się zazwyczaj wiele czynników. Każdy z nich może mieć inny wpływ na wartość niepewności pomiaru. Do wybranych źródeł niepewności można zaliczyć: zmiany w czasie wymiarów i innych właściwości elementów, części i zespołów biorących udział w pomiarach, niepełną znajomość wpływu otoczenia (drgań, fluktuacji temperatury, ciśnienia, wilgotności i innych zakłóceń) lub niedoskonały pomiar warunków otoczenia, błędy wzorcowania, nieliniowości, montażu (rys. 4).

Ponadto do źródeł niepewności pomiaru zaliczyć można niepełną definicję wielkości mierzonej, niedoskonałą realizację definicji wielkości mierzonej, błędy w odczycie wskazań przyrządów, klasę dokładności przyrządów pomiarowych, niedokładne wartości danych otrzymywanych ze źródeł zewnętrznych: wartości przypisane wzorcom i elementom odniesienia, stałe



Rys. 4. Wybrane czynniki wpływające na niepewność pomiaru

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń niepewności standardowej *u* i rozszerzonej *U* średnicy eksploatowanych frezów

Lp.	Średnica nominalna frezu <i>d_n</i> (mm)	Średnia średnica zaobserwowana <i>d_{sr}</i> (mm)	Niepewność standardowa <i>u</i> (mm)	Niepewność rozszerzona <i>U</i> (mm)
1.	3	2,906	0,00028	0,00056
2.	7,5	7,484	0,00027	0,00054
3.	10	9,782	0,00028	0,00056
4.	11,5	11,536	0,00032	0,00064
5.	15,5	15,614	0,00036	0,00072
6.	20	20,000	0,00035	0,00070
7.	25	24,452	0,00040	0,00080

przyjmowane do obliczeń, zaokrąglenia, niedoskonałość metody pomiarowej (rys. 4). Producenci sond pomiarowych jako parametr charakteryzujący niedokładność tych urządzeń podają zazwyczaj powtarzalność (2 s), przy czym warunki pomiaru nie są ujednolicone [1, 2]. W przypadku sondy NC4 firmy Renishaw, przy rozstawieniu modułów nadajnik-odbiornik równym 0,2 m, powtarzalność pomiaru wynosi ±0,25 μm (2 s).

Jak zaznaczono powyżej, w prezentowanej pracy została wyznaczona zarówno niepewność standardowa, jak również rozszerzona pomiaru. Z uwagi na to, że rzeczywista wartość wielkości mierzonej nie jest dokładnie znana, estymator wielkości średnicy frezu przyjęto w postaci średniej arytmetycznej *d_{sr}*. Oszacowanie wartości odchylenia średniego kwadratowego, będącego estymatorem odchylenia standardowego dokonano na podstawie zależności (1):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{sr})^2}{n - 1}}$$

(1)

gdzie: *n* – liczba pomiarów, *d_i* – kolejny wynik pomiaru, *i* = 1, ..., *n*, *d_{sr}* – wartość średnia arytmetyczna średnicy frezu.

Odchylenie to można traktować jako wartość niepewności standardowej pojedynczego pomiaru. Niepewność standardową wartości średniej *u* określono z zależności (2):

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(2)

zaś niepewność rozszerzoną wartości średniej *U* ze wzoru (3):

$$U = k_p \cdot u$$

(3)

gdzie: *k_p* – jest współczynnikiem rozszerzenia odpowiadającym prawdopodobieństwu *P*.

W rozważaniach przeprowadzonych w pracy wartość współczynnika rozszerzenia przyjęto na poziomie *k_p* = 2, co pokrywa przedział niepewności z prawdopodobieństwem *P* = 0,95. Przedział ten można określić korzystając z zależności (4):

$$d_{sr} - U < d_F < d_{sr} + U$$

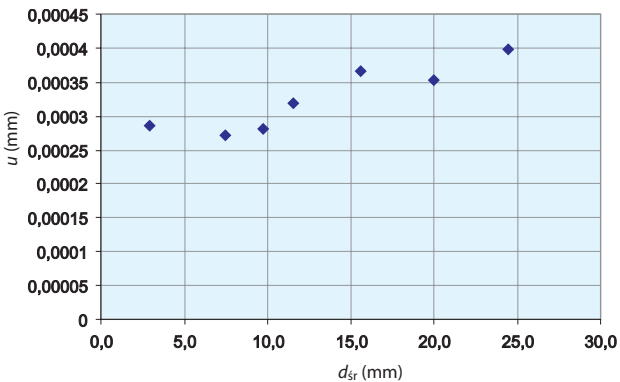
(4)

Przedstawione w tab. wyniki wskazują, że niepewność standardowa pomiaru średnicy frezu *u* przyjmuje wartości z przedziału 0,00027–0,00040, zaś niepewność rozszerzona *U* – z przedziału 0,00054–0,00080.

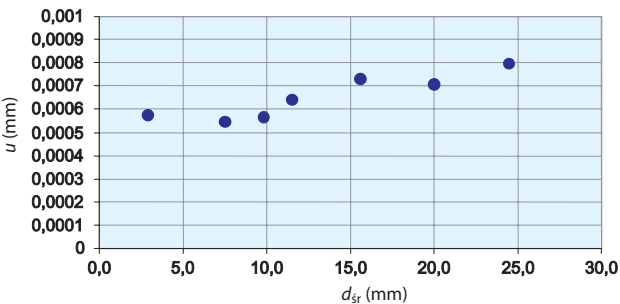
Wartość niepewności pomiaru w funkcji średnicy frezu na centrum obróbkowym FV-580A sondą NC4 przedstawiono w postaci graficznej na rys. 5–6.

Rys. 5 przedstawia przebieg zmian wartości niepewności standardowej pomiaru średnicy frezu laserową sondą pomiarową NC4 w funkcji przyjętego estymatora. Zaprezentowaną charakterystykę uzyskano w wyniku obliczeń, bazujących na wartościach wyników pomiarów eksperymentalnych.

Na rys. 6 zaprezentowano przebieg zmian wartości niepewności rozszerzonej pomiaru średnicy frezu laserową sondą pomiarową NC4 dla różnych wartości estymatora w postaci średniej. Przedstawioną charakterystykę uzyskano na podstawie obliczeń uwzględniających współczynnik rozszerzenia oraz niepewność standardową.



Rys. 5. Niepewność standardowa pomiaru średnicy laserową sondą pomiarową NC4



Rys. 6. Niepewność rozszerzona pomiaru średnicy frezu laserową sondą pomiarową NC4

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że niepewność pomiaru wyznaczona w warunkach rzeczywistych, nieznacznie przekracza niepewność szacowaną przez producenta. Szacowane wartości niepewności standardowej jak również rozszerzonej zmieniają się odpowiednio w zakresach *u* = 0,00027–0,00040, *U* = 0,00054–0,00080. Określony przedział wartości średnicy frezu z uwzględnieniem niepewności rozszerzonej przyjmuje niewielkie wartości. Zakładając, że założona przez konstruktora sze-

rokość pola tolerancji kształtowanego wymiaru na obrabiarce CNC jest większa niż przedział niepewności wyznaczenia średnicy frezu na potrzeby kompensacji oraz że przedziały te będą zachodziły na siebie, wówczas nie wystąpi przypadek niedokładnego kształtowania konturu. Okazuje się zatem, że przy akceptowalnej przez użytkownika niepewności pomiaru, system laserowy NC4, w jaki została wyposażona obrabiarka, może być wykorzystywany do oceny zmian geometrii stosowanych podczas obróbki narzędzi osiowo-symetrycznych, nie powodując przy tym niedokładności wykonania programowanego konturu. Powyższe stwierdzenie zakłada pominięcie szeregu czynników zewnętrznych i wewnętrznych wpływających na dokładność geometryczną wyrobu. Z praktyki wynika jednak, że udział poszczególnych czynników takich, jak np.: odkształcenia sprężyste, rozszerzalność cieplna, zużycie ostrza narzędzia, drgania, jest na tyle duży, że w połączeniu z dużą niepewnością oszacowania średnicy frezu, wykorzystywanej podczas kompensacji promienia narzędzia, może powodować przekroczenie pola tolerancji przewidzianej dla danego wymiaru konturu. Z tego punktu widzenia, wpływ dużej wartości niepewności pomiaru może odgrywać istotną rolę, szczególnie w przypadku obróbki wykańczającej konturów.

Bibliografia

1. *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO 1995, Switzerland. Tłumaczenie: Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik (Główny Urząd Miar Warszawa 1999).
2. Arendarski J.: *Niepewność pomiarów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
3. Zięba A.: *Natura rachunku niepewności pomiarowych a jego nowa kodyfikacja*. Postępy fizyki 52, 2001, nr 5, s. 238-247.
4. Szydłowski H.: *Międzynarodowe normy oceny niepewności pomiarowych*. Postępy fizyki 51, 2000, nr 2, s. 92-97.
5. Józwik J., Cymbała M.: *Wykorzystanie wyposażenia pomiarowego obrabiarki CNC do identyfikacji stanu ostrza narzędzia skrawającego*. Przegląd Mechaniczny, nr 6, 2008, s. 75-82.
6. Sydor P., Józwik J.: *Ocena niepewności standardowej i rozszerzonej pomiaru laserową sondą narzędziową obrabiarki CNC*. Международная научно-техническая конференция "Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта", Sewastopol 12-16 maja 2008. Издательство СевНТУ 2008.
7. Sydor P., Józwik J., i in.: *Sprawdzanie płaskości płyty pomiarowej za pomocą interferometru laserowego*. Monografia Józwik J. (red.): *Techniki wytwarzania w budowie maszyn – aktualne zagadnienia badawcze*, LTN, Lublin 2007, s. 273-278.
8. <http://www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/STAT/niepineternet.pdf> (dn. 5.11.2008). ■