

Szacowanie niepewności pomiaru zarysu okrągłości z wykorzystaniem przyrządu z obrotowym wrzecionem

Estimation of the uncertainty of the roundness measurement with a device with rotary spindle

STANISŁAW ADAMCZAK
JACEK ŚWIDERSKI
URSZULA KMIECIK-SOŁTYSIAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.145>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Oszacowano niepewność pomiaru zarysu okrągłości za pomocą przyrządu Talyrond 73 poprzez analizę źródeł błędów pomiarowych, takich jak szum pomiarowy, pełzanie sygnału, promieniowy błąd wrzeciona, powtarzalność, błąd wzmocnienia czujnika i niepewność wzorców. Zmierzone: rolę łożyskową, wzorec w postaci szklanej półkuli i walec ze ścięciem. **SŁOWA KLUCZOWE:** zarys okrągłości, niepewność pomiarowa

The paper presents the estimation of uncertainty of roundness measurement using the Talyrond 73 by analyzing the sources of measurement errors such as measuring noise, signal drift, radial spindle error, repeatability, sensor gain error and uncertainty of measurement standards. The study included the following measurements: roller bearing, glass hemisphere and flick standard.

KEYWORDS: roundness profile, uncertainty

Przy ocenie jakości wykonania części maszyn oprócz wymiarów należy uwzględniać stan powierzchni określany jako struktura geometryczna powierzchni. Jednym z elementów struktury geometrycznej powierzchni są zarysy kształtu. W elementach obrotowych są to zarysy okrągłości, walcowości i prostoliniowości tworzących. Odchyłka okrągłości jest jedną z tolerancji geometrycznych częściej wykorzystywanych do oceny dokładności wymiarowo-kształtowej takich elementów.

Metody pomiaru zarysu okrągłości

W warunkach laboratoryjnych oraz przemysłowych wykorzystuje się najczęściej dwie grupy metod pomiaru zarysów okrągłości: metody bezodniesieniowe oraz odniesieniowe. Istnieje również możliwość wykorzystania współrzędnościowej techniki pomiarowej do wyznaczenia odchyłki okrągłości.

Najprostszym bezodniesieniowym sposobem pomiaru zarysu okrągłości jest pomiar w urządzeniu kłowym. W tej technice mierzony walec, wykonujący ruch obrotowy, zamocowany jest w kłach, a czujnik umiejscowiony jest prostopadle do osi elementu. Kolejnym sposobem jest pomiar odchyłki z wykorzystaniem urządzenia z obrotowym czujnikiem, w którym czujnik pomiarowy obraca się wokół nieruchomego elementu umieszczonego na stole pomiarowym. Ostatnią techniką bezodniesieniową jest pomiar zarysu na urządzeniu z obrotowym stolikiem, podczas gdy czujnik pozostaje nieruchomy.

Metody odniesieniowe można podzielić ze względu na liczbę punktów pomiarowych oraz punktów podparcia na: 2-punktowe, 3-punktowe oraz n -punktowe [1–2].

Niewątpliwą zaletą wykorzystania współrzędnościowej techniki pomiarowej do pomiaru odchyłki okrągłości jest możliwość kompleksowej analizy wymiarowo-kształtowej badanego detalu.

Niepewność jako składnik wyniku pomiaru niezbędny do oceny zgodności ze specyfikacją

Niepewność pomiaru zgodnie normą z PKN-ISO/IEC Guide 99:2010: Międzynarodowy słownik metrologii – Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM) jest nieujemnym parametrem, charakteryzującym rozproszenie wartości wielkości, przyporządkowanym do mierzalności, który jest obliczony na podstawie uzyskanej informacji [3]. Przewodnik GUM definiuje natomiast niepewność pomiaru jako parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wartości wielkości mierzonej.

Zgodnie z wytycznymi przewodnika GUM składniki niepewności oblicza się dwiema metodami:

- A – składowe niepewności oblicza się metodami statystycznymi,
- B – składowe szacuje się innymi metodami.

W odróżnieniu od metody typu A, opartej na rozkładach wyników pomiarów, metoda typu B bazuje na obliczeniu składowych niepewności na podstawie rozkładów danych *a priori* poprzez analizę opartą na wszystkich dostępnych danych o możliwej zmienności wielkości wejściowej, takich jak: poprzednie pomiary, specyfikacje producenta przyrządu pomiarowego, dane uzyskane w trakcie wzorcowania, doświadczenie metrologa oparte na znajomości procesu pomiarowego oraz charakterystyk użytych wzorców i przyrządów [4].

Niepewność pomiaru jest składnikiem wyniku pomiaru niezbędnym do oceny zgodności ze specyfikacją wytwarzanych wyrobów. Dokumentacja konstrukcyjna wyrobu jednoznacznie określa granice tolerancji. Pomiary wytworzonego przedmiotu obarczone są niepewnością, która powoduje podział na: strefę zgodności ze specyfikacją, strefę niezgodności oraz strefę niepewności, dla której nie można określić zgodności lub jej braku [5–6].

Przyrząd pomiarowy i wzorce

Przedstawiony w artykule budżet niepewności pomiaru zarysu okrągłości dotyczy wyników pomiarów przeprowadzanych na przyrządzie z obrotowym wrzecionem Talyrond 73 firmy Taylor Hobson z trzpieniem pomiarowym

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak dr h.c. (adamczak@tu.kielce.pl), mgr inż. Jacek Świdorski (swiderski@tu.kielce.pl), mgr inż. Urszula Kmiecik-Sołtysiak (usoltysiak@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

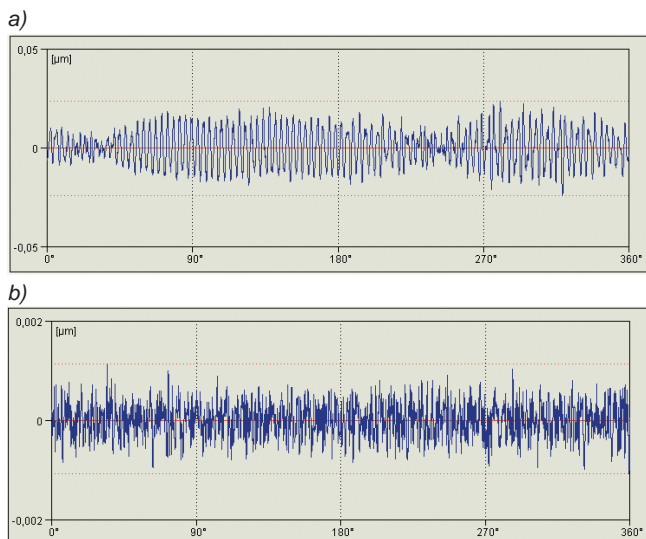
o długości 64 mm. Przyrząd znajduje się w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Analiza zmierzonych profili z wyznaczeniem parametrów przeprowadzana jest za pomocą oprogramowania ROFORM. Do wzorcowania przyrządu wykorzystano:

- wzorzec w postaci półkuli szklanej,
- wzorzec walcowy ze ścięciem (*flick standard*).

Analiza podstawowych źródeł błędów

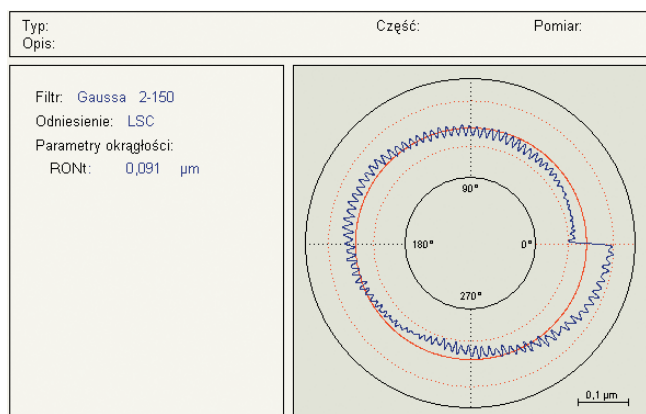
Struktura źródeł błędów występujących w procesie pomiarowym zarysów okrągłości metodą zmian promienia z wykorzystaniem przyrządów z obrotowym wrzecionem składa się z następujących podstawowych kategorii:

■ **Szum** na który składa się praca układów elektronicznych związanych z przyrządem pomiarowym oraz szum wynikający z drgań występujących w układzie napędowym wrzeciona. Zmierzona wartość szumu elementów elektronicznych stanowi tylko niewielki procent całkowitego szumu pomiarowego, który można wyznaczyć poprzez pomiar wzorca w postaci półkuli szklanej po wyodrębnieniu błędów wrzeciona (rys. 1).



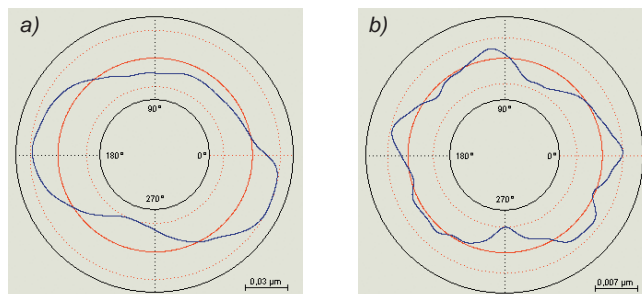
Rys. 1. Szum: a) układu elektronicznego, b) całkowity pomiarowy

■ **Pełzanie sygnału** polega na tym, że występuje znacząca różnica pomiędzy początkowym punktem zarysu a punktem końcowym. Błąd ten jest sumą pełzania sygnału czujnika pomiarowego i niestabilnego mocowania mierzonego przedmiotu na stole pomiarowym przyrządu (rys. 2).



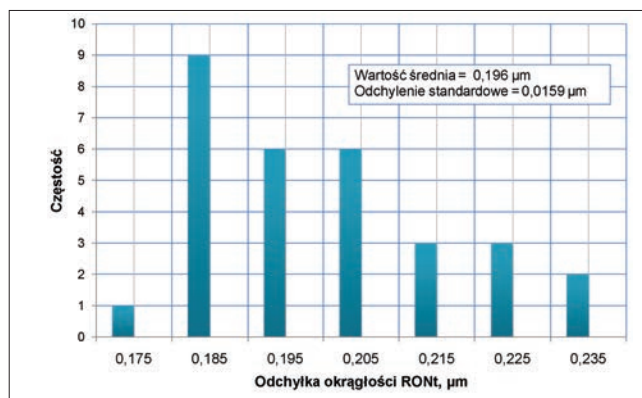
Rys. 2. Pełzanie sygnału

■ **Promieniowy błąd wrzeciona** wyznaczany podczas procesu wzorcowania za pomocą wzorca w postaci półkuli szklanej metodą wielostopniową opartą na wielokrotnych pomiarach wzorca obracanego co 30° na stole pomiarowym przyrządu. Zarejestrowany w każdym położeniu zarys okrągłości jest kombinacją błędów obrotu wrzeciona i zarysu okrągłości wzorca. Wynik pomiaru wzorca w postaci półkuli szklanej z uwzględnieniem korekcji błędów wrzeciona i bez korekcji przedstawiono na rys. 3 [7].

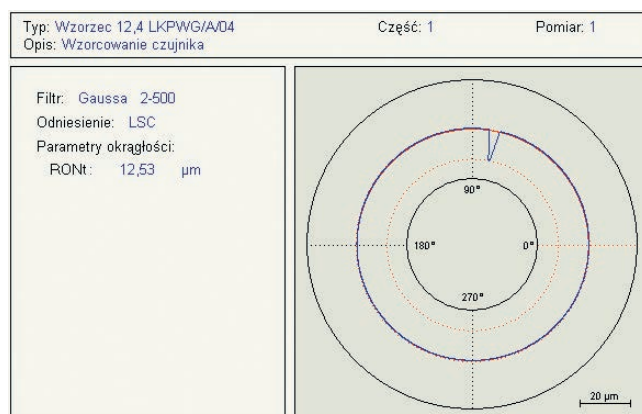


Rys. 3. Zarys okrągłości półkuli szklanej: a) bez korekcji, odchyłka okrągłości $RONT = 41$ nm, b) z uwzględnieniem korekcji błędów wrzeciona, $RONT = 8$ nm

■ **Powtarzalność** wyznaczana na podstawie 30 pomiarów elementu (walcowej rolki łożyska tocznego). Seria pomiarów wykonywana jest w ten sposób, że przed każdym kolejnym pomiarem mierzony element mocowany jest na stole pomiarowym przyrządu. Odchylenie standardowe serii pomiarów wykonywanych w ten sposób jest ok. 10-krotnie większe od odchylenia standardowego serii pomiarów bez zdejmowania mierzonego elementu ze stołu pomiarowego. W pierwszym sposobie wyznaczania powtarzalności uwzględniona jest składowa rozrzutu wynikająca z mocowania mierzonego elementu.



Rys. 4. Histogram powtarzalności wyników pomiarów uzyskanych z każdorazowym mocowaniem elementu na stole pomiarowym



Rys. 5. Zarys okrągłości wzorca walcowego ze ścięciem

■ **Błąd wzmocnienia czujnika pomiarowego** wyznaczony podczas wzorcowania dynamicznego z wykorzystaniem wzorca walcowego ze ścięciem. Zastosowanie tej metody pozwala na ustalenie wysoko częstotliwościowych odpowiedzi przyrządu (rys. 5).

■ **Niepewność wzorców** związana z procesem wzorcowania wzorca walcowego ze ścięciem oraz wzorca w postaci półkuli szklanej.

Budżet niepewności pomiaru

Równanie pomiaru z uwzględnieniem poprawek wynikających z warunków pomiaru ma postać:

$$RONt = \overline{RONt_p} + \delta_n + \delta_c + \delta_s + \delta_m$$

gdzie:

- $RONt$ – odchyłka okrągłości,
- $\overline{RONt_p}$ – średnia wyników pomiaru odchyłki okrągłości,
- δ_n – poprawka wynikająca z szumu pomiarowego,
- δ_c – poprawka wynikająca z pełzania sygnału,
- δ_s – poprawka wynikająca z błędu wrzeciona,
- δ_m – poprawka wynikająca ze wzorcowania wzmocnienia.

Niepewności standardowe poszczególnych wielkości składowych zostały określone w następujący sposób:

- Niepewność wynikająca z ograniczonej powtarzalności pomiarów określona na podstawie serii 30 pomiarów elementu o wartości odchyłki okrągłości porównywalnej do wartości elementów, dla których będzie szacowana niepewność pomiaru. Obliczone odchylenie standardowe będzie stanowił składową niepewności wynikającą z braku powtarzalności.
- Niepewność wynikająca z szumu pomiarowego określona na podstawie pomiarów półkuli szklanej, po odfiltrowaniu składowej stanowiącej błąd wrzeciona i błąd wzorca za pomocą filtra 15÷500 upr. Założono rozkład normalny.
- Niepewność wynikająca z pełzania sygnału, określona na podstawie przeprowadzonych badań. Maksymalny błąd zamknięcia nie przekracza 100 nm. Założono rozkład typu U.
- Niepewność wynikająca z błędu wrzeciona określona na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Maksymalny błąd wrzeciona nie przekracza wartości 30 nm. Założono rozkład normalny współdziałania tego błędu z zarysem okrągłości mierzzonego elementu.
- Niepewność wynikająca z błędu wzorcowania wzmocnienia czujnika pomiarowego określona na podstawie niepewności wzorcowania wzorca ze ścięciem. Według danych ze świadectwa wzorcowania niepewność wzorcowania wynosi 1% wzorcowanej wartości wzorca typu flick standard.

TABLICA. Budżet niepewności pomiaru odchyłki okrągłości

Nazwa składowej	Metoda	Typ rozkładu	Granica zmienności, nm	Składowa niepewności, nm
Powtarzalność	A	Normalny	–	15,9
Szum	A	Normalny	25	8,3
Błąd pełzania	B	U	45	31,5
Błąd wrzeciona	B	Równomierny	30	18,0
Błąd wzmocnienia	B	Równomierny	5	3,0
Niepewność standardowa złożona, u_c				40,6
Niepewność rozszerzona ($k = 2$), U				81

W oparciu o te założenia sporządzono budżet niepewności pomiaru odchyłki okrągłości, przedstawiony w tabelicy. Dotyczy on pomiaru elementów, których wartość odchyłki okrągłości nie przekracza $1\mu\text{m}$, czyli wyrobów o wysokich wymaganiach wymiarowo-kształtowych.

Niepewność standardowa złożona została obliczona ze wzoru:

$$u_c = \sqrt{u^2(\overline{RONt_p}) + u^2(\delta_n) + u^2(\delta_c) + u^2(\delta_s) + u^2(\delta_m)}$$

Natomiast niepewność rozszerzona została wyznaczona dla współczynnika $k = 2$ z prawdopodobieństwem wynoszącym 95%.

Z analizy przedstawionego budżetu niepewności wynika, że dominującymi składowymi niepewności są błąd pełzania sygnału oraz błąd wrzeciona. W przypadku pomiaru elementów o większej odchyłce kształtu wartość składowej wynikającej z błędu wzorcowania czujnika pomiarowego będzie rosła proporcjonalnie do wartości tej odchyłki i będzie to składowa dominująca bilansu niepewności.

Sposobem na zmniejszenie niepewności pomiaru odchyłki okrągłości w przypadku pomiarów elementów o małej nominalnej wartości tej odchyłki może być zastosowanie programowej korekcji błędów wrzeciona, pełzania sygnału oraz usunięcia z szumu pomiarowego dominujących składowych związanych z przeniesieniem napędu wrzeciona. Takie możliwości oferuje oprogramowanie ROFORM poprzez korekcję błędów wrzeciona, korekcję pełzania sygnału oraz usunięcie z widma amplitudowego składowych harmonicznych odpowiedzialnych za szum związany z napędem wrzeciona. W przypadku wprowadzenia tych korekcji główną składową niepewności będzie ta wynikająca z braku powtarzalności pomiarów.

Podsumowanie

Przyrządy z obrotowym wrzecionem wykorzystujące metodę zmian promienia do pomiarów zarysów okrągłości stanowią grupę przyrządów referencyjnych ze względu na osiągnięte wartości niepewności pomiaru.

Celowe jest używanie tych przyrządów do pomiarów elementów, w przypadku których stawiane są najwyższe wymagania wobec dokładności wykonania.

Ważnym elementem nadzoru metrologicznego tego typu przyrządów jest okresowe sprawdzanie błędu wrzeciona metodą wielostopniową. Pozwala to na wprowadzenie programowej korekcji tego błędu oraz dynamicznego wzorcowania za pomocą wzorca walcowego ze ścięciem.

LITERATURA

1. Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: WNT, 2008.
2. Stępień K., Janecki D., Adamczak S. “Investigating the influence of selected factors on results of V-block cylindricity measurements”. *Measurement*. 44/4 (2011): s. 767–777.
3. PKN-ISO/IEC Guide 99:2010: Międzynarodowy słownik metrologii – Podstawowe i ogólne terminy z nimi związane (VIM).
4. „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik”. Warszawa: Główny Urząd Miar, 1999.
5. PN-EN ISO 14253-1:2014: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Kontrola wyrobów i wyposażenia pomiarowego za pomocą pomiarów – Część 1: Reguły orzekania zgodności lub niezgodności ze specyfikacją.
6. PN-EN ISO 14253-2:2014: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Kontrola wyrobów i wyposażenia pomiarowego za pomocą pomiarów – Część 2: Przewodnik szacowania niepewności pomiarów w GPS, przy wzorcowaniu sprzętu pomiarowego i kontroli wyrobów.
7. Piengbangyan S., Somthong T., Buajarem J., Tonmueanwai A. „Roundness measurement capability and traceability at NIMT”. *XIX IMEKO World Congress. Fundamental and Applied Metrology*. (2009): s. 1780–1783.