

Maciej SIENIŁO, Sabina ŻEBROWSKA-ŁUCYK

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Zastosowanie algorytmu CMM do wyznaczania odchyłki okrągłości w pomiarach przekrojów powierzchni nieciągłych metodą bezodniesieniową

Mgr inż. Maciej SIENIŁO

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Obecnie słuchacz Studium Doktoranckiego na tym wydziale. Zajmuje się metodami pomiaru i opisu powierzchni geometrycznych o zmiennej krzywiźnie oraz tworzeniem algorytmów obliczeniowych do oceny dokładności pomiarów.



e-mail: m.sienilo@mchtr.pw.edu.pl

Dr hab. inż. Sabina ŻEBROWSKA-ŁUCYK

Prowadzi badania naukowe w dziedzinie metrologii geometrycznej ze szczególnym uwzględnieniem metod pomiaru makrogeometrii powierzchni. Zajmuje się też wykorzystaniem metod statystycznych w metrologii i inżynierii jakości. Jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Warszawskiej.



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

Streszczenie

Przedstawiono wyniki zastosowania do pomiarów odchyłki okrągłości metodą bezodniesieniową sposobu obliczeń opartego na algorytmie stosowanym w technice współrzędnościowej. Kontynuując wcześniej przeprowadzone badania, dotyczące elementów o powierzchniach pełnych, zastosowano tę metodę do pomiarów elementów o powierzchniach nieciągłych. Omówiono wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych przy użyciu własnego oprogramowania oraz badań eksperymentalnych, wykonanych na przyrządzie Talyrond 200. Wykazano znacznie mniejszą wrażliwość udoskonalonej metody obliczeń na położenie elementu względem osi obrotu.

Słowa kluczowe: metoda bezodniesieniowa, CMM, FMM, okrągłość

Use of CMM algorithms for computation of form errors in measurement of interrupted cross-section profiles

Abstract

Typical algorithms used in Form Measurement Machines are sensitive to the position of the measured object in measuring space. In order to get high accuracy the object should be very precisely positioned. The paper presents results of using CMM algorithms to measuring interrupted cross-section profiles by radius method, which gives results of roundness more resistive on the position of the object under measurement. There are also given results of simulations and experiments.

Keywords: Form Measuring Machines, Coordinate Measuring Machines, form error, roundness

1. Wprowadzenie

Pomiary odchyłek kształtu, a w szczególności odchyłki okrągłości, wykonywane są za pomocą dwóch typów urządzeń: uniwersalnych maszyn współrzędnościowych CMM (Coordinate Measuring Machines) oraz na stanowiskach mierzących metodą bezodniesieniową FMM (Form Measuring Machines). Maszyny współrzędnościowe umożliwiają pomiar powierzchni zarówno pełnych jak i nieciągłych o różnych kształtach i wymiarach. Czas pomiaru jest stosunkowo krótki, a typowa niepewność pomiaru odchyłki okrągłości wynosi kilka mikrometrów [1].

Urządzenia FMM nie są tak uniwersalne jak maszyny współrzędnościowe. Ich głównym przeznaczeniem jest pomiar odchyłek kształtu i położenia. Cechują się jednak znacznie wyższą dokładnością. Niepewność pomiaru na tych urządzeniach jest o rząd wielkości mniejsza w porównaniu z niepewnością pomiaru na maszynach współrzędnościowych.

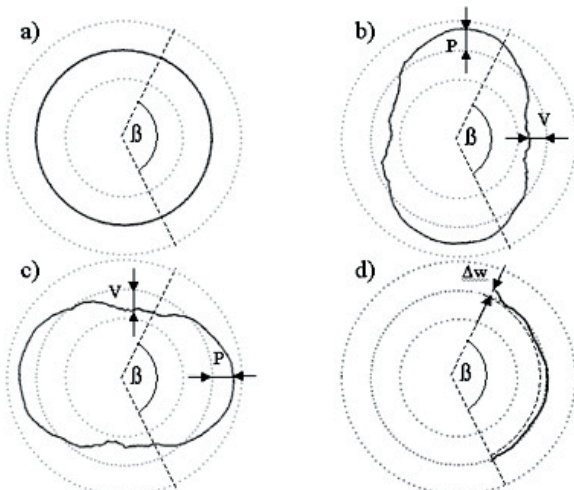
Istotnym mankamentem pomiarów na urządzeniach mierzących metodą bezodniesieniową jest długi czas cyklu pomiarowego, co wynika z konieczności pozycjonowania elementu w przestrzeni pomiarowej. Jest to spowodowane wrażliwością algorytmów obliczeniowych na położenie elementu względem osi obrotu stołu pomiarowego [2].

We wcześniejszych pracach autorzy przedstawili sposób zastosowania do pomiarów metodą bezodniesieniową rozwiązań numerycznych zapewniających odporność na położenie elementu względem osi obrotu [3, 4]. Przeprowadzone doświadczenia wskazywały na możliwość zastosowania tych rozwiązań również do pomiarów elementów o powierzchniach nieciągłych. Metodę obliczeń przedstawiono skrótowo w rozdziale 2. W dalszej części referatu zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przeprowadzonych przy zastosowaniu tej metody.

2. Algorytm tradycyjny i udoskonalony - koncepcja badań dokładności

Pomiar metodą bezodniesieniową polega na zebraniu wartości przyrostów promieni $\Delta r(\varphi)$ w punktach styku końcówki czujnika z powierzchnią elementu. Ponieważ metoda bezodniesieniowa jest wrażliwa na położenie elementu względem osi obrotu, przed przystąpieniem do pomiaru należy precyzyjnie ustawić element we właściwym miejscu przestrzeni pomiarowej.

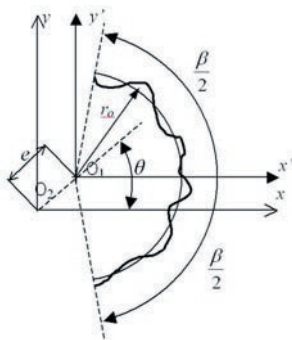
Pozycjonowanie elementów o pełnych powierzchniach walcowych nie stanowi dużego problemu, natomiast odpowiednie ustawienie elementów o przekrojach nieciągłych, zwłaszcza krótkich segmentów, jest znacznie trudniejsze i bardziej czasochłonne. Zatem, przy pomiarach tych elementów należy liczyć się z dużą mimośrodowością, a to sprawia, że ten sam fragment przekroju może przyjmować różny kształt w zależności od położenia elementu, jak to ilustruje rysunek 1, przedstawiający zarys przekroju wzorca okrągłości uzyskany na przyrządzie Talyrond 200. Wzorec ustawiono w trzech położeniach względem osi obrotu stołu pomiarowego. Przy ustawieniu osiowym (rys 1a) zarys nie wykazuje odchyłen od okrągłości. Natomiast mimośrodowe ustawienie elementu (rys 1b i 1c) spowodowało wydłużenie zarysu w kierunku zadanej mimośrodowości i spłaszczenie w kierunku prostopadłym. Miarą zniekształcenia zarysu jest suma najwyższego wzniesienia P i najgłębszej doliny V , czyli odchyłka okrągłości wyznaczona względem okręgu średniego. Rysunek 1d przedstawia wynik pomiaru odchyłki okrągłości wybranego fragmentu profilu o długości łuku określonej przez kąt β . Element pozostał ustawiony w tym samym położeniu co na rysunku 1c. Odchyłka okrągłości segmentu jest znacznie mniejsza niż pełnego profilu i z powodu małej wartości nie została ona oznaczona na rysunku.



Rys. 1. Kształt wycinka przekroju elementu wzorcowego uzyskany na przyrządzie Talyrond 200 w różnych położeniach względem osi obrotu stołu.
a) położenie osiowe b) mimośrodkowe, kierunek y c) i d) mimośrodkowe, kierunek x
Fig. 1. Results of roundness measurement of a precise cylindrical element located in various places in relation to the axis of rotation obtained from Talyrond 200
a) axial position b) eccentricity along axis y c) and d) eccentricity along axis x

Uogólniając, można zauważyć, że kształt badanego wycinka przekroju zależy od kąta β , mimośrodkowości oraz kierunku przesunięcia. W celu zbadania i opisanie tych zależności przyjęto oznaczenia przedstawione na rys. 2.

Środek zarysu o promieniu r_0 znajduje się w punkcie O_1 , a jego położenie względem punktu O_2 , leżącego na osi obrotu jest określone przez mimośrodkowość e i kąt θ .



Rys. 2. Zależności geometryczne między parametrami mierzonego przekroju
Fig. 2. Geometrical parameters of a profile under measurement

Ponadto wprowadzono współczynnik p , określający proporcję ciągłej części przekroju do jego całego obwodu:

$$p = \frac{\beta}{2\pi} \quad (1)$$

W przypadku szczególnym, gdy badany segment jest idealnie okrągły, wyznaczona odchyłka okrągłości $P+V$ jest błędem metody. Oznaczono go dalej symbolem Δw . Jest on funkcją trzech parametrów: p , e , θ .

Wpływ mimośrodkowego położenia przekroju ciągłego ($p = 1$) na wartość odchyłki okrągłości Δw zilustrowano w [4]. W pracy tej wykazano również, że zastosowanie algorytmu CMM pozwala wpływ ten istotnie zmniejszyć.

Pomiar na maszynie współrzędnościowej polega na zebraniu współrzędnych X , Y , Z punktów styku końcówki czujnika z powierzchnią elementu. Różnica pomiędzy obydwoma metodami dotyczy przede wszystkim tego, że w przypadku CMM strumień danych pochodzących z maszyny pozwala wyznaczyć promienie chwilowe badanego przekroju. W warunkach pomiarów za pomocą FMM promienie chwilowe nie są wyznaczane, a rejestrowany sygnał umożliwia wyznaczenie jedynie przyrostów promieni.

Istotą zastosowanego algorytmu jest dodanie do sygnału pomiarowego FMM średniej wartości promienia elementu, określonej na podstawie dokumentacji elementu bądź pomiaru średnicy badanego przekroju. Operacja ta powoduje przekształcenie zbioru przyrostów promieni chwilowych, wyrażonych w funkcji kąta obrotu, w zbiór promieni chwilowych. Następną operacją jest przeliczenie współrzędnych punktów pomiarowych z układu biegunowego na kartezjański. Otrzymany zbiór danych jest zbliżony do danych pomiarowych na maszynie współrzędnościowej, co umożliwia zastosowanie algorytmu CMM do wyznaczania okręgu odniesienia.

Tak zmodyfikowana metoda obliczeń będzie dalej zwana metodą udoskonaloną. Szersze omówienie tej koncepcji oraz jej matematyczne wyprowadzenie przedstawiono w [4].

3. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne pozwoliły prześledzić efekty zastosowania tradycyjnej i udoskonalonej metody wyznaczania okręgu średniego w pomiarach odchyłki okrągłości przekrojów nieciągłych.

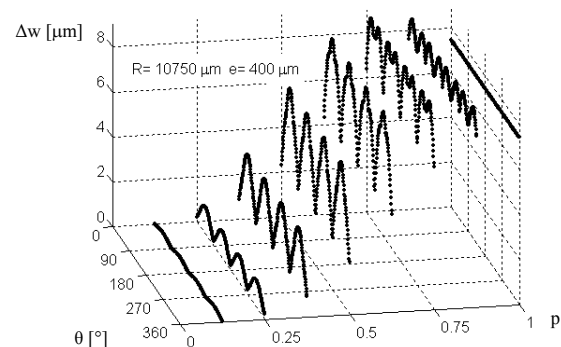
W badaniach tych analizowano osiem wycinków o różnej długości, zdefiniowanej za pomocą współczynnika p , zgodnie z zależnością $p = i/8$, gdzie i – liczba całkowita z przedziału (1, 8). Następnie, zmieniając długość e i kierunek θ wektora mimośrodkowości wyznaczano odchyłkę okrągłości dwiema metodami: tradycyjną i udoskonaloną.

W badaniach symulacyjnych zaniedbano odchyłki kształtu elementu. Błędy wynikające ze stosowania metody tradycyjnej oznaczono symbolem Δw (bez dodatkowego indeksu), a błędy metody udoskonalonej - symbolem Δw_k .

Opracowane programy symulacyjne dają możliwość wprowadzania różnych wartości promienia końcówki czujnika oraz promienia przekroju. Materiał ilustracyjny przedstawiony w dalszej części artykułu dotyczy elementu o promieniu 9,5 mm i końcówki o promieniu 1,25 mm. Wybór takich wartości pozwala na porównanie wyników badań symulacyjnych z przedstawionymi w rozdziale 4 badaniami empirycznymi.

3.1 Badania metodą tradycyjną

Wyniki badań symulacyjnych z zastosowaniem algorytmu tradycyjnego przedstawiono na rys. 3. Dla celów poglądowych przyjęto bardzo dużą wartość e (400 μm).

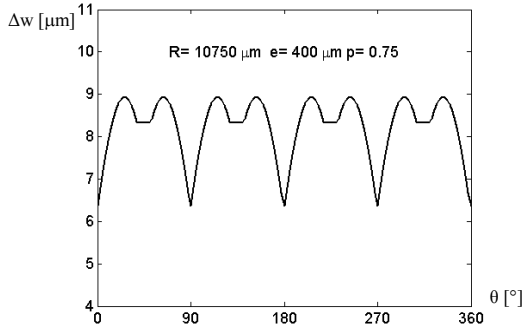


Rys. 3. Wpływ parametrów p , e , θ na wartość odchyłki okrągłości wyznaczoną metodą tradycyjną

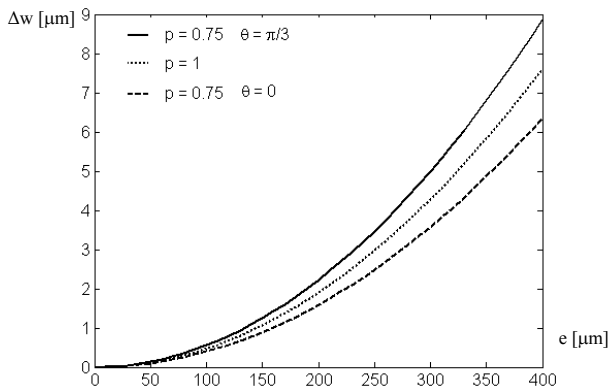
Fig. 3. Influence of the parameter p , e , θ on the measurement error of roundness - typical method

Błąd pomiaru Δw osiąga w skrajnie niekorzystnych warunkach wartość ponad 8 μm . Błąd ten zależy od długości łuku badanego wycinka, wyrażonej wartością współczynnika p , oraz od kierunku mimośrodkowości θ . Widoczne na rys. 3 oscylacje są szczególnie silne dla p (0,25 – 0,75).

Na rys. 4 przedstawiono wykres błędów $\Delta w(\theta)$ dla wycinka $p = 0,75$. Jak widać, można wyróżnić kierunki mimośrodowości mniej i bardziej korzystne pod względem dokładności uzyskiwanych wyników. Najmniejsze błędy pomiaru występują dla kierunków pokrywających się z kierunkiem osi x ($\theta = 0 + k\pi$) lub y ($\theta = \pi/2 + k\pi$). Różnica Δw pomiędzy położeniem najbardziej i najmniej korzystnym przekracza w tym przypadku $2 \mu\text{m}$.



Rys. 4. Wykres błędów dla metody tradycyjnej; $p = 0,75$
Fig. 4. Plot of form errors for typical method; $p = 0,75$



Rys. 5. Wpływ ustawienia elementu na wartość odchyłki okrągłości; algorytm tradycyjny
Fig. 5. Influence of the position of element on the roundness measurement error; typical algorithm

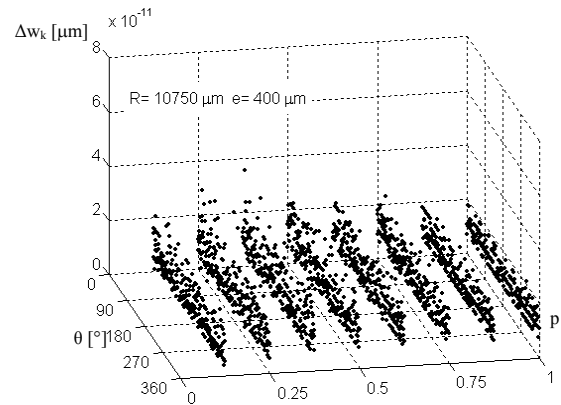
Wyniki badań symulacyjnych metodą tradycyjną podsumowuje rys. 5. Pokazano na nim wpływ położenia elementu na błąd pomiaru okrągłości dwóch przekrojów $p = 0,75$ i $p = 1$. Przedstawiono dwa kierunki mimośrodowości, $\theta = 0$ i $\theta = \pi/3$, najbardziej i najmniej korzystny w przypadku przekrojów nieciągłych. Dla przekroju pełnego kierunek mimośrodowości nie ma wpływu na wartość Δw . Natomiast dla segmentu przekroju otrzymano rozrzut możliwych do uzyskania wartości Δw w zależności od θ .

Należy dodać, że w przypadku pomiaru przekrojów nieciągłych operator nie ma możliwości decydowania o kierunku mimośrodowości. A więc zaobserwowane oscylacje są trudne do wyeliminowania i zwiększają niepewność pomiaru odchyłek kształtu metodą tradycyjną.

3.2 Badania metodą udoskonaloną

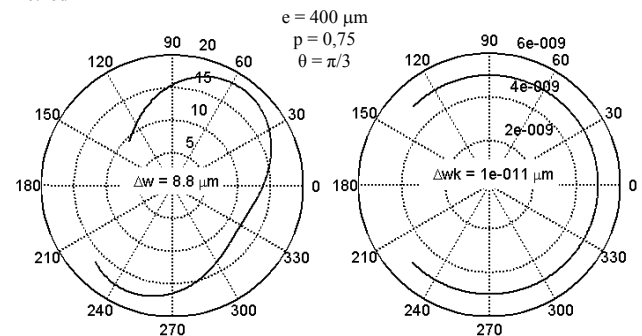
Wyniki badań symulacyjnych dla metody udoskalonej wykazały dużą odporność jej algorytmów na mimośrodowe położenie elementu w przestrzeni pomiarowej (rys. 6). Błędy mają charakter wyłącznie losowy i są pomijalnie małe (rzędu $10^{-11} \mu\text{m}$). Poza tym ani kierunek mimośrodowości θ ani długość łuku p nie mają wpływu na błąd pomiaru Δw_k .

Porównując kształty przekrojów uzyskane dwiema metodami (rys. 7) widać, że przy zastosowaniu algorytmu udoskalonego nie występują zniekształcenia badanego wycinka. Jest on kształtem bardzo zbliżony do fragmentu okręgu.



Rys. 6. Wpływ parametrów p, e, θ na wartość odchyłki okrągłości wyznaczonej metodą udoskonaloną

Fig. 6. Influence of parameters p, e, θ on the roundness measurement error; new method



Rys. 7. Wykresy biegunowe zarysu uzyskane w badaniach symulacyjnych: a) metodą tradycyjną, b) metodą udoskonaloną

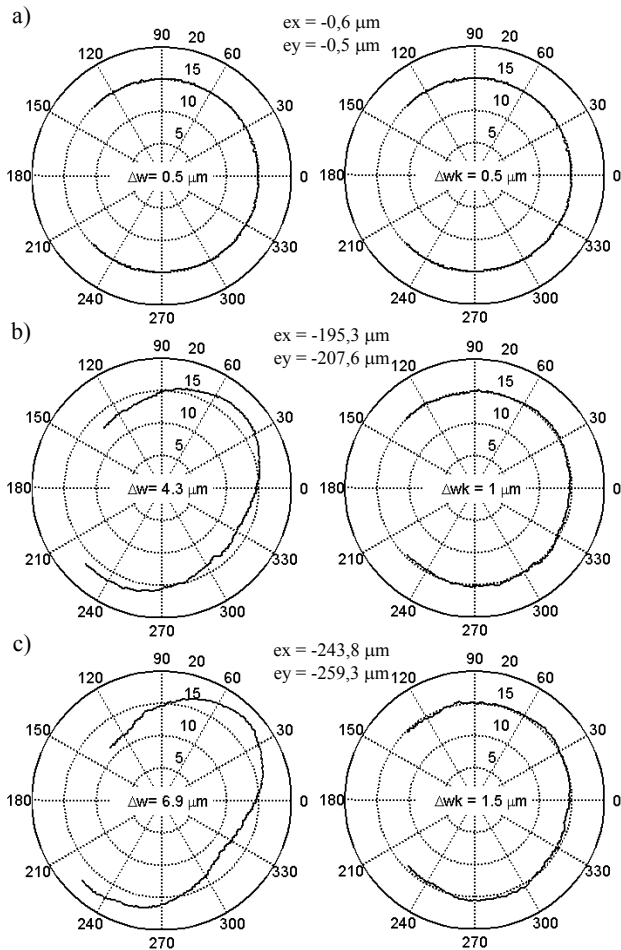
Fig. 7. Polar plots of profiles obtained by simulations: a) typical method, b) new method

Podsumowując, przedstawione wyniki badań symulacyjnych metodą udoskonaloną pozwalają oczekiwać znacznego zmniejszenia wpływu położenia elementu względem osi obrotu na wynik pomiaru odchyłki okrągłości.

4. Badania eksperymentalne

Celem badań eksperymentalnych było porównanie błędów, jakie występują w warunkach rzeczywistych, gdy ten sam sygnał jest analizowany przy użyciu tradycyjnego algorytmu i przy użyciu algorytmu udoskalonego. Badania zostały przeprowadzone na przyrządzie Talyron 200 firmy Taylor Hobson skomputeryzowanym w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych. Badano przekroje poprzeczne wzorca okrągłości o średnicy 19 mm , charakteryzującego się wysoką dokładnością wykonania i kształtem przekroju bardzo zbliżonym do okręgu (z odchyłką okrągłości poniżej $0,2 \mu\text{m}$). Pomiary wykonano czujnikiem wyposażonym w kulistą końcówkę o średnicy $2,5 \text{ mm}$. Mierzono pełne przekroje, ustawiając wzorec w różnych odległościach od osi stołu pomiarowego. Następnie numerycznie usuwano fragmenty zarysu, uzyskując w ten sposób segmenty o założonej długości kątowej.

Wykresy po lewej stronie na rysunku 8 przedstawiają wyniki pomiarów uzyskane metodą tradycyjną, a wykresy z prawej strony - wyniki pomiarów tego samego przekroju metodą udoskonaloną. Rys. 8a odpowiada osiowemu ustawieniu elementu, a dwa kolejne ustawieniom mimośrodowym. Na obydwu wykresach rysunku 8b i 8c profil wykazuje pewne deformacje, jednak są one znacznie większe po lewej stronie, gdzie ujawnił się kształt owalny - rezultat niedoskonałości algorytmu tradycyjnego. Profile po prawej stronie mają kształt nieregularny i są zdecydowanie bardziej zbliżone do wykresów na rysunku 8a. Odstępstwa od kształtu okrągłego są spowodowane głównie nieliniowością charakterystyki czujnika, co wykazały odrębne badania.

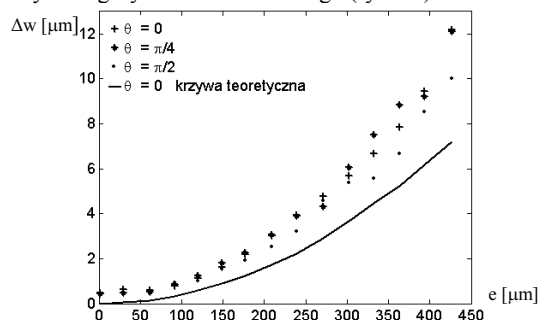


Rys. 8. Wykresy odchyłek kształtu elementu wzorcowego otrzymane za pomocą FMM przy użyciu typowego algorytmu (po lewej stronie) i zmodyfikowanego algorytmu (po prawej), $p = 0,75$

Fig. 8. Polar plots of form errors of a cylindrical master obtained by typical algorithm (on the left side) and new one (on the right)

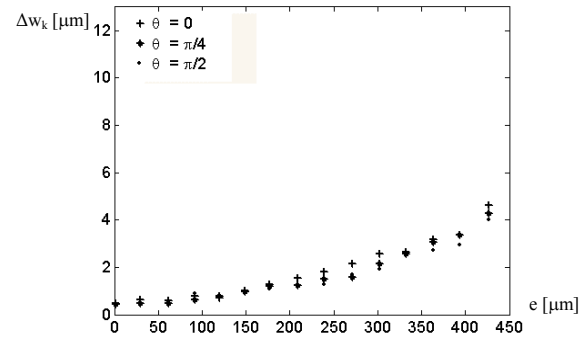
Na rys. 9 i 10 przedstawiono wykresy ilustrujące zbiorcze wyniki pomiarów odchyłki okrągłości wzorca $\varnothing 19$, uzyskane przy użyciu obu algorytmów obliczeniowych. Badany element ustawiano na stole pomiarowym w różnej odległości od osi obrotu w trzech kierunkach ($\theta = 0$, $\theta = \pi/4$, $\theta = \pi/2$).

Wykresy przedstawione na rys. 9 w postaci punktów obrazują wyniki pomiarów otrzymanych metodą tradycyjną dla różnych kątów θ . Różnica pomiędzy wartościami w eksperymencie dla $\theta = 0$ (punkty oznaczone znakiem +), a krzywą teoretyczną świadczy o tym, że w warunkach rzeczywistych na wyniki pomiaru odchyłki okrągłości mają, oprócz mimośradowości, inne czynniki. Te czynniki to nieliniowość charakterystyki czujnika, błąd dyskretyzacji sygnału pomiarowego oraz zmienny punkt styku końcówki czujnika z powierzchnią elementu. Różnica ta jest zbliżona do wartości odchyłki okrągłości Δw_k wyznaczonej przy użyciu algorytmu udoskonalonego (rys. 10).



Rys. 9. Wpływ mimośradowości e na błąd pomiaru odchyłki okrągłości metodą tradycyjną, $p = 0,75$

Fig. 9. Influence of the eccentricity on the measurement error of roundness - typical method; $p = 0,75$



Rys. 10. Wpływ mimośradowości e na błąd pomiaru odchyłki okrągłości metodą udoskonaloną; $p = 0,75$

Fig. 10. Influence of the eccentricity on the measurement error of roundness - new method; $p = 0,75$

Można zatem stwierdzić, że wymienione czynniki są źródłem takich samych błędów w obydwu metodach. Ich wpływ jest przyczyną wzrostu wartości odchyłki Δw_k w pomiarach przeprowadzonych metodą udoskonaloną (rys 10).

Pomimo to wyniki pomiarów uzyskane nową metodą są obciążone ponad dwukrotnie mniejszym błędem. Zbliżonych obserwacji dostarczyły także badania elementów o większych rozmiarach, niższej dokładności wykonania i innym kształcie przekroju.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki symulacyjnych i empirycznych pomiarów odchyłki okrągłości elementów o powierzchni nieciągłej z zastosowaniem dwóch metod: tradycyjnej i udoskonalonej.

Wyniki badań symulacyjnych wykazały, że zastosowanie udoskonalonej metody pozwoli całkowicie wyeliminować błędy wynikające z mimośradowego ustawienia elementu.

Badania laboratoryjne ujawniły znaczenie czynników związanych z konstrukcją urządzenia pomiarowego, które nie były uwzględnione w badaniach symulacyjnych. Najistotniejszym z nich jest nieliniowość charakterystyki czujnika.

Tę przyczynę błędów można stosunkowo łatwo usunąć lub ograniczyć poprzez numeryczną korekcję charakterystyki czujnika. Inne przyczyny błędów są wprawdzie trudniejsze do wyeliminowania, ale za to o mniejszym znaczeniu. Są to: szumy w torze przetwarzania sygnału pomiarowego, błąd dyskretyzacji, czy też niewłaściwy (inny niż promieniowy) kierunek przesuwu końcówki podczas skanowania powierzchni elementu, błędy kształtu kulistej końcówki czujnika

Mimo stwierdzonego wpływu błędów sprzętowych weryfikacja eksperymentalna potwierdziła odporność udoskonalonego algorytmu na mimośradowe położenie badanych przekrojów.

6. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [2] Żebrowska-Lucyk S.: Bezodniesieniowa metoda badania makrogeometrii powierzchni elementów obrotowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [3] Sieniło M., Żebrowska-Lucyk S.: Wyznaczanie zarysu przekrojów poprzecznych tłoków silnikowych metodą bezodniesieniową z wykorzystaniem algorytmów CMM. Materiały Konferencji Doktoranci Gospodarce 2006, Sarbinowo 10.2006.
- [4] Sieniło M., Żebrowska-Lucyk S.: Wykorzystanie algorytmów maszyn współrzędnościowych w pomiarach odchyłki okrągłości metodą bezodniesieniową. Zeszyty Naukowe Akad. Techn.-Humanistycznej w Bielsku Białej, 22/2006, 281-290.