

Krzysztof NOZDRZYKOWSKI
AKADEMIA MORSKA W SZCZECINIE

Analiza błędu pomiaru odchyłki okrągłości wynikającego z nieprostokątności promieni zarysu kształtu przedmiotu mierzonego do stycznych w stałych punktach podparcia pryzm ustalających

Dr inż. Krzysztof NOZDRZYKOWSKI

Dr inż. Krzysztof Nozdrzykowski jest kierownikiem Zakładu Podstaw Budowy i Eksploatacji Maszyn Instytutu Nauk Podstawowych Technicznych Akademii Morskiej w Szczecinie. Jego działalnością naukową objęte są zagadnienia metrologii, makro- i mikrogeometrii powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów błędów kształtu i położenia osi cylindrycznych dużych elementów maszyn.



e-mail: inpt@am.szczecin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu nieprostokątności promieni zarysów okrągłości przedmiotu mierzonego do stycznych tworzących kąt rozwarcia pryzm ustalających ten przedmiot na wartość względnego błędu mierzonej odchyłki okrągłości. Wyniki tej analizy przedstawione w formie wykresów pozwalają wnioskować, że wartość rozpatrywanego błędu uzależniona jest w dużej mierze od nieregularności zarysu przekroju mierzonego i zarysów powierzchni przedmiotu stykających się z powierzchniami pryzm ustalających.

Słowa kluczowe: analiza, błędy pomiaru, podparcie w pryzmach.

Analysis of the roundness deviation measurement error due to non-perpendicularity of measured object contour radiuses relative to tangents at fixed v-block support points

Abstract

The paper presents analysis results of the effect of non-perpendicularity of the measured object roundness contour radiuses to the tangents making up the Vee angle of the fixing V-blocks on the value of the relative error of the measured roundness deviation. Basing on the analysis results shown in the form of diagrams one can draw a conclusion that the value of the examined error largely depends on the measured cross-section contour irregularity as well as on the contours of the object surface contacting the V-block surfaces.

Keywords: analysis, measurement errors, support in V-blocks.

1. Wprowadzenie

W odniesieniowych pomiarach odchyłki okrągłości wyróżnia się punkty podparcia (bazowe) czyli punkty styku przedmiotu z pryzmą ustalającą oraz punkty pomiaru czyli punkty styku czujnika z przedmiotem mierzonym. Usytuowanie tych punktów względem przyjętego układu współrzędnych określają parametry metody, czyli kąty 2γ i α , rys. 1. Kąt 2γ jest kątem pomiędzy stycznymi do punktów podparcia mierzonego przedmiotu, natomiast kąt α jest kątem pomiędzy kierunkiem pomiaru wyznaczonym przez kierunek przemieszczenia trzpienia pomiarowego czujnika a osią x przyjętego układu współrzędnych. W odniesieniu do tak realizowanych pomiarów odchyłek okrągłości opracowano modele matematycznego zapisu drogi przemieszczania się środka przedmiotu mierzonego [3] lub modele matematycznego zapisu zmiany umownej odległości z [5, 1], które to modele pozwoliły na szczegółową analizę stosowanych metod odniesieniowych, głównie pod kątem szerszego ich stosowania w praktyce pomiarowej. Przyjęte modele matematycznego zapisu pomiaru zarysu okrągłości pozwalają w rezultacie na wyznaczenie zmierzonej odchyłki okrągłości ΔZ oraz tzw. współczynnika wykrywalności k_n nie-

zbędnego do wyznaczania rzeczywistej odchyłki okrągłości ΔR . Współczynnik wykrywalności k_n jest określony ilorazem zmierzonej odchyłki okrągłości ΔZ do jej wartości rzeczywistej ΔR – zależność (1):

$$k_n = \frac{\Delta Z}{\Delta R} \quad (1)$$

Opracowane modele teoretyczne opierały się na założeniach upraszczających, które zakładały między innymi, że:

- występują stałe punkty podparcia, utworzone przez dwie styczne, przecinające się pod kątem 2γ oraz przez promienie zarysu, które są prostopadłe do tych stycznych;
- powierzchnie tworzące stałe punkty podparcia są sztywne i odporne na ścieranie;
- punkty styku przedmiotu z punktami podparcia i punkty styku czujnika pomiarowego z przedmiotem oraz kierunek jego przemieszczania leżą w płaszczyźnie prostopadłej do osi wzdluznej przedmiotu;
- podczas obrotu mierzonego przedmiotu jest zachowany zawsze styk punktowy czujnika z jego powierzchnią;
- kierunek przemieszczenia końcówki pomiarowej czujnika, określony kątem α , przechodzi przez środek okręgu przyjętego jako okrąg odniesienia do oceny odchyłki okrągłości;
- podczas obrotu mierzonego przedmiot ma stały kontakt z punktami podparcia;
- pomijane są inne rodzaje nierówności powierzchni niż nierówności opisujące błędy kształtu;
- dowolny zarys mierzony jest sumą wyrazów skończonego lub nieskończonego trygonometrycznego szeregu Fouriera, cosinusoidalnych fal o określonych wartościach amplitud poszczególnych składowych harmonicznych i ich przesunięciach fazowych.

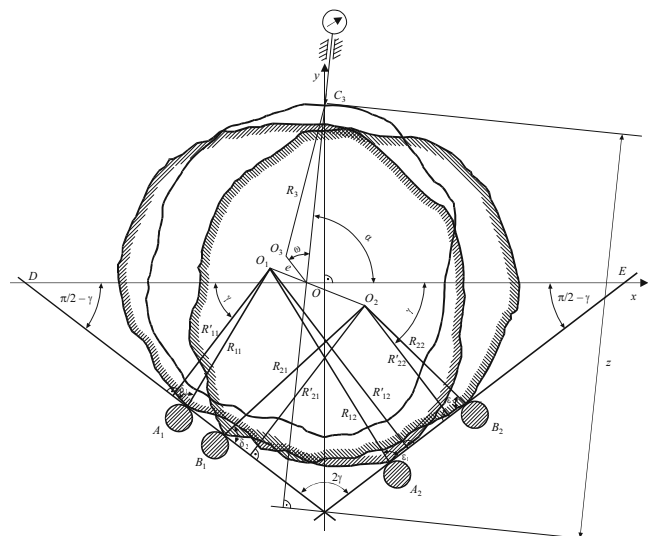
Przyjęcie założenia, że w punktach podparcia promienie zarysu mierzonego są prostopadłe do stycznych, tworzących kąt 2γ jest pewnym uproszczeniem. W pomiarach praktycznych ze względu na nieregularność zarysu mierzonego, promienie te mogą być nieprostopadłe. Nieprostokątność ta, jest funkcją kąta obrotu mierzonego przedmiotu i jak wykazano w pracy S. Adamczaka [2] dla układów jednopryzmowych, wpływ jej na wartość błędu współczynnika wykrywalności dla składowych harmonicznych dominujących jest nieznaczny, natomiast dla pozostałych harmonicznych nieprostokątność ta wpływa znacząco na wartość błędu wyznaczenia współczynnika wykrywalności k_n a więc i na dokładność pomiaru odchyłki okrągłości.

Przeprowadzona analiza błędu pomiaru odchyłki okrągłości wynikającego z nieprostokątności promieni zarysu przedmiotu mierzonego do stycznych do stałych punktów podparcia dla pomiarów realizowanych w dwóch pryzmach (odnoszących się do pomiarów dużych cylindrycznych elementów maszyn), której rezultaty są przedmiotem niniejszego opracowania, wykazała odmienny charakter zmienności rozpatrywanego błędu.

2. Podstawy teoretyczne wyznaczenia błędu pomiaru spowodowanego nieprostokątnością promieni zarysów przedmiotu mierzonego do stycznych do stałych punktów podparcia dla pomiarów realizowanych w dwóch pryzmach

Przyjmując, że przy podparciu przedmiotu mierzonego w dwóch pryzmach promienie zarysów przedmiotu mierzonego mogą być nieprostopadłe do stycznych do stałych punktów pod-

parcia tworzących kąt rozwarcia pryzm 2γ , schemat odniesionych pomiarów okrągłości przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat pomocniczy do wyznaczania błędu pomiaru odchyłki okrągłości spowodowanego nieprostopadłością promieni zarysu mierzonego do stycznych do stałych punktów podparcia dla pomiarów realizowanych w dwóch pryzmach

Fig. 1. Auxiliary diagram for determination of the roundness deviation measurement error caused by the measured contour radius non-perpendicularity to the tangents to fixed support points for measurements involving two V-blocks

Uwzględniając, że promienie zarysu przedmiotu mierzonego są usytuowane względem stycznych do stałych punktów podparcia odpowiednio pod kątami δ_{p1} , δ_{p2} , ε_{p1} , ε_{p2} , funkcję $\Delta Z_3(\gamma, \alpha, l, l_1, \delta_{p1}, \delta_{p2}, \varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2}, n_1, n_2, n_3, \varphi)$ przedstawiającą zapis matematyczny mierzonego zarysu okrągłości można (przy założeniu, że przesunięcia fazowe harmonicznych φ_{n1} , φ_{n2} , φ_{n3} równe są zero, w oparciu o [4]) wyrazić następująco:

$$\begin{aligned} \Delta Z_3(\gamma, \alpha, l, l_1, \delta_{p1}, \delta_{p2}, \varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2}, n_1, n_2, n_3, \varphi) = & \\ & \sum_{n_3=2}^{k_3} A_{n_3} \cos n_3 \varphi + e \cdot \cos(\varphi + \omega) + \\ & + \sum_{n_1=2}^{k_1} A_{n_1} (\cos n_1 \varphi \cdot X_1 - \sin n_1 \varphi \cdot Y_1) \frac{l_1}{l} + \\ & + \sum_{n_2=2}^{k_2} A_{n_2} (\cos n_2 \varphi \cdot X_2 - \sin n_2 \varphi \cdot Y_2) \frac{(l-l_1)}{l} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} X_1 &= \cos n_1 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma + \delta_{p1} \right) \sin \delta_{p1} \cdot \frac{\sin(\gamma + \alpha)}{\sin 2\gamma} + \\ & - \cos n_1 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma - \varepsilon_{p1} \right) \sin \varepsilon_{p1} \cdot \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin 2\gamma} \\ Y_1 &= \sin n_1 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma + \delta_{p1} \right) \sin \delta_{p1} \cdot \frac{\sin(\gamma + \alpha)}{\sin 2\gamma} + \\ & - \sin n_1 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma - \varepsilon_{p1} \right) \sin \varepsilon_{p1} \cdot \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin 2\gamma} \\ X_2 &= \cos n_2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma + \delta_{p2} \right) \sin \delta_{p2} \cdot \frac{\sin(\gamma + \alpha)}{\sin 2\gamma} + \\ & - \cos n_2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma - \varepsilon_{p2} \right) \sin \varepsilon_{p2} \cdot \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin 2\gamma} \\ Y_2 &= \sin n_2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma + \delta_{p2} \right) \sin \delta_{p2} \cdot \frac{\sin(\gamma + \alpha)}{\sin 2\gamma} + \\ & - \sin n_2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma - \varepsilon_{p2} \right) \sin \varepsilon_{p2} \cdot \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin 2\gamma} \end{aligned}$$

Funkcja opisana zależnością (2) o postaci $\Delta Z_3(\gamma, \alpha, l_1, l, n_1, n_2, n_3, \varphi)$ (w której nie występują kąty δ_{p1} , δ_{p2} , ε_{p1} , ε_{p2}) posiada maksymalną i minimalną wartość, których różnica jest teoretyczną wartością zmierzonej odchyłki okrągłości ΔZ_3 . Wartość ta zmieniać się może jednak w zależności od zmiany wartości kombinacji kątów δ_{p1} , δ_{p2} , ε_{p1} , ε_{p2} . Wyznaczając więc ekstremalne wartości funkcji $\Delta Z_3(\gamma, \alpha, l_1, l, \delta_{p1}, \delta_{p2}, \varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2}, n_1, n_2, n_3, \varphi)$ dla założonego zarysu rzeczywistego, obliczyć można maksymalną wartość zmierzonej odchyłki okrągłości $\Delta Z_{3\max}$, a następnie błąd względny wyznaczenia odchyłki okrągłości zgodnie z zależnością:

$$W_{\Delta Z_3} = \frac{\Delta Z_3 - \Delta Z_{3\max}}{\Delta Z_{3\max}} \quad (3)$$

gdzie:

ΔZ_3 – teoretyczne wartości zmierzonej odchyłki okrągłości dla określonych parametrów metody i wielkości wyjściowych przyjętych do obliczeń;

$\Delta Z_{3\max}$ – maksymalna wartość zmierzonej odchyłki okrągłości z uwzględnieniem nieprostopadłości promieni zarysów do stycznych do stałych punktów podparcia.

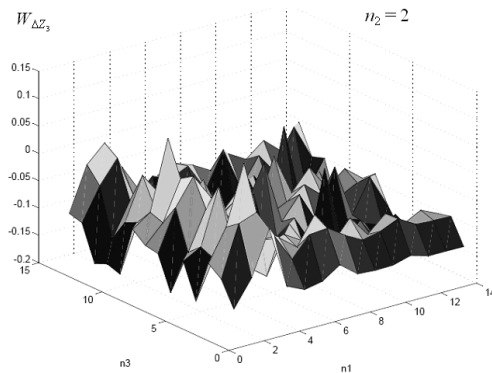
3. Analiza błędu pomiaru odchyłki okrągłości zawiązanego z nieprostopadłością promieni zarysów przedmiotu mierzonego do stycznych do stałych punktów podparcia

Obliczenia błędu wyznaczenia odchyłki okrągłości spowodowanego nieprostopadłością promieni zarysu przedmiotu mierzonego do stycznych do stałych punktów podparcia przeprowadzono metodą symulacji w oparciu o opracowany program obliczeniowy operujący w środowisku Matlab. Program ten umożliwił obliczenie błędu $W_{\Delta Z_3}$ dla dowolnych wartości parametrów i wielkości wpływających na jego wartość oraz graficzne przedstawienie wzajemnych zależności w postaci wykresów trójwymiarowych. W badaniach tych przyjęto, że zmiana wartości kątów δ_{p1} , δ_{p2} , ε_{p1} , ε_{p2} określających nieprostopadłość wynosi $89,75^\circ$ i $90,25^\circ$.

Otrzymane rezultaty pozwalają wnioskować, że wartość błędu wynikająca z niezachowania prostopadłości stycznych do promieni zarysu mierzonego, uzależniona jest zdecydowanie od kombinacji harmonicznych zarysu mierzonego oraz zarysów stykających się z powierzchniami pryzm ustalających, przedziały zmian i wartości błędów są jednak większe niż przy podparciu w jednej pryzmie.

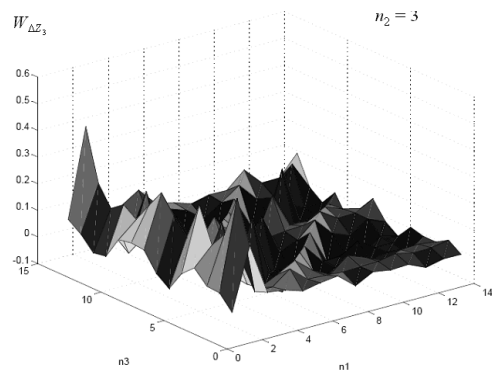
Potwierdzeniem tego wniosku są przykładowe wykresy (rys. 2 ÷ 5) przedstawiające zmianę wartości względnego błędu pomiaru odchyłki okrągłości spowodowanego nieprostopadłością stycznych i promieni w zależności od kolejnych harmonicznych zarysu mierzonego oraz zarysów przedmiotu stykających się z punktami pryzm ustalających. Wykresy te sporządzono dla parametrów metody $\alpha = 80^\circ$, $\gamma = 60^\circ$, $l_1 = 1100$, $l = 3000$ oraz przyjętej amplitudy zarysu mierzonego $A_{n_3} = 0,4$ i amplitud zarysów stykających się z punktami pryzm ustalających $A_{n_1} = 0,2$, $A_{n_2} = 0,35$.

Wykresy na rys. 2 i 3 przedstawiają zależność $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji harmonicznych n_1 i n_3 zmieniających się w granicach od 2 do 15 przy stałej wartości harmonicznej głównej n_2 wynoszącej kolejno 2 i 3. Wykresy na rys. 4 i 5 przedstawiają natomiast zależność $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji harmonicznych n_1 i n_2 zmieniających się w granicach od 2 do 15 przy stałej wartości harmonicznej głównej n_3 wynoszącej kolejno 2 i 3.



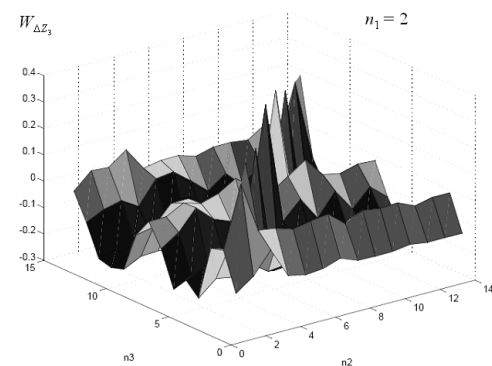
Rys. 2. Wykres przedstawiający zależności zmian wartości względnego błędu $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji zmian harmonicznnej głównej zarysu mierzonego n_3 i harmonicznnej głównej n_1 pierwszego z zarysów ustalonych w przyzmac oraz stałej wartości harmonicznnej głównej $n_2 = 2$ drugiego z zarysów ustalonych w przyzmac

Fig. 2. Changes in relative error $W_{\Delta Z_3}$ as a function of changes in the main harmonic of measured contour n_3 and the main harmonic n_1 of the first contour set in V-blocks at the constant value of the main harmonic $n_2 = 2$ of the second contour set in V-blocks



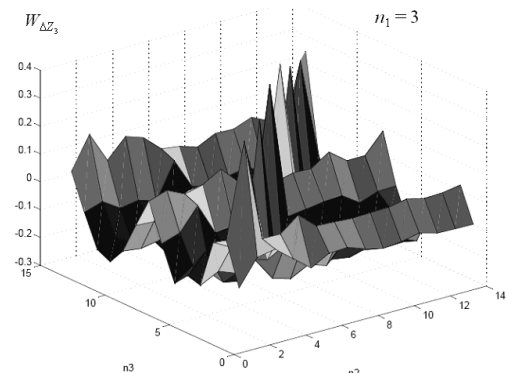
Rys. 3. Wykres przedstawiający zależność zmian wartości względnego błędu $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji zmian harmonicznnej głównej zarysu mierzonego n_3 i harmonicznnej głównej n_1 pierwszego z zarysów ustalonych w przyzmac oraz stałej wartości harmonicznnej głównej $n_2 = 3$ drugiego z zarysów ustalonych w przyzmac

Fig. 3. Changes in relative error $W_{\Delta Z_3}$ as a function of changes in the main harmonic of measured contour n_3 and the main harmonic n_1 of the first contour set in V-blocks at the constant value of the main harmonic $n_2 = 3$ of the second contour set in V-blocks



Rys. 4. Wykres przedstawiający zależność zmian wartości względnego błędu $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji zmian harmonicznnej głównej zarysu mierzonego n_3 i harmonicznnej głównej n_2 drugiego z zarysów ustalonych w przyzmac oraz stałej wartości harmonicznnej głównej $n_1 = 2$ pierwszego z zarysów ustalonych w przyzmac

Fig. 4. Changes in relative error $W_{\Delta Z_3}$ as a function of changes in the main harmonic n_3 of the measured contour and the main harmonic n_2 of the second contour set in V-blocks at the constant value of the main harmonic $n_1 = 2$ of the first contour set in V-blocks



Rys. 5. Wykres przedstawiający zależność zmian wartości względnego błędu $W_{\Delta Z_3}$ w funkcji zmian harmonicznnej głównej zarysu mierzonego n_3 i harmonicznnej głównej n_2 drugiego z zarysów ustalonych w przyzmac oraz stałej wartości harmonicznnej głównej $n_1 = 3$ pierwszego z zarysów ustalonych w przyzmac

Fig. 5. Changes in relative error $W_{\Delta Z_3}$ as a function of changes in the main harmonic n_3 of the measured contour and the main harmonic n_2 of the second contour set in V-blocks at the constant value of the main harmonic $n_1 = 3$ of the first contour set in V-blocks

Dla tak przyjętych wielkości wpływających na dokładność pomiaru odchyłki okrągłości, błąd ten zmienia swoją wartość kolejno w granicach:

- $\langle -0,16796 \div 0,083783 \rangle$ (rys. 2),
- $\langle -0,078941 \div 0,40015 \rangle$ (rys. 3),
- $\langle 0,26087 \div 0,33788 \rangle$ (rys. 4),
- $\langle -0,23335 \div 0,39832 \rangle$ (rys. 5).

4. Podsumowanie

Wykonana analiza błędu pozwala stwierdzić, że wartość rozpatrywanego błędu pomiaru odchyłki okrągłości może przyjmować wartość znaczące nie tylko dla harmonicznnych głównych ($n_1, n_2, n_3 \in \langle 2 \div 5 \rangle$), ale i dla pozostałych harmonicznnych ($n_1, n_2, n_3 \in \langle 6 \div 15 \rangle$).

Charakter zmian wartości błędu uzależniony jest od występujących rzeczywistych form nieregularności zarysu mierzonego i zarysów stykających się z powierzchniami przyzmac ustalających, wyrażonych za pomocą odpowiednich składowych harmonicznnych wymienionych zarysów.

Biorąc pod uwagę, że rozpatrywana nieprostokątność dla zarysów nieregularnych ma charakter przypadkowy, błąd ten będzie miał wpływ na sumaryczny, przypadkowy błąd metody pomiaru.

5. Literatura

- [1] S. Adamczak: Teoretyczne podstawy niesymetrycznej trójpunktowej metody pomiaru odchyłek kołowości. Zeszyt Naukowy Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 18, Kielce 1978, s.151-165.
- [2] S. Adamczak: Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn. Monografie, Studia, Rozprawy, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1998.
- [3] T. Cserna: Allgemeintheoretische Annäherung und neue Ausführungsmethode der Rundheitsmessungen im Prisma. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, T. 79 (3-4), 1974, pp. 351-382.
- [4] K. Nozdrzykowski: Nowe ujęcie matematycznego zapisu okrągłości przy podparciu dwuprzyzmacowym. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12, 2007.
- [5] A. Steger: Über Möglichkeiten und Grenzen der Dreipunktmessung zur Bestimmung der Formabweichung von Kreis. Dissertation. TH Chemnitz, 1978.