

# Прикладні аспекти: геометричні та механічні вимірювання

УДК 53.08 : 535.543

О.М. Загурська

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

## ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРИ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНО-ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАННЯХ ОКРУГЛОСТІ

*Проведено опрацювання результатів вимірювання округлості об'єктів. Проаналізовано впливні чинники під час вимірювання та виділено систематичні зміщення, які виникають при інтерференційно-оптичних вимірюваннях. Наведено алгоритми визначення та корекції систематичних зміщень в результаті вимірювання. Представлено результати оцінювання систематичних зміщень для об'єкту діаметром 40 мм та оцінено стандартні непевності результатів. Оцінена стандартна непевність округлості для розглянутого в роботі прикладу лежить між 0,06 і 0,09 мкм. Визначено значення допуску округлості для досліджуваного об'єкту.*

**Ключові слова:** округлість, систематичні зміщення, непевність інтерференційно-оптичного вимірювання.

### Вступ

Неокруглість – відхилення форми об'єкту від циліндричної і вона зумовлена недосконалістю обладнання, що використовується під час виготовлення об'єкту. Загалом відхилення форми від циліндричної має декілька складових, як систематичних, так і випадкових, зокрема таких як хвилястість та шорсткість. Дефекти виготовлення об'єктів розрізняють в залежності від співвідношення довжини хвилі та її амплітуди на поверхні вимірювального профілю [1].

Для оцінювання форми об'єктів виконують відповідні вимірювання, під час яких визначають систематичні відхилення форми від циліндричної з наступним оцінюванням непевності результатів. Для того, щоб можна було оцінити систематичну складову неокруглості об'єкту потрібно відділити її від інших складових, зокрема швидкозмінних.

У наведених нижче дослідженнях результати вимірювання одержані інтерференційно-оптичним приладом вимірювання округлості, який розроблено та сконструйовано в Технічному університеті Ільменау, Німеччина [2]. За допомогою даного приладу проводяться безконтактні вимірювання форми циліндричних об'єктів.

Прилад базується на використанні двох інтерферометрів, які одночасно вимірюють досліджувану поверхню. Об'єкт дослідження розміщується на столі, який обертається. Вісь обертання столу приймається, як основна вісь вимірювання. Прилад видає вимірювальні дані, які зберігаються в текстовому

документі, для подальшого використання та опрацювання.

**Метою** опрацювання результатів вимірювання є визначення округлості об'єкту та визначення і корекція присутніх під час вимірювання систематичних зміщень та оцінювання непевності скоригованих результатів.

### 1. Результати вимірювань та їх опрацювання

Результати опрацювання вимірних даних представлені для об'єкту діаметром 40 мм, вимірювання якого проводились в лабораторії LMW Шмалькальден, Німеччина 22.10.2013. Вимірювання об'єкту проводилися на трьох рівнях: низу, всередині та вверху.

Сигнали, отримані під час вимірювання несуть не тільки інформацію про радіуси вимірювального об'єкту, але й мають відхилення, які виникають під впливом різних чинників [3]. Це такі чинники, як: налаштування вимірювальної системи, шум вимірювального сигналу, ексцентричне розміщення об'єкту на поворотному столі, рухи поворотного столу, відносні коливання об'єкту під час вимірювання та впливи навколишнього середовища.

Вирівнювання вимірювального об'єкту на поворотному столі відіграє велику роль при аналізі даних. Ексцентричне розміщення осі вимірювального об'єкту до осі поворотного столу спричиняє велике систематичне зміщення результатів.

Для визначення впливу ексцентриситету на результат вимірювання проводять гармонічний аналіз. При цьому можна визначити коефіцієнти  $a$  (1) та  $b$  (2) в декартових координатах [4]. Оскільки вимірювання даних деталі проводиться в полярних координатах, то дані повинні бути переведені з полярних в декартові координати:

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} R_i \cos \varphi_i; \quad (1)$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_i = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} R_i \sin \varphi_i. \quad (2)$$

На основі інформації про коефіцієнти  $a$  та  $b$  визначаються ексцентриситет  $e$  (3):

$$e = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (3)$$

## 2. Корекція систематичних зміщень та оцінювання непевності скоригованих результатів

Для корекції систематичних відхилень ексцентриситету, спочатку обчислюють коефіцієнти  $a$  та  $b$  за формулами (1) та (2). Після обчислення коефіцієнтів, які відповідають ексцентриситету в декартових координатах, визначається значення ексцентриситету (3) та його напрямку ( $\varphi_e$ ) в полярних координатах. Напрямок ексцентриситету визначається за такою формулою:

$$\varphi_e = \begin{cases} \arctan \frac{b}{a} + \pi, & a < 0; \\ \arctan \frac{b}{a} + \pi, & a > 0; \\ \frac{\pi}{2}, & a = 0 \text{ та } b > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & a = 0 \text{ та } b < 0; \\ \text{невизначений}, & a = b = 0. \end{cases} \quad (4)$$

На основі одержаних результатів можна скоригувати вплив результатів вимірювання на ексцентриситет через косинус (5).

$$R(x_i) = x_i - e \cdot \cos(\varphi_i - \varphi_e). \quad (5)$$

Для розглянутого прикладу значення систематичного відхилення ексцентриситету лежить в межах 0,6 – 2 мкм.

При вимірюванні на сигнал впливають також випадкові чинники та відносні коливання досліджуваного об'єкту. Випадкові впливи спричиняють хаотичний розкид вимірюваних значень, тобто шум вимірювального сигналу, що призводить до непевності результатів, які можна оцінити статистичним методом, тобто методом типу А [6].

Для зменшення впливу випадкових шумів застосовано згладжування вимірювальних даних, тобто їх фільтрування відносно високочастотних шу-

мів. Згладжування результатів вимірювання проводилося шляхом обчислення ковзаючих середніх значень. При обчисленні середніх значень замкнутого профілю, такого як кільце, початкові та кінцеві значення масиву лежать поряд. Масив розглядається з математичної сторони, як замкнене коло. В результаті розрізняють три випадки, які повинні задовольняти алгоритм обчислення на початку масиву, в середині масиву та в кінці масиву.

Ковзаючі середні значення обчислюються згідно такої формули:

$$R(X_i) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{x_{[n+i-(j-\frac{m}{2})]}}{m}, & i - (j - \frac{m}{2}) < 0; \\ \sum_{j=0}^{m-1} \frac{x_{[i-(j-\frac{m}{2})]}}{m}, & 0 \leq i - (j - \frac{m}{2}) \leq (n-1); \\ \sum_{j=0}^{m-1} \frac{x_{[i-(j-\frac{m}{2})-n]}}{m}, & (n-1) < i - (j - \frac{m}{2}), \end{cases} \quad (6)$$

де  $n$  – кількість вхідних значень та  $m$  число значень, через які обчислено середнє значення.

При вимірюванні об'єкт розміщений на поворотному столі, який під час вимірювання обертається не навколо своєї осі, а постійно змінює своє положення. Через зміну положення осі обертання виникає додаткова складова відхилення результатів вимірювання від нестабільності опори.

Відхилення результатів від зміни положення поворотного столу можна визначити з допомогою багаторазових вимірювань об'єкту з наступним статистичним опрацюванням результатів вимірювань. Для даного прикладу зміна положення поворотного столу може спричинити систематичні відхилення результатів до 0,3 мкм і тому має бути скоригованою. Обчислення цієї складової відхилення результатів проводилось з використання методу «Donaldson-Ball-Reversal» [5].

Для того щоб послабити у вимірювальному сигналі складові високих порядків, які відповідають шорсткості поверхні профілю округлості, можна використати фільтр нижніх частот (ФНЧ). Фільтрацію здійснено на основі швидкого перетворення Фур'є (7) з наступним послабленням високочастотних складових сигналу, а відфільтровані значення сигналу отримано зворотнім перетворенням Фур'є (8). Фільтр повинен мати змінне граничне хвильове число ( $K_{WG}$ ), для створення можливості подальшої зміни параметрів.

$$F\{f_0, f_1, \dots, f_{n-1}\} = FFT(R\{x_0, x_1, \dots, x_{n-1}\}); \quad (7)$$

$$R_f\{x_{0,f}, x_{1,f}, \dots, x_{n-1,f}\} = FFT^{-1}\left(\begin{cases} f_i & i \leq K_{WG} \\ 0 + 0i & i > K_{WG} \end{cases}\right). \quad (8)$$

Оскільки прилад для вимірювання округлості використовується при відхиленні умов навколишнього середовища від нормальних, то зміни його факторів впливають на результат вимірювання. Швидкі зміни температури можуть привести до змін показника заломлення повітря та при цьому до помітних змін довжини хвилі. Це призводить до змін параметрів променя, і в результаті до дрейфу сигналу в інтерферометрі. В результаті виникає різниця між початковими та кінцевими значеннями при вимірюванні, хоча це для замкнутого профілю є неможливим. Даний вплив є лінійним, може досягти до 0,12 мкм і тому повинен бути скоригованим в результаті вимірювання.

Зменшення впливу лінійного дрейфу інтерферометричних значень проводиться з допомогою лінійної корекції та реалізується наступною формулою:

$$R(x_i) = x_i - \varphi_i \left( \frac{\sum_{i=0}^4 x_i(n-i+1)}{5} - \frac{\sum_{i=0}^4 x_i}{5} \right) \cdot (9)$$

Стандартна непевність скоригованого лінійного дрейфу становить близько 0,01 мкм.

Вимірювання об'єкту проводиться двома інтерферометрами одночасно, які розміщені один від одного під кутом 180°. Під час вимірювання кожен інтерферометр видає 9000 значень.

Після опрацювання зареєстрованих 9000 результатів вимірювання, визначення та корекції систематичних зміщень, систематичним методом обчислена стандартна непевність типу А [6]. Стандартна непевність для вимірювань на трьох рівнях становить відповідно 0,16, 0,25 та 0,25 нм.

## Висновки

Вимірювання округлих об'єктів проводилися інтерференційно-оптичним приладом вимірювання

округлості. Різні впливні фактори при вимірюванні накладаються. В результаті чого і виникає проблема при аналізі даних, зокрема, як ці чинники розпізнати та розділити один від одного, а далі скоригувати чи зменшити їх вплив.

Здійснено корекцію систематичних відхилень ексцентриситету, впливу відхилення результатів від зміни положення поворотного столу. Для зменшення впливу випадкових шумів застосовано згладжування вимірювальних даних шляхом обчислення ковзаючих середніх значень.

Для даного прикладу значення округлості після проведення корекцій перерахованих вище систематичних зміщень на різних рівнях вимірювання становить відповідно 0,06, 0,08 та 0,09 мкм. Стандартна непевність опрацьованих результатів становить 0,15, 0,25 та 0,25 нм.

## Список літератури

1. Kefestein, P., Dutschke, W.: *Fertigungsmesstechnik: praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. Teubner, Wiesbaden, 2008.
2. Michael Kьhnel: *Entwicklung eines interferenz optischen Rundheitsprьfplatzes*. Technische Universitдt Ilmenau, 2006.
3. Olha Zahurska: *Rechnergestьtzte Verarbeitung und Auswertung von Messdaten in der interferenzoptischen Formmesstechnik*. Technische Universitдt Ilmenau, 2014.
4. Bronstein, I.N. u.a.: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2012.
5. Donaldson R: *A simple method for separating spindle error from test ball roundness error* / R: Donaldson // CIRP, Bd. 21(1), S. 125-126, 1972.
6. Дорожовець М. *Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посібник* / М. Дорожовець. – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2007. – 624 с.

Надійшла до редколегії 29.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехін, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ ОКРУГЛОСТИ

О.М. Загурська

*Проведено обробка результатів измерения округлости объектов. Проанализированы влияющие факторы при измерениях и выделено систематические смещения, которые возникают при интерференционно-оптических измерениях. Приведены алгоритмы определения и коррекции систематических смещений в результате измерения. Представлены результаты оценены систематических смещений для объекта диаметром 40 мм и оценены стандартные неуверенности результатов. Оценена стандартная неопределенность округлости для рассматриваемого в работе примера лежит между 0,06 и 0,09 мкм. Определены значения допуска округлости для исследуемого объекта.*

**Ключевые слова:** округлость, систематическое смещение, неопределенность интерференционно-оптического измерения.

## PROCESSING OF RESULTS OF THE INTERFERENCE-OPTICAL MEASUREMENTS OF ROUNDNESS

O.M. Zahurska

*There was conducted processing of results of the measurements of roundness of the objects. Were analysed the influential factors during the measurement and there were distinguished systematic displacements that appear during the interference-optical measurements. There were mentioned algorithms of determination and adjustment of the systematic displacements as a result of the measurement. There were presented results of value of the systematic displacements of the object 40 mm by diameter and evaluated standard uncertainty of the results. The evaluated standard uncertainty of roundness of the example presented in the work is between 0.06 and 0.09 μm. There was determined significance of tolerance of the roundness for the examined object.*

**Key words:** roundness, systematic displacement, uncertainty of interference-optical measurement.