

В.М. ГАЛАЙ, професор, канд. техн. наук, ПНТУ, г. Полтва

ПОХИБКИ КОНТРОЛЮ ДІАМЕТРІВ КВАРЦОВИХ ТРУБ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Розглянуті оцінки компонент помилки автоматичного контролю діаметрів кварцових труб методом аналізу їх зображення (методом хорд).

The considered estimations are a component of error of automatic control of diameters of quartz pipes by the method of analysis of their image (method of chords).

Кварцові труби, що використовуються в промисловості, наприклад, для виробництва деталей дугових газорозрядних ламп, мають жорсткі технічні вимоги до допусків на їх діаметри [1].

Відомо вимірювання геометричних розмірів деталей машин за допомогою лазерного променя [2], еритроцитів та інших кров'яних тілець за допомогою мікроскопа [3]. В [4,5] розглядаються методи вимірювання просторових координат рухомих і нерухомих об'єктів та дальності до них.

Опираючись на ці дослідження, поставлена мета оцінити помилки контролю діаметрів кварцових труб, що виникають при застосуванні метода хорд [6] для аналізу їх зображень за допомогою системи технічного зору на приладах із зарядним зв'язком.

Існує три види помилок вимірювання діаметрів, що виникають при застосуванні цього методу.

Це помилки, визвані дискретизацією, несиметричністю положення зображення відносно строчок сканування та флуктуацією кроку сканування. Помилки виникають при вимірюванні довжин хорд, утворених в результаті перетину строк сканування із зображенням торця труби у вигляді кола.

Визначимо оцінку значень помилок і характер впливу змін параметрів вимірювальної системи і геометричних характеристик труб.

Помилка дискретизації. При використанні в якості відеоадавача СТЗ лінійного приладу з зарядним зв'язком (ПЗЗ-лінійки) під час проходження проекції рухомого об'єкта через строчку світлочутливих елементів (пікселей) в кожному мить часу на її виході з'являється дискретний відеосигнал. Відносна помилка вимірювання довжини хорди, що виникла з причин дискретності сигналу дорівнює

$$\varepsilon_D = \frac{1}{n\sqrt{6}}, \quad (1)$$

де n -число імпульсів дискретизації, що приходиться на довжину хорди.

Для вибраного типу лінійного ПЗЗ відстань між пікселями є величиною незмінною і дорівнює x_0 . Довжина хорди визначається за формулою

$$l_x = D \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (2)$$

де D – внутрішній діаметр досліджуваної труби; α – центральний кут, на який опирається хорда ($0 \leq \alpha \leq \pi$).

Тоді $n = \frac{l_x}{x_0} = \frac{D}{x_0} \lim\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ і вираз для помилки дискретизації приймає вигляд

$$\varepsilon_D = \frac{x_0}{D} \cdot \frac{1}{\sqrt{6} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (3)$$

На рис. 1 показана залежність $\varepsilon_D = \varepsilon_D(\alpha)$ для деяких значень D при $x_0 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м для лінійного ПЗЗ типу К1200ЦЛ1. Значення кута α визначає положення вимірюваної хорди на досліджуваному колі (чим менше α , тим ближче хорда до краю кола і навпаки). Як видно (рис. 1) значення ε_D різко зростає, починаючи з $d = \frac{\pi}{2}$ і стає дуже великим при прямуванні α до нуля (для крайніх хорд). Цей результат підтверджує правильність того, що ці хорди «відкидаються» і не використовуються при розрахуванні діаметра труби [6].

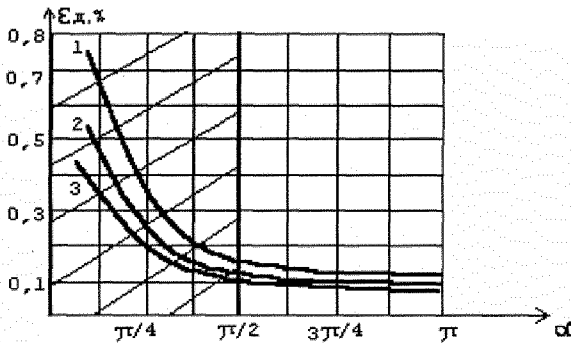


Рис. 1. Залежність помилки ε_D від кута α .

1 – $D = 4 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $D = 6 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $D = 7 \cdot 10^{-3}$ м. Для всіх випадків $x_0 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м.

(Заштрихована область відповідає хордам, що не використовуються при вимірюваннях діаметрів).

Визначимо середнє значення $\bar{\varepsilon}_D$ для значень α в інтервалі $\left[\frac{\pi}{2}; \pi\right]$, що відповідає хордам, які враховуються при оцінюванні внутрішнього діаметра труби. Тоді

$$\varepsilon_D = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\pi/2}^{\pi} \varepsilon_D d\alpha. \quad (4)$$

Після інтегрування і підстановки границь отримуємо

$$\bar{\varepsilon}_D = 0,46 \frac{x_0}{D}. \quad (5)$$

Для прикладу покажемо величину помилки $\bar{\varepsilon}_D$ для декількох значень діаметра D і $x_0 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м :

$$D = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \bar{\varepsilon}_D = 0,15\%; \quad D = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \bar{\varepsilon}_D = 0,1\%;$$

$$D = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \bar{\varepsilon}_D = 0,085\%.$$

Таким чином, помилка дискретизації зображень труб діаметром $(4 \dots 7) \cdot 10^{-3}$ м при використанні ПЗЗ-лінійки типу К1200ЦП1 складає 0,1...0,15%. Можна показати, що у випадку, коли при оцінюванні діаметра труб використовуються всі хорди, похибка дискретизації збільшується більш ніж в 4 рази.

Помилка несиметричності. Під несиметричним положенням зображення кола розуміється таке його положення, при якому висоти Δh_B і Δh_H сегментів, що відсікаються відповідно верхньою і нижньою строками сканування, будуть різними, тобто $\Delta h_B \neq \Delta h_H$ або $\Delta h_B - \Delta h_H \neq 0$ (рис. 2). Тоді значення відліків d_H і d_B діаметрів, що виміряні на хордах l_H і l_B (умовно симетричні відносно кола), будуть відрізнятися від істинного діаметра $d_{\text{іст}}$ кола. При цьому $d_B > d_{\text{іст}}$ і $d_H < d_{\text{іст}}$, якщо $\Delta h_B > \Delta h_H$ або навпаки, якщо $\Delta h_B < \Delta h_H$. Відносна похибка в такому випадку визначається за формулою.

$$\varepsilon_{\text{нс}} = \frac{2d_{\text{іст}} - (d_B + d_H)}{d_{\text{іст}}}$$

або

$$\varepsilon_{\text{нс}} = 2 - \left(\frac{d_B}{d_{\text{іст}}} + \frac{d_H}{d_{\text{іст}}} \right). \quad (6)$$

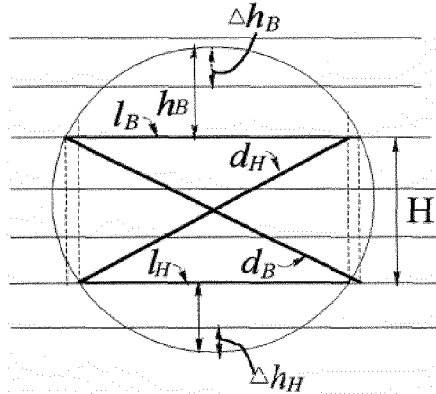


Рис. 2. Несиметричне положення кола на дискретній просторовій сітці

Значення d_H і d_B розраховуються за формулами

$$d_H = \sqrt{l_H^2 + H^2}; \quad d_B = \sqrt{l_B^2 + H^2}, \quad (7)$$

де l_B і l_H – довжина відповідно верхньої і нижньої умовно симетричних хорд; H – відстань між цими хордами.

Підставивши у вираз (7)

$$l_H = 2\sqrt{d_{\text{іст}}h_H - h_H^2}; \quad l_B = 2\sqrt{d_{\text{іст}}h_B - h_B^2}, \quad (8)$$

і використавши (6), отримаємо

$$\varepsilon_{\text{нс}} = 2 - \sqrt{1 - \Delta(2 + \Delta - 2\Sigma)} - \sqrt{1 + \Delta(2 - \Delta - 2\Sigma)}, \quad (9)$$

де $\Delta = \left| \frac{h_B - h_H}{d_{\text{іст}}} \right| = \left| \frac{\Delta h_B - \Delta h_H}{d_{\text{іст}}} \right|$ – параметр асиметрії; $\Sigma = \frac{h_B - h_H}{d_{\text{іст}}} = \frac{d_{\text{іст}} - H}{d_{\text{іст}}}$

– параметр, що визначає відстань між хордами l_B і l_H .

Тут параметр Δ змінюється в межах $0 \leq \Sigma \leq \frac{P_0}{d_{\text{іст}}}$ (максимальне значення

$(|\Delta h_B - \Delta h_H|)_{\text{max}}$ дорівнює кроку сканування), а параметр Σ – в межах $0 \leq \Sigma \leq 1$. В такому поданні параметри Δ і Σ є незалежними величинами і забезпечують можливість зручним і наочним способом оцінити значення помилки несиметричності $\varepsilon_{\text{нс}}$. На рис. 3 показана залежність $\varepsilon_{\text{нс}} = \varepsilon_{\text{нс}}(\Delta)$ для $\rho_0/D = 0,1$ і кількох значень параметра Σ . Можна показати, що для вимірювання даним методом внутрішніх діаметрів труб використовуються хорди із зміною параметра Σ в межах $0,3 \leq \Sigma \leq 1$. На рис. 3 можна також ба-

чити залежність максимального значення $(\epsilon_{нс})_{\max}$ від кроку сканування при заданому діаметрі D (від відношення ρ_0/D).

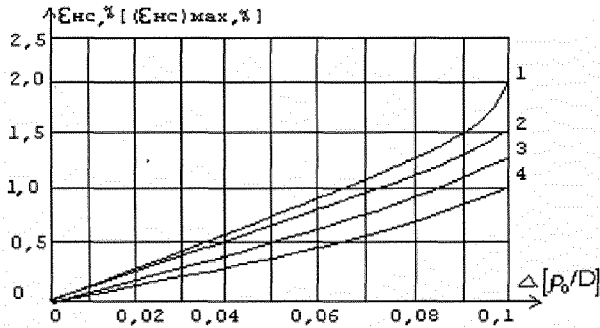


Рис. 3. Залежність похибки $\epsilon_{нс}$ від параметра асиметричності Δ (залежність $(\epsilon_{нс})_{\max}$ від відношення ρ_0/D).

1 – $\Sigma = 0,1$; 2 – $\Sigma = 0,3$; 3 – $\Sigma = 0,5$; 4 – $\Sigma = 0,8$.

Із графіка залежності максимальної відносної помилки $(\epsilon_{нс})_{\max}$ для $\Delta = \rho_0/D = 0,1$ від параметра Σ (рис.4) видно, що віддаленням вимірюваної хорди від центра кола і приближенням її до краю ($\Sigma \rightarrow 0$) похибка вимірювання діаметра зростає.

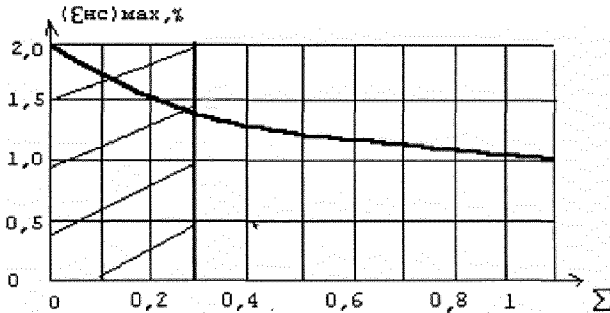


Рис. 4. Залежність похибки $(\epsilon_{нс})_{\max}$ від параметра Σ для $\rho_0/D = 0,1$.

(Заштрихована область відповідає хордам, що не використовуються для обчислення внутрішнього діаметра труби).

Як уже було зазначено, при розрахунку внутрішнього діаметра труби використовуються хорди, що відповідають значенням параметра Σ в інтервалі

$[0, 3; 1]$. Тоді середнє значення відносної помилки, визване порушенням симетрії дорівнює:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{нс}} = \frac{1}{0,7} \cdot \int_{0,3}^1 \varepsilon_{\text{нс}} d\Sigma. \quad (10)$$

Користуючись формулою (9), після інтегрування і підстановки границь отримуємо

$$\bar{\varepsilon}_{\text{нс}} = 2 - \frac{1}{2,1 \cdot \Delta} \left[\sqrt{(1+1,4\Delta - \Delta^2)^3} - \sqrt{(1-1,4\Delta - \Delta^2)^3} \right]. \quad (11)$$

Із графіка залежності $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}} = \bar{\varepsilon}_{\text{нс}}(\Delta)$ (рис. 5) можна визначити максимальне значення $(\varepsilon_{\text{нс}})_{\text{max}}$ (для $\Delta = \rho_0/D$) при різних величинах відношення ρ_0/D .

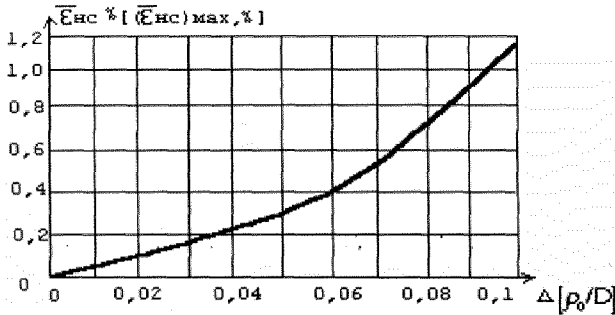


Рис. 5. Залежність помилки $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}}$ від параметра несиметричності Δ

Всі значення параметра несиметричності Δ в інтервалі $0 \leq \Delta < \rho_0/D$ можна вважати рівноймовірними. Тоді для усереднення значення $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}}$ відносно значень Δ потрібно скористуватися формулою

$$\bar{\varepsilon}_{\text{нс}} = \frac{1}{\rho_0/D} \cdot \int_0^{\rho_0/D} \bar{\varepsilon}_{\text{нс}} d\Delta. \quad (12)$$

Значення $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}}$ можна оцінити також графічно, розрахувавши площу фігури, обмеженою лінією $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}}(\Delta)$ і горизонтальною віссю (рис. 5). В результаті отримаємо, що на інтервалі $0 \leq \Delta < 0,1$ середнє значення відносної помилки, визваної асиметрією, дорівнює $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}} \approx 0,4\%$. Аналогічно можна показати, якщо б урахували в алгоритмі контролю діаметрів труб всі хорди ($0 \leq \Delta < 0,1$), то помилка $\bar{\varepsilon}_{\text{нс}}$ була б більшою в 1,5 рази.

Помилка флуктуацій. Її причиною є флуктуація кроку сканування. Ці флуктуації призводять до зміщення строки сканування, а значить і вимірюваної хорди відносно її фактичного положення на колі. В результаті, довжина зміщеної хорди відрізняється від довжини хорди, що не зміщена відносно фіксованого положення на зображенні. Це викликає появу похибки флуктуації.

Нехай

$$l_{\alpha} = D \sin \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

довжина незміщеної хорди, α – центральний кут, на який опирається ця хорда.

Тоді довжина, зміщеної за рахунок флуктуації, хорди дорівнює

$$l_{\alpha \pm \Delta\alpha} = D \sin \left(\frac{\alpha \pm \Delta\alpha}{2} \right), \quad (14)$$

де $\Delta\alpha$ – флуктуація центрального кута.

Відносну похибку флуктуації $\varepsilon_{\text{фл}}$ можна визначити за формулою

$$\varepsilon_{\text{фл}} = \left| \frac{l_{\alpha \pm \Delta\alpha} - l_{\alpha}}{l_{\alpha}} \right|$$

або після підстановки (13) і (14):

$$\varepsilon_{\text{фл}} = \left| \frac{\sin \alpha \pm \Delta\alpha}{\sin(\alpha/2)} - 1 \right|. \quad (15)$$

Після перетворень, урахувавши мале значення величини $\Delta\alpha$, отримуємо

$$\varepsilon_{\text{фл}} \approx \frac{1}{2} |\Delta\alpha| \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (16)$$

Але на практиці зручніше користуватися флуктуаціями кроку сканування, а не центрального кута. Для отримання залежності похибки $\varepsilon_{\text{фл}}$ від флуктуації кроку сканування скористуємося наближеною рівністю

$$\Delta\rho_0 \approx \frac{1}{4} \Delta\alpha \cdot D \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (17)$$

Тоді вираз для $\varepsilon_{\text{фл}}$ перепишеться

$$\varepsilon_{\text{фл}} \approx 2 \frac{|\Delta\rho_0|}{D} \cdot \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)}. \quad (18)$$

В дійсності флуктуація кроку сканування є величиною випадковою, що приймає довільні значення в інтервалі $-\rho_0^{\max} \leq \Delta\rho_0 \leq \rho_0^{\max}$, де ρ_0^{\max} – мо-

дуть максимального значення. Середньоквадратична величина кроку сканування дорівнює

$$\sigma_{\text{фл}} \approx \frac{2\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\sqrt{6}} \quad (19)$$

або у відносному вигляді

$$\varepsilon_{\text{фл}} \approx \frac{4}{\sqrt{6}} \left(\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} \right) \left(\frac{\rho_0}{D} \right) \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)}, \quad (20)$$

де $\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0}$ – максимальне значення відносної флуктуації кроку сканування.

Із залежності $\varepsilon_{\text{фл}} = \varepsilon_{\text{фл}}(\alpha)$ для фіксованих значень $\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0}$ і $\frac{\rho_0}{D}$

(рис. 6) видно, що $\varepsilon_{\text{фл}}$ різко зростає для хорд, що відповідають кутам $\alpha < \frac{\pi}{2}$.

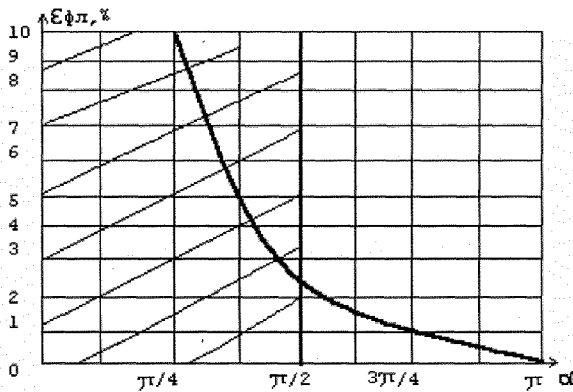


Рис. 6. Залежність похибки $\varepsilon_{\text{фл}}$ від кута α для значень $\left(\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} \right) = \frac{\rho_0}{D} = 0,1$.

(Заштрихована частина відповідає хордам, що не використовуються при контролі діаметрів труб).

При вимірюванні внутрішнього діаметра труб за два етапи з використанням хорд в інтервалі кута $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ середнє значення відповідної похибки флуктуації дорівнює

$$\bar{\varepsilon}_{\text{фл}} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\pi/2}^{\pi} \varepsilon_{\text{фл}} d\alpha$$

або після підстановки (20)

$$\bar{\varepsilon}_{\text{фл}} = \frac{8}{\pi\sqrt{6}} \left(\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} \right) \cdot \left(\frac{\rho_0}{D} \right) \cdot \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} d\alpha \quad (21)$$

і інтегрування

$$\bar{\varepsilon}_{\text{фл}} = (\sqrt{2} - 1) \frac{16}{\pi\sqrt{6}} \left(\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} \right) \cdot \left(\frac{\rho_0}{D} \right) = 0,86 \left(\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} \right) \cdot \left(\frac{\rho_0}{D} \right) \quad (22)$$

Наприклад, для значень $\frac{\Delta\rho_0^{\text{max}}}{\rho_0} = 0,1$ і $\frac{\rho_0}{D} = 0,1$ – $\bar{\varepsilon}_{\text{фл}} = 0,86\%$

відповідно (22).

Можна показати, що при вимірюванні діаметрів кола з використанням усіх хорд середнє значення $\varepsilon_{\text{фл}}$ при тих же параметрах зростає більш ніж в 4 рази.

У зв'язку з некорельованістю між собою розглянутих помилок труб середнє значення сумарної похибки вимірювань діаметра дорівнює

$$\bar{\varepsilon}_{\Sigma} = \sqrt{\bar{\varepsilon}_{\text{д}}^2 + \bar{\varepsilon}_{\text{нс}}^2 + \bar{\varepsilon}_{\text{фл}}^2} \quad (23)$$

Для приведених раніше прикладів сумарна похибка $\bar{\varepsilon}_{\Sigma}$ дорівнює 0,96%.

При контролі діаметрів труб за 4 етапи ($\frac{3\pi}{4} \leq \alpha \leq \pi$ і $0,62 \leq \Sigma \leq 1$), сумарна похибка зменшується і дорівнює 0,5%.

Висновок. В результаті досліджень характеру і величини помилок контролю діаметрів кварцових труб методом хорд визначено середню оцінку сумарної похибки методу і його придатність для практичного використання.

Список літератури: 1. *Галай В.М.* Автоматизація контролю діаметрів кварцових труб // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 4/2007(45) ч.1. – С.165-166. 2. *Ільченко В.М.* Методи та засоби контролю деталей комп'ютеризованими лазерними інформаційно-вимірювальними системами // Автореферат дис. канд. техн. н., НАУ, 2009. – 20 с. 3. *Іваницький Г.Р., Латинская Л.Л., Шихматова В.Л.* Автоматический анализ микрообъектов. – М.: Энергия, 1967. – 224 с. 4. *Катыс Г.П.* Оптические информационные системы роботов-манипуляторов. – М.: Машиностроение, 1977. – 272 с. 5. *Путятин Е.П., Аверин С.И.* Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с. 6. *Галай В.М.* Метод оптико-координатного вимірювання геометричних характеристик // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2008. – №57. С.30-35.

Поступила в редколлегию 8.04.09