

Визначення розмірів труб та стану їх поверхні оптико-електронним методом

Ярослав В. Гапонюк

Відділ обчислювальних методів і систем перетворення інформації
Фізико-механічний інститут НАНУ, Львів, Україна
yh2005@ukr.net

Анотація

Розглянуто проблему побудови оптико-електронних пристроїв із застосуванням лінійного структурованого освітлення для вимірювання розмірів циліндричної або еліпсоподібної труби в умовах непостійного просторового положення її поверхні відносно вимірювального пристрою. Наведено структурні схеми таких пристроїв та математично обґрунтовано принципи їх функціонування.

1. Вступ

Розповсюджені на сьогоднішній день оптико-електронні пристрої, побудовані на основі тінювого методу, а також ультразвукові пристрої, вимірюють діаметр труби, як віддаль між парою діаметрально розташованих на периметрі труби точок, причому таких пар може бути від одної до чотирьох. Такий підхід має похибку вимірювання, тому що не гарантує розташування кожної пари точок на діаметрально протилежних кінцях труби. Тому актуальним є розроблення ефективних методів та недорогих і простих в експлуатації пристроїв, які б давали можливість встановлення достовірного значення розмірів перерізу труби циліндричної або еліптичної форми.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оптико-електронна система безконтактного контролю пустотілих циліндрів розглянута в [1]. В описаному пристрої джерелом світла служить світлодіод, випромінювання якого за допомогою оптичної системи перетворюється в квазіпаралельний пучок світла. Тіньове зображення циліндра фіксується лінійними фотоприймачів.

В [2] використовується також тінювий метод освітлення циліндричної поверхні, але особливість пристрою полягає в тому, що використано три світлові промені, які направлені по дотичній до циліндричної поверхні, що дає можливість визначити координати трьох точок та на основі отриманої інформації обрахувати діаметр циліндра.

Вказані пристрої спроектовані для вимірювання діаметрів циліндричних виробів, і при вимірюванні параметрів нециліндричних виробів результати вимірювання будуть мати похибку відхилення від достовірного значення.

Вимірювання кривизни поверхні виробів за допомогою структурованого освітлення розглянуто в роботі [3], яка присвячена вимірюванню кривизни поверхні деталей кузова автомобіля. Недоліком запропонованого пристрою є необхідність проведення структурованого освітлення деталі під наперед заданим кутом 45 градусів та

фіксованого ортогонального положення телекамери по відношенню до деталі.

Ультразвуковий метод вимірювання застосовується в приладові UltraScan 3125, який пропонується на ринку американською фірмою Beta LaserMike. Товщина стінок труби та її діаметр контролюються ультразвуковим методом за допомогою восьми ультразвукових давачів, причому діаметр додатково вимірюється оптико-електронним тінювим методом за допомогою променя лазера. Таке обладнання є високоточним, але водночас складним та дорогим [4].

Пристрій ПОЛІМЕР-4К, побудований також із застосуванням ультразвукового методу вимірювання діаметру труби, розглянуто в [5]. Вимірювання діаметра труби та її еліптичності проводиться за допомогою чотирьох ультразвукових давачів, розташованих попарно на взаємно перпендикулярних осях. Слід звернути увагу на складність побудови пристрою, яка зумовлена проблемами, які виникають при застосуванні даного методу. Наприклад, для забезпечення співвісності ультразвукових перетворювачів з кільцевим перерізом труби застосовують слідкуючу механічну систему сканування, яка відслідковує перпендикулярні переміщення труби. При відхиленні форми труби від циліндричної вимірювання розмірів труби буде проводитися з похибкою в обох ультразвукових пристроях.

3. Обчислення параметрів труб еліптичної форми

На рис.1 зображена структурна схема електронного пристрою для вимірювання параметрів труб еліптичної форми, в якому застосовується структуроване освітлення труби за допомогою двох світлових площин. Пристрій складається з оптико-електронного формувача 1 зображення, системи 2 структурованого освітлення у вигляді двох паралельних світлових площин та обчислювального блока 5 з індикатором 6, причому формувач 1 та система 2 об'єднані в єдиний конструктив 4 таким чином, що матричний фотосенсор формувача 1 зображення завжди розташований паралельно світловим площинам системи 2 освітлення, яка підсвічує трубу 3 овальної форми, віддаль між світловими площинами є відомою, конструктивно заданою величиною s . Принцип роботи пристрою полягає в тому, що структуроване освітлення у вигляді світлових площин направляється на опуклу поверхню труби таким чином, щоб утворити дві світлові криві на поверхні труби, які в свою чергу фіксуються формувачем зображення та перетворюються в дві одномірні криві на площині фоточутливої матриці формувача зображення. Аналіз зображення світлових кривих повинен надати інформацію про параметри труби

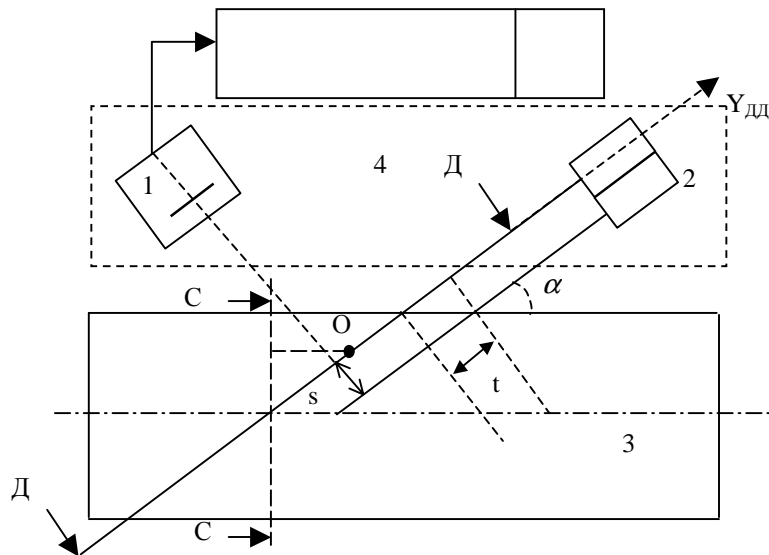


Рис.1. Оптико-електронна система для вимірювання параметрів труб еліптичної форми

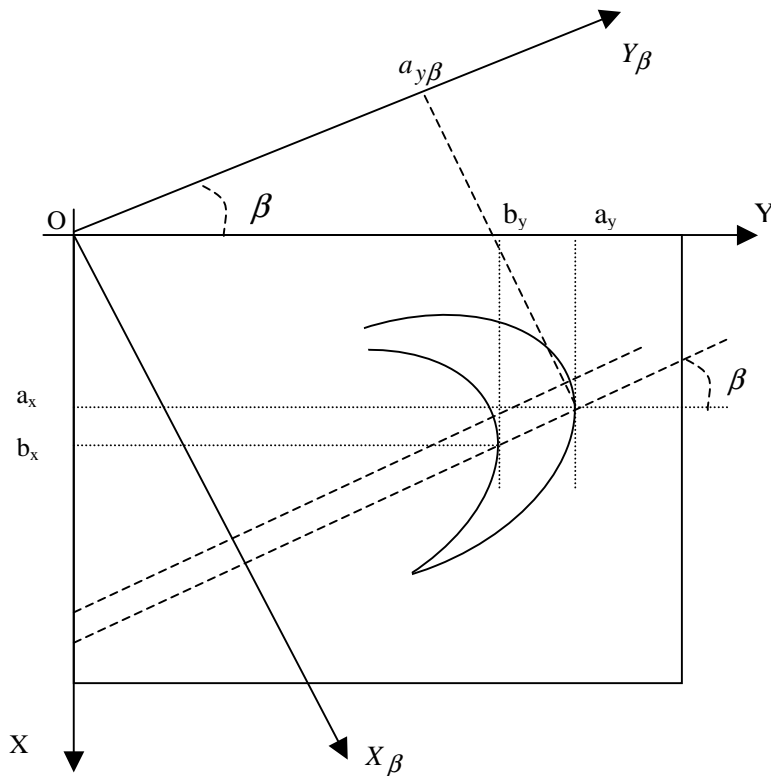


Рис.2. Зображення на матриці фотосенсора формувача зображення

еліптичної форми, а саме розміри півосей її перпендикулярного перерізу. Для вирішення цієї задачі нам потрібно встановити взаємозв'язок між еліпсом, який утворюється внаслідок перпендикулярного перерізу труби еліптичної форми, світловою кривою, утвореною світловою площиною на поверхні труби, та її зображенням на матричному фотосенсорі формувача 1 зображення.

Перша світлова площина системи 2 освітлення застосовується для утворення поверхневої світлової кривої з метою визначення кривизни поверхні, друга світлова площина введена з метою обчислення кута α

нахилу світлових площин відносно осі труби, який визначається із співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha = s / t ; \quad (1)$$

де s – віддаль між світловими площинами, t – проекція на матрицю фотосенсора формувача зображення віддалі між світловими кривими на поверхні труби. На рис.2 величина t відображається відрізком АВ.

На рис.2 подано зображення, яке ми отримуємо на матриці фотосенсора формувача зображення. Криві 1 та 2 – це зображення світлових кривих, які утворюються внаслідок перетину світлових площин з поверхнею труби. При довільному розташуванні конструктива 4 по

відношенню до поверхні труби з метою коректного обчислення шуканих параметрів ми змушені враховувати не тільки кут α між оптичною віссю формувача зображення та віссю труби, але і кут β повороту формувача зображення навколо власної осі. Це пов'язано, по-перше, з тим, що еліпс, на відміну від кола, не є круговою фігурою, і для правильного обчислення його параметрів слід враховувати його просторове положення відносно вимірювального пристрою, а по-друге, тому що для спрощення обчислень бажано використовувати систему координат, осі якої співпадають зі сторонами матриці фотосенсора формувача зображення. Це дає можливість для обчислення координати точки зображення використовувати порядковий номер відповідного пікселя по горизонталі та вертикалі матриці фотосенсора.

Використовуючи рис.2 покажемо, яким чином можна отримати значення кутів α та β внаслідок аналізу зображення світлових кривих 1 та 2.

Обрахувати значення кута α ми можемо із формули (1), але для цього нам потрібно встановити величину значення t – проєкції на матрицю фотосенсора формувача зображення величини зсуву світлових кривих на поверхні труби. Будемо вважати очевидним, що в результаті умовного перетину двох паралельних світлових площин з поверхнею труби ми отримаємо дві ідентичні світлові криві, зміщені на поверхні труби на деяку віддачу. Проєкції цих світлових кривих на поверхні матриці фотосенсора формувача зображення внаслідок особливостей конструктива 4, також будуть ідентичними. Тому величину зсуву проєкцій світлових кривих на матриці формувача зображення можна визначити як відрізок АВ між ідентичними точками кривих 1 та 2, тобто точками, які мають однакове значення першої похідної. Найпростішими для пошуку, з алгоритмічної точки зору, є точки, які мають нульове значення першої похідної, тобто точки максимуму А та В для кривих 1 та 2 відповідно, в системі координат, яка формується сторонами матриці фотосенсора формувача зображення, так як показано на рис. 2. При такому підході координати точок А(a_x , a_y) та В(b_x , b_y) будуть визначатися як порядкові номери пікселів по вертикалі (a_y , b_y) та горизонталі (a_x , b_x) матриці фотосенсора формувача зображення, без додаткових обчислень. Тому величина t дорівнює величині відрізка АВ:

$$t = AB = \sqrt{(a_y - b_y)^2 + (a_x - b_x)^2}; \quad (2)$$

а величина кута α визначається з рівняння:

$$tg\alpha = s/t = s/AB = s/\sqrt{(a_y - b_y)^2 + (a_x - b_x)^2}; \quad (3)$$

Крім того, відрізок АВ є паралельним до проєкції осі труби на матрицю фотосенсора формувача зображення, тобто вказує на кут повороту матриці фотосенсора по відношенню до осі труби. Тому кут β буде визначатися з рівняння:

$$tg\beta = (b_x - a_x)/(a_y - b_y); \quad (4)$$

Введемо нову систему координат $X_\beta O Y_\beta$, яка буде повернута відносно системи координат XOY на кут β проти годинникової стрілки. Координати точок зображень світлових кривих в новій системі координат $X_\beta O Y_\beta$ будуть пов'язані з координатами точок зображень світлових кривих в попередній системі координат XOY залежностями:

$$x_\beta = x \cos \beta + y \sin \beta; \quad y_\beta = -x \sin \beta + y \cos \beta; \quad (5)$$

Для спрощення формул будемо вважати, що масштабний коефіцієнт оптичного перетворення формувача зображення дорівнює 1. В такому разі зображення світлових кривих на матриці фотосенсора формувача зображення ідентичне тим світловим кривим, які утворені внаслідок умовного перерізу еліптичної труби світловою площиною Д-Д. Очевидно, що ми можемо ортогонально спроекувати на площину Д-Д координатну систему $X_\beta O Y_\beta$ так, щоб її розташування по відношенню до світлової кривої було таким же, як і на площині матриці фотосенсора формувача зображення по відношенню до зображення світлової кривої, тобто координати точок світлової кривої в системі координат $(XOY)_{\text{дл}}$ ($(XOY)_{\text{дл}}$ – ортогональна проєкція координатної системи $X_\beta O Y_\beta$ на площину Д-Д) були такими ж, як і в системі координат $X_\beta O Y_\beta$. На рис. 1 вісь $X_{\text{дл}}$ ми будемо спостерігати як точку О, а вісь $Y_{\text{дл}}$ буде направлена вздовж площини Д-Д. Тому справедливим будуть рівняння для деякої точки $R_\beta(x_\beta, y_\beta)$ на площині $X_\beta O Y_\beta$ та її проєкції $R_d(x_d, y_d)$ на площині $(XOY)_{\text{дл}}$:

$$x_d = x_\beta; \quad y_d = y_\beta; \quad (6)$$

Тепер ортогонально спроекуємо світлову криву на площину С-С. Очевидно, що проєкція світлової кривої на площині С-С є частиною периметра еліптичної труби, тобто частиною еліпса, параметри якого ми і намагаємося знайти. Ортогонально спроекуємо осі координат $(XOY)_{\text{дл}}$ на площину С-С, що означає вибір на площині С-С такої системи координат, яка б була пов'язана з системою координат $(XOY)_{\text{дл}}$ відомими нам проєкційними залежностями. В системі координат $(XOY)_{\text{сс}}$ ($(XOY)_{\text{сс}}$ – ортогональна проєкція координатної системи $(XOY)_{\text{дл}}$ на площину С-С) координати точок проєкції світлової кривої будуть визначатися через координати точок світлової кривої в системі координат $(XOY)_{\text{дл}}$ наступними залежностями:

$$x_c = x_d; \quad y_c = y_d \cos \alpha; \quad (7)$$

Початок системи координат $(XOY)_{\text{сс}}$ не співпадає з центром перерізу еліптичної труби, але для визначення розмірів півосей еліпса така вимога необов'язкова.

Еліпс описується кривою другого порядку у вигляді [6]:

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0; \quad (8)$$

коефіцієнти якої можна визначити, якщо відомо її п'ять точок з координатами (x_n, y_n) , де $n = 1, 2, 3, 4, 5$ відповідно до рівняння, яке описується детермінантом:

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5 y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{vmatrix} = 0; \quad (9)$$

З урахуванням перетворень, які описуються рівняннями (1)-(7), підставляємо в рівняння (9) координати п'яти точок, які належать кривій 1 (або 2), визначаємо коефіцієнти рівняння (8), після чого визначаємо півосі a, b шуканого нами еліпса по формулах:

$$a = \sqrt{\frac{-I_3}{I_2 a_{11}'}}; \quad b = \sqrt{\frac{-I_3}{I_2 a_{22}'}}; \quad (10)$$

причому коефіцієнти a_{11}' , a_{22}' визначаються через коефіцієнти рівняння (8):

$$a_{11}' = a_{12} \sin 2\varphi + \frac{1}{2}(a_{11} - a_{22}) \cos 2\varphi + \frac{1}{2}(a_{11} + a_{22});$$

$$a_{22}' = -a_{12} \sin 2\varphi - \frac{1}{2}(a_{11} - a_{22}) \cos 2\varphi + \frac{1}{2}(a_{11} + a_{22});$$

де параметр φ визначається також через коефіцієнти рівняння (8) із рівняння:

$$\operatorname{ctg} 2\varphi = (a_{11} - a_{22}) / 2a_{12};$$

Величини I_2 , I_3 є інваріантами рівняння лінії другого порядку і визначаються через коефіцієнти рівняння (8) із співвідношення:

$$I_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}; \quad I_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix};$$

Слід враховувати, що коефіцієнт масштабування оптичної системи формувача зображення дорівнює не 1, а деякій величині L . Тому координати точок в координатних системах XOY та $X_\beta OY_\beta$ при проведенні обчислень слід масштабувати в L раз.

4. Визначення діаметра циліндричної труби

Визначення діаметра циліндричної труби можна вважати частковим випадком розглянутого вище підходу до обчислення півосей поперечного перерізу труби еліптичної форми. Пристрій для обчислення діаметра циліндричної труби відрізняється від пристрою, структурна схема якого наведена на рис.1 меншими апаратними затратами за рахунок застосування для освітлення поверхні труби не двох, а тільки однієї світлової площини, а також спрощеним програмним забезпеченням для обчислювального блоку, який обраховує тільки півосі по фрагментові світлового еліпса, сформованому на поверхні труби. Менша піввісь, із двох обчислених, завжди дорівнює діаметрові даного циліндра. Стационарний пристрій може бути універсальним, тобто побудованим на основі структурної схеми на рисунку 1. Але для портативного пристрою з обмеженою потужністю обчислювального блоку менший об'єм обчислень може мати суттєве значення при його реалізації.

5. Методи обчислення розмірів труби та стану її поверхні

Розглянуті в доповіді пристрої дають можливість визначати не тільки параметри труби, але і наявність та величину дефектів видимої для фотосенсора поверхні труби. Обчислювальні методи визначення розмірів труби та дефектів на її поверхні ґрунтуються на статистичній обробці координат всіх пікселів, які утворюють світлову криву на фотосенсорі, шляхом перебору всіх можливих комбінацій пікселів, на основі яких можна обчислити радіус циліндричної труби, або розміри півосей труби з еліптичним перерізом. Залежно від типу дефектів на поверхні труби з масиву значень розмірів труби вибирається середньостатистична, мінімальна, максимальна, або така величина, яка має найбільше статистичне значення появи в масиві значень

обчислюваного розміру. Якщо обчислений таким чином діаметр співпадає з заданим значенням, то проводиться перевірка на наявність дефектів поверхні та обрахунок їх величини шляхом визначення розмірів відхилення координат кожного пікселя світлової кривої на поверхні труби від координат точок так званого "зразкового" еліпса. Масив встановлених відхилень піддається обробці відповідно до заданого алгоритму класифікації відомих дефектів.

6. Висновки

Застосування оптико-електронних пристроїв формування зображення із використанням структурованого освітлення у вигляді однієї або двох світлових площин дає можливість вирішити задачу обчислення параметрів поперечного перерізу труб циліндричної або еліптичної форми. Запропонована в роботі методика обчислення параметрів труби еліптичної або циліндричної форми дає можливість мінімізувати апаратні затрати за рахунок вдосконалення обчислювальних алгоритмів. Запропонований пристрій може бути побудований на основі недорогих серійних пристроїв з невисоким рівнем енергоспоживання як портативний автономний прилад для вимірювання розмірів труб в умовах виробництва. Запропонований пристрій має незаперечні переваги з точки зору широких функціональних можливостей, собівартості виготовлення, а отже і ринкової ціни, точності вимірювання, простоти встановлення, обслуговування, надійності та довговічності.

7. Література

- [1] Битюцкий О.И. и др. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров полых цилиндров // *Автометрия*. – 1995.– №6. – С.69-74.
- [2] Non-contact dimensional gage for turned parts // International Class: G01J 003/45 / *Патент США № 4880991 від 14.11.1989 р.*
- [3] System for measuring shapes and dimensions of gaps and flushnesses on three dimensional surfaces of objects. // International Class: G06K 009/00 / *Патент США № 5129010 від 07.07.1992 р.*
- [4] Комерційна інформація фірми Beta LaserMike. www.betalasermike.com.
- [5] Криничний П.Я., Райтер П.М., Гриців А.Б., Вісков А.В. Контроль геометричних параметрів пластмасових труб у процесі їх виготовлення // *Збірник наукових праць. Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Випуск 10 "Акустичні та електромагнітні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів". – Львів: ФМІ НАНУ, 2005. – с.64 -71.*
- [6] Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия. – М.: Наука, 1999. – 224 с.