

1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К., 1985. 2. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора / Минэнерго СССР. – М., 1986. 3. Квазі-компенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності / М.Й. Бурбело, Б.С. Рогальський, В.М. Непійвода, С.І. Вознюк // *Енергетика и электрификация*. – 2001. – №6. – С. 29–33. 4. Пат. 64831 Україна. МКИ Н02J 3/26. Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого коефіцієнта потужності трифазної системи: Пат. 64831 Україна. МКИ Н02J 3/26 / М.Й. Бурбело, Б.С. Рогальський, В.О. Іванков, В.Ф. Сайченко (Україна). – №2001075285; Заявлено 24.07.01. Опубл. 15.03.04. Бюл. №3. 5. Бурбело М.Й. Квазікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень // *Енергетика и электрификация*. – 2001. – №12. – С. 26–28. 6. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Бабенко О.В. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2002. – №2. – С. 92–95. 7. Бурбело М., Бабенко О. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів // *Промислова електроенергетика та електротехніка*. – 2003. – №5. – С. 25–27.

УДК 681.32

Я.В. Гапонюк

Фізико-механічний інститут НАН України

## **ВИЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРА ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМ МЕТОДОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУКТУРОВАНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

© Гапонюк Я.В., 2005

**Розглянуто один із методів розв'язання задачі визначення діаметра циліндричної труби для неперервного контролю її технологічних розмірів у ході виготовлення із застосуванням безконтактних оптико-електронних засобів формування зображення видимої поверхні труби в умовах структурованого освітлення.**

**It is considered one method of cylinder tube diameter determination for uninterrupted measurements monitoring during manufacture process by implementing of non-contact optic-electronic devices for tube visible surface image forming in the structural lighting conditions.**

### **1. Постановка проблеми**

В умовах неперервного виробничого циклу виготовлення виробів циліндричної форми, наприклад, циліндричних труб, методом видавлювання, або циліндричних заготовок під час токарних робіт, виникає задача постійного контролю певних технологічних розмірів циліндричних виробів, таких, як діаметр та стан поверхні виробу, наприклад, наявність або відсутність поверхневих дефектів. Використання відомих механічних засобів контролю діаметра циліндрів практично унеможливує неперервність виконання робіт, вимагає присутності оператора та робить контроль достатньо трудомістким. Відомі оптико-електронні автоматичні системи значною мірою вирішують завдання неперервності контролю, проте їх виготовлення вимагає застосування прецизійних оптичних, механічних та(або) електронних компонентів, індивідуального або дрібносерійного виготовлення, кваліфікованих пусконаладжувальних робіт, що і визначає достатньо високі ціни на таке устаткування, понижену надійність та довговічність. Крім того, оптико-електронні системи визначення діаметра труб побудовані здебільшого на основі тіньового методу, що дає змогу говорити про наявність дефектів тільки в тій області поверхні, яка збігається з контрольованим контуром циліндра.

До оптико-електронних систем ми зараховуємо пристрої, до складу яких входять лазерні випромінювачі, системи дзеркал, оптичні лінзи, телевізійні камери, фотокамери, багатоелементні оптичні лінійки тощо. Ми не розглядаємо у межах цієї роботи методи і пристрої для вимірювання діаметра циліндричних виробів, в основі яких лежать акустичні перетворювачі або давачі інфрачервоного випромінювання, тому що вони розв'язують задачі з дещо іншою проблематикою.

## **2. Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Комбінований механічний оптико-електронний пристрій, в якому застосовано тіньовий метод освітлення, використано в розробці фірми Beta LaserMike [1]. Циліндричний виріб освітлюють паралельним пучком променів, сформованим за допомогою лазера та оптичної системи. Зовнішнє тіньове зображення виробу фіксується та вимірюється оптично-електронною системою. Внутрішній діаметр циліндра та товщина стінки визначається за допомогою введення в отвір циліндра опорного стрижня, який контактує з внутрішньою стінкою циліндра. На основі інформації про положення опорного стрижня та значення зовнішнього діаметра циліндра визначається товщина стінки та внутрішній діаметр циліндра.

Оптико-електронна система безконтактного контролю порожнинних циліндрів розглянута також у [2]. В описаному пристрої джерелом світла служить світлодіод, випромінювання якого за допомогою оптичної системи перетворюється в квазіпаралельний пучок світла. Тіньове зображення циліндра фіксується лінійками фотоприймачів.

У [3] використовується також тіньовий метод освітлення циліндричної поверхні, але особливість пристрою полягає в тому, що використано три світлові промені, які спрямовані по дотичній до циліндричної поверхні, що дає змогу визначити координати трьох точок та на основі отриманої інформації розрахувати діаметр циліндра.

У [4] запропоновано метод визначення діаметра контактних отворів при виготовленні напівпровідникових пристроїв в електронній промисловості. За допомогою електронного мікроскопа отримують зображення контактного отвору, яке складається з окремих точок. Використовуючи координати набору із трьох точок, визначають діаметр отвору.

Відомий також цілий напрямок застосувань систем машинного зору, в якому застосовують структуроване освітлення для вимірювання віддалі до об'єкта та визначення його форми та положення [5].

## **3. Мета роботи**

Метою роботи є розв'язання задачі неперервного контролю технологічних параметрів циліндричних виробів, таких, як діаметр та стан поверхні виробу, на основі застосування структурованого освітлення об'єктів та використання недорогих пристроїв формування зображення серійного виробництва.

## **4. Методика визначення параметрів циліндричних виробів із застосуванням структурованого освітлення.**

Для вимірювання діаметра труби можна застосовувати не тільки тіньовий (контурний) метод освітлення, але і метод структурованого освітлення.

До недоліків визначення діаметра труби за допомогою тіньового методу необхідно зарахувати необхідність застосування парної кількості оптико-електронних формувачів зображення в зв'язку з необхідністю отримання зображення кожного краю контуру циліндричної поверхні труби.

Застосування структурованого освітлення для визначення діаметра циліндричних поверхонь, зокрема циліндричних труб, безпосередньо під час їх виготовлення, є доцільнішим.

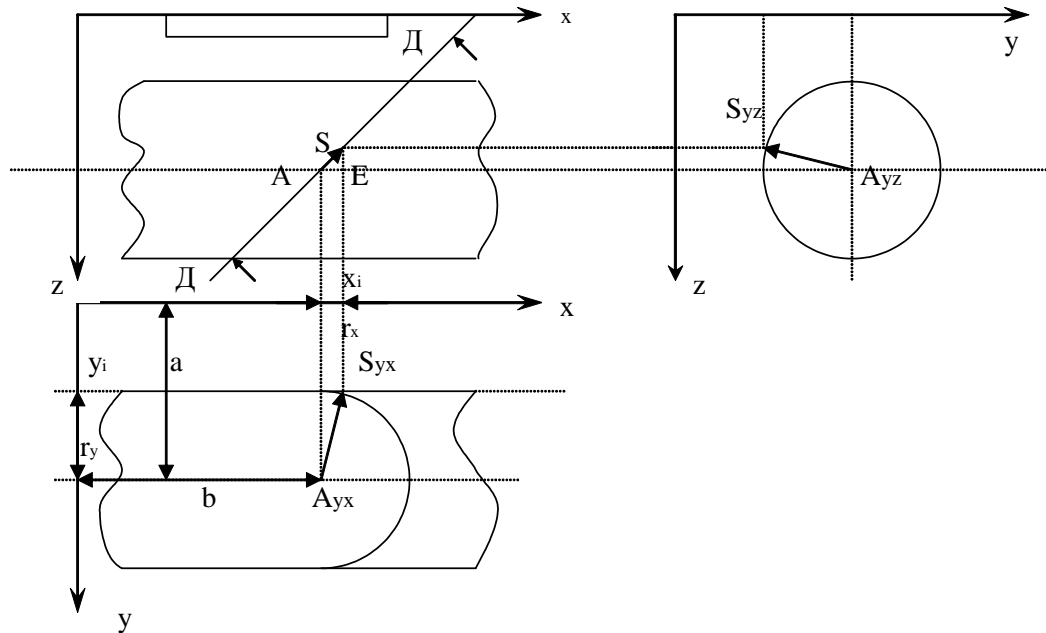
На рисунку показано три проекції циліндричної поверхні, на яку спрямоване лінійне освітлення у вигляді світлової площини під кутом 45 градусів до осі циліндра.

Розглянемо умовний перетин  $D-D$ , який утворює площина світла та циліндрична поверхня труби. Нам потрібно довести, що проекція цього перерізу на площини  $YZ$  та  $YX$  утворює геометричні фігури, що мають однакові характеристики. Для цього розглянемо відрізок прямої  $AS$ ,

що з'єднає точку перетину світлової площини з віссю циліндра  $A$  та довільну точку перетину світлової площини та поверхні циліндра  $S$ . Проекцією відрізка  $AS$  на площину  $YZ$  є відрізок  $A_{yz}S_{yz}$ , для якого справедливе рівняння:

$$(A_{yz}S_{yz})^2 = (A_{yz}S_{yz})_y^2 + (A_{yz}S_{yz})_z^2, \quad (1)$$

де  $(A_{yz}S_{yz})_y$  та  $(A_{yz}S_{yz})_z$  є проекціями відрізка  $(A_{yz}S_{yz})$  на вісь  $Y$  та вісь  $Z$  відповідно.



Три проекції циліндричної поверхні, на яку спрямоване лінійне освітлення у вигляді світлової площини під кутом 45 градусів до осі циліндра

Аналогічно проекцією відрізка  $AS$  на площину  $YX$  є відрізок  $A_{yx}S_{yx}$ , для якого справедливе рівняння:

$$(A_{yx}S_{yx})^2 = (A_{yx}S_{yx})_y^2 + (A_{yx}S_{yx})_x^2, \quad (2)$$

де  $(A_{yx}S_{yx})_y$  та  $(A_{yx}S_{yx})_x$  є проекціями відрізка  $(A_{yx}S_{yx})$  на вісь  $Y$  та вісь  $X$  відповідно.

Справедливо, що

$$(A_{yz}S_{yz})_y = (A_{yx}S_{yx})_y, \quad (3)$$

тому що це одна і та сама проекція відрізка  $AS$  на вісь  $Y$ .

Розглянемо трикутник  $ASE$ . Оскільки світлова площина перетинає вісь циліндра під кутом 45 градусів, то трикутник  $ASE$  є рівнобедреним, тобто сторони рівні:  $AE = ES$ . Але ці сторони є проекціями відрізка  $AS$  на осі  $X$  та  $Z$  відповідно. Тобто

$$AE = (A_{yx}S_{yx})_x = ES = (A_{yz}S_{yz})_z. \quad (4)$$

Із рівнянь (3) та (4) випливає, що праві частини рівнянь (1) та (2) рівні. Отже ліві частини рівнянь (1) та (2) також рівні. Тобто проекції відрізка  $AS$  на площини  $YX$  та  $YZ$  є рівними:

$$A_{yx}S_{yx} = A_{yz}S_{yz}. \quad (5)$$

Проекцією перетину  $Д-Д$  на площину  $YZ$  є коло, радіус якого є радіусом циліндра. Із рівняння (5) випливає, що замість проекції перетину  $Д-Д$  на площину  $YZ$  можна розглядати проекцію перерізу  $Д-Д$  на площину  $YX$ , яка також є колом, радіус якого дорівнює радіусові циліндра.

Тому для знаходження діаметра циліндра ми будемо аналізувати зображення на світлочутливій матриці формувача зображення, яке утворюється за допомогою лінійного освітлення поверхні циліндра, спрямованого під кутом 45 градусів до осі циліндра.

Розглянемо проекцію перерізу Д–Д на площину YX, яка відповідає зображенню, яке ми отримуємо на світлочутливій матриці формувача зображення, за умови, що пристрій формування зображення має ідеальну оптичну систему, яка передає зображення об'єкта на матрицю формувача у масштабі 1:1 та не вносить у зображення об'єкта нелінійних спотворень. Вирішення проблем, які виникають внаслідок існування нелінійних спотворень об'єкта та його масштабування, будуть розглянуті в наступних роботах.

На проекції перерізу Д–Д на площину YX видно, що координати проекції точки, яка належить перетині циліндра та світлової площини, на матриці формувача зображення можна записати у вигляді рівняння:

$$r^2 = r_y^2 + r_z^2 = (y_i - a)^2 + (x_i - b)^2,$$

де  $r$  – радіус зображення світлового півкола на площині XY;  $r_y, r_x$  – проекції радіуса на вісь  $y$  та  $x$  відповідно;  $x_i, y_i$  – координати деякої точки, яка належить зображенню світлового півкола;  $a, b$  – зміщення центра півкола відносно початку координат.

Для того щоб визначити радіус півкола, складаємо систему рівнянь для трьох точок  $s_1, s_2, s_3$  з координатами відповідно  $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$ :

$$\begin{aligned} r^2 &= (y_1 - a)^2 + (x_1 - b)^2, \\ r^2 &= (y_2 - a)^2 + (x_2 - b)^2, \\ r^2 &= (y_3 - a)^2 + (x_3 - b)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Розв'язуємо систему рівнянь (6), послідовно виключаючи невідомі  $a, b$ .

Визначаємо  $r$ . Аналітичний розв'язок системи рівнянь (6) можна отримати, наприклад, за допомогою спеціалізованої математичної системи Maple, або в числовому вигляді. Це залежить від постановки задачі з реалізації обчислювального блока для конкретної системи машинного зору.

Із системи рівнянь (6) та її розв'язання випливає, що для знаходження радіуса циліндра необхідно отримати координати трьох точок зображення світлового півкола на матриці формувача зображення при довільному розташуванні системи координат, наприклад, початок системи координат може знаходитись в одному з кутів матриці зображення телекамери. Наявність координат трьох точок зображення дає можливість здійснити одне обчислення радіуса (діаметра) циліндра.

Для практичного застосування запропонованої методики достатня наявність недорогій веб-камери та спеціалізованої або універсальної обчислювальної системи, наприклад, персонального комп'ютера середнього класу.

Виконаємо приблизну оцінку похибки обчислення діаметра труби у разі застосування запропонованої методики та інформативність отриманих результатів.

Для захоплення зображення відрізка труби, який потрапляє в зону лінійного освітлення, достатньо використовувати веб-камеру з роздільною здатністю 640×480 пікселів. Нехай зображенню лінійного променя на поверхні труби відповідає 300 пікселів на матриці веб-камери по осі Y відповідно до умов рисунка. Таке зображення доцільно згладжувати, наприклад, методом усереднення, для отримання достовірнішої та меншої за обсягом інформації, яка буде підлягати подальшій обробці. Нехай після усереднення ми одержуємо 100 точок у вибраній нами системі координат.

Наявність 100 точок зображення дасть можливість виконати кількість вимірювань діаметра труби, що дорівнює кількості комбінацій трьох точок із ста можливих, а саме 161700 вимірювань, що дає змогу виконати статистичну обробку отриманих результатів та значно підвищити точність обчислення діаметра труби. Для порівняння, при застосуванні методу вимірювання діаметра труби із застосуванням двох веб-камер (при великому діаметрі труби), кожна із яких захоплює один край

труби, максимальна кількість вимірювань діаметра труби при вказаній роздільній здатності веб-камери дорівнює 640. Кожне вимірювання діаметра відповідає діаметрові одного з 640 послідовних перерізів труби. Статистичне усереднення результатів є коректним, лише якщо діаметр труби не змінюється та його контур є вільним від дефектних ділянок. Інформація про стан труби зводиться до інформації про стан її видимого контуру. Відповідно до вимог виробництва при цьому методи для отримання мінімально необхідної інформації використовують не менше від чотирьох камер, які розташовуються попарно на двох взаємно перпендикулярних осях. Принциповим недоліком цього методу є також необхідність вирішення проблеми визначення контуру, внаслідок дифракції світлових променів, що понижує точність та призводить до необхідності введення додаткових програмно-апаратних засобів.

При запропонованому методі визначення діаметра за допомогою лінійного освітлення одна веб-камера дає змогу отримати обсяг інформації, достатній, щоб збільшити кількість можливих вимірювань на декілька порядків, що навіть перевищує потреби виробництва з погляду вимірювання усередненого діаметра труби. Тому одержану інформацію доцільно використовувати для оцінки стану видимої частини труби – визначити наявність поверхневих дефектів, їх форму та величину. Отримана інформація також дає змогу виконати вимірювання миттєвого радіуса труби, якщо її форма відрізняється від циліндричної. Для цього зображення світлової кривої на поверхні труби протяжністю  $A=100$  точок розділяємо на ряд рівномірних або нерівномірних проміжків, залежно від характеристики кривої, наприклад, 10 рівномірних проміжків, кожний з яких містить  $a=10$  точок. Для кожного з проміжків здійсимо обчислення відповідно до системи рівнянь (1). Якщо результат обчислення не змінюється для жодного з діапазонів, то це означає, що труба має циліндричну форму, якщо результат змінюється плавно – форма труби відрізняється від циліндричної, різкі зміни результату свідчать про наявність в діапазоні дефектної ділянки. Змінюючи розміри діапазону, можна локалізувати дефект та визначити його розміри. Застосування цього методу дає змогу контролювати всю видиму поверхню труби та ефективно використовувати всю поверхню матриці камери. Для підвищення ефективності методу можна застосувати освітлення поверхні труби не однією, а певним набором світлових площин. Внаслідок зростання ефективності використання матриці формувача зображення зростає швидкодія методу – з'являється можливість контролювати поверхню та діаметр труби на деякому скінченному проміжку.

При обробці зображення, отриманого на матриці формувача зображення, для вимірювання деяких просторових параметрів об'єкта слід враховувати просторові спотворення, які привносить оптична система формувача зображення в результуюче зображення. Перетин світлової площини та циліндричної поверхні труби є тривимірним об'єктом і тому його нелінійні спотворення мають тривимірні властивості. Мінімізація часових та обчислювальних затрат при застосуванні тривимірного функціонального перетворення буде розглянута в наступних роботах.

## 5. Висновки

Застосування методу структурованого освітлення для визначення технологічних параметрів циліндричних поверхонь, таких, як діаметр та наявність поверхневих дефектів, в сукупності з оптико-електронними формувачами зображення, порівняно з тінювим методом має ряд переваг, таких, як зменшення кількості формувачів зображення, підвищення точності обчислення діаметра циліндричної поверхні, а також розширення функціональних можливостей за рахунок обчислення профілю труби при її відхиленні від циліндричної форми, розпізнавання локальних дефектів на видимій оптико-електронним формувачем зображення поверхні труби. До недоліків вказаного методу можна зарахувати необхідність введення додаткового обчислювального блока, але швидкий розвиток напівпровідникових технологій робить цей недолік неістотним. Запропонований метод може бути вдосконалений за рахунок зміни параметрів структурованого освітлення, наприклад, введення додаткових світлових площин, зміни кутів освітлення поверхні циліндра, кута нахилу фотоелемента формувача зображення щодо оптичної осі циліндра та інших параметрів.

1. Комерційна інформація фірми Beta LaserMike. [www.betalasermike.com](http://www.betalasermike.com). 2. Битюцкий О.И. и др. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров полых

циліндров // Автометрия. – 1995.– №6. – С.69–74. 3. Non-contact dimensional gage for turned parts // International Class: G01J 003/45 / Патент США № 4880991 від 14.11.1989 р. 4. Method and system for measuring characteristics of curved features // International Class: G06K 009/36 / Патент США № 6724947 від 20.04.2004 р. 5. Робототехника. / К.Фу, Р.Гонсалес, К.Лу.–М.,1989.– С.336–339.

УДК 621.317

Р.М. Івах

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОМІРА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Описано актуальність вимірювання вологості сипких матеріалів, проаналізовано конструкції ємнісних первинних перетворювачів, подана їх коротка класифікація. Автор рекомендує для зменшення впливу висоти засипки та для кращого ущільнення досліджуваного сипкого матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами використовувати ємнісний перетворювач циліндричного типу, де як внутрішній електрод взято конус.

The urgency of measurement of humidity of bulk materials is described, the designs of capacitive primary converters, their introduced brief classification are parsed. The writer recommends for reduction influencing of an altitude of a filling and for the best seal of investigated bulk material and accordingly of constant and even contact of a stuff to welding rods to use the capacitive converter of a cylindrical type, where as an internal welding rod the tumulus is taken.

### Вступ

Електровимірювальна техніка нині володіє усталеним комплексом методів та засобів вимірювання всіх електричних величин. Точність та надійність електричних вимірювальних приладів невинно зростає. Навпаки, вимірювання та контроль неелектричних величин, які займають значну частку в процесах автоматизації, перебувають в найбурхливішому періоді свого розвитку: нові принципи вимірювання з'являються та зникають дуже швидко, і лише після їх ретельного аналізу можуть бути визначені оцінки для окремих методів. Однак і у цій галузі вже помітне прагнення до уніфікації для підвищення продуктивності праці проєктувальників, котрі б при використанні уніфікованих елементів могли б більше уваги приділяти якості проєктування нових та підвищенню надійності відомих засобів вимірювання.

Серед розмаїття неелектричних величин [1], які вимагають постійного контролю, значне місце займає вологовміст сипких матеріалів, адже вимірювання вологості сипких сільськогосподарських культур та проєктування експрес-вологомірів є актуальною задачею для України, оскільки стратегічним напрямком розвитку економіки є виробництво зерна та продуктів його переробки. Точний контроль вмісту вологи, зокрема в зерні, сприяє зниженню витрат, пов'язаних із його сушінням і збереженням. Можливість точного визначення вологості зерна в потрібний момент, а особливо під час збирання врожаю – є тим чинником, що відокремлює прибуток від збитків. Експрес-вологоміри застосовують при прийманні зерна від хлібоздавальників, при взаємних розрахунках, для контролю при зберіганні та переробці зерна.

Серед розмаїття непрямих методів вимірювання вологості сипких матеріалів найперспективнішим є діелькометричний метод вимірювання [2], оскільки цей метод має ряд переваг, серед яких:

- обладнання, яке використовується при діелькометричному методі, просте в експлуатації та має малу масу і габарити;