

Й. Й. Білинський<sup>1</sup>  
 М. Й. Юкиш<sup>1</sup>  
 І. В. Сухоцька<sup>1</sup>

## КЛАСИФІКАЦІЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Проаналізовано існуючі оптико-електронні координатно-вимірювальні системи та запропоновано їх класифікацію.*

**Ключові слова:** оптико-електронна система, координати, вимірювальна система, класифікація.

### Вступ

На сьогодні широкого застосування набувають сучасні технології координатних вимірювань, оскільки під час вимірювання деталей мікросхемної техніки можуть виникати труднощі, через їх малі розміри та важкодоступність. Постійне ускладнення конфігурації виробів, підвищення вимог до їх якості та точності, призвело до того, що контроль геометричних параметрів з використанням застарілих засобів (універсального вимірювального інструмента, контрольних пристосувань, шаблонів і т. д.) вимагає більших витрат для виготовлення відповідного оснащення, а найчастіше й просто неможливий. Тому створення нових методів обробки зображень та різного роду сенсорів дало змогу розробити високоточні оптико-електронні координатно-вимірювальні системи для вимірювання геометричних параметрів деталей (розміру, діаметру, кута тощо) [1]. Проте їх велика кількість не дозволяє досліднику безпомилково вибрати ту чи іншу систему, тому виникла необхідність їх аналізу для визначення найефективнішого, що і було поставлено за *мету роботи*.

### Основна частина

Принцип координатних вимірювань полягає у вимірюванні складних форм, розмірів і місця знаходження елементів деталей та зводиться до визначення і математичної оцінки просторових координат окремих точок [1].

Визнаними лідерами в галузі виробництва контрольно-вимірювальних систем для лінійно-кутових величин є компанії Hexagon Metrology TESA (Швейцарія), DEA (Італія), Jenoptik, WIKА та VEGA (Німеччина), Ernst (Швейцарія), Renishaw plc (Великобританія), Рифтэк (Білорусь), та Українсько-Американське ТОВ Фірма «КОДА».

Оскільки останнім часом багато підприємств для контролю використовують координатно-вимірювальні системи (КВС), щоб безконтактно знімати інформацію з геометрії виробу тому у роботі запропонована їх класифікація.

КВС за способом сканування первинного зображення поділяються на точкове, построкове та площинне сканування. Точкове сканування вважається найінформативнішим, проте його недоліком порівняно з іншими є тривалий час обробки, оскільки сканується кожен піксель зображення [2].

За способом просторового представлення об'єктів, що вимірюються, розрізняють одновимірні, двовимірні та тривимірні КВС. Найбільш поширені двовимірні системи. Проте з розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення все більшу роль відіграють тривимірні системи, які дають більше інформації про вимірювальний об'єкт [3].

За способом керування КВС можна поділити на: традиційні (з ручним керуванням), автоматизовані та аналізаторні. У системі з ручним керуванням оператор впливає на результат вимірювання шляхом візуального наближення вимірювальних точок, тобто здійснюється суб'єктне вимірювання. Основне призначення автоматизованих методів — це автоматизація простих повторюваних операцій. Системи, що аналізують, дозволяють самостійно переміщати та фокусувати препарат, вибирати траєкторію перегляду, контролювати якість освітлення та окраску, знаходити та записувати в базу даних зображення об'єктів заданих типів [4, 5].

Методи спостереження в мікроскопії обираються та забезпечуються конструктивно залежно від характеру та властивостей об'єктів, що вивчаються. За методами спостереження можна виділити такі КВС, як: поляризаційні, люмінесцентні, фазового контрасту, інтерференційного контрасту, відбитого та прохідного світла.

Методи спостереження в поляризаційному світлі служать для мікроскопічного дослідження препаратів, що включають оптично анізотропні елементи (або цілком складаються з таких елементів). Метод люмінесцентної мікроскопії широко використовується у всіх областях науки. Велика кількість і різноманітність застосувань пов'язані з надзвичайно високою чутливістю ока до кольору і високою контрастністю зображення об'єкта на темному нелюмінесцентному фоні, а також цінністю інформації про склад і властивості досліджуваних речовин, яку можна отримати, знаючи інтенсивність і спектральний склад їх люмінесцентного випромінювання.

Метод фазового контрасту служить для отримання зображень прозорих і безбарвних об'єктів, невидимих у разі спостереження методом світлого поля. Метод заснований на тому, що навіть за дуже малих відмінностей у показниках заломлення різних елементів препарату світлова хвиля, що проходить через них, зазнає різні зміни по фазі. Ці фазові зміни, які не сприймаються безпосередньо ні оком, ні фотопластинкою, за допомогою спеціального оптичного пристрою перетворюються в зміни амплітуди світлової хвилі, тобто в зміни яскравості, які вже помітні оком або фіксуються на фоточутливому шарі.

Відмінність інтерференційного методу від методу фазового контрасту полягає головним чином у можливості з високою точністю вимірювати різниці ходу, що вносяться мікроб'єктами. Це відкриває широкі можливості кількісних досліджень. На підставі таких вимірів можуть бути розраховані загальна маса і концентрація сухої речовини в мікроб'єкті, показник заломлення і розміри об'єкта.

Метод спостереження в у відбитому світлі поділяється на метод світлого та темного поля. Метод світлого поля у відбитому світлі застосовується для спостереження непрозорих об'єктів, що відображають світло, наприклад, шліфів металів. Спостерігаючи за методом темного поля у відбитому світлі, непрозорі препарати (наприклад, шліфи металів) освітлюють зверху — через спеціальну кільцеву систему, розташовану навколо об'єктива.

Метод спостереження в прохідному світлі можна розділити на такі групи: метод світлого та темного поля, косоного освітлення та метод ультрамікроскопії. Метод світлого поля в прохідному світлі застосовується у дослідженні прозорих препаратів з включеними в них абсорбуючими (поглинаючими світло) частками і деталями. Метод може бути корисний і для спостереження об'єктів, що не абсорбують, але лише в тому випадку, якщо вони розсіюють пучок настільки сильно, що значна частина його не потрапляє в об'єктив. Метод косоного освітлення є різновидом попереднього, відрізняючись тим, що світло на об'єкт направляють під великим кутом до напрямку спостереження. У низці випадків це дозволяє виявити «рельєфність» об'єкту за рахунок утворення тіней. Метод темного поля в прохідному світлі застосовується для отримання зображень прозорих об'єктів, що не абсорбують, невидимих у освітленні за методом світлого поля. За цим методом за зображенням не можна визначити, прозорі частки або непрозорі, більший або менший показник заломлення вони мають у порівнянні з навколишнім середовищем. Метод ультрамікроскопії дає можливість виявити (але не «спостерігати» в буквальному сенсі слова) надзвичайно дрібні частинки, розміри яких лежать далеко за межами роздільної здатності найсильніших мікроскопів. Але при цьому не можливо визначити форму і точні розміри таких часток: їх зображення представляються спостерігачеві у вигляді дифракційних плям, розміри яких залежать не від розмірів і форми самих частинок а від апертури об'єктива і збільшення мікроскопа [6].

КВС за направленістю світлового потоку бувають прямі та інвертовані. Інвертовані відрізняються тим, що об'єкти в них розташовується під спостережуваним предметом, а конденсор — зверху. КВС цього типу призначені для дослідження громіздких об'єктів, які важко або неможливо розташувати на предметних столиках звичайних мікроскопів. Особливо зручна ця схема для спостереження у відбитому світлі структур різних поверхонь. Тому вона застосовується в більшості металографічних системах.

За способом представлення даних КВС можна поділити на системи: відображення, реєстрації та порівняння. Системи відображення не мають можливості запису та подальшої обробки даних, що передбачено в реєструвальних системах. Системи порівняння мають бази даних, які забезпечують збереження та швидке порівняння отриманих даних з наявними.

За довжиною хвилі КВС можуть бути: рентгенівські, інфрачервоні, ультрафіолетові та лазерні.

Лазерні системи поділяються на: 1D транзлазери, 1D лазери Фуко, 2D лазер Фуко, 3D фотограметрія та 3D проекція смуг. 1D транзлазери застосовуються в цілях автоматизації технології вимірювань. Проте результат вимірювання залежить від структури кута нахилу поверхні, внаслідок чого зменшується точність вимірювань. В 1D та 2D лазерах Фуко результат отримують шляхом накладання значень, отриманих лазерним датчиком та значень отриманих КВС. В системах 3D проекції смуг точність проекції впливає на результат вимірювання. Системи 3D фотограметрії виключають цей недолік. Основною перевагою лазерних датчиків є порівняно висока швидкість вимірювання: від декількох сотень до тисячі точок в секунду, проте вони мають велику вартість та складну конструкцію [1].

За видом фокусування КВС поділяються на дві групи — ручного та автоматичного. Особливістю автоматичної системи є відсутність людського фактору під час оцінювання ступеня різкості зображення. Реалізації систем автофокусування дає можливість виділи її два типи: активна та пасивна. Система активного автофокусування вимірює відстань до об'єкта за допомогою світлового імпульсу і автоматично фокусується на нього. Проте вона визначає відстань лише до найближчого об'єкта. Принцип дії пасивних систем оснований на визначенні контрасту зображення або різниці фаз падаючого та відбитого променів, саме тому вони поділяються на: контрастні та фазові. Принцип фазового автофокусування полягає в визначенні відстані між відбитими світловими потоками від різних точок. Розрізняють горизонтальні та вертикальні системи фазового автофокусування. Горизонтальні точніше працюють з вертикальними деталями, а вертикальні навпаки. Такі системи володіють високою швидкістю реєстрації під час руху об'єктів, проте в них є необхідність фізичного юстування та програмної настройки.

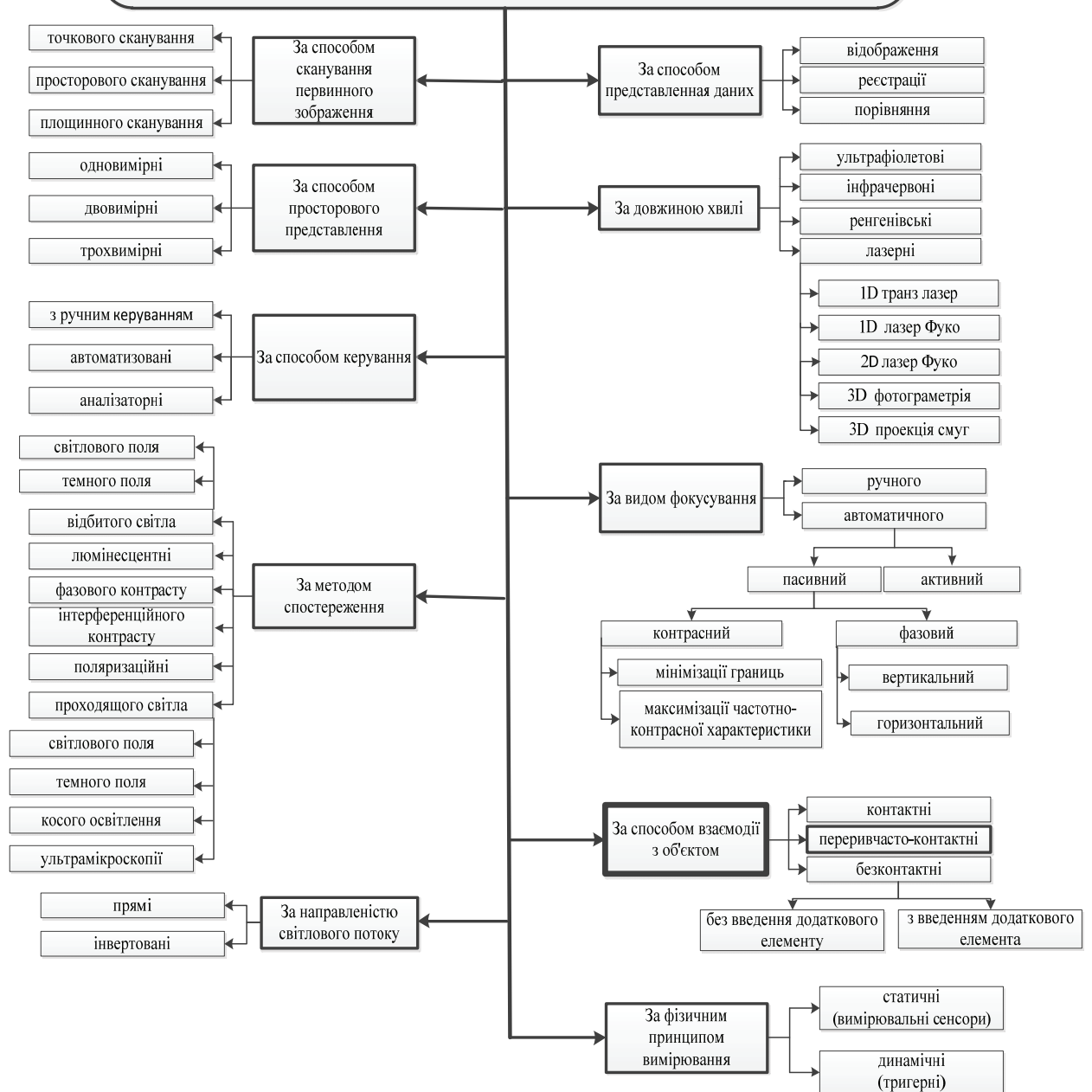
Контрастний автофокус визначається за допомогою аналізу зображення на ступінь різкості (розмитості). Його перевагами є простота, невисока вартість, мініатюрність та висока точність. Проте контрастний автофокус має невисоку швидкість роботи, оскільки невідомо в якому напрямку необхідно змінювати фокусування, щоб досягти максимально різкого зображення. В роботі [7] запропоновано два види контрастного автофокусування: метод мінімізації границь та метод максимізації частотно-контрастної характеристики. Метод мінімізації границь забезпечується використанням фільтрів, що виділяють границі об'єктів. Автори зазначають, що оператор Собела точніше визначає границі та є швидкодійним. Метод частотно-контрастної характеристики оснований на Фур'є-перетворенні вхідного зображення. Після Фур'є-перетворення підраховується фокусне число і порівнюється з попередньою ітерацією. Перевагою методу є висока чутливість до поздовжнього зміщення, а відповідно, і високі вимоги до фокусування.

За фізичним принципом вимірювання виділяють дві групи КВС: динамічні (тригерні) та статичні. Тригерні системи коли знаходять точку вимірювання, створюють сигнал за яким вимірювальна система визначає координати точки в просторі. Для визначення координат в тригерних системах переміщення вздовж осей є необхідним [1], а в статичному режимі визначення координат точки можливе навіть тоді, коли КВС є нерухомою.

За способом взаємодії КВС розрізняють контактні, безконтактні та переривчасто-контактні. Контактні методи, як правило, використовують щуп. Технологія виготовлення і конструкції щупів накладають обмеження на габаритні розміри наконечників, що зменшує точність вимірювання. Крім цього, слід враховувати похибку зв'язану з деформацією щупа під дією вимірювального тиску [8]. Під час безконтактних вимірювань використовують мікроскопи. Таким системам притаманний досить великий набір похибок, які пов'язані з характеристиками мікроскопа: похибка від дифракції світла на межах вимірюваного об'єкта складає приблизно 0,02 мм; для отримання достатньої точності вимірювання необхідно, щоб об'єкти знаходились в одній площині; похибки, які залежать від стану краю, що породжує складність їх оконтурення, фільтрації та бінаризації. Крім цього одним з основних недоліків є вплив оператора на результат вимірювання за рахунок візуального наближення вимірювальних точок, тобто здійснюється суб'єктивне вимірювання [9].

Отже, на основі вищевикладеного, розроблена класифікація оптико-електронних координатно-вимірювальних систем (рис.). За основні класифікаційні ознаки вибрано спосіб сканування первинного зображення; спосіб просторового представлення об'єктів; спосіб керування; метод спостереження; направленість світлового потоку; спосіб представлення даних; довжина хвилі; вид фокусування; фізичний принцип вимірювання та спосіб взаємодії з об'єктом.

## Оптико-електронні координатно-вимірювальні системи



Класифікація оптико-електронних координатно-вимірювальних систем

Найефективнішими на сьогодні є КВС, які поєднують переваги мікроскопів та контактних методів. За їх допомогою можна виміряти мініатюрні елементи деталей та деталі складної форми. Крім цього, вони мають доступ до важкодоступних елементів деталей [9]. Проте в таких системах координати країв об'єктів знаходяться шляхом згладжування з подальшим диференціюванням дискретного зображення, отриманого з використанням оптико-електронної системи. Це призводить до втрати частини вимірювальної інформації. При цьому, оскільки системи використовують матричні фотоприймальні пристрої, то не враховується, що координати країв об'єкта на зображенні можуть попадати як на вузли, так і між вузлами періодичної просторової ґратки. За принцип визначення країв в них використовуються інтерполяційні методи, які дозволяють знаходити додаткові точки, що призводить до зростання похибки вимірювання, оскільки не завжди правильно знаходяться початкові точки відліку для виконання інтерполяції [10]. Точнішою є поліноміальна інтерполяція [11], проте місцезнаходження краю обмежується похибкою величиною в половину пікселя.

## Висновки

Проведено аналіз оптико-електронних координатно-вимірювальних систем. За основні класифікаційні ознаки вибрані: спосіб сканування первинного зображення; спосіб просторового представлення об'єктів; спосіб управління; метод спостереження; направленість світлового потоку; спосіб представлення даних; довжина хвилі; вид фокусування; фізичний принцип вимірювання та спосіб взаємодії з об'єктом.

Встановлено, що для координатних вимірювань оптимально використовувати безконтактні методи з введенням додаткового елемента в зону вимірювань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нейманн Р. И. Технология мультисенсорных координатных измерений / Ральф Кристоф Ханс Иоахим Нейманн, изд. 2, Германия. — 2004 г. — 148 с.
2. Кондратов В. Т. Визуализация в метрологии: уровни, направления, цели, задачи, методы и программное обеспечение / В. Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 1. — С. 7—22.
3. Богданкевич О. В. Линейные измерения в субмикронном диапазоне / О. В. Богданкевич, В. В. Календин, Ю. А. Кудяров, Л. Н. Невзорова // Метрологическая служба в СССР. — 1987. — Вып. 3. — С. 31—35.
4. Дюков В. Г. Растровая оптическая микроскопия / В. Г. Дюков, Ю. А. Кудяров. — М. : Наука. — 1992. — 208 с.
5. Білінський Й. Й. Класифікація методів вимірювань розмірів мікроскопічних об'єктів / Й. Й. Білінський, І. В. Микулка, Б. П. Книш // Вісник Хмельницького національного університету. — 2011. — № 5. — С. 132—135.
6. Аппельт Г. Введение в методы микроскопического исследования / Г. Аппельт. — М. : Медгиз, 1959. — 425 с. — ISBN: 978-5-458-53348-5.
7. Лашманов О. Ю. Исследование и разработка методов автоматической фокусировки реального масштаба времени для систем технического зрения / О. Ю. Лашманов, А. В. Краснящих // Труды оптического общества им. Д. С. Рождественского. — 2011. — С. 262—266.
8. Namashima N. Optical measurements of half micron critical dimensions / N. Namashima, K. Kato, T. Ishizeki. — Ibid. — P. 92—99.
9. Зуйков А. А. Повышение точности координатных измерений геометрических параметров объектов в компьютерной микроскопии с дополнительным телом в зоне измерения : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук спец. : 05.11.16. / А. А. Зуйков. — М., 2013 г. — 22 с.
10. Білінський Й. Й. Методи обробки зображення в комп'ютеризованих оптико-електронних системах: моногр. / Й. Й. Білінський. — Вінниця : ВНТУ, 2010 р. — 272 с. — ISBN 978-966-641-366-9.
11. Deriche R. Using Canny's criteria to Derive a Recursively implemented optimal edge detection // Int. J. Comput. Vis. — 1998. — No 7(12). — P. 5—12.

Рекомендована кафедрою електроніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 03.02.2014

**Білінський Йосип Йосипович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроніки;

**Юкиш Марина Йосипівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

**Сухоцька Ірина Володимирівна** — аспірантка кафедри електроніки, e-mail: mukylka@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Y. Y. Bilynskiy<sup>1</sup>**  
**M. Y. Yukysh<sup>1</sup>**  
**I. V. Suhotska<sup>1</sup>**

## Classification of electro-optical coordinate measuring systems

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The analysis of existing electro-optical coordinate measuring systems was conducted and their classification is suggested.*

**Keywords:** optical-electronic system, coordinates, measuring system, classification.

**Bilynskiy Yosyp Y.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronics;

**Yukysh Maryna Y.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurement;

**Suhotska Iryna V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electronics, e-mail: mukylka@gmail.com.

**И. И. Билинский<sup>1</sup>**  
**М. И. Юкиш<sup>1</sup>**  
**И. В. Сухоцкая<sup>1</sup>**

## **Классификация оптико-электронных координатно-измерительных систем**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Проанализированы существующие оптико-электронные координатно-измерительные системы и предложена их классификация.*

**Ключевые слова:** оптико-электронная система, координаты, измерительная система, классификация.

**Билинский Иосиф Иосифович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроники;

**Юкиш Марина Иосифовна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений;

**Сухоцкая Ирина Владимировна** — аспирант кафедры электроники, e-mail: mukylka@gmail.com.