

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька

**ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНИЙ МЕТОД
ТА ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ
МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 681.3.08

Б-61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 23 лютого 2017 р.)

Рецензенти:

В. І. Шклярський, доктор технічних наук, професор

О. Г. Шайко-Шайковський, доктор технічних наук, професор

Білинський, Й. Й.

Б-61 Переривчасто-контактний метод та засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми : монографія / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

ISBN 978-966-641-701-8

Робота спрямована на розв'язання актуальної задачі підвищення вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом врахування ступеня розмитості зображення країв об'єкта та визначення коефіцієнта масштабування додатково введеної міри геометричного розміру. В роботі наведено удосконалену функцію вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях, яка враховує коефіцієнт масштабування, і розроблено переривчасто-контактний засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми зі стабільними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

УДК 681.3.08

ISBN 978-966-641-701-8

© Й. Білинський, І. Сухоцька, 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Розділ 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	7
1.1 Аналіз особливостей контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми	7
1.2 Класифікація методів та оптичних засобів контролю геометричних розмірів об'єктів.....	13
1.3 Вибір критерію оцінювання ефективності засобу контролю геометричних розмірів об'єктів	19
Розділ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	21
2.1 Математичний опис процесу отримання вимірювальної інформації про об'єкт на зображенні, який знаходиться в фокусі оптичної системи, для подальшого контролю його геометричних параметрів.....	21
2.2 Вдосконалення переривчасто-контактного методу контролю малогабаритних об'єктів складної форми.....	23
2.3 Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях.....	27
2.4 Підвищення чутливості вимірювання та вірогідності контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми на основі удосконалення методу субпіксельної локалізації краю зображення об'єкта.....	30
2.5 Результати моделювання переривчасто-контактного методу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	37
Розділ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	40
3.1 Розробка переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	40

3.2 Виведення функції перетворення переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	42
3.3 Підвищення точності визначення розмірів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом розробки методів та детекторів виділення контурів об'єктів на розфокусованих зображеннях та їх дослідження.....	46
3.3.1 Розробка методу та детектора виділення контурів об'єктів на розфокусованих слабоконтрастних розмитих зображеннях та їх дослідження.....	46
3.3.2 Розробка методу виділення контуру об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації та детектора контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	55
3.4 Апаратно-програмна реалізація знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта.....	65
Розділ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	69
4.1 Рекомендації щодо інженерного проектування засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	69
4.2 Алгоритм контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	72
4.3 Аналіз похибок переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	75
4.3.1 Оцінювання похибки щупа.....	75
4.3.2 Оцінювання субпіксельної дискретизації в просторі.....	77
4.4 Оцінювання вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	80
4.5 Експериментальні дослідження переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ВСТУП

Стрімкий розвиток електроніки та приладобудування супроводжується постійною мінітюаризацією деталей, компонентів та вузлів. У зв'язку з ростом виробництва високоточних малогабаритних деталей зростає потреба і в засобах вимірювального контролю геометричних розмірів [1–5], оскільки їх експлуатація впливає на якість та зносостійкість готової продукції.

При середньо- та дрібносерійному виробництві, як правило, використовують недорогі засоби вимірювального контролю геометричних параметрів. Проте їх застосування для контролю малогабаритних об'єктів складної форми стає причиною отримання недостовірної вимірювальної інформації, оскільки найчастіше досліджувані розміри знаходяться на межі роздільної здатності систем реєстрації цих засобів. Крім цього вимірювальний контроль такими засобами вимагає достатньо великих витрат часу.

На сьогодні найбільш універсальним засобом вимірювального контролю геометричних розмірів є координатно-вимірювальна машина (КВМ) як контактного так і безконтактного типу. КВМ контактного типу, як правило, використовують щуп, який прив'язаний до координатної сітки, що вимагає великих витрат часу в умовах потокового контролю. При цьому безперервне дослідження геометрії деталі супроводжується низкою недоліків, які викликають похибки вимірювання, а саме: нелінійність, вібрація, температурний режим та деформація під дією прикладеного зусилля [1].

Ці недоліки компенсуються безконтактними КВМ, в структурі яких використовують вимірювальні мікроскопи, що унеможливають силові деформації, але мають характерні для мікроскопії проблеми, а саме: вимірювання з задовільною точністю можливо лише для об'єктів, у яких елементи розташовані в одній площині; похибки при візуванні істотно залежать від стану краю об'єкта (нечіткі фаски, довільні округлення або пошкодження); похибки візування від дифракції світла на краях вимірюваного об'єкта (досяга-

ють значень до 0,02 мм). Зазвичай для автоматизації контролю в безконтактних КВМ використовують матричні фотоприймальні пристрої, на якість візуалізації яких впливає освітленість та колір досліджуваної деталі, а також не враховується, що координати країв об'єкта на зображенні можуть потрапляти як на вузли, так і між вузлами періодичної просторової ґратки фотоматриці, що вносить значну похибку в результат вимірювання [5]. Крім цього, КВМ мають велику вартість та є економічно не доцільними в умовах дрібносерійного виробництва.

Таким чином, з огляду на безупинний розвиток виробництва та високі вимоги щодо якості деталей, а, відповідно, й до вимірювального обладнання, актуальним постає завдання розробки сучасних методів і засобів контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми в умовах середнього та дрібносерійного виробництва.

Розділ 1
ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ
ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ
МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

На сучасному етапі розвитку науки та техніки за допомогою сучасних технологій здійснюється виробництво високоточних і малогабаритних деталей. При виготовленні таких деталей велика увага приділяється контролю їх геометричних параметрів [1–4, 6–29]. Під геометричними параметрами об'єкта на зображенні розуміють його геометричні розміри, які знаходяться шляхом координатних вимірювань.

**1.1 Аналіз особливостей контролю розмірів
малогабаритних об'єктів складної форми**

Виготовлення виробів пов'язано з обробкою матеріалів за заданими розмірами, формою і якістю поверхні. Від точності контролю розмірів деталей в процесі їх створення залежать показники виробництва, якість і зносостійкість продукції [30]. Найважливішу роль в забезпеченні якості та конкурентоспроможності продукції відіграє контроль геометричних розмірів виробів. Виділяють такий контроль 2D геометрії виробів, як лінійні розміри – довжина, ширина, товщина, глибина, радіуси та діаметри; кутові величини – кути, конуси; параметри положення – паралельність, прямолінійність, перпендикулярність [30, 31]. Як правило, конструктивними елементами деталей є: одиничні (циліндр, призма, паралелепіпед, конус, сфера, профіль), групові (комплекти баз, наприклад, бази під підшипникові кріплення, штифтові, квадратні, різьбові, центрові отвори, зубчасті та інші) та спеціальні (канавки, радіуси заокруглень, фаски, легкодеформівні та ін.) [32].

Основними видами розмірів елементів деталей, що контролюються, є: вали (рис. 1.1а), отвори (див. рис. 1.1б) та елементи, що не належать до отворів і валів (див. рис. 1.1в).

Об'єкти, що їх контролюють за габаритними розмірами, умовно можна поділити на чотири категорії [33].

1. Мікрооб'єкти – вироби з розмірами меншими 1 мм. До таких об'єктів можуть належати ювелірні вироби, кристали, алмази, дрібні лінзи, елементи мікросхемотехніки.

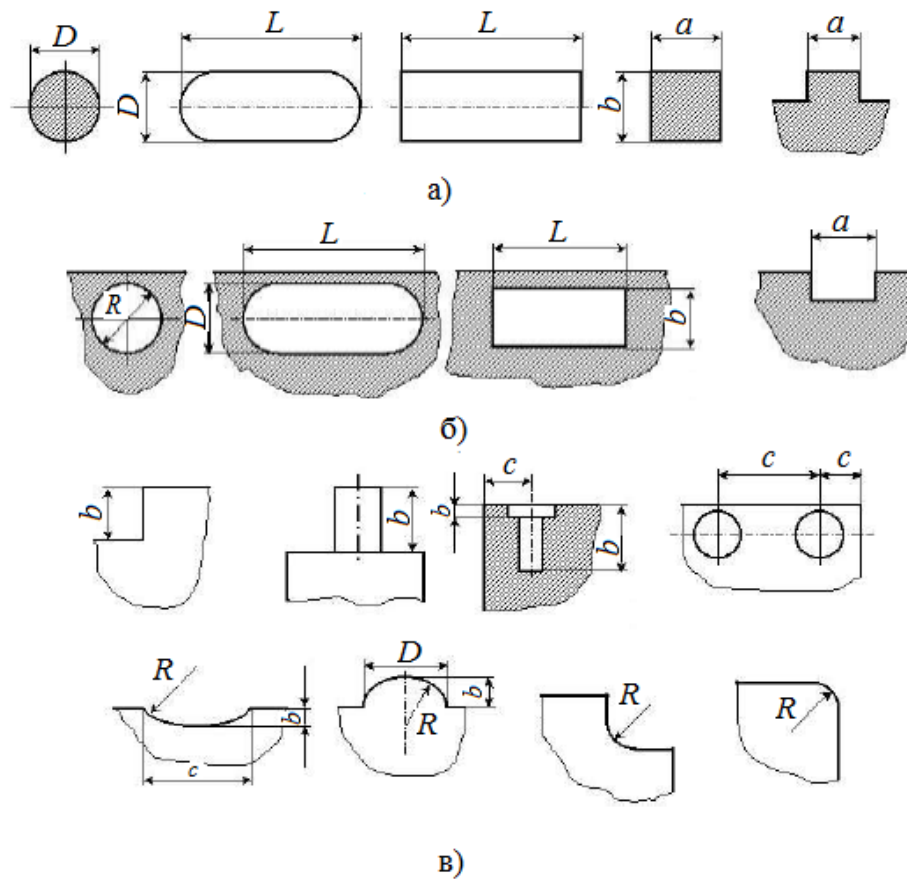


Рисунок 1.1 – Основні види розмірів елементів деталей:
 а – вали; б – отвори; в – елементи, що не належать до отворів і валів [32]

2 Малогабаритні деталі – це вироби з розмірами від 100 мкм до 50 мм, наприклад, шестерінки годинників і машин, малогабаритні лопатки, алмазні голки та наконечники, ювелірні вироби та інші.

3 Середньогабаритні деталі – вироби з розмірами від 50 до 2000 мм. Наприклад, блоки двигунів внутрішнього згорання.

4 Крупногабаритні деталі – вироби з розмірами більше 2000 мм, вимірювання яких потребують зменшувальної оптики. Класичними прикладами таких об'єктів є труби, резервуари, корпуси автомобільної, авіаційної та ракетно-космічної техніки.

При цьому, за точністю виготовлення деталі поділяються на: низької точності, тобто з похибкою – $2 \leq \varepsilon_{\Pi} \leq 5 \%$; середньої точності – $0,5 \leq \varepsilon_{\Pi} \leq 2 \%$; високоточні – $0,1 \leq \varepsilon_{\Pi} \leq 0,5 \%$ та прецизійні – $\varepsilon_{\Pi} \leq 0,1 \%$ [33].

В роботі проводились дослідження малогабаритних об'єктів складної форми. Причому, метою є високоточний контроль (з похибкою

0,1 ≤ ε_п ≤ 0,5 %) їх геометричних розмірів. Основними об'єктами дослідження були алмази в оправках, алмазні олівці та алмазні голки. На рис. 1.2 показано зовнішній вигляд алмазів в оправках.

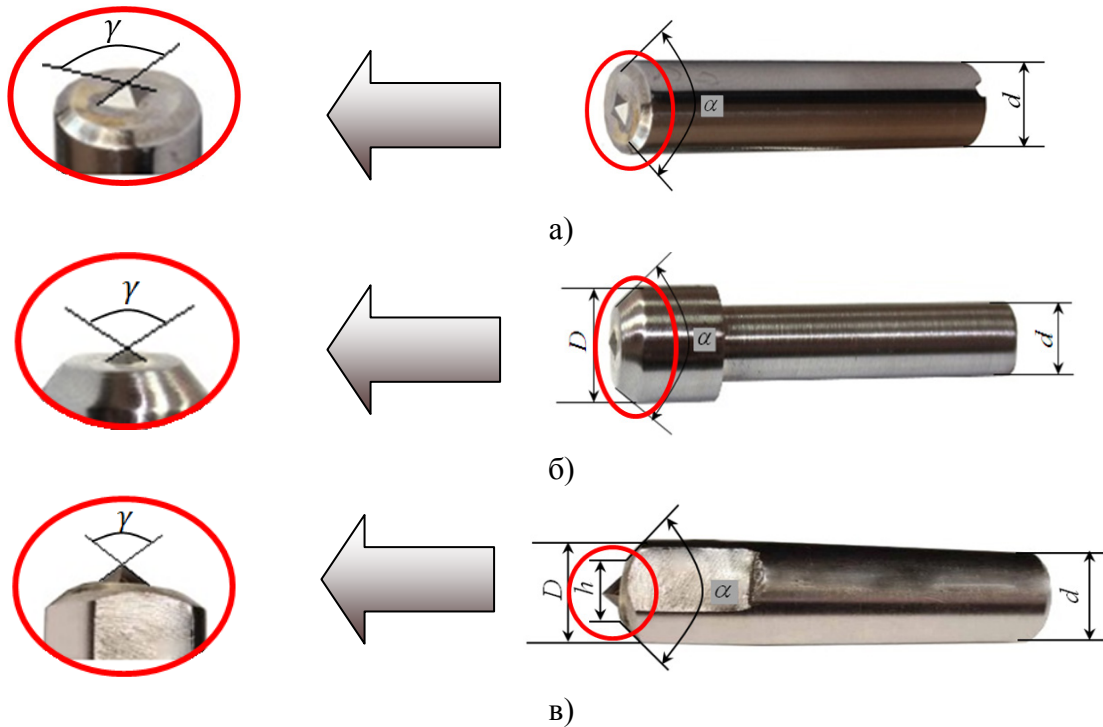


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд алмазів в оправках:
а – тип 1; б – тип 2; в – тип 3

Технічні умови, основні характеристики та допуски алмазів в оправках повинні відповідати стандарту ГОСТ 22908-78 [34], згідно з яким граничне відхилення діаметра D для алмаза в оправі типів 1, 2 та 3 на довжині 10 мм не повинно перевищувати +0,5 мм, в окремих випадках граничне відхилення береться за $f9$ на всій довжині. Для алмаза в оправі типу 2 граничне відхилення діаметра d береться за $f9$. Для алмаза в оправі типу 3 граничне відхилення розміру h береться за $h12$.

При цьому граничне відхилення кутів α та γ дорівнює $\pm 0,5^\circ$. На рис. 1.3 показано зовнішній вигляд алмазних олівців. Технічні умови, основні характеристики та допуски алмазних олівців повинні відповідати [35], згідно з яким граничне відхилення діаметра D для алмазних олівців типів 1 та 2 визначається за $h14$, діаметра d – за $f9$, а довжини $L - \pm \frac{IT16}{2}$.

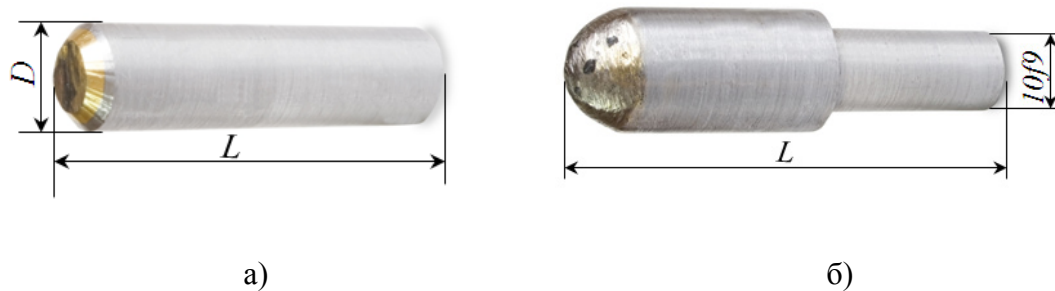


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд алмазних олівців: а – тип 1; б – тип 2

При цьому, не вказані граничні відхилення повинні відповідати $\pm \frac{IT14}{2}$. На рис. 1.4 наведено зовнішній вигляд алмазної голки.

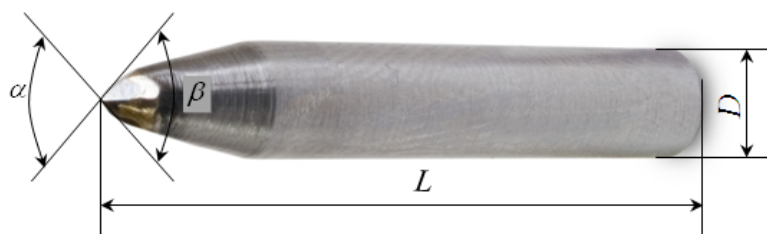


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд алмазної голки

Технічні умови, основні характеристики та допуски алмазних голок повинні відповідати [36], згідно з яким граничне відхилення діаметра D для алмазних голок визначається за $d11$, довжини $L - 0,5$ мм, кутів α та $\beta - \pm 0,5^\circ$.

Граничні відхилення за $f9$, $h12$, $h14$, $\pm \frac{IT16}{2}$, $\pm \frac{IT14}{2}$ та $d11$ повинні відповідати [37].

На сьогодні відомими засобами контролю геометричних розмірів в умовах невеликих підприємств є інструментальні оптичні мікроскопи та проекційні прилади (наприклад, великий проектор ВП-2) [38]. Проте основними недоліками їх використання є низька точність вимірювального процесу, велика суб'єктивна похибка, тобто вплив оператора на результат вимірювання, а також відсутність автоматизації процесу контролю. За допомогою існуючих засобів координати зображення точки об'єкта визначаються з точністю до пікселя або 1/2 пікселя, що не завжди є достатнім.

Для визначення геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми доцільно застосовувати координатне вимірювання. Координатне вимірювання – вимірювання геометричних розмірів деталей шляхом вимірювання координат окремих точок поверхонь об'єкта в прийнятій системі координат (прямокутній Декартовій, циліндричній або сферичній) і подальшої математичної обробки вимірних координат для визначення розмірів [39].

На рис. 1.5 наведено приклади координатних вимірювань геометричних розмірів об'єктів, а саме: відстань між отворами; діаметр зовнішнього отвору; міжосьова відстань та діаметр внутрішнього отвору.

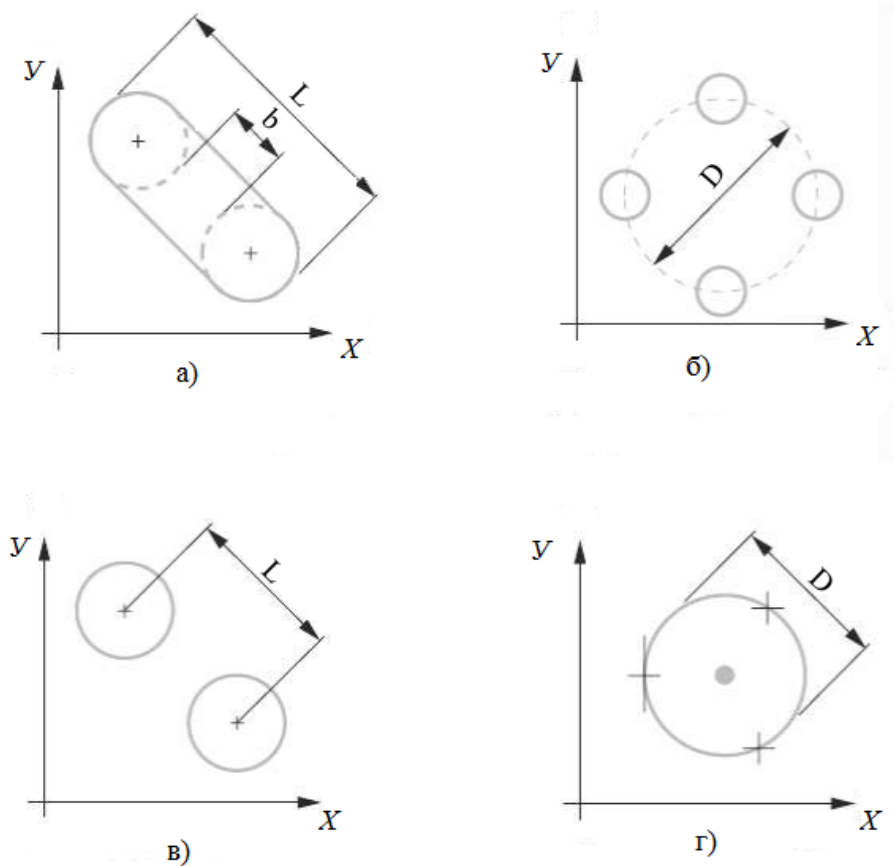


Рисунок 1.5 – Приклади координатних вимірювань геометричних параметрів об'єктів: а – відстань між отворами; б – діаметр зовнішнього отвору; в – міжосьова відстань; г – діаметр отвору [40]

В сучасних вимірювальних технологіях набуває широкого розповсюдження визначення геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми за допомогою методів візуалізації [41]. Ос-

новою таких методів є здійснення локалізації країв об'єкта, тобто його оконтурювання. Для виділення чіткого контуру необхідно отримати висококонтрастне зображення, що є неможливим при знаходженні розмірів об'єктів на межі роздільної здатності систем реєстрації, а також розмірів малогабаритних деталей та деталей складної форми.

Отже, задача візуалізації об'єктів на зображеннях полягає у виділенні чітких меж досліджуваних об'єктів для можливості подальшого автоматизованого обрахунку їх розмірів, а також у полегшенні візуального сприйняття людиною.

Потрібно врахувати, що особливістю зображень малогабаритних об'єктів складної форми (рис. 1.6), які досліджуються в роботі, є досить велика розмитість за рахунок неможливості повної фіксації та наведення різкості.

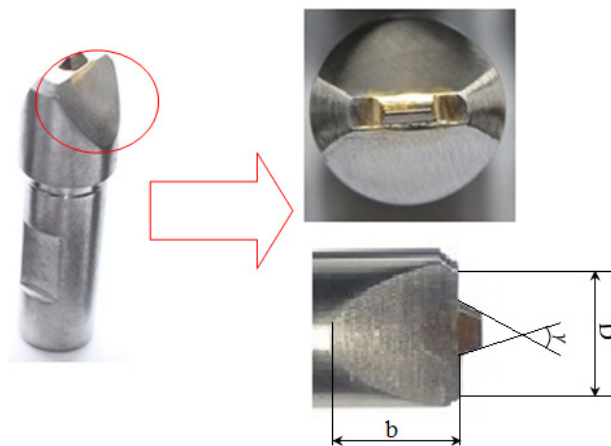


Рисунок 1.6 – Візуалізація об'єкта складної форми на прикладі алмазного різця

Значення розмитості σ такого зображення варіює в межах 1–2,5 при ширині перепадів до 20 пікселів. Контури таких зображень, виділені за допомогою відомих методів, будуть або широкими, якщо це методи просторового диференціювання (наприклад Собела), або ж похибка виділення буде досить великою через наявність розривів контуру або хибних контурних ліній, як, наприклад, у детектора Канні [41, 42]. Отже, враховуючи особливості контролю оптичними засобами малогабаритних об'єктів складної форми, необхідно розробити нові методи контролю їх геометричних розмірів.

1.2 Класифікація методів та оптичних засобів контролю геометричних розмірів об'єктів

Принцип координатних вимірювань полягає у вимірюванні складних форм, розмірів і місця знаходження елементів деталей та зводиться до визначення та математичного оцінювання просторових координат окремих точок.

Останнім часом багато підприємств для контролю розмірів малогабаритних деталей використовують координатно-вимірювальні засоби (КВЗ), щоб безконтактно знімати інформацію про геометрію виробу. 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» [5].

На основі проведеного аналізу [1–5, 30, 41, 43–52] в роботі запропоновано класифікацію КВЗ, що на рис. 1.7, за основні класифікаційні ознаки якої вирішено взяти [6, 7]: 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.

КВЗ за способом сканування первинного зображення поділяються на точкового, рядкового та площинного сканування. Точкове сканування вважається найбільш інформативним, проте його недоліком, порівняно з іншими, є тривалий час обробки, оскільки сканується кожен піксел зображення [43].

За способом просторового представлення вимірюваних об'єктів розрізняють одновимірні, двовимірні та тривимірні КВЗ. Найбільш поширені двовимірні системи. Проте з розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення все більшу роль відіграють тривимірні системи, тому що вони дають більше інформації про вимірювальний об'єкт [44].

За способом керування КВЗ можна поділити на: традиційні (з ручним керуванням), автоматизовані та аналізаторні. При використанні системи з ручним керуванням присутній вплив оператора на результат вимірювання шляхом візуального наближення вимірювальних точок, тобто здійснюється суб'єктивне вимірювання. Основне призначення автоматизованих методів – це автоматизація простих повторюваних операцій.



Рисунок 1.7 – Класифікація координатно-вимірювальних засобів

Системи аналізу дозволяють самостійно переміщувати та фокусувати препарат, вибирати траєкторію перегляду, контролювати якість освітлення та забарвлення, знаходити та записувати в базу даних зображення об'єктів заданих типів [6, 45].

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

Методи спостереження в поляризаційному світлі слугують для мікроскопічного дослідження препаратів, що містять оптично анізотропні елементи (або повністю складаються з таких елементів). Метод люмінесцентної мікроскопії широко використовується в усіх галузях 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 при спостереженні методом світлого поля. Метод заснований на тому, що навіть при дуже малих відмінностях у показниках заломлення різних елементів препарату світлова хвиля, що проходить через них, зазнає різних змін за фазою. 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 мікрооб'єктами. Це відкриває широкі можливості для кількісних досліджень – на підставі таких вимірювань можуть бути розраховані: загальна маса і концентрація сухої речовини в мікрооб'єкті, показник заломлення і розміри об'єкта.

Метод спостереження у відбитому світлі поділяється на метод світлового та темного поля. Метод світлового поля у відбитому світлі застосовується для спостереження непрозорих об'єктів, що відбивають світло, наприклад, шліфів металів. При спостереженні за методом темного поля у відбитому світлі непрозорі препарати (наприклад, шліфи металів) осві-

тлюють зверху – через спеціальну кільцеву систему, розташовану навколо об'єктива.

Метод спостереження у прохідному світлі можна розділити на такі групи: метод світлового та темного поля, похилого освітлення та метод ультрамікроскопії. Метод світлового поля у прохідному світлі застосовується при дослідженні прозорих препаратів з включеннями в них абсорбувальних (таких, що поглинають світло) часток і деталей. Метод може бути корисний і при спостереженні об'єктів, що не абсорбують, але лише в тому випадку, коли вони розсіюють пучок настільки сильно, що значна частина його не потрапляє в об'єктив. Метод похилого освітлення є різновидом попереднього, відрізняючись тим, що світло на об'єкт направляють під великим кутом до напрямку спостереження. В низці випадків це дозволяє виявити «рельєфність» об'єкта за рахунок утворення тіней. Метод темного поля у прохідному світлі застосовується для отримання зображень прозорих об'єктів, що не абсорбують, невидимих при освітленні за методом світлового поля. При цьому методі за виглядом зображення не можна визначити, прозорі частки чи непрозорі, більший чи менший показник заломлення вони мають у порівнянні з навколишнім середовищем. Метод ультрамікроскопії дає можливість виявити надзвичайно дрібні частинки, розміри яких лежать далеко за межами роздільної здатності найбільш сильних мікроскопів, але при цьому неможливо визначити форму і точні розміри таких часток [46].

КВЗ за направленістю світлового потоку бувають прямі та інвертовані. Інвертовані відрізняються тим, що об'єктив в них розташовується під спостережуваним предметом, а конденсор – зверху. КВЗ 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 систем.

За способом представлення даних КВЗ можна поділити на засоби відображення, реєстрації та порівняння. Системи відображення не мають можливості запису та подальшої обробки даних, що передбачено в реєструвальних системах. Системи порівняння мають бази да-

них, які забезпечують зберігання та швидке порівняння отриманих даних з існуючими.

За довжиною хвилі КВЗ можуть бути: рентгенівські, інфрачервоні, ультрафіолетові та лазерні. Лазерні системи поділяються на: 1D транслазери, 1D лазери Фуко, 2D лазери Фуко, 3D фотограметрію та 3D проекцію смуг. 1D транслазери 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 КВЗ. В засобах 3D проекції смуг точність проекції впливає на результат вимірювання. Засоби 3D фотограметрії усувають 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 КВЗ поділяються на дві групи – ручного та автоматичного. Особливістю автоматичного засобу є відсутність людського фактора при оцінюванні ступеня різкості зображення. Реалізація систем автофокусування дає можливість виділити два її типи: активну та пасивну. 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. Таким системам характерна висока швидкість реєстрації при русі об'єктів, проте є необхідність фізичного юстування та програмного налаштування. 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 [47] запропоновано два види контрастного автофокусування: метод мінімізації меж та метод максимізації частотно-контрастної характеристики. Метод мінімізації меж забезпечується використанням фільтрів, що виділяють межі об'єктів. Автори зазначають, що оператор Собела точніше визначає межі та є швидкодієвим. 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, тому, відповідно, і високі вимоги до фокусування.

За фізичним принципом вимірювання виділяють дві групи КВЗ: 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 КВЗ є нерухомим.

За способом взаємодії КВЗ 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, пов'язану з деформацією щупа під дією вимірювального тиску [5]. При безконтактних вимірюваннях використовують мікроскопи. Таким системам властивий 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 [5]. Найбільш оптимальними на сьогодні є КВЗ, 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 [1, 5].

1.3 Вибір критерію оцінювання ефективності засобу контролю геометричних розмірів об'єктів

Ефективність пристрою є комплексним показником і проявляється в процесі використання пристрою за функціональним призначенням. Це можна проілюструвати у вигляді критерію «ефективність–вартість» [78]:

$$K_e = (K_k, K_z),$$

де K_k – показник, який характеризує якість засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми; K_z – показник, що характеризує інтегровані витрати при реалізації засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

Задача оптимізації в загальному вигляді полягає в тому, щоб знайти засіб S серед множини допустимих варіантів S_{dop} , який має найбільше значення K_e . При цьому правило оптимальності

$$K_{e_{opt}} = \inf_{S \in S_{dop}} K_e.$$

Для розв'язання такої задачі необхідно багатокритеріальну задачу звести до однокритеріальної. В загальному випадку показники K_k і K_z залежать від способу вимірювання та принципу реалізації засобу вимірювання. Для цього випадку показники критерію оптимальності засобу, що розробляється, можна описати у вигляді

$$K_e = \|M_i, G_i, Y_i\|,$$

де M_i – показник якості вимірювача при реалізації i -го варіанта; G_i – фінансові витрати на реалізацію i -го варіанта; Y_i – затрати часу при реалізації i -го варіанта вимірювача конкретним способом.

На основі [79, 80] запишемо критерій ефективності у вигляді функціональної залежності вигляду:

$$K_e(x, a) = x + \varepsilon + e^{-ax},$$

де $x = \delta_{дон} / \delta$; ε – вірогідність контролю; a – коефіцієнт, що враховує фінансові затрати, в даному випадку вартість; δ – похибка вимірювання; $\delta_{дон}$ – допустима похибка вимірювання.

Критерій ефективності показує, що ефективність засобу зростає при збільшенні величини критерію ефективності. Тобто, якщо обирати для аналізу засоби контролю, що мають близький діапазон вимірювань, більш ефективним буде засіб з меншими ціною та відносною похибкою [80].

Проте критерій ефективності не є достатнім у випадку потокового контролю. В умовах крупно- або середньосерійного виробництва одним із важливих критеріїв є швидкодія засобу. З інформаційної точки зору швидкодію засобу контролю доцільно оцінювати за допомогою кількості інформації, що її отримує засіб за певний проміжок часу. Інформаційну швидкодію можна визначити як відношення кількості інформації, яку обробить засіб, до кількості інформації, яка подається йому за одиницю часу [81].

$$K_i = \frac{I_p}{I_n},$$

де I_p – кількість вимірюваної інформації, яку обробить засіб; I_n – кількість інформації, що її отримує засіб протягом експерименту.

Тоді сумарний коефіцієнт ефективності можна записати як

$$K_{\Sigma e} = K_e(x, a) + K_i.$$

Порівняльну характеристику засобів контролю за згаданими вище критеріями наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика засобів контролю

Засіб контролю Параметри	Універсальний вимірювальний мікроскоп УВМ-21	KBM Coord3 EOS (Італія)	Великий інструментальний мікроскоп	Великий проектор ВП-2	Потенційний засіб
a , тис. грн	20	1000	20	15	20
Діапазон, мм	0–200	0,1–495	0–150	0–150	0,01–50
δ , мкм	± 3	± 2	± 3	$\pm 2,5$	± 1
ε	0,95	0,96	0,95	0,96	0,98
$K_{\Sigma e}$	2,15	2,78	2,12	2,32	3,59

Аналіз показав, що зменшення похибки вимірювання та підвищення вірогідності контролю суттєво впливають на ефективність вимірювальних перетворювачів. При цьому для контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми не менш важливим є діапазон вимірювань.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу встановлено необхідність розробки засобу, який би охоплював весь діапазон вимірювань геометричних розмірів малогабаритних об'єктів, маючи при цьому високу точність вимірювань та вірогідність контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кристоф Р. Технология мультисенсорных координатных измерений / Р. Кристоф, Х. Нейманн, Изд.: Die Bibliothek der Technik , Германия, 2004. – 148 с.
2. Ермолов И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества : учеб. пособие для инженерно-техн. спец. вузов/ И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. – М. : Высшая школа, 2002. – 368 с.
3. Палей М. А. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. РД2 БВ00-9-1990, - М.: Изд-во стандартов. – 1990. – 241 с.
4. Глухов В. И. Метрологическое обеспечение качества по точности геометрических величин : учеб. пособие / В. И. Глухов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 140 с.
5. Зуйков А. А. Повышение точности координатных измерений геометрических параметров объектов в компьютерной микроскопии с дополнительным телом в зоне измерения : автореферат дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (по машиностроению и машиноведению)» / Зуйков Андрей Андреевич; ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – Москва, 2013. – 22с.
6. 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.
7. Білінський Й. Й. Класифікація оптико-електронних координатно-вимірювальних систем / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, М. Й. Юкиш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 3. – С. 15–20.
8. Білінський Й. Й. Метод виділення контуру на слабкоконтрастних розмитих зображеннях / Й. Й. Білінський, І. В. Микулка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 164–169.
9. Микулка І. В. Метод виділення контуру на слабкоконтрастних розмитих зображеннях та детектор на його основі / І. В. Микулка, Й. Й. Білінський // Всеукраїнський конкурс наукових студентських

робіт у галузі «Електроніка» (II етап) : тези доповідей. – Херсон : ХНТУ, 2012. – С. 57–58.

10. Білинський Й. Й. Спосіб виділення контурів об'єктів зображення / Й. Й. Білинський, І. В. Микулка // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : тези доповідей XI міжнар. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 92.

11. Пат. № 70764 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. Спосіб виділення контуру слабоконтрастних зображень / Білинський Й. Й., Микулка І. В., Ратушний П. М., Сухоцький О. М., заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201114326 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

12. Пат. № 71951 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. Спосіб виділення контуру слабоконтрастних розмитих зображень / Й. Й. Білинський, П. М. Ратушний, І. В. Микулка, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201203217 ; заявл. 19.03.2012 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

13. Пат. № 83351 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. Спосіб виділення контуру зображень / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька, С. В. Юкиш, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201300299 ; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

14. Білинський Й. Й. Детектор виділення контуру розфокусованих зображень [Електронне видання] / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, І. В. Микулка // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2012. – № 3. – Режим доступу до видання: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2338/2612>.

15. Пат. № 73138 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/20. Пристрій виділення контуру слабоконтрастних розмитих зображень / Білинський Й. Й., Микулка І. В., заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201203188 ; заявл. 19.03.2012 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17.

16. Білинський Й. Й. Метод знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманих тактильно-оптичним сенсором / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька, С. В. Юкиш // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2014. – № 3. – С. 94–98.

17. Bilynskyy J. The Method of Sub-pixel Accuracy for Coordinate Measuring Systems / J. Bilynskyy, I. Syhotska // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science «TCSET'2014»: materials of Proceedings of the International Conference. – Lviv : Lviv Polytechnic, 2014, P. 640.

18. Білінський Й. Й. Визначення геометричних параметрів мікрооб'єктів з субпіксельною точністю / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Інформаційно-комп'ютерні технології 2014 : тези VII міжнар. наук.-техн. конф. – Житомир : ЖДТУ, 2014. – С. 3–4.

19. Білінський Й. Й. Визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми з субпіксельною точністю / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : тези доповіді I всеукр. наук.-техн. конф. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – С. 3–4.

20. Пат. № 70758 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/36. Спосіб знаходження субпіксельних координат контурних точок об'єктів на слабкоконтрастних розмитих зображеннях / Й. Й. Білінський, І. В. Микулка, П. М. Ратушний, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201114318 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

21. Пат. № 93615 Україна, МПК (2006.01) G06K 9/36. Спосіб знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманого тактильно-оптичним сенсором / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201404345 ; заявл. 22.04.2014 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.

22. Білінський Й. Й. Засіб визначення кутових параметрів наконечників / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, С. В. Юкиш // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 3/1(11). – С. 35–38.

23. Білінський Й. Й. Програмна реалізація методу визначення кутових параметрів наконечників / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013» : матеріали 9-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 307.

24. Білінський Й. Й. Алгоритм визначення та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом субпіксельної обробки їх зображень / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Методи та прилади контролю якості. – 2015. – № 1(34). – С. 71–78.

25. Білінський Й. Й. Контроль геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом використання субпіксельного вимірювання / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи «МТН-2015»: матер. міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=10&mat=86>.

26. Білінський Й. Й. Розробка засобу контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, А. Б. Гуральник // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 51–55.

27. Білінський Й. Й. Оптико-електронна координатно-вимірювана система з використанням щупа / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-13-2014) : матер. XIII міжнар. наук.-техн. конференції. – Одеса – Хмельницький : ХНУ, 2014. – С. 111.

28. Білінський Й. Й. Засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2015) : тези доповіді 3-ї міжнар. наук. конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – С. 67.

29. Білінський Й. Й. Координатно-вимірювальна система геометричних параметрів мікрооб'єктів складної форми / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька // Контроль і управління в складних системах «КУСС-2014» : тези доповіді XII міжнар. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 62.

30. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / Клюев В. В. [и др.]. – М. : Машиностроение, 2005. – 657 с.

31. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 1980-01-07. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.

32. Глухов В. И. Метрологическое обеспечение качества по точности геометрических величин : учеб. пособие / В. И. Глухов. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 140 с.

33. Малышева-Стройкова А. Н. Оптоэлектронные устройства дистанционного контроля геометрических параметров профильных объектов : дис. канд. техн. наук : 05.13.05 / Малышева-Стройкова А. Н. – Самара, 2014. – 188с.

34. ГОСТ 22908-78. Алмазы в оправках. Технические условия. – Введ. 01.01.1979. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 10с.

35. ГОСТ 607-80 Карандаши алмазные для правки шлифовальных кругов. Технические условия. – Взамен ГОСТ 607-75. Введ. 30.06.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 14 с.

36. ГОСТ 17564-85. Иглы алмазные. Технические условия. Взамен ГОСТ 17564-72. Введ. 30.06.1986. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.

37. ГОСТ 25347-82. Система допусков на линейные размеры. Часть 2. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов. Введ. 01.07.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.

38. Дудніков А. А. Основи стандартизації. Допуски. Посадки і технічні вимірювання : підручник/ А. А. Дудніков. – К. : Центр навчальної літератури, 2006. – 352 с.

39. Палей М. А. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. РД2 БВ00-9-1990, - М.: Изд-во стандартов. – 1990. – 241 с.

40. Абакумов И. И. Компенсация погрешностей оптико-электронной системы автоматизированного контроля геометрических параметров объектов : дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Абакумов И. И. – Санкт-Петербург, 2014. – 132 с.

41. Білінський Й. Й. Методи обробки зображення в комп'ютеризованих оптико-електронних системах : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 272 с.

42. Білінський Й. Й. Методи та система оброблення слабконтрастних зображень для оцінювання показників мікрокапілярів кінцівок людини : монографія / Й. Й. Білінський, П. М. Ратушний. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 122 с.

43. 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.
44. Линейные измерения в субмикронном диапазоне / О. В. Богданкевич, В. В. Календин, Ю. А. Кудеяров, Л. Н. Невзорова // Метрологическая служба в СССР. – 1987. – Вып. 3. – С. 31–35.
45. Дюков В. Г. Растровая оптическая микроскопия / В. Г. Дюков, Ю. А. Кудеяров. – М. : Наука, 1992. – 208 с.
46. Аппельт Г. Введение в методы микроскопического исследования / Г. Аппельт. – М.: Медгиз, 1959. – 425 с.
47. 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.
48. Hamashima N. Optical measurements of half micron critical dimensions / N. Hamashima, K. Kato, T. Ishizeki. – *Proc. SPIE 0921, Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control II*; doi:10.1117/12.968356 P.92-99.
49. Кузин А. Ю. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне / А. Ю. Кузин, В. Н. Марютин, В. В. Календин. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://www.microsystems.ru>.
50. Deriche R. Using Canny's criteria to Derive a Recursively implemented optimal edge detection / R. Deriche// *International Journal of Computer Vision*. –1998. – 7(12) . – P. 5–12.
51. Сойфер В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 1. Математические модели / В. А. Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 2. – С. 118–124.
52. Сойфер В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Математические модели / В. А. Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3. – С. 110–121.
53. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений / В. А. Сойфер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.

54. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

55. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Часть 2 / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

56. Форсайт Д. Компьютерное зрение / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2003. – 827с.

57. Прэтт У. Цифровая обработка изображений в двух книгах / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – 468 с.

58. Білінський Й. Й. Детектор крайового детектування на основі низькочастотної фільтрації / Й. Й. Білінський, П. М. Ратушний, С. В. Юкиш // Вісник Хмельницького національного університету. – № 1. – 2009. – С. 230–233.

59. Пат. №25485, МПК (2006.01) G 06 K 9/36. Спосіб визначення краю примежової кривої зображень / Й. Й. Білінський, П. М. Ратушний, А. О. Мельничук ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 02.04.2007 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12. – 4 с.

60. Пат. №32886, МПК (2006.01) G 01 K 9/64. Спосіб ізотропно-го виділення контуру зображення / Й. Й. Білінський, С. В. Юкиш, П. М. Ратушний ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; завл. 03.12.2007; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

61. Білінський Й. Й. Класифікація методів крайового детектування зображень / Й. Й. Білінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1. – С. 161–169.

62. Система управления процессом распознавания и определения геометрических размеров объектов для гибких производственных систем / В. П. Шевчук, Д. Б. Мелехов, Р. Н. Титов, А. Г. Саньков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 5. – С. 54–57.

63. Русин Б. П. Системи синтезу, обробки та розпізнавання складно-структурованих зображень / Б. П. Русин. – Л. : Вертикаль, 1997. – 264 с.

64. Robinson G. S. Edge detection by compass gradient masks, Comput / G. S Robinson // Vision Graphics Image Process. – 1977. – № 6. – P. 492–501.

65. Field D. J. Relations between the Statistics and Natural Images and the Responses Properties of Cortical Cells / D. J. Field // J. Optical Soc. Am. – 1987. – V. A, № 4. – P. 2379–2394.

66. Білінський Й. Й. Методи та система оброблення слабкоконтрастних зображень для оцінювання показників мікрокапілярів кінцівок людини / Й. Й. Білінський, П. М. Ратушний : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 122 с.

67. Шклярський В. І. Сканувальна телевізійна оптична мікроскопія: теорія та практика : монографія / В. І. Шклярський. – Львів : В-во Львівської політехніки, 2010. – 456 с.

68. Braggins D. Achieving subpixel precision / D. Braggins // Sensor Review. – 1996. – V. 10, № 4. – P. 174–177.

69. Пат. 4628469 (США). Method and Apparatus for Locating of Reference Pulse in a Measurement System / S.J.White. – 6 p.

70. Фурман Я. А. Обработка контуров изображений с протяжёнными прямолинейными границами / Я. А. Фурман, И. Л. Егошина // Автометрия. – 1999. – № 6. – С. 93–104.

71. Deriche R. Using Canny's criteria to Derive a Recursively implemented optimal edge detection / R. Deriche // Int. J. Comput. Vis. – 1998. – № 7(12). – P. 5–12.

72. Users M. B-spline signal processing Part II-Efficient design and applicatsons / M. Users, M. Aldroubi, M. Eden // IEEE Trans. Signal Process. – 1993. – № 41(2). – P. 834–848.

73. Nair D. On comparing the performance of object recognition systems / D. Nair, A. Mitiche, J. Aggarwal // International Conference on Image Processing. doi: 10.1109/ICIP.1995.537558, 1995. – P. 254–256.

74. F. Blais and Rioux. Real-Time Numerical Peak Processing / F. Blais and Rioux// Signal Processing. – 1986. – №11. – P. 145–155.

75. Truchetet F. Subpixel Edge Detection for Dimention Control by Artificial Vision / F. Truchetet, F. Nicolier, O. Laligant // Jornal of Electronics Imaging. – 2001. – № 10(1). – P. 234–239.

76. Zhou Y. T. Edge detection and linear feature extraction using a 2d random field model / Y. T. Zhou, V. Venkateshwar, R. Chellappa // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – V. 11. – P. 84–95.

77. Пат. 6 690 842 (США). Apparatus and Method for Detection and Sub-pixel Location Edges in a Digital Image / W. Silver, A. Garacani, Aaron Wallack. – 4p.

78. Лазарев И. В. Метод синтеза структур адаптивных измерителей временных параметров импульсов сложной формы по критерию «Эффективность – интегрированные затраты» в условиях параметрической априорной неопределенности/ И. В. Лазарев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2010. – № 1. – С. 144–148.

79. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчого. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

80. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев [и др]. – М. : Машиностроение, 2005. – 657 с.

81. Шеннон К. Математическая теория связи / К. Шеннон. – М. : Изд. иностр. лит., 1963. – С. 243–414.

82. Нестеров В. Н. Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах / В. Н. Нестеров, В. М. Мухин, А. В. Мещанов. – Самара : СНЦ РАН, 2013. – 224 с.

83. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем / Г. Г. Слюсарев. – Л. : Машиностроение, 1975. – 639 с.

84. Русинов М. М. Техническая оптика / М. М. Русинов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 488 с.

85. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов /М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1977. – 600 с.

86. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов / В. Н. Чуриловский. – М.–Л. : Машиностроение, 1966. – 564 с.

87. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения / Ю. Г. Якушенков. – М. : Советское радио, 1977. – 208 с.

88. Карасик В. Е. Лазерные системы видения / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М. : МВТУ им. Баумана, 2001. – 352 с.

89. Цифровое преобразование изображений / Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцветов. – М. : Горячая линия–Телеком, 2003. – 228 с.

90. Абламейко С. В. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине / С. В. Абламейко, А. М. Недзьведь. – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 156 с.

91. Tsai R. Y. A versatile camera calibration technique for highaccuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [Text] / R. Y. Tsai // IEEE Int. Journal Robotics and Automation. – 1987. – V. 3(4). – P. 323–344.
92. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. – 1979. – № 9. – P. 62–66.
93. Дегтярева А. Преобразование Хафа (Hough transform) / А. Дегтярева, В. Вежневек // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2003. – Выпуск №1(2). – Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/36>
94. Абду И. Э. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением. / И. Э. Абду, У. К Прэнт // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67, № 5. – С. 59–70.
95. Triggs B. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis / B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley, A. Fitzgibbon // ICCV 99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms. Springer-Verlag. – 1999. – P. 298–372.
96. Решение задачи автокалибровки камеры с использованием метода согласованной идентификации. – Режим доступа: <http://www.computeroptics.smr.ru/КО/PDF/КО36-4/36418.pdf>.
97. Технические характеристики цифровых фотоаппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://fotografiya.info/?p=1104>.
98. Веб-камера Gemix. – Режим доступа: <http://www.gemix.ua/index.php?page=catalogCard&categoryID=38&version=1&itemID=1878>.
99. Ноутбук Lenovo IdeaPad S10-3-Black-1. – Режим доступа: http://zoom.cnews.ru/goods_card/character/189440/lenovo-ideapad-s10-3.
100. ISO 10360 Acceptance and re-verification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMMs). – 2010. – 16 p.
101. ISO 10360-2 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and re-verification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. – 2010. – 16 p.
102. Галиулин Р. М. Сравнение результатов контроля заготовки лопатки на системе «ОПТЭЛ-КЛ» и КИМ «SCIROCCO» [Электронный ресурс] / Р. М. Галиулин // ООО Научно-Внедренческое предпри-

ятие «ОТПЭЛ». – Режим доступа: http://nvp-optel.ru/downloads/Sravnitel'naya__otsenka.pdf (дата обращения: 12.09.2013)

103.. Орнатский П. П. Автоматизированные измерения и приборы / Орнатский П. П. – К. : Вища шк., 1986. – 504 с.

104. Муравський Л. І. Інструментальна похибка вимірювання геометричних параметрів тінювих зображень в оптико-цифровій системі / Л. І. Муравський // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2001. – Вип. 6. – С. 202–207.

105. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – К. : Высшая школа, 1983. – 455 с.

106. Image analysis of corrosion pit damage / S. Journaux, C. Guillaumin, P. Gouton [et al.] // Opt. Eng. – 1999. – V. 38, № 8. – P. 1312–1318.

107. Evaluation of errors in automatic image analysis determination of sessile drop shapes / R. S. Bachevsky, Y. V. Naidich, N. F. Grigorenko, [et al.] // Proc. Int. Conf. «High Temperature Capillarity». – Bratislava, 1995. – P. 254–258.

108. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

109. Муравський Л. І. Вплив шумів оптико-цифрової системи на точність вимірювання геометричних параметрів бінарних тінювих зображень / Л. І. Муравський // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2000. – Вип. 35. – С. 113–118.

110. Микроскоп стереоскопический МБС-10. Руководство по эксплуатации и паспорт АЦЗ.850.005 РЭ. – Режим доступа: <http://www.laboratorium.dp.ua/item/14/manual>.

111. Боровицкий В. Н. Оптимизация цифрового фильтра для оценивания фокусировки изображений в цифровой оптической микроскопии / В. Н. Боровицкий // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 2. – С. 32–40.

112. Гвоздева Н. П. Физическая оптика : учебник для учащихся высших и средних специальных учебных заведений / Н. П. Гвоздева, В. И. Кульянова, Т. М. Леушина ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1991. – 304 с.

113.Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

114.Егоров А. Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров, А. В. Коваль ; под. ред. В. Г. Воронова. – Х. : Вища школа, 1986. – 240 с.

115.Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.

116.Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.

117.Володарский Е. Т. Уменьшение влияния погрешности измерительного канала на достоверность контроля / Е. Т. Володарский, И. П. Москаленко // Измерения – 98 : сб. труд. МНТК. – К. – 1998. – С. 266–267.

118. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

119.Фрумкин В. Д. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.

120. Венцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1991. – 384 с.

121. ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные: [правомочен от 1990] – М. : И-во стандартов, 1981. – 28 с.

122. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры длины концевые плоскопараллельные. Общие требования к методикам поверки. МИ 1604-87. – Утв. НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Взамен ГОСТ 8.166-75, Введ 01.07 1988. – 6 с.

Наукове видання

**Білінський Йосип Йосипович
Сухоцька Ірина Володимирівна**

**ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНИЙ МЕТОД ТА ЗАСІБ
КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ
МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до друку 29.08.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,01.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2017-22

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.