

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

СУХОЦЬКА ІРИНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 681.3.08

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

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та
визначення складу речовин

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник: Білинський Йосип Йосипович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	14
1.1 Аналіз особливостей контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	14
1.2 Класифікація методів та оптичних засобів контролю геометричних розмірів об'єктів	21
1.3 Класифікація методів виділення контурів.....	28
1.4 Методи субпіксельної локалізації краю зображення об'єкта.....	32
1.5 Вибір критерію оцінювання ефективності засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	39
Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	46
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	46
2.2 Вдосконалення переривчасто-контактного методу контролю малогабаритних об'єктів складної форми.....	49
2.3 Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях	53

2.4 Підвищення чутливості вимірювання та вірогідності контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми на основі удосконалення методу субпіксельної локалізації краю зображення об'єкта.....58

2.5 Результати моделювання переривчасто-контактного методу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми67

Висновки до розділу.2.....70

РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....72

3.1 Розробка переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми72

3.2 Виведення функції перетворення переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....74

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.....79

3.3.1 Розробка методу та детектора виділення контурів об'єктів на розфокусованих слабкоконтрастних розмитих зображеннях та їх дослідження.....79

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.....89

3.4 Апаратно-програмна реалізація знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта.....101

Висновки до розділу 3.....107

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРИВЧАСТО-КОНТАКТНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....109

4.1 Рекомендації щодо інженерного проектування засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	109
4.2 Алгоритм контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	113
4.3 Аналіз похибок переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	116
4.2.1 Оцінювання похибки щупа.....	116
4.2.2 Оцінювання субпіксельної дискретизації в просторі.....	118
4.2.3 Оцінювання похибки квантування.....	120
4.2.4 Оцінювання похибки, викликаної шумами.....	121
4.4 Оцінювання вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	124
4.5 Експериментальні дослідження переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	127
Висновки до розділу 4.....	137
ВИСНОВКИ.....	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
ДОДАТКИ.....	156
Додаток А Огляд процесу формування різкого зображення об'єкта.....	157
Додаток Б Структурна схема блока аналізу гістограм.....	160
Додаток В Алгоритм роботи методу Оцу. Блок-схема алгоритму.....	161
Додаток Г Лістинги програмної реалізації методу знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта.....	163
Додаток Д Результати дослідження вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.....	203
Додаток Ж Експериментальні дані дослідження повторюваності результату.....	208
Додаток К Акти впровадження.....	209

ВСТУП

Актуальність теми. У зв'язку з стрімким 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 та мобільні засоби вимірювального контролю геометричних параметрів. Проте їх застосування для контролю малогабаритних об'єктів складної форми призводить до 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 рядом 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'єктів (нечіткі фаски, довільні скруглення або пошкодження); похибки візування від дифракції світла на краях вимірюваного об'єкта (досягають значень до 0,02 мм).

Зазвичай для автоматизації контролю в безконтактних КВМ використовують матричні фотоприймальні пристрої, на якість візуалізації яких впливає освітленість та колірність 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.

Теоретичним підґрунтям для досліджень, які були виконані в дисертаційній роботі, стали роботи вчених України та країн СНД – Кузін А. Ю., Бінінг Г., Маслова Н. С., Бухараєв А. А., Богданевич О. В., Шклярський В. І., Квасніков В. П., Кондратов В. Т., Романюк О. Н., Кожем'яко В. П., Білинський Й. Й., Муравський Л. І. та інші. Серед закордонних науковців найвідомішими є роботи Сойфера В. А., Гонсалеса Р., Форсайта Д., Претта У. та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у Вінницькому національному технічному університеті відповідно до держбюджетної фундаментальної науково-дослідної роботи «Розробка методів підвищення інформативності медико-біологічних зображень» 339-Д-43 та в межах договорів про творчу співдружність № 43/4 «Розробка програмного засобу визначення геометричних параметрів наконечників (різців)» (2012 р., номер державної реєстрації 0112U003125) та № 43/6 «Розробка методу визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми» (2015 р., номер державної реєстрації 0115U001290).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є 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.*

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити нижчевказані задачі.

1. Проаналізувати відомі методи та засоби контролю геометричних розмірів, а також існуючі підходи до автоматизованого отримання та оброблення об'єктів на зображеннях.

2. Удосконалити переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

3. Удосконалити функцію перетворення вимірювального перетворювача розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях та отримати математичну модель переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

4. Розробити метод виділення контурів об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації та детектор вимірювального контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

5. Розробити переривчасто-контактний засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми та алгоритм вимірювального контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

6. Отримати аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик засобу контролю та аналітичні залежності для оцінювання вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми та виконати експериментальні дослідження, підтвердити адекватність результатів фізичного та математичного моделювання.

Об'єктом дослідження є процес контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

Предмет дослідження – методи та засоби контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

Методи дослідження. При виконанні поставлених задач використовувались: математичний апарат теорії сигналів і цифрового подання та обробки зображень для побудови методів і детекторів попередньої обробки зображень; методи побудови оптико-електронних засобів для синтезу оптико-електронних компонент і систем; теорії вимірювань і похибок для оцінювання метрологічних характеристик запропонованих методів і засобів; математичне моделювання з використанням сучасних комп'ютерних технологій для підтвердження точності роботи запропонованих методів крайового детектування, виділення контуру; інтерполяційні методи для отримання неперервної примежової кривої; числові методи розв'язування нелінійних рівнянь для знаходження спільної точки примежових кривих деталі та щупа; основи дискретної математики та аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для створення програмного забезпечення запропонованих методів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено метод виділення контурів об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації, в якому, за рахунок дворазового автоматичного визначення порогу бінаризації, забезпечується видалення шумових складових із фону зображення та виділення тонких неперервних контурів об'єктів на зображеннях без розривів та зайвих фрагментів, що дозволило підвищити достовірність вимірювальної інформації і, як наслідок, – вірогідність контролю.

2. Удосконалено функцію вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях, що пов'язує вихідну величину – розмір зображення досліджуваної деталі та вхідну – вимірюваний розмір, в якій, на відміну від існуючих, враховується коефіцієнт масштабування, що дозволило зменшити похибку вимірювання.

3. Отримав подальший розвиток переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, в якому, на відміну від відомих, завдяки введенню в зону вимірювання додаткового тіла, яке виконує роль міри, забезпечується субпіксельна локалізація крайових точок об'єкта на зображенні шляхом отримання координати спільної точки зображення обмежувальних кривих деталі та міри з урахуванням ступеня розмитості, що дало змогу зменшити похибку вимірювання та підвищити вірогідність контролю.

4. Отримала подальший розвиток математична модель переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, яка враховує подвійну фільтрацію зображень, а також значення напруги спільної крайової точки обмежувальних кривих зображення щупа та об'єкта, отриманої в результаті лінійної інтерполяції, що дозволило визначити геометричні розміри з урахуванням субпіксельного зміщення відносно центра пікселя i , як наслідок, підвищити вірогідність контролю на 0,15.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на основі проведених теоретичних досліджень та отриманих наукових результатів:

1. Розроблено переривчасто-контактний засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, який відрізняється від існуючих введенням в зону вимірювань щупа з відомими розмірами, що не прив'язаний до координатної сітки, та використанням субпіксельної локалізації крайових координат, що дозволило підвищити точність та вірогідність вимірювального контролю.

2. Запропоновано алгоритм контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, який враховує особливості вимірювального контролю оптичними засобами малогабаритних об'єктів складної форми як об'єктів досліджень та дозволяє зробити висновок про придатність

деталі, тобто про відповідність її розмірів заданим допускам для конкретного застосування.

3. Розроблено детектор контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, який забезпечує автоматичне визначення контурних ліній з субпіксельною точністю, що дає змогу підвищити точність визначення кутових параметрів.

4. Розроблено програмне забезпечення визначення координат крайових точок зображення об'єкта, яке враховує субпіксельні зміщення відносно центра пікселя по координатних осях X та Y , що дозволяє підвищити точність локалізації і, як наслідок, – вірогідність контролю.

Практичні результати дисертаційного дослідження (переривчасто-контактний метод та засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, а також детектор вимірювального контролю кутових розмірів) впроваджено у ПП «Інструмент-Сервіс» про що свідчить відповідний акт (акт від 21.10.2015 р.), теоретичні та практичні положення роботи впроваджено в навчальний процес у Вінницькому національному технічному університеті для виконання лабораторних робіт та проведення лекційних занять для студентів за напрямом підготовки 6.050801 – «Мікро- та наноелектроніка» (акт від 20.10.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні і практичні результати отримані автором самостійно. У роботах, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: у роботах [6, 7] – аналіз методів та оптико-електронних координатно-вимірювальних засобів; [8-13] – розробка методів виділення контуру розфокусованих зображень; [14, 15] – розробка структурних схем детекторів виділення контуру; [16-21] – розробка методу знаходження координат об'єкта та визначення його геометричних розмірів на зображенні з субпіксельною точністю; [22, 23] – розробка методу та детектору визначення лінійних та кутових параметрів об'єктів; [24, 25] – розробка методу та

алгоритму контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми; [26-28] – розробка математичної моделі засобу контролю та функції вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях; [29] – розробка структурної схеми засобу контролю геометричних розмірів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень були обговорені на: XI Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2012); 9-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013» (м. Севастополь, 2013); XII Proceedings of the International Conference TCSET'2014 «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science», (Lviv-Slavske, 2014); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології, 2014» (Житомир, 2014); Тринадцятій Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса (Затока), 2014); XII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2014); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (Вінниця, 2014); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (Житомир, 2015); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2015).

Публікації. Результати досліджень опубліковані в 24 наукових працях, у тому числі у 8 статтях у наукових журналах, 4 з яких входять в наукометричні бази, 6 патентах України на корисні моделі та 10 тезах і матеріалах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел з 122

найменувань. Обсяг основної частини складає 141 сторінку, загальний обсяг – 210 сторінок. Робота містить 7 таблиць і 77 рисунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кристоф Р. Технология мультисенсорных координатных измерений/ Р. Кристоф, Х. Нейманн, изд. 2, 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/ М. А. Палей, 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. – ISBN 978-5-8149-1385-2
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 слабконтрастних 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 слабоконтрасних розмитих зображеннях та детектор на його основі/ І. В. Микулка, Й. Й. Білинський// Всеукраїнський конкурс наукових студентських робіт у галузі „Електроніка” (II етап): тези доповіді. – 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 Спосіб виділення контуру слабоконтрасних зображень / Білинський Й. Й., Микулка І.В., Ратушний П.М., Сухоцький О.М. //Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. № u201114326; заявл. 05.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл№ 12.

12. Пат. № 71951 Спосіб виділення контуру слабоконтрасних розмитих зображень / Й. Й. Білинський, П.М. Ратушний, І.В. Микулка //Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. № u201203217; заявл. 19.03.2012; опубл. 25.07.2012; Бюл№ 14.

13. Пат. № 83351 Спосіб виділення контуру зображень / Й. Й. Білинський, І.В. Сухоцька, С. В. Юкиш // Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. № 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 Пристрій виділення контуру слабоконтрасних розмитих зображень / Білинський Й. Й., Микулка І.В. //Україна, МПК (2006.01) G06K 9/20. № 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. – ISSN 1995-0519.

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

19. Білинський Й. Й. Визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми з субпіксельною точністю/ Й. Й. Білинський, 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 Спосіб знаходження субпіксельних координат контурних точок об'єктів на слабоконтрастних розмитих зображеннях/ Й. Й. Білинський, І. В. Микулка, П. М. Ратушний // Україна, МПК (2006.01) G06K 9/36. № u201114318; заявл. 05.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл№ 12.

21. Пат. № 93615 Спосіб знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманого тактильно-оптичним сенсором / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька // Україна, МПК (2006.01) G06K 9/36. № u201404345; заявл. 22.04.2014; опубл. 10.10.2014; Бюл№19.

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

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

24. Білинський Й. Й. Алгоритм визначення та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом субпіксельної обробки їх зображень/ Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька // Методи та прилади контролю якості. – 2015. – № 1(34). – С. 71–78. – ISSN 1993-9981.

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

27. Білинський Й.Й. Оптико-електронна координатно-вимірювана система з використанням щупа / Й. Й. Білинський, 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. Білинський Й. Й. Засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми/ Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2015): тези доповіді 3-тньої міжнар. наук. Конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – С.67.

29. Білинський Й. Й. Координатно-вимірювальна система геометричних параметрів мікрооб'єктів складної форми/ Й. Й. Білинський, 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 : Изд-во ОмГТУ, 2012. –140 с. – ISBN 978-5-8149-1385-2

33. Малышева-Стройкова А. Н. Оптоэлектронные устройства дистанционного контроля геометрических параметров профильных объектов: дис. на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.13.05; – захищена 2014 р. – 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. – 14с.

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

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. – 9с.

38. Дудніков А. А. Основи стандартизації. допуски. посадки і технічні вимірювання: підручник/ А. А. Дудніков. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 352 с. – ISBN 966-364-303-X

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

40. Абакумов И. И. Компенсация погрешностей оптико-электронной системы автоматизированного контроля геометрических параметров объектов: дис. на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.11.13; – защищена 2014 р. – 132с.

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

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

43. Кондратов В. Т. Визуализация в метрологии: урони, напрвления, 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. – Вып. 3. – 1987. – 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 – 1959. – 425с.

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. Namashima N. Optical measurements of half micron critical dimentions / N. Namashima, K. Kato, T. Ishizeki – Ibid 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, Int. J. Comput. Vis. . –1998. – 7(12) . – Р. 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. –1072с.

56. Форсайт Д. Компьютерное зрение/ Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Издательский дом «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. 02.04.2007р.; опубл. 10.08.2007р., Бюл. №12. – 4с.

60. Пат. №32886, МПК (2006.01) G 01 K 9/64. Спосіб ізотропного виділення контуру зображення / Й.Й. Білінський, С.В. Юкиш, П.М. Ратушний; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет; завл. 03.12.2007р.; опубл. 10.06.2008р., 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 управління 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., vol. A, no. 4, 1987 – P. 2379-2394.

66. Білінський Й. Й. Методи та система оброблення слабконтрастних 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.—В-во Львівської політехніки. – 2010. – 456 с.

68. Braggins. D. Achieving subpixel precision / D. Braggins // Sensor Review. – 1996. – Vol. 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 / Users M., 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, 1995. – P. 254–256.

74. F. Blais and Rioux. Real-Time Numerical Peak Processing/ F. Blais and Rioux. – 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, and R. Chellappa // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989 – vol. 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. Осадного. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

80. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник/ В. В. Ключев [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. – 156с. – ISBN 985-6744-09-1.
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. — Vol. 3(4). — P. 323—344.
92. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms/ N.

Otsu // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. - 9. – 1979. – 62–66.

93. Дегтярева А. Преобразование Хафа (Hough transform)/ А. Дегтярева, В. Вежневц// Компьютерная графика и мультимедиа. – Выпуск №1(2), 2003. – 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 Прэрт. // ТИИЭР. – 1979. – Т.67, № 5. – С.59–70.

95. Triggs B. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis [Text] / 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/KO/PDF/KO36-4/36418.pdf>

97. Технические характеристики цифровых фотоаппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85_%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2

98. Веб-камера Gemix. – Режим доступа: http://rozetka.com.ua/gemixa20_hd_black/p269623/

99. Ноутбук Lenovo IdeaPad S10-3-Black-1 . – Режим доступа: <http://rozetka.com.ua/41466/p41466/>

100. ISO 10360 Acceptance and re-verification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMMs). – 2010. – 16p.

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. – 16p.

102. Галиулин Р. М. Сравнение результатов контроля заготовки лопатки на системе «ОПТЭЛ-КЛ» и КИМ " SCIROCCO» [Электронный ресурс] / Р. М. Галиулин // ООО Научно-Внедренческое предприятие «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. – 455с.

106. Image analysis of corrosion pit damage / S. Journaux, C. Guillaumin, P. Gouton et al.] // Opt. Eng. – 1999. – Vol. 38, N 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, V. A. Dostoiny, L. I. Muravsky, A. I. Stefansky // Proc. Int. Conf. "High Temperature Capillarity" N. Eustathopoulos Ed. – 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>

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. – ISBN 5-217-01264-1.

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. Володарський Є. Т. 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 // Сб. труд. МНТК «Измерения – 98». – 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 , 1987. – 6 с.

