

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Білінський Йосип Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електроніки та наносистем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Порєв Володимир Андрійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри наукових, аналітичних та
екологічних приладів і систем

доктор технічних наук, професор
Шклярський Володимир Іванович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри радіоелектронних пристроїв
та систем.

Захист відбудеться «09» грудня 2016 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «07» листопада 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

К. В. Огородник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку зі стрімким зростанням виробництва високоточних малогабаритних деталей зростає потреба і в засобах вимірювального контролю геометричних розмірів, 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 контактної, так і безконтактної типу. КВМ контактної типу, як правило, використовують щуп, який «прив'язаний» до координатної сітки, що в умовах потокового вимірювального контролю вимагає великих витрат часу. При цьому безперервне дослідження геометрії деталі супроводжується рядом недоліків, які викликають похибки вимірювання, а саме: нелінійність, вібрація та деформація під дією прикладеного зусилля. 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. Крім цього, КВМ мають велику вартість та є економічно недоцільними 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.

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 дисертаційної 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 нижчезказані 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 полягає в отриманні нижчеподаних 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 – виміряний 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 субпікселна локалізація крайових точок об'єкта на зображенні шляхом отримання координати спільної точки зображення примежових 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 примежових кривих зображення щупа та об'єкта, отриманої в результаті лінійної інтерполяції, що дозволило визначити геометричні розміри з урахуванням субпікселного зміщення відносно центра піксела і, як наслідок, підвищити вірогідність контролю на 0,15.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

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 субпікселної 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 положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у спів-авторстві, дисертанту належить: [1, 6] – аналіз методів та оптико-електронних координатно-вимірювальних засобів; [2, 9, 10, 20, 21, 23] – розробка методів виділення контуру розфокусованих зображень; [3, 22] – розробка структурних схем детекторів виділення контуру; [5, 12, 13, 17, 19, 24] – розробка методу знаходження координат об'єкта та визначення його геометричних розмірів на зображенні з субпіксельною точністю; [4, 11] – розробка методу та детектора визначення лінійних та кутових параметрів об'єктів; [7, 16] – розробка методу та алгоритму контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми; [8, 14, 18] – розробка математичної моделі засобу контролю та функції вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях; [15] – 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 RT-2013» (м. Севастополь, 2013); XII Proceedings of the International Conference TCSET'2014 «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science», (м. Львів, 2014); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології, 2014» (м. 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» (м. Вінниця, 2014); Всеукраїнській науково-технічній конференції

«Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (м. Житомир, 2015); 3-ій 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 корисну модель та 10 тезах і матеріалах доповідей на конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел зі 122 найменувань. Обсяг основної частини складає 141 сторінку, загальний обсяг – 210 сторінок. Робота містить 7 таблиць і 77 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету роботи та задачі досліджень. Дана характеристика наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

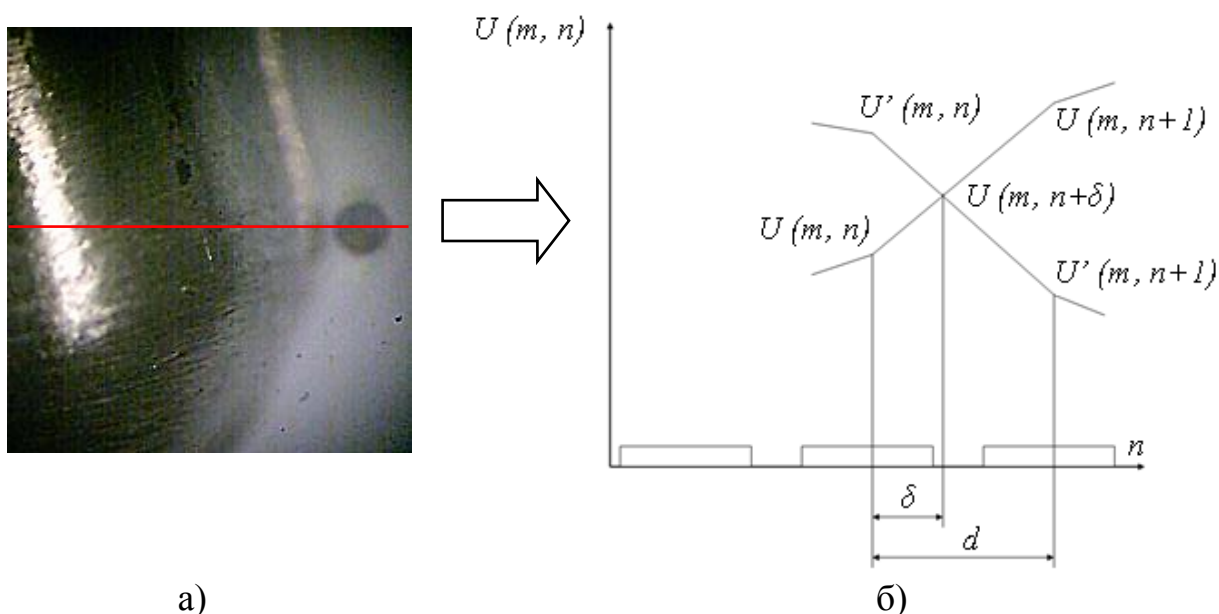
У першому розділі проаналізовано особливості малогабаритних об'єктів складної форми, існуючі методи та засоби контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, визначено їх основні недоліки. На основі вдосконаленого критерію оцінювання ефективності встановлено, що найвищий критерій ефективності мають оптико-електронні координатно-вимірювальні засоби.

У другому розділі запропоновано переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, удосконалено функцію вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях та проведено її дослідження.

Неточне позиціонування фокуса оптичної системи мікроскопа на малогабаритному об'єкті складної форми є додатковим джерелом невизначеності, оскільки при спробі провести контроль в області об'єкта, що знаходиться нижче фокальної площини, зображення зони візуалізації стає нечітким та розмитим. Значення ступеня розмитості σ такого зображення варіює в межах 1–3 при ширині перепадів до 20 пікселів. Виходячи з умов вимірювання доцільно використати переривчасто-контактний метод, який поєднує переваги оптичних методів, а саме: можливість вимірювати мініатюрні елементи деталей, та контактних методів – вимірювання розмірів у важкодоступних місцях елементів деталі.

Розроблений переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми базується на введенні в зону вимірювання додаткового тіла, яке виконує роль міри, що дозволяє врахувати ступінь розмитості його зображення та в результаті визначити коефіцієнт масштабування. За міру запропоновано використовувати відградуваний щуп з відомими геометричними розмірами, який не прив'язаний до координатної сітки. На рис. 1, а показано зображення області дотику деталі та щупа. При цьому визначення крайової координати області дотику здійснюється на основі субпик-

селної локалізації крайових точок об'єкта на зображенні шляхом отримання координати спільної точки примежових кривих деталі та щупа.



а)
Рисунок 1 – Знаходження субпіксельних координат межі об'єкта на зображенні: а – зображення області дотику деталі та щупа;
б – модель точки дотику деталі та щупа

Як видно з рис. 1, б, субпіксельне зміщення координати відносно центра пікселя за умови використання лінійно-кускової інтерполяції визначається як

$$\delta = \frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))} \cdot d, \quad (1)$$

де d – відстань між пікселями; δ – субпіксельне зміщення; $U(m, n)$, $U'(m, n)$, $U(m, n+1)$, $U'(m, n+1)$ – напруга на комірках фотоматриці, що відповідає освітленості n -го та $n+1$ -го пікселя зображень щупа та досліджуваного об'єкта відповідно в системі координат (m, n) .

Тоді координати μ та η точки дотику щупа та досліджуваного об'єкта з субпіксельною точністю можна записати так

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{((n-1)d + (\frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))}) \cdot d)_y \cdot f}{(n-1)d + (\frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))}) \cdot d}_x - f \\ \eta = \frac{((n-1)d + (\frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))}) \cdot d)_z \cdot f}{(n-1)d + (\frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))}) \cdot d}_x - f \end{array} \right. \quad (2)$$

Розмір досліджуваного об'єкта визначається за формулою

$$L_{ik} = \sum_i^{k-1} \sqrt{(\mu_{i+1} - \mu_i)^2 + (\eta_{i+1} - \eta_i)^2}. \quad (3)$$

На рис. 2 показано осцилограму одного рядка фотоматриці, що відповідає

зображенню центрального переріза щупів та досліджуваної деталі.

Як видно з рисунка, субпіксельне зміщення вносить вагому частку в результат вимірювання.

Проведено моделювання запропонованого методу при різному ступені розмитості ($1 \leq \sigma \leq 3$). Результати моделювання знаходження крайової точки об'єкта на зображенні показані на рис. 3. Розрахунок дискретних координат, що задовольняє умову кусково-лінійної інтерполяції, здійснювався для відомого ступеня розмитості σ . З графіків видно, що для приміжових кривих, крайова точка яких дорівнює 0 або 0,5 міжпіксельної ширини, абсолютна похибка є мінімальною, а в межах ступеня розмитості $1 \leq \sigma \leq 2,5$ не перевищує 10% ширини пікселя, але при збільшенні розмитості $\sigma > 2,5$ спостерігається її збільшення.

Проведено імітаційне моделювання запропонованого методу, для чого застосований експериментальний макет імітаційного засобу контролю, зовнішній вигляд якого показано на рис. 4. Зображення досліджуваного об'єкта, який знаходився в контакті зі щупом, виводилось на монітор, фіксувалося фотокамерою та розраховувалася координата дотику щупа до об'єкта.

Програмним шляхом виконувався зсув зображення об'єкта на один піксель монітора та фіксувалося нове положення зображення фотокамерою. Як видно з

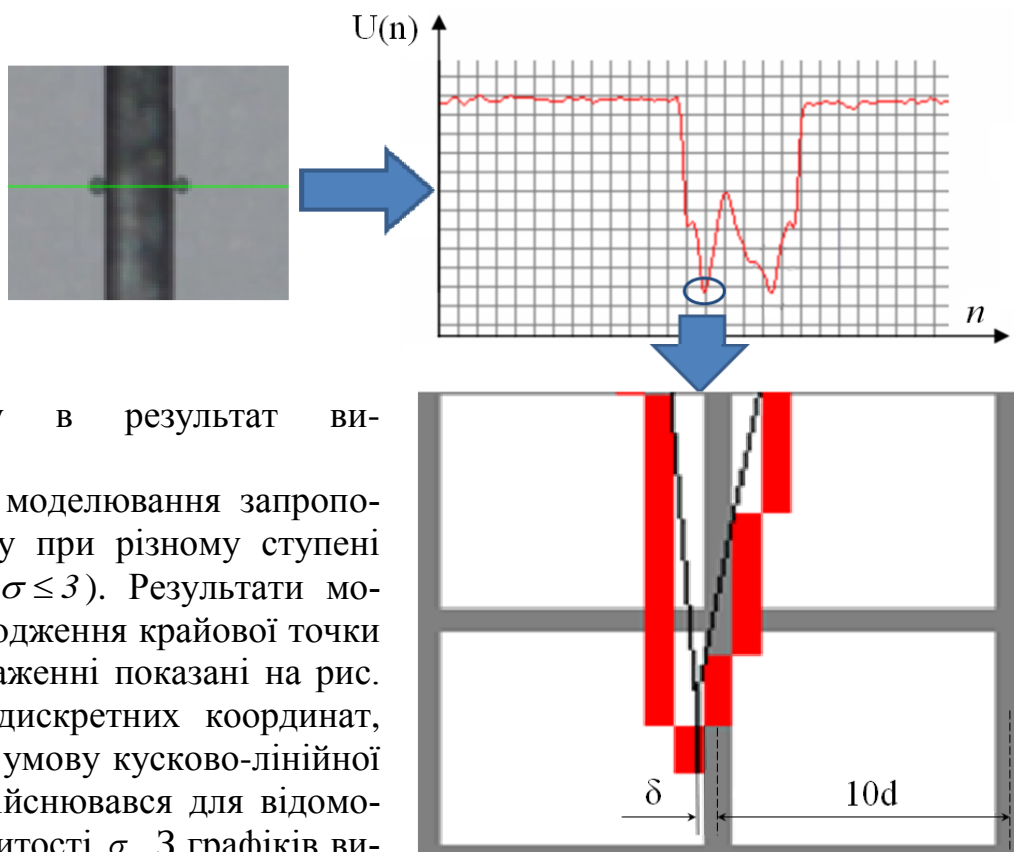


Рисунок 2 – Осцилограма одного рядка фотоматриці, що відповідає зображенню центрального переріза щупів та досліджуваної деталі

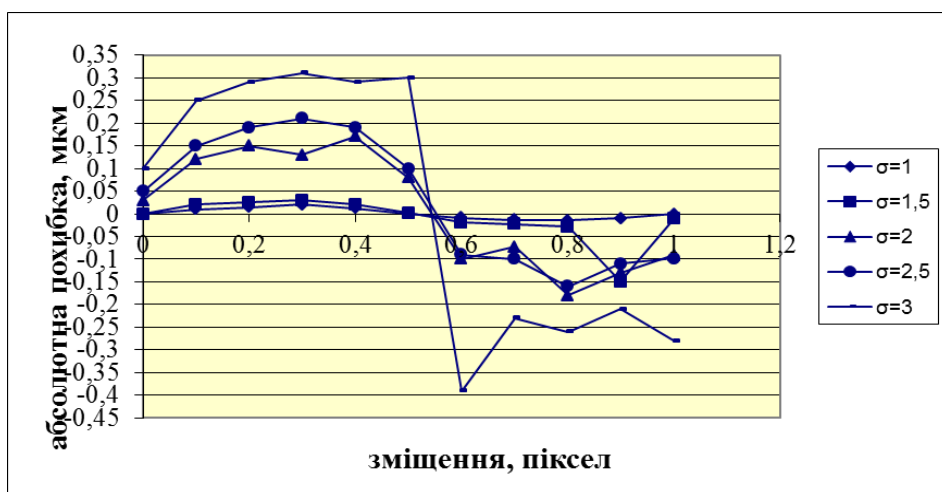


Рисунок 3 – Результати моделювання знаходження крайової точки об'єкта на зображенні в області контакту об'єкта з щупом

рис. 5 значення координати крайового пікселя в першому та другому випадках однакові, але обрахувавши координати з субпіксельною точністю значення координати змінилось на Δ_δ . Результати багатократного зсуву, а саме визначене положення



Рисунок 4 – Схема експериментального макета імітаційного засобу контролю краю зображення об'єкта, що формувалося фотокамерою, та уточнене внаслідок використання запропонованого методу, показані на рис. 6. З рисунка видно, що при зсуві зображення краю об'єкта на моніторі в рамках одного пікселя положення зображення краю об'єкта на відеокамері не змінюється. Але при використанні запропонованого методу положення локалізованої координати має субпіксельне зміщення відносно крайового пікселя.

краю зображення об'єкта, що формувалося фотокамерою, та уточнене внаслідок використання запропонованого методу, показані на рис. 6. З рисунка видно, що при зсуві зображення краю об'єкта на моніторі в рамках одного пікселя положення зображення краю об'єкта на відеокамері не змінюється. Але при використанні запропонованого методу положення локалізованої координати має субпіксельне зміщення відносно крайового пікселя.

На основі запропонованого переривчасто-контактного методу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми розроблено вимірювальний перетворювач розміру

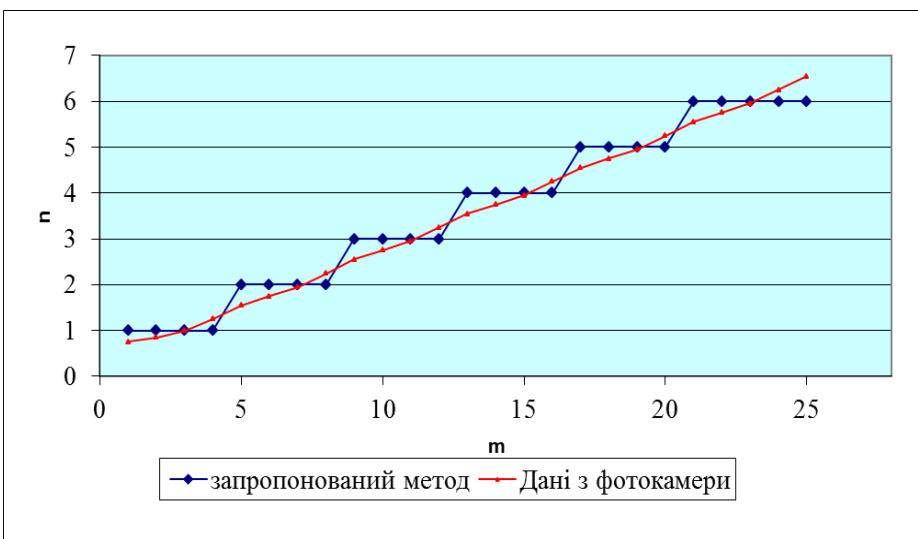


Рисунок 6 – Положення краю об'єкта в результаті зсуву, зафіксоване фотокамерою та розраховане: m – номер пікселя монітора та n – номер пікселя фотокамери

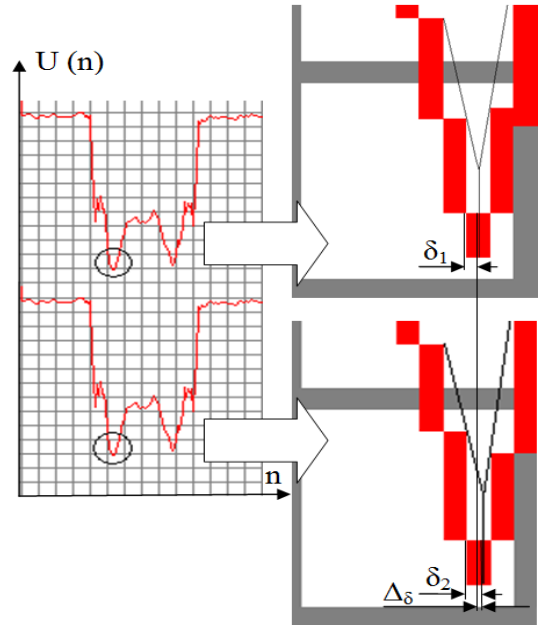


Рисунок 5 – Осцилограма зображення області дотику міри та краю об'єкта на моніторі

об'єкта при розфокусованих зображеннях, основними елементами якого є об'єкт дослідження, міра геометричного розміру (щуп), оптична система, фотоприймальна матриця та числовий перетворювач. Структурна схема вимірювального перетворювача наведена на рис. 7.

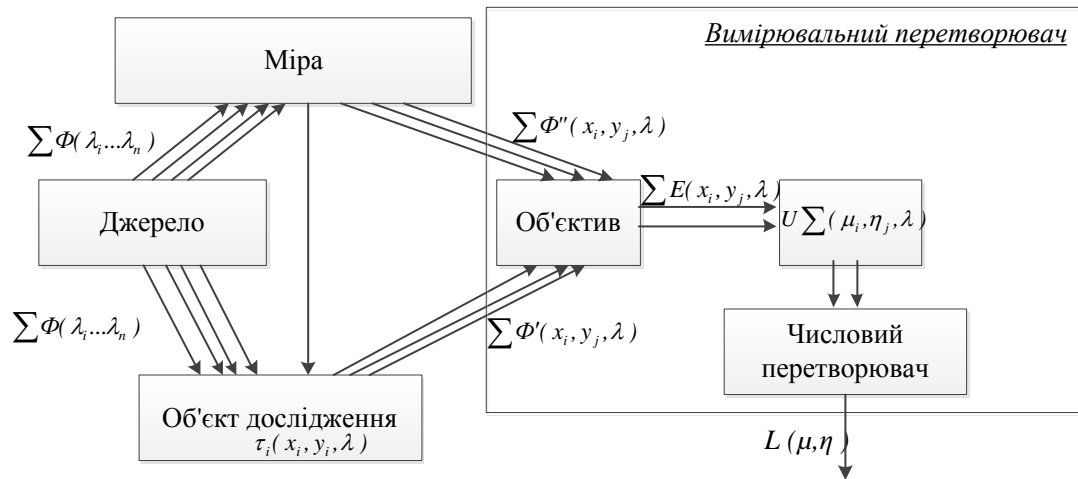


Рисунок 7 – Структурна схема вимірювального перетворювача розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях

Функція перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях має вигляд

$$\begin{cases} U(\mu_1, \eta_1) = U'(\mu_1, \eta_1); \\ U''(\mu_2, \eta_2) = U'''(\mu_2, \eta_2); \\ L_i(\mu_1, \eta_1, \mu_2, \eta_2) = \sum_i^{n-1} \sqrt{(\mu_{i+1} - \mu_i)^2 + (\eta_{i+1} - \eta_i)^2} \cdot K_m, \end{cases} \quad (4)$$

де $U(\mu_1, \eta_1)$, $U''(\mu_2, \eta_2)$ – значення напруг, отриманих внаслідок інтерполяції примежової кривої щупа (перша та друга точки дотику, відповідно); $U'(\mu_1, \eta_1)$, $U'''(\mu_2, \eta_2)$ – значення напруг, отриманих внаслідок інтерполяції примежової кривої досліджуваної деталі (перша та друга точки дотику, відповідно); $K_m = \frac{\Gamma \cdot h}{H_1}$ – коефіцієнт масштабування; H_1 – радіус щупа на зображенні; h – реальний радіус щупа; Γ – збільшення оптичної системи.

Для дослідження впливу розмитості зображення об'єкта на результат вимірювання геометричних розмірів проведено моделювання відповідності реального розміру деталі до знайденого на зображенні при різних ступенях розмитості. Результати моделювання показано на рис. 8,

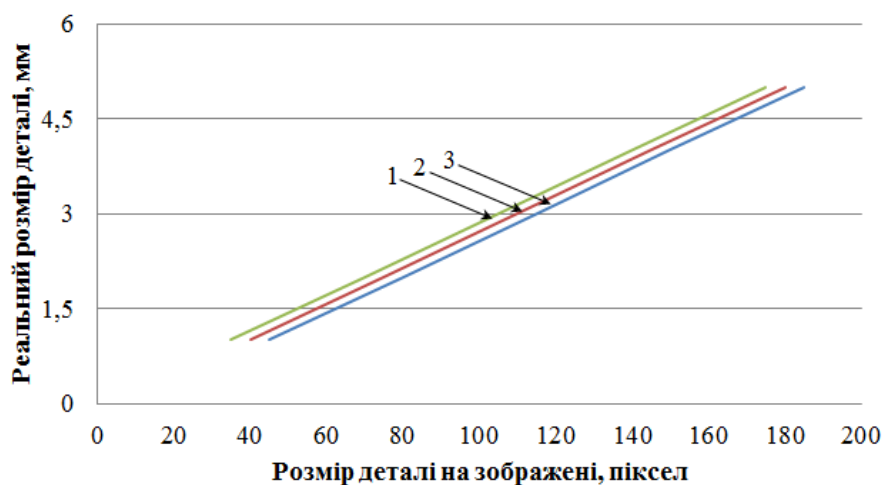


Рисунок 8 – Результати моделювання відповідності реального розміру деталі до знайденого на зображенні при різних ступенях розмитості

де характеристика 1 відповідає нерозмитим зображенням, 2 та 3 – зображенням, розмитим на $\sigma=0,5$ та $\sigma=1$, відповідно. Зображення досліджуваного об'єкта, який знаходився в контакті зі щупом, були розмиті за допомогою фільтра Гаусса, визначались координати крайових точок, за якими формувалась контурна лінія та розраховувались геометричні розміри, при цьому коефіцієнт масштабування не враховувався. При наявності розмитості зображень характеристики (2 та 3) значно зміщуються, що свідчить про присутність адитивної похибки.

Результати моделювання підтверджують необхідність використання коефіцієнта масштабування для компенсації адитивної похибки.

У третьому розділі розглянуто питання розробки переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми. Для підвищення вірогідності вимірювального контролю розмірів малогабаритних об'єктів складної форми розроблено метод виділення контурів об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації та детектор контролю лінійних і кутових розмірів на його основі.

На рис. 9 показано структурно-функціональну схему переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, яка містить досліджуваний об'єкт 1; оптичну систему мікроскопа 2; щуп 3; цифрову відеокамеру 4; комп'ютер з програмним комплексом

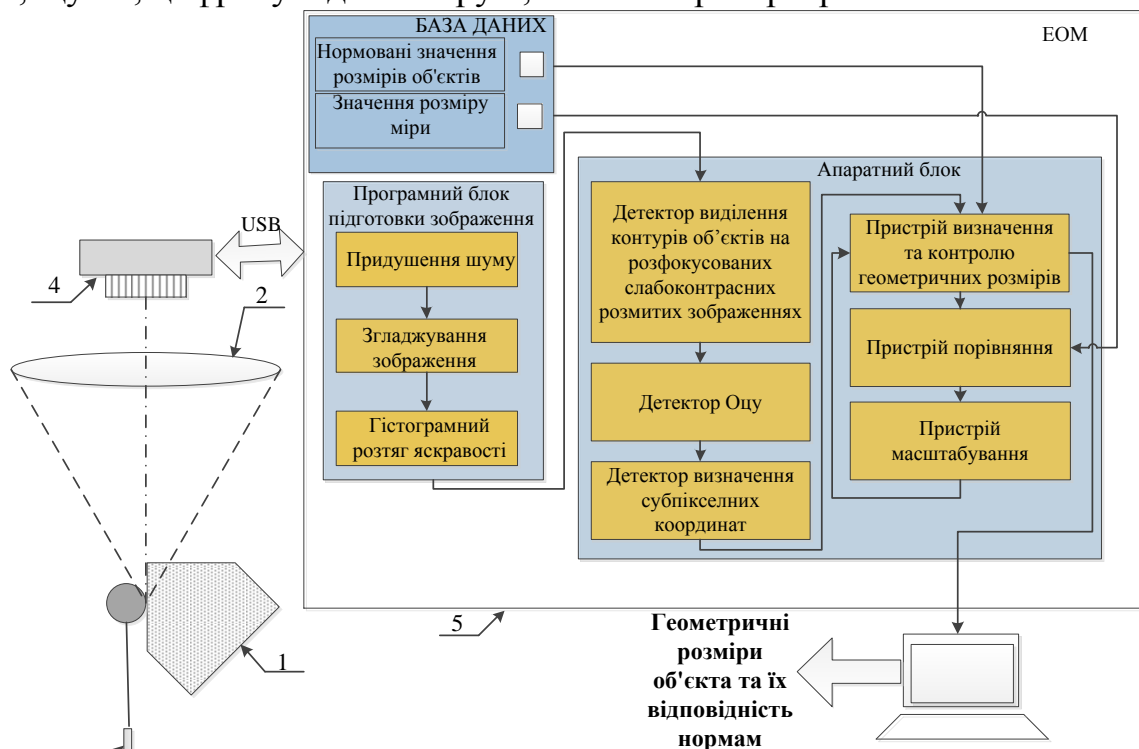


Рисунок 9 – Структурно-функціональна схема переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми

для обробки зображень та автоматичного визначення геометричних розмірів 5.

Математична модель засобу контролю описується як

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \frac{B_i n_c \tau_0(\lambda) \pi D^2}{D^2 + 4(f-L)^2} \frac{KAT}{C} \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \Phi'(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \Phi'(\lambda) \nu(\lambda) d\lambda}; \\ t = U_{oij} - U_{fij}, \text{ при умові } U_{oij} \geq U_{fij}; \\ T = \sigma_b^2(t)_{MAX} = w_1(t) w_2(t) [\mu_1(t) - \mu_2(t)]; \\ \delta = \frac{U'(m, n) - U(m, n)}{(U(m, n+1) - U'(m, n+1)) + (U'(m, n) - U(m, n))} \cdot d \quad \text{при } T = \max; \\ \mu = \frac{((n-1)d + \delta_y f)}{(n-1)d + \delta_x - f}; \\ \eta = \frac{((n-1)d + \delta_z f)}{(n-1)d + \delta_x - f}; \\ L_{in} = \sum_i^{n-1} \sqrt{(\mu_{i+1} - \mu_i)^2 + (\eta_{i+1} - \eta_i)^2} \cdot Y_f \cdot K_m; \\ \gamma_{AB} = \arctg \frac{L_A}{L_B}, \end{array} \right. \quad (5)$$

де n_c – показник заломлення середовища; $\tau_0(\lambda)$ – інтегральний коефіцієнт пропускання оптичної системи; D – діаметр вхідної зіниці; f – фокусна відстань об'єктива зі сторони матриці; L – відстань від об'єкта до зіниці об'єктива, K – коефіцієнт передачі; A – площа світлочутливого елемента; T – час, за який електрони накопичуються в світлочутливому елементі; C – ємність вихідного пристрою, де відбувається перетворення зарядового пакета в напругу; $\Phi'(\lambda)$ – відносний спектральний розподіл величини; $S(\lambda)$ – спектральна чутливість ПЗЗ; $\nu(\lambda)$ – крива видимості зорового аналізатора; k – 638 лм/Вт, d – відстань між пікселями; U_{oij} та U_{fij} – напруги на комірках фотоматриці, що відповідають освітленості i -го та j -го пікселів зображень дослідженого об'єкта та щупа, відповідно, $w_1(t)$ та $w_2(t)$ – ймовірність двох класів, що розділені порогом t , $\mu_1(t)$ та $\mu_2(t)$ – середнє арифметичне 1-го та 2-го класу.

Для оконтурювання деталей в результаті отримання декількох крайових точок з субпіксельною точністю розроблено метод виділення контурів об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації. Як видно з рис. 10, основними етапами методу є дворазове автоматичне визначення порогу бінаризації Оцу, що забезпечує придушення шумових складових із фону зображення та виділення тонких неперервних контурів об'єктів на зображеннях без розривів та зайвих фрагментів. На рисунку: а – зображення з виділеним контуром без порогової обробки та його гістограма з прийнятим I порогом; б – зображення після I порогу та його гістограма з прийнятим II порогом; в – оконтуроване зображення та його гістограма.

У випадку формування контурів, що мають прямі лінії, запропоновано використати перетворення Хафа, що дозволило усереднити параметричні криві на зображенні та підвищити якість визначення контурів.

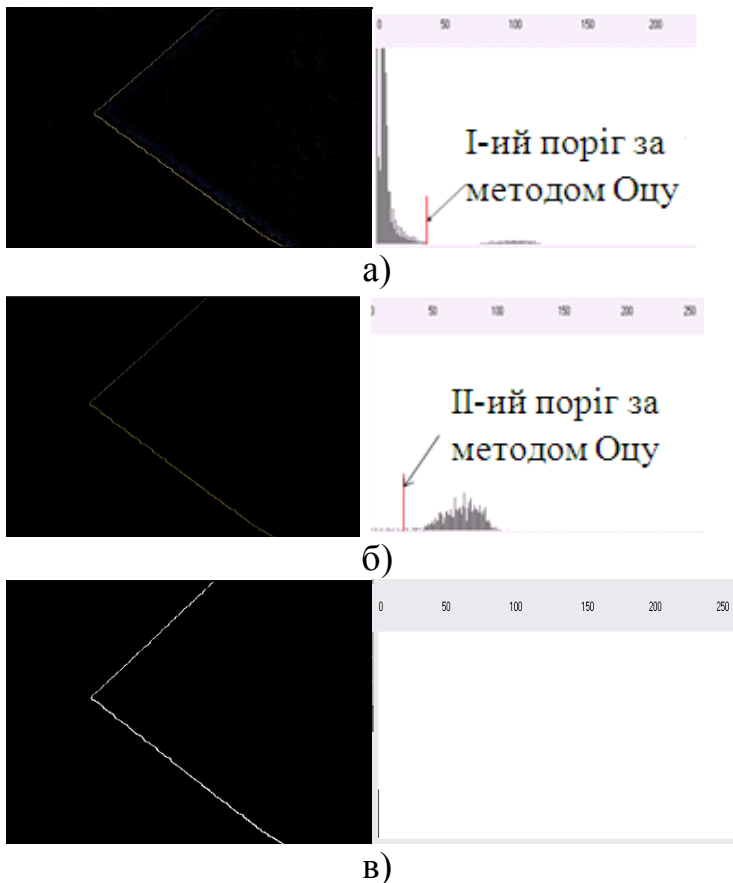


Рисунок 10 – Основні етапи методу виділення контурів об'єктів на зображенні на основі низькочастотної фільтрації

контури досліджуваної деталі виділялись автоматично шляхом захоплення невеликої крайової області зображення об'єкта (рис. 11, а та в), в результаті чого будувалась крайова лінія (рис. 11, б та г), координати якої визначені з субпіксельною точністю. Аналогічно будувались інші лінії, на основі яких визначались як лінійні, так і кутові розміри досліджуваної деталі. Встановлено, що абсолютна похибка визначення кута складає $0,5^\circ$.

У четвертому розділі наведено рекомендації щодо інженерного проектування переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми та алгоритм контролю. Проаналізовано впливні величини та похибки вимірювання геометричних розмірів. Проведено експериментальні дослідження переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми. Отримано залежності для

На основі методу виділення контурів об'єктів на зображенні розроблено детектор контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми (рис.11).

Як показано на рисунку,

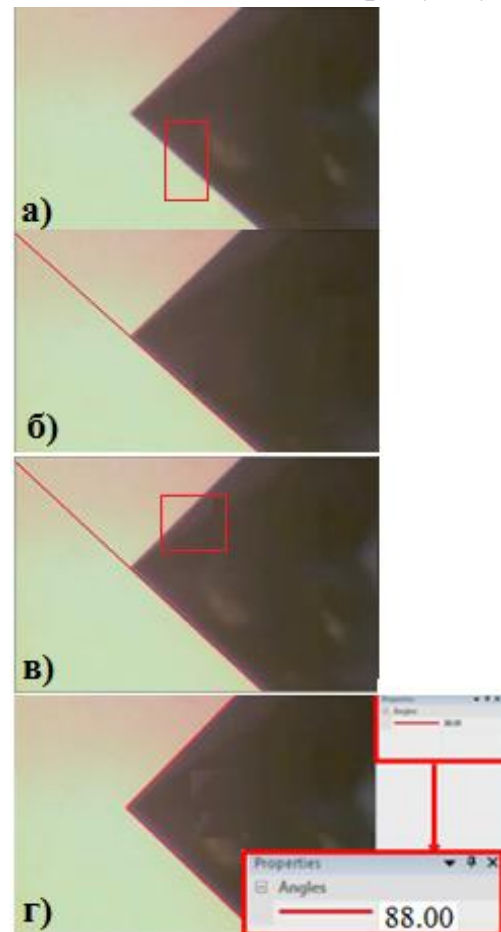


Рисунок 11 – Приклад роботи детектора контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми

розрахунку вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми.

За алгоритмом контролю перед початком вимірювання геометричних розмірів встановлювалась наявність дотику щупа до досліджуваного об'єкта. Якщо умова виконана, то визначений таким чином радіус щупа на зображенні порівнювався з його паспортним значенням, розраховувався коефіцієнт масштабування та перераховувались координати досліджуваного об'єкта з його врахуванням.

Проаналізовано похибки вимірювання геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми та встановлено, що інструментальні похибки можна розділити на: похибка встановлення положення й розмірів світлового потоку в мікроскопі; похибка виготовлення щупа; похибка дотику щупа; похибка дисторсії; похибка квантування; похибка відновлення та інші похибки різноманітного походження та дестабілізуючі фактори навколишнього середовища. Загальна інструментальна похибка складає 1,52%.

До методичних похибок відносять: похибку субпіксельної дискретизації в просторі; похибку бінаризації за Оцу та кусково-лінійної інтерполяції. Загальна методична похибка дорівнює 0,9%.

Загальна похибка вимірювання геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми не перевищує 2,5%.

Проведено дослідження роботи переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, зовнішній вигляд якого наведений на рис. 12, де 1 – відеокамера; 2 – оптичний мікроскоп; 3 – досліджуваний об'єкт; 4 – ноутбук; 5 – щуп.

На рис. 13 показано основні етапи обробки зображення при роботі переривчасто-контактного засобу контролю. На рисунку: а – отримане зображення після першого порогу фільтрації; б – зображення після другого порогу фільтрації (фільтрація за методом Оцу); в – значення координат X та Y точки дотику щупа та досліджуваного об'єкта; г – значення координат X та Y точки дотику щупа та досліджуваного об'єкта з субпіксельною точністю. За знайденими координатами формувалась крайова лінія щупа та розраховувався радіус щупа на зображенні. За відомими розмірами розраховувався коефіцієнт масштабування. Кінцевим етапом роботи переривчасто-контактного засобу контролю є розрахунок розмірів за допомогою знайдених координат з урахуванням коефіцієнта масштабування та визначення їх відповідності заданим нормам.

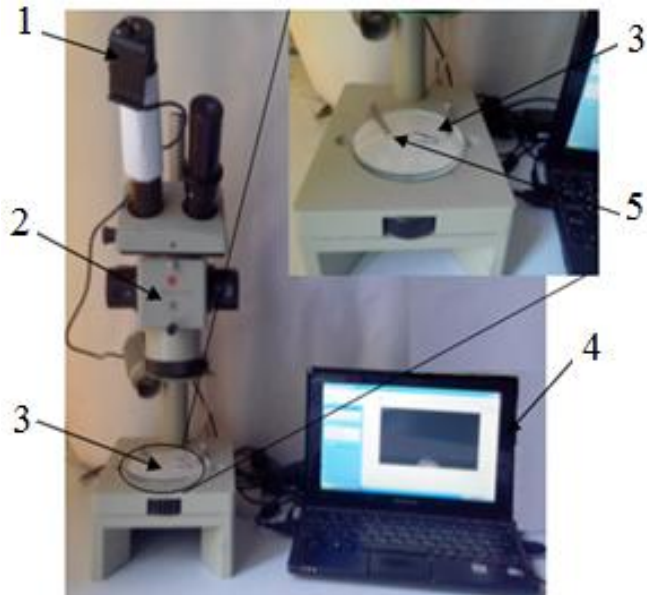


Рисунок 12 – Зовнішній вигляд переривчасто-контактного засобу контролю

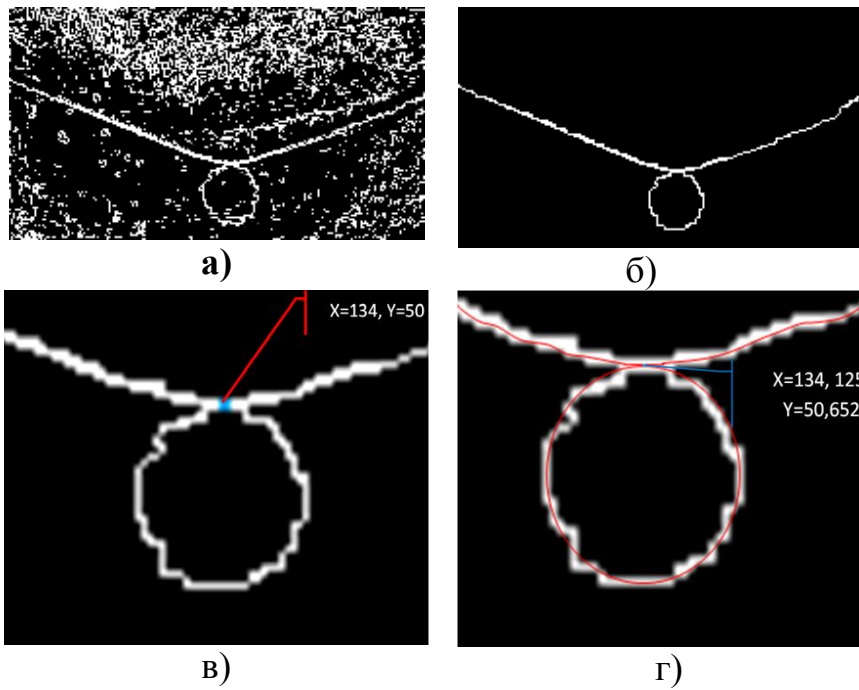


Рисунок 13 – Знаходження координат запропонованим переривчасто-контактним засобом

На рис. 14 показано зображення наконечника з підведеними до нього щупами та визначений його розмір, а також осцилограма одного рядка фотоматриці, що відповідає зображенню центрального переріза щупів та досліджуваної деталі. Експериментальні дослідження проводились з використанням плоско-паралельних мір I класу точності.

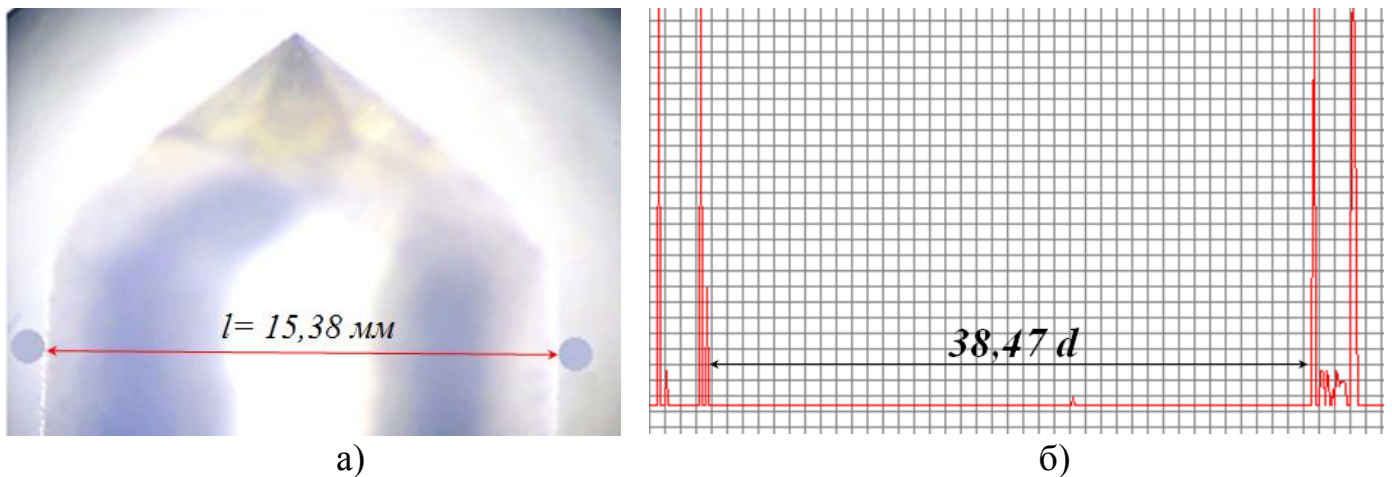


Рисунок 14 – Визначення розміру наконечника (а) та осцилограма одного рядка, що відповідає зображенню центрального переріза щупів та досліджуваної деталі після обробки (б)

На рис. 15 показано теоретичну та експериментальну статичні характеристики переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми. Отримано збіжність теоретичної та експериментальної характеристики. Похибка моделі не перевищує 10%.

За результатами експериментальних досліджень побудовано зміну вимірних геометричних розмірів плоско-паралельної кінцевої міри розміром 1 мм та їх відносних похибок. Отримано 100 точок виміру. Наведено залежності загального закону розподілу похибки вимірювання геометричних розмірів та встановлено, що закон розподілу нормальний. Проаналізовано результати досліджень та отримано залежності помилок першого та другого роду.

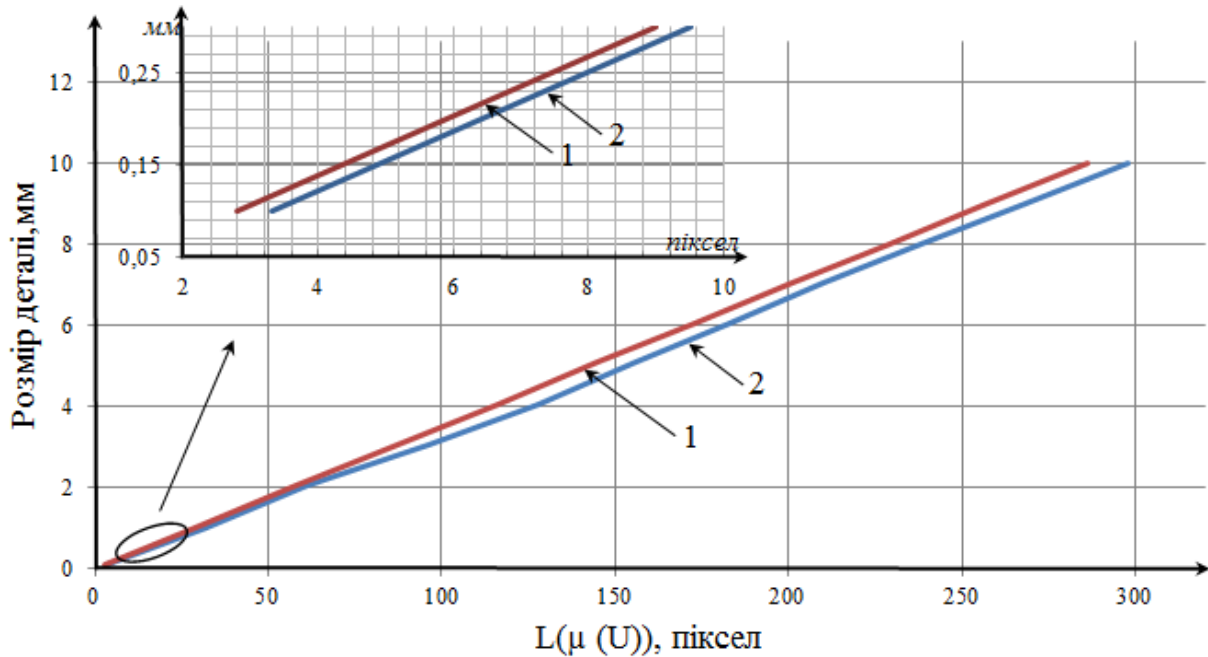


Рисунок 15 – Теоретична (1) та експериментальна (2) статичні характеристики переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми

Вірогідність прийняття засобом контролю правильного результату становить $D=0,975$.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом урахування ступеня розмитості їх зображень.

В загальному по роботі можна зробити такі висновки.

1. Проведено аналіз методів і оптичних координатно-вимірювальних засобів. За основні класифікаційні ознаки вирішено взяти: спосіб сканування первинного зображення; спосіб просторового представлення об'єктів; спосіб управління; метод спостереження; направленість світлового потоку; спосіб представлення даних; довжину хвилі; вид фокусування; фізичний принцип вимірювання та спосіб взаємодії з об'єктом. Встановлено, що для малогабаритних об'єктів складної форми оптимально використовувати безконтактні методи з введенням додаткового елемента в зону вимірювань. Проаналізовано та обрано критерії оцінювання ефективності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, а саме: достовірність вимірювального контролю; вартість; швидкість та допустиму відносну похибку вимірювання. Встановлено, що найвищий критерій ефективності мають оптико-електронні координатно-вимірювальні засоби.

2. Розроблено переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, в якому завдяки введенню в зону вимірювання додаткового тіла, яке виконує роль міри, забезпечується суб-

пiкселна локалiзацiя крайових точок об'єкта на зображеннi шляхом отримання координати спiльної точки примежових кривих деталi та мiри з врахуванням ступеня розмитостi, що дало змогу зменшити похибку вимiрювання та пiдвищити вiрогiднiсть контролю. Проведено дослiдження й аналiз точностi переривчасто-контактного методу контролю геометричних розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми, що дозволяє стверджувати про адекватнiсть роботи запропонованого методу, а також встановлено, що похибка визначення положення крайової точки не перевищує 0,1 мiжпiкселної ширини.

5. Розроблено вимiрювальний перетворювач розмiру об'єкта при розфокусованих зображеннях, основними елементами якого є об'єкт дослiдження, мiра геометричного розмiру (щуп), оптична система, фотоприймальна матриця та числовий перетворювач. Удосконалено функцiю вимiрювального перетворення розмiру об'єкта при розфокусованих зображеннях, що пов'язує вихiдну величину – розмiр зображення дослiджуваної деталi та вхiдну – вимiряний розмiр, в якiй, на вiдмiну вiд iснуючих, враховується коефiцiєнт масштабування, що дозволило зменшити похибку вимiрювання. Отримано математичну модель переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми, яка враховує подвiйну фiльтрацiю зображень, а також значення напруги спiльної крайової точки примежових кривих зображення щупа та об'єкта, отриманої в результатi лiнiйної iнтерполяцiї, що дозволило визначити геометричнi розмiри з урахуванням субпiкселного змiщення вiдносно центра пiксела i , як наслiдок, пiдвищити вiрогiднiсть контролю на 0,15.

3. Розроблено метод видiлення контурiв об'єктiв на зображеннi на основi низькочастотної фiльтрацiї та детектор контролю лiнiйних i кутових розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми, який вiдрiзняється вiд iснуючих використанням двох порогiв фiльтрацiї та застосуванням субпiкселної локалiзацiї контурних точок, що забезпечує автоматичне визначення контурних лiнiй з субпiкселною точнiстю. Проведено порiвняльний аналiз роботи запропонованого методу з традицiйними та встановлено, що параметри критерiю PSNR розробленого методу видiлення контурiв об'єктiв вищi, нiж у вiдомих, а похибка фiльтрацiї RMSE – менша.

4. Розроблено переривчасто-контактний засiб контролю геометричних розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми, який вiдрiзняється вiд iснуючих введенням в зону вимiрювань щупа з вiдомими розмiрами, що не прив'язаний до координатної сiтки, та використанням субпiкселної локалiзацiї крайових координат, що дозволило визначити геометричнi розмiри з вiдносною похибкою, що не перевищує 2,5%, клас точностi засобу – 2,5, а вiрогiднiсть контролю дорiвнює 0,975. Розроблено алгоритм контролю геометричних розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми, який враховує особливостi контролю оптичними засобами малогабаритних об'єктiв складної форми як об'єкта дослiджень та дозволяє зробити висновок про придатнiсть деталi, тобто про вiдповiднiсть її розмiрiв заданим допускам для конкретного застосування.

5. За результатами вимiрювань геометричних розмiрiв малогабаритних об'єктiв складної форми на прикладi плоско-паралельної кiнцевої мiри отрима-

но основні статистичні характеристики та побудовано закони розподілу контрольованої величини, відносної похибки вимірювання геометричних розмірів та сумісний закон розподілу. При проведенні експериментальних досліджень вимірювання геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми отримано 100 значень у діапазоні від 0,999 мм до 1,001 мм. Підтверджена збіжність теоретичних та експериментальних результатів дослідження. Отримано абсолютну похибку вимірювань геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, що дорівнює близько 1 мкм. Для обрахунку вірогідності розробленого засобу вимірювального контролю розраховано помилку першого роду, яка становить 0,023, та помилку другого роду – 0,0014. Вірогідність розробленого переривчасто-контактного засобу контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми дорівнює 0,975.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Білинський Й. Й. Класифікація методів вимірювань розмірів мікроскопічних об'єктів / Й. Й. Білинський, І. В. Микулка, Б. П. Книш // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 5. – С. 132–135.

2. Білинський Й. Й. Метод виділення контуру на слабконтрастних розмитих зображеннях / Й. Й. Білинський, І. В. Микулка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 164–169.

3. 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>.

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

5. 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.

6. Білинський Й. Й. Класифікація оптико-електронних координатно-вимірювальних систем / Й. Й. Білинський, М. Й. Юкиш, І. В. Сухоцька // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 3. – С. 15–20.

7. 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.

8. Білинський Й. Й. Розробка засобу контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька,

*Микулку І. В. вважати Сухоцькою І. В. у зв'язку з одруженням.

А. Б. Гуральник // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 51–55.

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. Білинський Й. Й. Програмна реалізація методу визначення куткових 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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>.

17. 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.

18. Білинський Й. Й. Засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми / Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька // Вимірю-

вання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2015) : тези доповіді 3-ої Міжнар. наук. конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – С. 67.

19. Пат. № 70758 Спосіб знаходження субпіксельних координат контурних точок об'єктів на слабкоконтрастних розмитих зображеннях/ Й. Й. Білинський, П. М. Ратушний, І. В. Микулка// Україна, МПК (2006.01) G06K 9/36. № u201114318; заявл. 05.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл№ 12.

20. Пат. № 70764 Спосіб виділення контуру слабкоконтрастних зображень / Й. Й. Білинський, П. М. Ратушний, І. В. Микулка, О. М. Сухоцький //Україна, МПК (2006.01) G06K 9/64. № u201114326; заявл. 05.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл№ 12.

21. Пат. № 71951 Спосіб виділення контуру слабкоконтрастних 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.

22. Пат. № 73138 Пристрій виділення контуру слабкоконтрастних розмитих зображень / Й. Й. Білинський, І. В. Микулка //Україна, МПК (2006.01) G06K 9/20. № u201203188; заявл. 19.03.2012; опубл. 10.09.2012; Бюл№17.

23. 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.

24. 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.

АНОТАЦІЯ

Сухоцька І. В. Переривчасто-контактний метод та засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2016.

В дисертаційній роботі викладено результати досліджень щодо підвищення вірогідності контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми. У роботі запропоновано переривчасто-контактний метод контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, в якому завдяки введенню в зону вимірювання додаткового тіла, забезпечується субпіксельна локалізація крайових точок об'єкта на зображенні.

На основі запропонованого методу удосконалено функцію вимірювального перетворення розміру об'єкта при розфокусованих зображеннях, в якій враховується коефіцієнт масштабування, що дозволило зменшити похибку вимірювання.

Розроблено метод та детектор контролю лінійних і кутових розмірів малогабаритних об'єктів складної форми, що забезпечує автоматичне виділення контурних ліній з субпіксельною точністю.

На основі досліджень розроблено переривчасто-контактний засіб контролю геометричних розмірів малогабаритних об'єктів складної форми та розроблена його математична модель, яка дає змогу визначити геометричні розміри з урахуванням субпіксельного зміщення відносно центра пікселя.

Виділено основні похибки засобу контролю. Знайдено композицію законів розподілу для випадкової похибки. Встановлено, що вірогідність прийняття правильного результату становить 0,975, що на 0,15 вище, ніж у відомих засобів.

Ключові слова: переривчасто-контактний засіб контролю, геометричні розміри, малогабаритні об'єкти складної форми, субпіксельна локалізація, ступінь розмитості, коефіцієнт масштабування, щуп.

АННОТАЦИЯ

Сухоцкая И. В. Прерывисто-контактный метод и средство контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Винницкий национальный технический университет, Винница, 2016.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по повышению достоверности контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы.

Проанализировано современное состояние методов и средств контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы. Выявлено, что основными средствами контроля геометрических размеров являются координатно-измерительные машины, как контактного, так и бесконтактного типа. Установлено, что основными их недостатками является высокая стоимость и низкая точность определения геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы, поскольку их изображения имеют большую степень размытия.

В работе предложен прерывисто-контактный метод контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы, в котором благодаря введению в зону измерения дополнительного тела, обеспечивается субпиксельная локализация краевых точек объекта на изображении путем получения координаты общей точки детали и меры, а также учета степени размытости его изображения, что позволило уменьшить погрешность измерения и повысить достоверность контроля.

На основе предложенного метода усовершенствована функция измерительного преобразования размера объекта при расфокусированных изображениях, что связывает исходную величину – размер изображения исследуемой детали и входную – измеренную величину, в которой учитывается коэффициент масштабирования, что позволило уменьшить погрешность измерения.

Для повышения достоверности контроля геометрических размеров разработан метод выделения контуров объектов на изображении на основе низкочастотной фильтрации и детектор контроля линейных и угловых размеров малогабаритных объектов сложной формы, в которых обеспечивается удаление шумовых составляющих с фона изображения и автоматическое выделение тонких непрерывных контуров объектов на изображениях без разрывов и лишних фрагментов.

На основе исследований разработано прерывисто-контактное средство контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы и разработана его математическая модель, которая позволяет определять геометрические размеры с субпиксельной точностью и, как следствие, повысить достоверность контроля на 0,15.

Предложен алгоритм контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы, учитывающий особенности измерительного контроля оптическими средствами малогабаритных объектов сложной формы как объектов исследований и позволяет сделать вывод о пригодности детали, то есть о соответствии ее размеров заданным допускам для конкретного применения.

Выделены основные погрешности средства контроля. Найдено композицию законов распределения для случайной погрешности, на основе которой оценены показатели достоверности контроля геометрических размеров малогабаритных объектов сложной формы. Установлено, что вероятность принятия правильного результата составляет 0,975, что на 0,15 выше, чем в известных средств.

Ключевые слова: прерывисто-контактное средство контроля, геометрические размеры, малогабаритные объекты сложной формы, субпиксельной локализация, степень размытости, коэффициент масштабирования, щуп.

ABSTRACT

Sukhotska I. V. Intermittent-contact method and means for controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects. - The manuscript.

Ph.D. thesis in engineering science with 05.11.13 specialization – devices and methods of control and analysis of materials composition. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya, 2016.

The thesis presents results of the research on increasing probability of controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects. An intermittent-contact method for controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects is proposed. It provides sub-pixel localization of the object edge points on the image due to introduction of an additional body into the measurement zone.

On the basis of the proposed method, the object size measurement conversion function for defocused images has been improved, taking into account the scaling factor, which enables measurement error reduction.

A method and detector for controlling linear and angular dimensions of small-size complex-shaped objects have been developed. The method is based on twofold automatic binarization threshold determination, which provides extraction of the noise components from the image background as well as detection of thin continuous contours of objects in the images.

On the basis of the research an intermittent-contact method for controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects has been developed as well as its mathematical model, which makes it possible to determine geometric dimensions, taking into account sub-pixel shift in relation to pixel center.

Basic errors of the controlling means have been detected. Composition of the random error distribution laws has been determined. Probability of accepting the correct result was found to be 0.975, which is by 0,15 higher than that of the known means.

Keywords: intermittent-contact controlling method, geometric dimensions, small-size complex-shaped objects, sub-pixel localization, degree of fuzziness, scaling factor, probe.

Підписано до друку 26.10.2016 р.
Формат 21x29.7 1/4. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний.
Наклад 100 прим. Зам. № 2016-231.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59