

УДК 681.3.07

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ШЛЯХОМ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЇХ ЗОБРАЖЕНЬ

Й.Й. Білинський, І.В. Сухоцька\*

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, 21021

*Розглянута особливість визначення координат крайових точок малогабаритних об'єктів складної форми. Запропоновано алгоритм визначення та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом їх візуалізації та знаходження субпіксельних координат на зображенні. Розрахована сумарна похибка, що виникає під час вимірювального перетворення, яка складає 0,089 піксела.*

*Ключові слова: об'єкти складної форми, геометричні параметри, малогабаритні об'єкти, субпіксельні координати.*

*Рассмотрена особенность определения координат краевых точек малогабаритных объектов сложной формы. Предложен алгоритм определения и контроля геометрических параметров малогабаритных объектов сложной формы путем их визуализации и нахождения субпиксельных координат на изображении. Рассчитана суммарная погрешность, возникающая при измерительном преобразовании, которая составляет 0,089 пиксела.*

*Ключевые слова: объекты сложной формы, геометрические параметры, малогабаритные объекты, субпиксельные координаты.*

*Considered feature determining coordinate of boundary of points of small objects with complex shapes. The algorithm for determining the geometric parameters and control small objects with complex shapes through their visual and determining of the sub-pixel of coordinates of image. The calculated total error that occurs when measuring conversion that pixel is 0.089.*

*Keywords: objects with complex shapes, geometric parameters small objects, sub-pixel coordinates.*

**Вступ.** На сьогодні область вимірювання та контролю геометричних параметрів характеризується великим числом вимірювальних задач, методів і досліджуваних об'єктів [1-4]. Визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми за допомогою методів візуалізації в сучасних вимірювальних технологіях набуває широкого розповсюдження.

Широкого застосування для вимірювання шаблонів і деталей складних конфігурацій набув проєкційний прилад – великий проєктор (ВП-2). За допомогою проєктора вимірюють деталі складних профілів: лекала, шаблони, кулачки, пуансони, матриці, різці, різьбові гребінки, фрези, гвинти, зубчасті шестерні та ін. Проте при використанні ВП-2 для визначення геометричних параметрів присутній вплив оператора на результат вимірювання, шляхом візуального наближення вимірювальних точок (суб'єктивне вимірювання), що зменшує точність вимірювання. Також точність вимірювання, залежить від якості шаблонів,

тобто вони повинні зберігати форму і розміри протягом тривалого часу, а при зберіганні та експлуатації – не деформуватись, не втрачати чіткість і точність [5]. Вагомим недоліком є габарити пристрою, які складають 2,1 x 1,2 x 0,9 м та вага 500 кг, при цьому площа необхідна для установки ВП-2 складає 2,5 x 3 м.

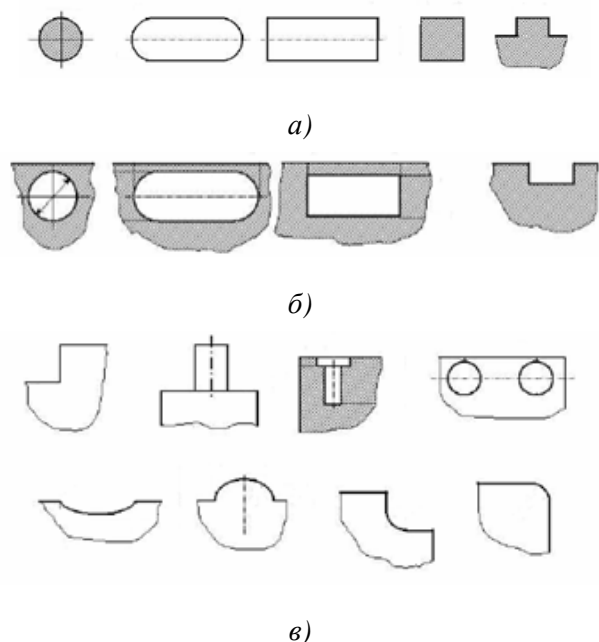
Для точного визначення координат необхідно отримати висококонтрасне зображення, що є неможливим при знаходженні розмірів об'єктів на межі роздільної здатності систем реєстрації, а також малогабаритних деталей та деталей складної форми. Неможливість точного фокусування оптичної системи візирного мікроскопа на об'єкті виміру є додатковим джерелом невизначеності, оскільки при спробі провести вимірювання в області об'єкта, що знаходиться нижче фокальної площини, зображення зони візуалізації стає нечітким, розмитим.

Тому, метою роботи є підвищення точності визначення та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної

форми шляхом розробки алгоритму на основі субпіксельної обробки зображень.

**Основна частина.** Для оцінки якості виробу в цілому потрібно провести контроль сукупності геометричних параметрів [3], таких як: лінійні розміри (довжина, товщина, глибина, радіуси та діаметри); кутові величини (кути та конуси); параметри положення (паралельність, перпендикулярність) та параметри форми (компактність, еліптичність та ін.).

Конструктивними елементами деталей є: одиничні (циліндр, призма, паралелепіпед, конус, сфера, профіль і т.п.), групові (комплекти баз, наприклад бази під підшипникові кріплення, штифтові, квадратні, різьбові, центрові отвори, зубчасті та інші) та спеціальні (канавки, радіуси заокруглень, фаски, легко деформуючі та інші). Основними видами елементів деталей, що вимірюються, є [4]: вали (рис. 1, а), отвори (рис. 1, б) та елементи, що не відносяться до отворів і валів (рис. 1, в).



**Рисунок 1 – Основні види елементів деталей:**  
а) – вали; б) – отвори; в) – елементи, що не відносяться до отворів і валів [4]

На сьогодні, для обчислення геометричних характеристик, у зв'язку з дискретністю зображення, використовують два способи: традиційний і контурний. Це пов'язано з тим, що піксел має лінійні розміри, а обчислення геометричних характеристик виконується по вузлових точках. При традиційному способі вузлова точка знаходиться в центрі піксела і має

розмір, що дорівнює площі піксела, а при виконанні контурного обчислення оперують лінійними розмірами між точками, які лежать на кутах піксела [6]. Контурний метод є точнішим, проте контури, що виділяються, мають такі недоліки, як розриви, відсутність контурних ліній або наявність помилкових, а також контурні лінії можуть бути широкими, розмитими й нечіткими, що унеможливує їх розпізнавання [7]. Тому, для комплексної оцінки геометрії виробів застосовується координатний метод. Координатне вимірювання – вимірювання геометричних параметрів об'єктів, яке здійснюється шляхом знаходження координат окремих точок поверхні об'єкта в прийнятій системі координат (прямокутній Декартовій, циліндричній або сферичній) і подальші математичній обробці отриманих координат для визначення розмірів.

Потрібно враховувати, що особливістю зображень об'єктів малогабаритних деталей (рис. 2), які досліджуються в роботі є досить велика розмитість за рахунок неможливості повної фіксації та низька контрастність.



**Рисунок 2 – Візуалізація об'єкта складної форми на прикладі алмазного різця**

Значення розмитості  $\sigma$  такого зображення варіює в межах 2,5 – 3,5 при ширині перепадів до 40 пікселів. Контури таких зображень, виділені за допомогою відомих методів, будуть або широкими, якщо це методи просторового диференціювання (наприклад Собела, Канні), або ж похибка виділення буде мати місце через похибки в оптичній системі, а також через наявність розривів контуру або хибних контурних ліній при обробці зображення. Тому, доцільно для визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми застосовувати координатне вимірювання. Проте, за допомогою існуючих засобів, координати зображення точки об'єкта визначаються з точністю до піксела або 1/2 піксела, що не завжди є достатнім [8].

На сьогодні для вимірювання більшості елементів деталей в різних перетинах застосовують контактні методи, які, як правило, використовують щуп [9]. Хоча технологія виготовлення і конструювання щупів накладають певні обмеження на їх габаритні розміри, що негативно впливає на точність вимірювання, проте його доцільно використовувати для вимірювання лише декількох точок локалізації краю об'єкта. Оскільки координати країв об'єктів знаходяться шляхом згладжування з наступним диференціюванням дискретного зображення, отриманого завдяки оптико-електронній системі, то це призводить до втрати частини вимірювальної інформації. При цьому, системи використовують матричні фотоприймальні пристрої, що не враховують, що координати країв об'єкта на зображенні можуть попадати як на вузли, так і між вузлами періодичної просторової ґратки. За принцип визначення країв в них використовуються інтерполяційні методи, які дозволяють знаходити додаткові точки, що призводить до зростання похибки вимірювання, оскільки не завжди правильно знаходяться початкові точки відліку для виконання інтерполяції [10-12].

Тому для підвищення точності визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми доцільно використати субпіксельний метод визначення координат контурних точок об'єкта з застосуванням щупа для локалізації крайової точки [7].

Отже процес визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми на зображенні включає три основні етапи: візуалізація об'єкта, знаходження субпіксельних координат точок досліджуваного об'єкта та визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом.

На першому етапі здійснюється візуалізація об'єкта за допомогою оптичної системи мікроскопа та щупа. При вимірюванні геометричних параметрів мікрооб'єктів сферичний наконечник щупа підводиться до досліджуваного об'єкту та завдяки фотоматриці фіксується зображення, яке подається на комп'ютер.

На другому етапі знаходять субпіксельні координати точок досліджуваного об'єкту. Для підвищення точності процесу визначення геометричних параметрів об'єктів необхідно враховувати обмеження, що обумовлені дискретною структурою піксельної сітки та визначити координату крайової точки всередині пікселя (рис. 3).

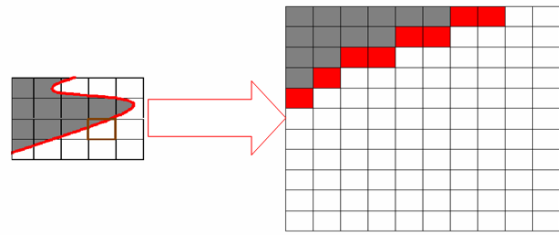
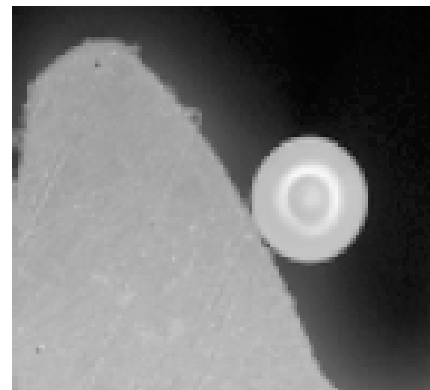
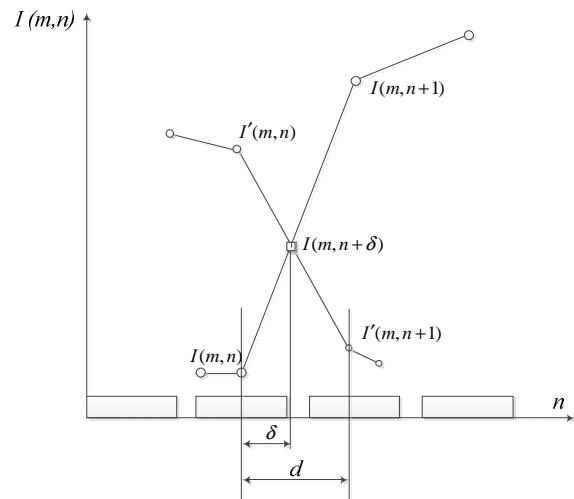


Рисунок 3 – Перехід від координатної сітки «піксел» до координатної сітки «субпіксел»

Знаходження субпіксельних координат краю досліджуваного об'єкта зводиться до знаходження спільної точки зображення краю щупа та межі зображення об'єкта (рис. 4).



а)



б)

а)- зображення дотику деталі та щупа;  
б)- модель точки дотику деталі та щупа

Рисунок 4 – Знаходження субпіксельних координат межі об'єкта на зображенні

Положення точки перетину (рис. 4, б), визначається за допомогою системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{I(m, n + \delta) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I(m, n + \delta)} = \frac{\delta}{d - \delta}; \\ \frac{I(m, n + \delta) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I(m, n + \delta)} = \frac{I'(m, n) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I'(m, n + 1)}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $d$  – відстань між пікселами;  $\delta$  – субпікселне зміщення.

З системи рівнянь, субпікселне зміщення координати відносно центра піксела знаходиться як

$$\delta = \frac{I'(m, n) - I(m, n)}{(I(m, n + 1) - I'(m, n + 1)) + (I'(m, n) - I(m, n))} \cdot d. \quad (2)$$

На третьому етапі здійснюється визначення геометричних параметрів об'єктів з субпікселною точністю (рис. 5). Одним з основних геометричних параметрів є площа, оскільки характеризує загальні розміри об'єкта. При контурному способі обчислення площа характеризується областю, що обмежена замкнутим контуром.

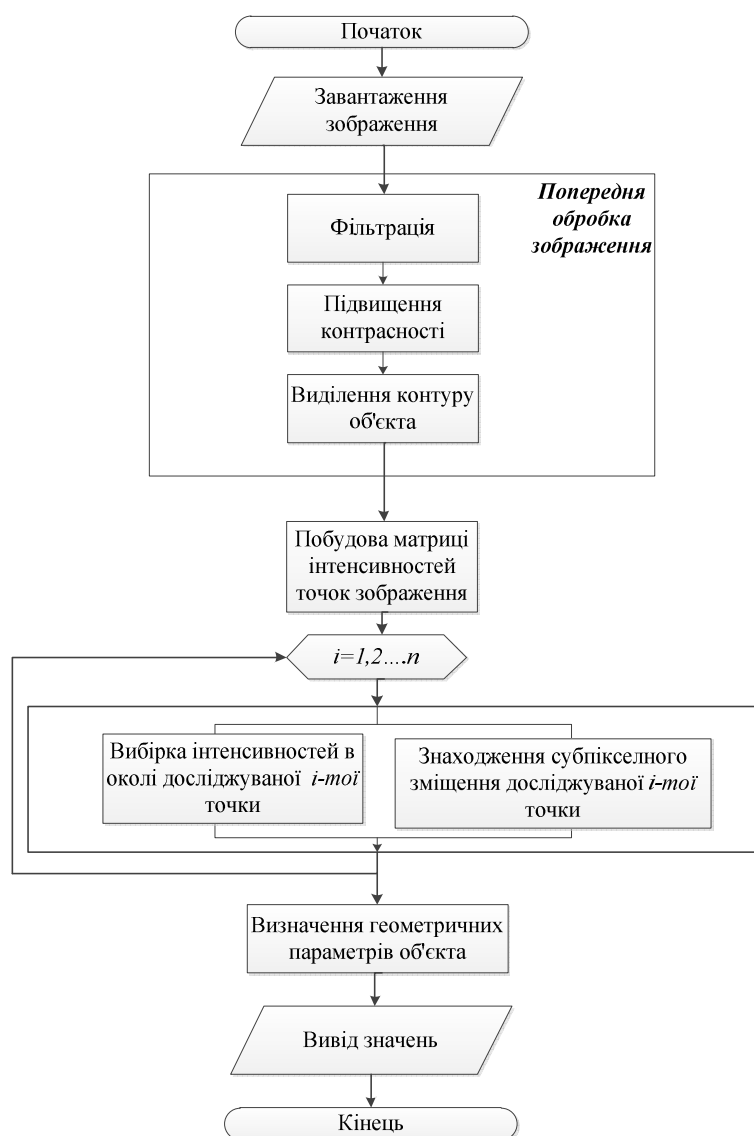


Рисунок 5 – Алгоритм визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми

Площа визначається як сума всіх пікселів об'єкта за винятком граничних, з урахуванням субпіксельної поправки [6]

$$S = \sum_{\text{об'єкт}} \begin{cases} \frac{1}{2} \text{unit} - \text{для діагональних пікселів,} \\ \text{unit} - \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3)$$

де  $S$  – площа об'єкта на зображенні;  $\text{unit}$  – відстань між центрами пікселів.

А з врахуванням субпіксельної точності площа об'єкта буде визначатися як

$$S = \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit}. \quad (4)$$

Діаметр досліджуваного об'єкта, з урахуванням субпіксельного зміщення, визначається за формулою

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit}}{\pi}}. \quad (5)$$

Форму об'єкта описують кілька характеристик. Одна з них – це компактність. Вона визначається як відношення площі об'єкта до площі кола з однаковими периметрами, оскільки коло вважається об'єктом самої компактної форми, для нього компактність дорівнює 1. Компактність, з урахуванням субпіксельного зміщення, визначається як

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{P^2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit}}{P^2}, \quad (6)$$

де  $P$  – периметр об'єкта, що рівний периметру кола.

Еліптичність  $\epsilon$  – відношенням довжин ортогональної осі до основної. Результат обчислення може змінюватися від 0 до 1. Еліптичність, в основному, обчислюється за допомогою центральних моментів  $i$ , з урахуванням субпіксельного зміщення, визначається за формулою

$$E = \frac{(\mu_{02} - \mu_{20})^2 + 4 \cdot \mu_{11}}{S} = \frac{(\mu_{02} - \mu_{20})^2 + 4 \cdot \mu_{11}}{\sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit}}, \quad (7)$$

де  $\mu_{02}$ ,  $\mu_{20}$  та  $\mu_{11}$  – центральні моменти. Просторові моменти визначаються як:

$$\mu_{pq} = \sum_p \sum_q x^p y^q, \quad (8)$$

де  $x, y$  – координати точок;  $p, q$  – визначають порядок моментів.

Для протяжних об'єктів в поздовжньому перетині багато вимірювань мають свою специфіку, наприклад довжина звичайного об'єкта визначається як максимальна відстань між двома точками об'єкта, в той же час основний фізичний зміст мають довжина й товщина розгорнутого, витягнутого об'єкта [6]. Така довжина ( $L$ ) відповідає розмірам середньої лінії, а товщина ( $W$ ) – мінімальній відстані між двома граничними точками всередині об'єкта і, з урахуванням субпіксельного зміщення, може визначатися як

$$L = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16 \cdot S}}{4} = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16 \cdot \left( \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit} \right)}}{4}, \quad (9)$$

$$W = \frac{S}{L} = \frac{4 \cdot \left( \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit} \right)}{P - \sqrt{P^2 - 16 \cdot \left( \sum_{\text{об'єкт}} \left( \frac{1}{2} \pm \frac{\delta}{10} \right) \text{unit} \right)}}. \quad (10)$$

Для досягнення високої якості вимірювання необхідно забезпечити адекватність запропонованого методу. Сумарна похибка, що виникає під час вимірювального перетворення, є функцією складових [9]:

$$\Delta_{\Sigma} = f(\Delta_{cd}, \Delta_{kv}, \Delta_{ui}, \Delta_e), \quad (11)$$

де  $\Delta_{cd}$  – похибка субпіксельної дискретизації;  $\Delta_{kv}$  – похибка квантування;  $\Delta_{ui}$  – похибка спотворень (шум, нелінійність перетворення);  $\Delta_e$  – похибка відновлення.

Вказані складові похибки мають різну природу походження й для повного метрологічного аналізу необхідно їх оцінити і мінімізувати.

Похибка дискретизації зображення залежить від таких факторів: величини кроку дискретизації; статичних властивостей зображення та способу відновлення зображення (або виду функції інтерполювання). При довірчій ймовірності  $p \approx 0,997$  похибку дискретизації зображення об'єкта запишемо таким чином [10]:

$$\Delta_{cd,p} = \sqrt{3} \epsilon_x K_{\sigma} n \Delta_{cn} S_d = \frac{v \left[ \text{erf} \left( \frac{v \Delta I \sqrt{\pi}}{(I_{\max} - I_{\min}) \beta} \right) \right]^{-1}}{\sqrt{2}}, \quad (12)$$

де коефіцієнт розмиття краю

$$K_{\sigma} = \frac{1}{H_c} = \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{v}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]^{-1} = \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{v\Delta I\sqrt{\pi}}{(I_{\max} - I_{\min})\beta} \right) \right]^{-1}. \quad (13)$$

У випадку субпіксельної дискретизації примежової кривої зображення об'єкта методом на основі низькочастотної фільтрації маємо  $\Delta_{\sigma, P} = 0,0891$  мкм, що відповідає 0,011 піксела.

Під час аналогово-цифрового перетворення відеосигналу відбувається його квантування. Максимальна похибка квантування [11]

$$\varepsilon_{f, \max} = \Delta_f / 2, \quad (14)$$

де  $\Delta_f$  – крок квантування.

Якщо зображення піддається квантуванню за допомогою загально прийнятного підходу байт на відлік, то весь діапазон функції пропускання відповідає 0 – 255 біт. Тоді максимальна похибка квантування дорівнює 0,007 піксела [10]. А при субпіксельному вимірюванні похибка квантування становить  $0,07 \cdot 10^{-2}$  піксела.

Значення відносних дисперсій шумів становлять відповідно  $\sigma_i^2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\sigma_d^2 = 6,2 \cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_v^2 \approx 0$  для відносної інтенсивності  $I_0 \approx 0,5$  фону, що оточує зображення об'єкта [10]. Тоді

$$\Delta_{\sigma, P=0.9} = 1.6\sigma\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_i^2(n^1) + \sigma_d^2 + \sigma_v^2(n^1)}. \quad (15)$$

Довірче значення похибки вимірювання крайової точки зображення тестового об'єкта, викликаних шумами становить  $\Delta_{\sigma, P=0.9} = 0,078$  піксела.

В оптико-електронних системах, які призначені для вимірювання геометричних параметрів об'єктів на зображенні, дискретизація зображення відбувається двічі. Спочатку відбувається аналогова дискретизація зображення за допомогою матриці відеосенсорів на вході відеокамери. Потім відбувається цифрова дискретизація аналогового сигналу. При цьому можна припустити, що форма краю цього сигналу не зазнає суттєвих змін порівняно з формою краю зображення об'єкта

$$(\Delta_{\varepsilon})_2 = \sqrt{3}\varepsilon_d n\Delta + \frac{p_d K_{\sigma, d}}{\sqrt{2}}, \quad (16)$$

де  $\varepsilon_d$  – СКВ похибки дискретизації і відновлення аналогового дискретизованого сигналу, як для білінійної інтерполяції, визначається  $\varepsilon_d^2 \approx 2\sigma_f^2$ ;  $p_d$  – крок цифрової дискретизації сигналу;  $K_{\sigma, d}$  – коефіцієнт розмиття краю аналогового дискретизованого сигналу.

Так, у випадку дискретизації тестового зображення відеоматрицею маємо  $\Delta_{\sigma, P=0.9}^{\Sigma} = 0.14 \times 10^{-4}$  піксела.

Отже, сумарна похибка, що виникає під час вимірювального перетворення складає 0,089 піксела.

## ВИСНОВОКИ

Запропоновано алгоритм визначення та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми шляхом їх візуалізації та знаходження субпіксельних координат на зображенні. Основним етапом процесу є знаходження субпіксельних координат точки, що зводиться до локалізації спільної точки зображення краю щупа та межі зображення об'єкта. Обчислено сумарну похибку вимірювального контролю, яка виникає під час вимірювального перетворення та включає, такі складові, як: похибка дискретизації, квантування, відновлення зображення та похибка, що викликана шумами. Таким чином сумарна похибка, що виникає під час вимірювального перетворення складає 0,089 піксела.

1. Ральф Кристоф, Ханс Йоахим Нейманн *Технология мультисенсорных координатных измерений* / Р. Кристоф, Х. Нейманн, изд. 2, Германия. – 2004 г. – 148 с. 2. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. *Методы и средства неразрушающего контроля качества: Учеб. пособие для инженерно-техн. спец. вузов.* – 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. Дорин В.И. *Точная штамповка деталей оптико-механических приборов* / В.И. Дорин. - М.: Оборонгиз. - 1958. - 459 с. 6. Абрамейко С.В. *Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине* / С.В. Абрамейко, А.М. Недзьведь. – Мн.: ОИПИ

НАН Беларуси, 2005. – 156с. – ISBN 985-6744-09-1. 7. Білінський Й.Й. Метод знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманих тактильно-оптичним сенсором / Й.Й. Білінський, І.В. Сухоцька, С.В. Юкиш // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – вип. 3. – 2014. – С.94-99. – ISSN 1995-0519. 8. Бондаренко И.Д. Принципы построения фотоэлектрических автоколлиматоров / И.Д. Бондаренко. – Мн.:Изд-во «Университетское» . – 1984. – 190 с. 9. Зуйков А. А. Повышение точности координатных измерений геометрических параметров объектов в компьютерной микроскопии с дополнительным телом в зоне измерения: автореферат, Россия, 2013 г., 22с. 10. Білінський Й.Й. Методи обробки зображення в комп'ютеризованих оптико-електронних системах: монографія, Вінниця: ВНТУ, 2010 с.,-

272 с. 11. Соифер В. А. Методы компьютерной обработки изображений / В.А. Соифер– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с. 12. Bilynsky Iosip The Method of Sub-pixel Accuracy for Coordinate Measuring Systems/ Iosip Bilynsky, Irina Sukhotska// Proceedings of the International Conference TCSET'2014 “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science”, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1, 2014,- P 640.

**Поступила в редакцію 18.05.2015р.**

**Рекомендували до друку: докт. фіз.-мат. наук, проф. Снарський А. О., докт. техн. наук, проф. Порєв В. А.**