

УДК 621.307.13

## ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МІКРООБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

<sup>1)</sup>Маркін М. О., <sup>1)</sup>Маркіна О. М., <sup>2)</sup>Агінський Ю. А.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна; <sup>2)</sup>Вища технічна школа Бремена, м.Бремен, Німеччина

В статті проведено аналіз напрямів досліджень, спрямованих на підвищення точності вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійної інформаційно-вимірювальної системи (ТІВС). Для підвищення точності вимірювання за допомогою ТІВС запропоновано використовувати матрицю корекції при різних значеннях освітленості в робочому діапазоні ТІВС.

Обґрунтовано підхід до формування вимірювального сигналу, який також дозволить зменшити похибку вимірювання геометричних параметрів об'єкту.

**Ключові слова:** телевізійна інформаційно-вимірювальна система, ТІВС, геометричні розміри.

### Вступ

Технологічний рівень суспільства в сьогоdnішньому світі визначають, головним чином, високі технології, наприклад, матеріалознавство як база для отримання нових виробів та матеріалів (надчистих, композитних та із заданими властивостями).

Очевидно, що розроблення принципово нових матеріалів та виробів вимагає створення адекватних засобів дослідження та контролю їхнього структурного стану. Вже сьогодні одночасно із традиційними засобами мікроскопії (світлової, електронної) швидко розвиваються телевізійні комп'ютеризовані засоби, які забезпечують формування, обробку і подальший кількісний аналіз широкого спектру характеристик різноманітних об'єктів.

Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС) фактично знаменують собою новий рівень вимірювальних технологій і потенційно найбільше відповідають сучасним вимогам щодо вимірювання геометричних, динамічних та амплітудних параметрів багатьох об'єктів та технологічних процесів.

Сьогодні телевізійні вимірювальні засоби використовуються для контролю виробництва матеріалів із заданими властивостями, в технології очищення кристалів, для медичної діагностики захворювань, для аналізу продуктів харчування, у хімічній і нафтохімічній промисловості, для аналізу субмікронних структур тощо.

Телевізійні вимірювальні засоби можуть бути використані для потреб наномеханотроніки – спеціального розділу нанотехнологій, який займається створенням прецизійних приладів формування та керування рухом (керування рухом космічних наземних та супутникових антен, маніпуляторів для складних мікрохірургічних операцій та технологічних обробляючих центрів, в сучасних біотехнологіях тощо).

Можливе також використання телевізійних вимірювальних засобів в багатьох промислових технологіях, наприклад, в машинобудуванні для контролю процесу виготовлення деталей з унікальними точностями, в електронній промисловості при виготовленні інтегральних мікросхем, для контролю з'єднань оптичних модулів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Застосування телевізійних засобів вимірювання та створених методів і алгоритмів може забезпечити зростаючі вимоги до контролю технологій з'єднання прецизійних деталей в приладобудуванні, а в перспективі і технологій виробництва нових матеріалів та матеріалів із заданими властивостями.

Варто врахувати те, що використання універсальних і тому надзвичайно дорогих комп'ютерно-телевізійних мікроскопів закордонного виробництва (К. Zeiss Opton, Quantimet, "Нітасні"), не завжди доцільне в тих галузях науки та промисловості, які динамічно розвиваються, і тому постійно висувають все нові й нові вимоги до засобів вимірювання.

Метою статті є обґрунтування напрямів досліджень, спрямованих на створення вітчизняних телевізійних вимірювальних засобів з покращеними характеристиками.

### **Аналіз проблем вимірювання геометричних параметрів за допомогою ТІВС**

Незважаючи на значні досягнення, потенційні можливості телевізійних вимірювальних систем в багатьох задачах повністю не реалізуються, головним чином, внаслідок недосконалості методології їх використання. Можна назвати кілька причин такого положення.

По-перше, на сьогодні повністю вичерпали свої можливості існуючі методи поліпшення характеристик телевізійних вимірювальних приладів, зокрема, методи корекції нерівномірності чутливості ПЗЗ-матриць, що разом з відсутністю достовірних експериментальних результатів негативно позначається на точності вимірювання в мікро- та нанодіапазоні.

По-друге, існують значні розходження в методиках оцінки характеристик телевізійних вимірювальних приладів взагалі та в методиках оцінки їх потенційних можливостей при вирішенні задач вимірювання геометричних, динамічних та амплітудних параметрів [1].

Якщо ж врахувати ще й динаміку розвитку операційних систем та програмних засобів, вартість яких складає основну частку вартості телевізійних вимірювальних приладів, то стає очевидною потреба нової концепції побудови телевізійного мікроскопа, що враховує як потреби сучасного матеріалознавства, так і можливість оперативного реагування на появу нових технологічних вимог та більш досконалих апаратно-програмних засобів інформаційно-вимірювальної техніки.

Сучасний рівень розвитку телевізійних систем і технологій їх виробництва у світі досяг однаково високого рівня. І тому істотне підвищення точності

телевізійних вимірювальних засобів можливе тільки на шляху вдосконалення методології застосування, створення спеціалізованих методик, алгоритмів для підвищення точності визначення тих характеристик телевізійних систем, які є важливими з точки зору їх використання як засобів вимірювання.

Першим кроком на шляху вдосконалення методології застосування телевізійних вимірювальних засобів має бути визначення умов, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки (обсяг і час формування виборки відповідно  $10^{-7}$  і  $10^{-3}$ с, малі розміри елемента розкладу зображення 5 – 10мкм) можуть бути реалізовані в рамках конкретної задачі.

Свого часу в роботі [2] було звернено увагу на необхідність виваженого підходу до питань застосування телевізійних вимірювальних засобів, що дозволило визначити першочергові напрями підвищення ефективності їх застосування, тобто, сформулювати умови, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки більш повно трансформуються в таку важливу характеристику як точність вимірювання геометричних параметрів.

По-перше, сьогодні практично повністю вичерпали свої можливості існуючі методи корекції нерівномірності чутливості світлоелектричний перетворювач (СЕП), що негативно позначається на точності вимірювання геометричних та енергетичних параметрів. (Поняттям "нерівномірність чутливості" визначається неідентичність властивостей елементів розкладу, що утворюють СЕП). Серед чинників, що впливають на точність визначення геометричних параметрів, нерівномірність чутливості (іноді вживають термін "геометричний шум СЕП") заслуговує особливої уваги, оскільки при однаковій освітленості СЕП сигнали будь-яких піксел мають бути однаковими, тобто  $C_{ij} = C_{pk}$  при  $E_{ij} = E_{pk}$ . Але, практично для всіх СЕП фіксуються випадки, коли  $C_{ij} \neq C_{pk}$  при  $E_{ij} = E_{pk}$ . Можлива також ситуація, що  $C_{ij} = C_{pk}$  при  $E_{ij} \neq E_{pk}$ .

Кількісно нерівномірність чутливості визначається в межах поля зображення чи певної його ділянки такою формулою

$$H = \frac{\Delta C}{2C_c}, \quad (1)$$

де  $\Delta C$  – різниця між мінімальним  $C_{\min}$  і максимальним  $C_{\max}$  значеннями сигналу;  $C_c$  – середнє значення сигналу при постійній освітленості СЕП.

Існуючі методики компенсації нерівномірності чутливості базуються на експериментальному визначенні локальних значень чутливості з подальшим їх використанням при обробці сигналу.

Найчастіше для компенсації нерівномірності чутливості матричних СЕП використовується метод програмної корекції [3], який полягає в тому, що при еталонній освітленості формують двовимірну матрицю значень сигналів  $C_{ij}^0$ , визначають максимальне значення сигналу  $C_{\max}^0$  і утворюють матрицю вагових коефіцієнтів

$$V_{ij} = \frac{C_{\max}^0}{C_{ij}^0} \quad (2)$$

Надалі сигнал із елемента розкладу визначається за формулою

$$C_{ij}^* = V_{ij} \cdot C_{ij} \quad (3)$$

де  $C_{ij}$  – вимірне значення.

Такий метод корекції нерівномірності чутливості дозволяє суттєво знизити нерівномірність.

В принципі, формування компенсуючої матриці можна виконати для сукупності значень освітленості в робочому діапазоні, але розробка такої методики виходить за межі задач дослідження.

Чинники, які впливають на точність вимірювання геометричних параметрів об'єкту, обумовлені характеристиками технічних засобів, а також особливостями формування зображення об'єкту.

Зрозуміло, що кожний компонент телевізійних вимірювальних засобів впливає певним чином на точність визначення геометричних параметрів зображення. Обмежимося розглядом тих компонентів, які входять в склад структурної схеми засобів і можуть бути головними джерелами похибок визначення геометричних параметрів.

Аналіз літературних джерел [4] дає всі підстави зробити висновок про те, що найбільший внесок в сумарну похибку вимірювання координати вносять похибки, обумовлені шумами СЕП (власним та геометричним), методичні похибки визначення координат та похибки аналого-цифрового перетворення (АЦП), що дозволяє віднести їх до головних чинників, які впливають на точність визначення геометричних параметрів зображення.

Отже, сумарна похибка вимірювання координати може бути визначена за формулою

$$\Delta P = \sqrt{\Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{г}}^2 + \Delta_{\text{ацп}}^2 + \Delta_{\text{м}}^2} \quad (4)$$

де  $\Delta_{\text{ш}}^2$  – складова похибки, обумовлена власним шумом СЕП;  $\Delta_{\text{г}}^2$  – складова похибки, обумовлена геометричним шумом СЕП;  $\Delta_{\text{ацп}}^2$  – складова похибки, обумовлена шумом АЦП;  $\Delta_{\text{м}}^2$  – складова похибки, обумовлена методикою визначення параметру об'єкту.

Похибка АЦП складаються з інструментальної (нестабільність частоти та нелінійність характеристики), похибок дискретизації та квантування. Питання, пов'язані з похибками АЦП та їх впливом на сьогодні є достатньо вивченими, тому можна скористатися відомими результатами, наприклад [4].

На етапі існування телевізійного зображення у вигляді цифрових масивів можливі методичні похибки, які обумовлюються алгоритмом визначення заданої характеристики, що потребує детального аналізу конкретних алгоритмів.

Якщо обумовлена нерівномірністю чутливості похибка буде повністю скомпенсованою (а скомпенсувати геометричний шум можливо при застосуванні досконалих експериментальних пристроїв для формування еталонної освітленості), а координати меж об'єкту є випадковими величинами із нормальним законом розподілу, то сумарна похибка вимірювання координати об'єкту визначається за формулою

$$\Delta p = \sqrt{\Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{апп}}^2 + \Delta_{\text{м}}^2}. \quad (5)$$

Відповідно, сумарна похибка вимірювання лінійного розміру може бути визначена за формулою

$$\Delta h = \sqrt{2} \Delta p \quad (6)$$

### Дослідження особливостей формування вимірювального сигналу

Загальна методика застосування телевізійних вимірювальних засобів полягає в формуванні зображення, перетворенні його в цифровий код та використанні алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання відповідних параметрів. Водночас, такі засоби надають унікальну можливість провадити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням завдяки аналізу і власного випромінювання, і того, що відбилося або пройшло через об'єкт.

При використанні телевізійних засобів для вимірювання геометричних параметрів можливі значні розходження в методиках оцінки їх потенційних можливостей за умови вирішення конкретних задач. У більшості випадків приймають, що лінійне розрізнення обернено пропорційне лінійному розміру пікселя, а розміри пікселя визначаються типом СЕП і можуть бути в діапазоні від одиниць до десятків мікрометрів. Власне, саме ця обставина разом з малою тривалістю формування сигналу всієї матриці є принциповою особливістю телевізійних вимірювальних засобів, яка вже зараз відкриває перед ними широкі перспективи впровадження в наукові дослідження та в технологічну практику.

У той же час існує клас задач, наприклад, вимірювання розмірів контрастних мікрооб'єктів або вимірювання мікрозміщення об'єкту від заданого положення, коли вимірювання необхідно провадити з більшою точністю.

Виконані в [5] дослідження показали, що точність визначення координати межі зображення мікрооб'єкту, а отже і його розміру, можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування вимірювального сигналу.

Нехай для довільного пікселя в момент часу  $t$  відношення сигнал/шум

$$c_1 = \frac{C(t)}{\sigma} \quad (7)$$

де  $\sigma$  – значення шумового сигналу;  $C(t)$  – сигнал.

Сигнал  $C(t)$  може бути зареєстрований за умови

$$c_3 < c_1 - c_2, \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{C_{\Pi}(t)}{\sigma}, \quad (9)$$

де  $C_{\Pi}(t)$  – поріг реєстрації сигналу,

$$c_3 = \frac{C_{\text{ш}}(t)}{\sigma}, \quad (10)$$

де  $C_{\text{ш}}(t)$  – реалізація шуму.

Шум піксела  $C_{\text{ш}}(t)$ , а також приведені значення  $c_3$  є випадковими величинами. Повною характеристикою випадкової величини  $c_3$  є функція розподілу, яка визначає ймовірність того, що випадкова величина приймає значення менше заданого. Оскільки шумовий сигнал утворюється внаслідок одночасної дії кількох незалежних чинників, жоден з яких не домінує, то шум СЕП підкоряється нормальному закону розподілу.

Наприклад, при  $c_2 = 1$ , тобто при  $C_{\Pi}(t) = \sigma$  значення ймовірності реєстрації  $P = 0,99$  буде забезпечуватись при  $C(t) = 3,2\sigma$ . Якщо такий сигнал буде сформований частиною піксела і водночас  $C(t) \ll C_0(t)$ , то кількість ділянок, що можуть бути розрізнені в межах піксела з лінійним розміром  $\Delta$ , як окремі

$$N_1 = \frac{A_0(t)}{3,2\sigma}. \quad (11)$$

Зазначимо, що експериментальні дослідження підтверджують ефективність даної методики. Наприклад, в [7] вказується, що гранична похибка вимірювання координати для сучасних ПЗЗ може бути зменшена до величини 1 мкм. Використання даної методики формування вимірювального сигналу дозволило зменшити похибку вимірювання геометричних параметрів в задачі визначення коефіцієнту міжфазного натягу [8].

У той же час практична реалізація такого підходу може бути пов'язана із значними труднощами внаслідок цілого ряду причин, серед яких основну роль відіграють власні шуми, флуктуації вхідного сигналу, якість оптики тощо.

Дійсно, лінійне розрізнення в одиниці мкм є одного порядку з тим, яке визначається для об'єктиву за критерієм Релея. А це вже вимагає окремих досліджень і оптики з високим ступенем корекції аберацій.

### Висновки

1. Проведено аналіз досліджень, спрямованих на підвищення точності вимірювання геометричних параметрів за допомогою ТІВС.
2. Запропоновано використовувати матрицю корекції при різних значеннях освітленості  $E_1, E_2, \dots, E_k$  в робочому діапазоні ТІВС.
3. Обґрунтовано підхід до формування вимірювального сигналу, який дозволить зменшити похибку вимірювання геометричних параметрів об'єкту.

### Література

1. Маркін М. О. Оцінка точності вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем / М. О. Маркін, О. М. Маркіна // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2009. – Вип. 38. – С. 102 - 106.
2. Порєв В. А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів / В. А. Порєв, Г. В. Порєв // Наукові вісті НТУУ "КПІ". - 2001. - № 1. - С. 56 – 61.
3. Порєв Г. В. Програмна корекція в телевізійних системах автоматизованого контролю / Г. В. Порєв, В. І. Лагодний // Приборостроение-96. - Том 1. - Судак: АІНУ. - 1996. - С. 18.
4. Телешов Г. В. Погрешность определения линейных размеров в системах обработки изображения на фоточувствительных приборах с зарядовой связью / Г. В. Телешов // Изв. вузов. Приборостроение. - 1995. - №11 – 12. – Т. 38. - С. 44 – 46.
5. Порєв В. А. Імовірносний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю / В. А. Порєв, Г. В. Порєв, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2002. - № 8. - С. 40 – 43.
6. Маслюков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-механическая промышленность. - 1990. - № 4. - С. 70 – 73.
7. Порєв Г. В. Вимірювання геометричних розмірів обертової краплі за допомогою телевізійної системи контролю / Г. В. Порєв, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5. - С. 87 – 91.

Надійшла до редакції  
15 листопада 2013 року

© Маркін М. О., Маркіна О. М., Агінський Ю. А., 2013

УДК536.532

## ОЦІНКА ТРИВАЛОСТІ САМОПОВІРКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З КЕРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Кочан О. В.

Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна

У статті показано недоліки розповсюджених давачів високих температур – термоелектричних перетворювачів (ТЕП) та перспективність підвищення точності вимірювання температури при використанні ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). Також описано сам метод та сформульовано мету статті – дослідження часових параметрів процесу зміни температури вздовж електродів головної термопари ТЕП з КПТП для оцінки тривалості процедури його самоповірки. Крім того, запропоновано сам метод дослідження шляхом аналізу теплових потоків нагрівачів ТЕП з КПТП для оцінки параметрів перехідного процесу в безконечному циліндричному нагрівачі з поверхневою теплоізоляцією. Аналогічно досліджено параметри процесу охолодження, а також розраховано криві нагріву та охолодження його макету. Вказано на те, що тривалість самоповірки веде до виникнення додаткової похибки, та показано шляхи її зменшення.

**Ключові слова:** вимірювання температури; метрологічна повірка; термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля.

### Вступ

Хоча термоелектричні перетворювачі (ТЕП) є найбільш розповсюдженими давачами (первинними вимірювальними перетворювачами, сенсорами) температури (особливо для температур вище 500°C) [1], вони мають низку суттєвих