

УДК 621.307.13

**В.А. Порєв, М.О. Маркін**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем;E-mail: [prof@barvinok.net](mailto:prof@barvinok.net)**ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В БІСПЕКТРАЛЬНІЙ  
ТЕЛЕВІЗІЙНІЙ ПІРОМЕТРІЇ****Анотація**

*Порєв В.А., Маркін М.О. Похибки вимірювання температури в біспектральній телевізійній пірометрії. Розроблена математична модель вимірювального сигналу телевізійного біспектрального пірометра. Встановлені аналітичні залежності між похибками вимірювання температури та основними характеристиками телевізійного біспектрального пірометра.*

**Ключові слова:** температура, вимірювання, біспектральний пірометр.

**Загальна постановка проблеми.**

На сьогодні не викликає заперечень твердження, що ефективність високотемпературних технологій може бути забезпечена тільки при дотриманні технологічних вимог щодо найважливішого параметру — температури, а це в принципі неможливо без належних технічних засобів вимірювання температури (пірометрів). При цьому характеристики технічного засобу повинні задовольняти вимоги щодо точності вимірювання температури протягом тривалості технологічного циклу.

Зростаючі потреби високих технологій в адекватних засобах контролю сприяли становленню та розвитку нового напрямку неруйнівного контролю — телевізійної пірометрії. При цьому впровадження телевізійних засобів дозволило не тільки вирішити значну кількість важливих прикладних задач, але в свою чергу, супроводжувалося вдосконаленням відповідних методів та засобів.

Сучасні телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС) дозволяють одночасно забезпечити найвищі серед усіх інших інформаційно-вимірювальних засобів показники щодо максимального формату виборки, мінімального часу її формування та найвищого просторового розрізнення, що надає їм суттєві переваги в тих випадках, коли саме така сукупність показників є визначальною. Безальтернативною перевагою ТІВС є також унікальна можливість забезпечити вимірювання температур по будь-якій траєкторії в реальному часі.

Але деякі питання, важливі з точки зору забезпечення точності вимірювання високих температур телевізійними засобами, не вирішені і до цього часу. Одним із таких питань є проблема створення телевізійних біспектральних пірометрів (БСП) [1], які потенційно мають значні переваги перед монохроматичними, зокрема, по точності вимірювання температури в умовах дефіциту апріорних даних щодо значень коефіцієнту випромінювальної здатності.

До основних причин такого положення можна віднести слідуючі.

По-перше, на сьогодні відсутні адекватні фізичним процесам математичні моделі вимірювального сигналу телевізійного БСП, на базі яких можлива розробка нових методів вимірювання та методик оцінки похибок. Зрозуміло, що відсутні також і достовірні оцінки похибок телевізійного БСП.

Невирішеність цих питань перешкоджає активному впровадженню телевізійних БСП для вимірювання високих температур, звужує сферу застосування телевізійних засобів, що

негативно відбивається на розвитку високотемпературних технологій. Вищенаведене обумовлює актуальність та наукову новизну досліджень, спрямованих на створення ефективної методології контролю температурних полів різноманітного походження.

#### Постановка задачі дослідження.

Метою даної роботи є дослідження факторів, які визначають точність вимірювання температури в біспектральній пірометрії.

Основною задачею роботи є створення математичної моделі сигналу телевізійного БСП та розробка на її основі методик оцінки похибок вимірювання температури, обумовлених нерівномірністю чутливості СЕП, малими змінами коефіцієнту випромінювальної здатності та похибкою визначення еквівалентної довжини хвилі (ЕкДХ).

#### Математична модель вихідного сигналу БСП.

Фізично робота телевізійного пірометра полягає в послідовності перетворень потоку випромінювання, яке попадає ПЗЗ-матрицю.

Кінцевою ланкою цієї послідовності перетворень є цифровий сигнал, пропорційний значенню вхідного сигналу, який виникає при взаємодії випромінювання з первинним вимірювальним перетворювачем (ПЗЗ-матрицею).

Формування сигналу і перетворення сигналу в біспектральній пірометрії відбувається в такій послідовності. Спочатку світловий потік обмежується за рахунок вибору світлового діаметра об'єктива. Одночасно здійснюється спектральна фільтрація потоку середовищем та елементами оптичної системи.

Далі формується функція розподілу спектральної освітленості матриці  $E(\lambda)$ , яка перетворюється в масив зарядів пікселів і формується вихідний (пірометричний) сигнал  $A$ .

Відповідно до цієї моделі квазімонохроматичні сигнали  $A(\lambda_1)$ ,  $A(\lambda_2)$  визначаються наступними співвідношеннями:

$$A(\lambda_1) = \frac{kR}{t_K} \varepsilon(\lambda_1, T) \frac{C_1}{\lambda_1^5} \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda_1) \tau_o(\lambda_1) \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right), \quad (1)$$

$$A(\lambda_2) = \frac{kR}{t_K} \varepsilon(\lambda_2, T) \frac{C_1}{\lambda_2^5} \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda_2) \tau_o(\lambda_2) \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right), \quad (2)$$

де  $D/f'$  – відносний отвір об'єктива;  $\tau_c$  – спектральний коефіцієнт пропускання середовища;  $\tau_o$  – спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи  $t_K$  – час комутації,  $R$  – електричний опір,  $T$  – температура джерела,  $\varepsilon(\lambda_1)$ ,  $\varepsilon(\lambda_2)$  – коефіцієнти випромінювальної здатності поверхні тіла на довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ ,

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}, C_1 = 3,74 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{м}^2}.$$

Біспектральна телевізійна пірометрія вирізняється тим, що сигнали формуються одразу у двох спектральних діапазонах, а пірометричний сигнал є їх часткою, що дозволяє в більшості випадків уникнути похибок, пов'язаних з визначенням коефіцієнту випромінювальної здатності, а в підсумку підвищити точність вимірювання температури.

Отже, математична модель вихідного сигналу БСП:

$$A = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} \exp\left[-\frac{c_2}{T} \frac{1}{\lambda_{ек}}\right], \quad (3)$$

де  $\lambda_{ек}$  – еквівалентна довжина хвилі,  $\lambda_{ек} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ .

На базі математичної моделі вихідного сигналу БСП проведено детальне дослідження похибок вимірювання температури в телевізійній біспектральній пірометрії.

#### **Аналіз похибок вимірювання температури в телевізійній пірометрії.**

В загальному випадку в телевізійній пірометрії отримане в результаті вимірювання значення температури є функцію багатьох змінних

$$T = T(A_{Ш}, A_H, \lambda_{ек}, \varepsilon, \tau_c, \tau_{oc}, M_B) \quad (4)$$

$A_{Ш}$  - шуми електронних блоків (формується весь час вимірювання);  $A_H$  - нерівномірність чутливості ПЗЗ-матриці (геометричний шум);  $\lambda_{ек}$  - ефективна в моноспектральній пірометрії (еквівалентна в біспектральній пірометрії) довжина хвилі;  $M_B$  - відбите від об'єкту випромінювання сторонніх джерел;  $\varepsilon$  - коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні об'єкту;  $\tau_c$  - коефіцієнт пропускання середовища;  $\tau_{oc}$  - коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Зрозуміло, що кожен із аргументів (4) певним чином впливає на формування похибки  $\Delta T$ .

В більшості важливих випадків змін значень  $\tau_c$ ,  $\tau_{oc}$  можна знехтувати. Проблема впливу відбитого випромінювання на похибку вимірювання температури є надзвичайно складною і виходить за рамки наших задач.

Відомі рішення [2] стосуються конкретних специфічних задач і не можуть бути механічно перенесені на інші задачі.

В той же час в науково-технічній літературі відсутні результати досліджень впливу еквівалентної довжини хвилі і геометричного шуму на похибку телевізійного біспектрального пірометра, що і визначає актуальність проведення таких досліджень.

На нашу думку, доцільно також проаналізувати вплив можливих змін коефіцієнту випромінювальної здатності на похибку вимірювання температури. Теоретично у методі пірометрії спектрального відношення він скомпенсований. І це спостерігається для більшості прикладних задач.

Але внаслідок того, що при розробці БСП значення  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  фіксуються, не виключається можливість того, що для певного об'єкту саме в цьому спектральному діапазоні  $\varepsilon(\lambda_1)$  не дорівнюватиме  $\varepsilon(\lambda_2)$ .

З врахуванням цих застережень будемо розглядати залежність (4) в такому вигляді

$$T = T(A_H, \lambda_{ек}, \varepsilon) \quad (5)$$

#### **Похибка вимірювання температури, обумовлена нерівномірністю чутливості СЕП.**

Для визначення похибки вимірювання температури, обумовленої нерівномірністю чутливості ПЗЗ-матриці, врахуємо, що в класичній моделі біспектральної пірометрії  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$  і скористаємось формулою (3), записавши її в такому вигляді

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ек}} \frac{1}{\ln\left(\frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)}\right)} \quad (6)$$

Розглядаючи температуру як функцію аргументів  $A(\lambda_1)$  і  $A(\lambda_2)$  після диференціювання формули (6) та переходу до скінчених приростів, для абсолютної похибки отримаємо:

$$\Delta T = \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T^2 \left( \frac{\Delta A_1}{A_1} + \frac{\Delta A_2}{A_2} \right) = \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T^2 4H. \quad (7)$$

В формулі (7) враховано, що нерівномірність чутливості ПЗЗ-матриці визначається виразом

$$H = \frac{\Delta A}{2\bar{A}},$$

де  $\bar{A}$  - середнє значення сигналу в межах матриці при однаковій освітленості,  $\Delta A$  - максимальне відхилення від середнього значення.

Відносна похибка вимірювання температури, обумовлена нерівномірністю чутливості:

$$\delta_T = 4 \cdot \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T \cdot H \quad (8)$$

Отже, відносна похибка вимірювання температури в методі біспектральної телевізійної пірометрії пропорційна температурі і нерівномірності чутливості ПЗЗ-матриці (геометричному шуму).

З формули (8) випливає аналітична залежність, яку можна покласти в основу критерію вибору камери при заданих значеннях похибки  $\delta_T$  і діапазону вимірювання температур:

$$H = \frac{\delta_T C_2}{4 \lambda_{ек} T}. \quad (9)$$

Наприклад, задано, що при вимірюванні температури об'єкту за допомогою БСП в діапазоні від 1300 К до 1400 К похибка не повинна перевищувати 1%. Отримаємо умову для вибору камери  $H < 0,03$ .

**Вплив змін коефіцієнту випромінювальної здатності на похибку вимірювання температури.**

В реальних задачах беззастережне дотримання умов класичній моделі біспектральної пірометрії може бути причиною додаткової похибки.

Наприклад, при використанні БСП для вимірювання температури об'єкту, для якого характер залежності апріорно  $\varepsilon(\lambda)$  невідомий, навіть для близьких значень  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  може статися, що  $\varepsilon(\lambda_1) \neq \varepsilon(\lambda_2)$ .

Для дослідження впливу малих змін коефіцієнту випромінювальної здатності на похибку вимірювання температури логарифмуємо формулу (3):

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ек}} \frac{1}{\left[ \ln \left( \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} \right) - \ln \left( \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} \right) \right]} \quad (10)$$

Для малих змін  $\varepsilon(\lambda)$  можна записати:

$$\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2) + \Delta\varepsilon.$$

Відповідно:

$$\ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right).$$

Оскільки  $\Delta\varepsilon \ll \varepsilon(\lambda_2)$ , то і  $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)} \ll 1$ .

За цієї умови функція  $\ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right)$  може бути представлена рядом Маклорена:

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right) = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (11)$$

Підставивши (11) в (10), отримаємо:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ек}} \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)}\right) - \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)}\right]} \quad (12)$$

Формулу, яка встановлює зв'язок між значенням  $\Delta\varepsilon$  і абсолютною похибкою вимірювання температури, отримаємо після диференціювання формули (12) і переходу до скінчених приростів:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial(\Delta\varepsilon)} \Delta\varepsilon = \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T^2 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon(\lambda_2)} \quad (13)$$

Відносна похибка вимірювання температури визначається так:

$$\delta_T = \frac{\lambda_{ек}}{C_2} T \delta_\varepsilon, \quad (14)$$

де  $\delta_\varepsilon$  - відносна зміна коефіцієнту випромінювальної здатності.

### **Вплив еквівалентної довжини хвилі на похибку телевізійного біспектрального пірометра.**

Поняття еквівалентної довжини хвилі (ЕкДХ) є аналогом поняття ефективної довжини хвилі в квазімонохроматичному методі і широко використовується в теорії і практиці пірометрії. ЕкДХ являє собою деяке умовне значення, що характеризує відгук даної системи на реальний вхідний сигнал, спектр випромінювання якого має складний характер.

Зрозуміло, що з практичної точки зору важливим етапом метрологічного забезпечення проблеми кількісного аналізу температурних полів є визначення значення ЕкДХ телевізійного БСП.

Визначення ЕкДХ БСП забезпечує правомірність використання як самої формули Планка, так і тих співвідношень, що з неї випливають, для вимірювання температури реальних об'єктів та оцінок перетворень сигналів в реальних системах.

Отже, методично обгрунтоване використання БСП для кількісного аналізу температурних полів можливе тільки після експериментального визначення ЕкДХ.

З формули (6) випливає залежність, яка може бути використана для визначення ЕкДХ БСП:

$$\lambda_{ек} = \frac{C_2}{T_0} \frac{1}{\ln \frac{A_0(\lambda_1)}{A_0(\lambda_2)}}, \quad (15)$$

де  $T_o$  - відома температура еталонного об'єкта,  $A_0(\lambda_1)$  і  $A_0(\lambda_2)$  - виміряні експериментально сигнали за умови  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ .

При аналізі впливу похибки визначення ЕкДХ на похибку вимірювання температури врахуємо, що сигнали  $A_0(\lambda_1)$  і  $A_0(\lambda_2)$  вимірюються з похибкою, отже і значення  $\lambda_{ек}$  отримано з похибкою. Для скінчених приростів аргументів  $A_0(\lambda_1)$  і  $A_0(\lambda_2)$  та функції  $\lambda_{ек}$

$$\Delta\lambda_{ек} = \frac{\partial\lambda_{ек}}{\partial A_1} \Delta A_1 + \frac{\partial\lambda_{ек}}{\partial A_2} \Delta A_2 \quad (16)$$

Часткові похідні в формулі (16):

$$\left| \frac{\partial\lambda_{ек}}{\partial A_1} \right| = \frac{T_o}{C_2} \lambda_{ек}^2 \frac{1}{A_1}, \quad \frac{\partial\lambda_{ек}}{\partial A_2} = \frac{T_o}{C_2} \lambda_{ек}^2 \frac{1}{A_2}.$$

Значення похідних підставимо в формулу (16):

$$\Delta\lambda_{ек} = \frac{T_o}{C_2} \lambda_{ек}^2 \left( \frac{\Delta A_2}{A_2} + \frac{\Delta A_1}{A_1} \right), \quad (17)$$

Для відносної похибки:

$$\delta_\lambda = \frac{T_o}{C_2} \lambda_{ек} (\delta_{A_{1e}} + \delta_{A_{2e}}), \quad (18)$$

де  $\delta_{A_{1e}}$   $\delta_{A_{2e}}$  - відносні похибки вимірювання сигналів  $A_0(\lambda_1)$  і  $A_0(\lambda_2)$ .

В свою чергу, у відповідності з формулою (6):

$$\Delta T = T \frac{\Delta\lambda_{ек}}{\lambda_{ек}}$$

Для відносної похибки:

$$\delta_T = \delta_{\lambda_{ек}} \quad (19)$$

Підставивши (18) в формулу (19), отримаємо:

$$\delta_T = \frac{T_o}{C_2} \lambda_{ек} (\delta_\lambda) \quad (20)$$

Формула (20) дозволяє визначити відносну похибку вимірювання температури, обумовлену похибкою експериментального визначення  $\lambda_{ек}$ .

### Висновки.

1. Вперше створена математична модель вимірювального сигналу телевізійного біспектрального пірметра, на базі якої розроблені методики оцінки похибок вимірювання температури і встановлені аналітичні залежності між похибками вимірювання температури, нерівномірністю чутливості ПЗЗ-матриці, еквівалентною довжиною хвилі та зміною коефіцієнту випромінювальної здатності.

2. Обґрунтовано критерій вибору ПЗЗ-камери для створення телевізійного БСП, застосування якого забезпечує вимірювання температури спектрального відношення з похибкою, що не перевищує заданої.

3. Перспективою подальших розвідок є вдосконалення методики визначення ЕкДХ, яка б враховувала особливості формування вимірювального сигналу та створення лабораторного стенду для експериментального дослідження значень ЕкДХ для різних зон ПЗЗ-матриці телевізійного пірометра. В складі стенду можливе використання еталонної лампи СИ10-300, для якої в широкому діапазоні виконується рівність  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ .

В статті використано матеріали, отримані при виконанні НДР №497-2009.

### Література

1. Порев В.А., Маркін М.О. Мультиспектральні телевізійні прилади контролю високотемпературних технологій/ В.А. Порев, О.М. Маркін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2006. – №4/2 (22). – С. 34–39.
2. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982.–296 с.

### Аннотация

**Порев В.А., Маркин М.А. Погрешности измерения температуры в биспектральной пирометрии.** Разработана математическая модель измерительного сигнала телевизионного биспектрального пирометра. Определены аналитические зависимости между погрешностями измерения температуры и основными характеристиками телевизионного биспектрального пирометра.

**Ключевые слова:** температура, измерение, биспектральный пирометр.

### Abstract

**Poryev V., Markin M. The Errors of the Temperature Measurement in the Dual-band Television Pyrometry.** The math model of measurement signal of the dual-band television pyrometer has been developed. The analytical relations of temperature measurement error and the basic characteristics of the dual-band television pyrometer have been determined.

**Keywords:** temperature, measurement, dual-band television pyrometer.

Здано в редакцію:  
16.02.10р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Зорі А.А.