536.521.2

Н.Є. Гоц[1], Т. Пянтковскі
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації
[1)] Військова технічна академія,
інститут оптоелектроніки (Варшава, Польща)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШУМУ ПРИЙМАЧА ВИПРОМІНЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВИПРОМІНЕННЯМ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИМИ МЕТОДАМИ

© Гоц Н.Є., Пянтковскі Т., 2010

Розглянуто вплив шумів приймача випромінення на похибку пірометра у процесі його калібрування. Визначено математичну залежність між похибкою вимірювання температури та відношенням сигнал/шум за різної кількості спектральних каналів пірометра, що досліджено за допомогою математичного моделювання.

Ключові слова: пірометр, температура за випроміненням, похибка, відношення сигнал/шум.

Eradiation receiver impact on the pyrometer error in the process of calibration has been considered in the proposed article. The mathematical dependence of temperature measurement error on signal/noise ratio at various amount of spectral pyrometer channels is determined by the modeling.

Keywords: pyrometer, radiation temperature, measurement error, signal to noise ratio.

Актуальність та постановка задачі

Сучасний розвиток вимірювань температури за випромінюванням спрямований на широке використання інфрачервоного температурного діапазону, підвищення точності і відтворюваності вимірювань, упровадження нових багатоспектральних методів, розроблення нових зразкових засобів вимірювання, а також розширення робочого діапазону як в область високих, так і в область низьких температур. Важливим є завдання зменшення похибок вимірювання температури.

Методична складова похибки вимірювання температури за випроміненням зумовлена відсутністю достовірної інформації про коефіцієнт випромінення, впливом фонового випромінювання і поглинання проміжного середовища. Для зменшення впливу цих чинників на точність вимірювання температури використовують переважно багатоспектральні методи, розглянуті в [1].

Інструментальна складова похибки вимірювання викликана впливом оптичної системи і зміною параметрів приймача випромінення (ПВ) в робочому спекральному діапазоні та характеристик електричної схеми перетворення сигналу, що призводить до шумів, які накладаються на корисний сигнал.

Під час багатоспектральних вимірювань вихідні сигнали приймача випромінювання в декількох спектральних інтервалах опрацьовуються за допомогою певного алгоритму. Це зумовлює підвищені вимоги до співвідношення корисного сигналу на вході схеми цифрової обробки сигналу і сумарного шуму, що накладається на нього. Також важливим є завдання дослідження впливу шумів приймача на похибку під час розроблення нових засобів вимірювання температури за випромінюванням, зокрема зразкових, оскільки їхня точність повинна бути на декілька порядків вищою за точність робочих засобів вимірювання. Отже, зменшення впливу

шуму на результати вимірювання температури за випромінюванням є актуальним. Для цього нами виконані такі дослідження:

- дослідження впливу шуму на похибку пірометра в процесі його калібрування;
- дослідження залежності сигнал/шум за заданої похибки вимірювання температури за випроміненням за різної кількості робочих спектральних каналів.

Аналіз складових шуму приймачів випромінення

Найзначнішим джерелом шуму є приймач випромінювання. Тому забезпечення низького значення інструментальної похибки вимірювання пов'язане з вибором параметрів приймача випромінювання, а саме оптимального співвідношення сигнал/шум, яке забезпечувало б вимірювання температури із заданою похибкою. Для вирішення поставленого завдання проаналізовано виникнення різних видів шумів у приймачах випромінення, використовуваних у пірометрах.

Вимірювання температури за випромінюванням здійснюють в спектральних інтервалах шириною від 50 нм до декількох мікрометрів. Під час вимірювання температури, особливо нижчої за 1000°С, на точність вимірювання температури значно впливають шуми, зумовлені фізичними процесами, що відбуваються в приймачі, оскільки їх значення стають співмірними із значенням корисного сигналу. Наявність шумів утруднює виявлення слабких сигналів низькотемпературних джерел випромінення, а також призводить до похибки вимірювання параметрів сигналу: амплітуди, частоти, фази, часу появи імпульсів випромінення. Особливо сильний вплив шуму на точність під час вимірювання низьких температур (нижче за 300°С) при роботі в спектральній області вище за 3 мкм.

Основними складовими шуму ПВ є струмовий шум (флікер-шум) U_{Nf}, тепловий шум (шум Найквіста) U_{NT} і генераційно-рекомбінаційний шум (дробовий шум) U_{Nd}. Шуми характеризуються середнім квадратичним значенням флуктуації сумарного сигналу на виході приймача випромінення в заданій смузі частот $I_ш$ або $U_ш$ на заданому навантаженні:

$$U_N = \sqrt{U_{Nf}^2 + U_{NT}^2 + U_{Nd}^2}\ . \qquad (1)$$

Кожна складова сигналу шуму характерна для певного виду ПВ. Так, струмовий шум наявний у всіх видах ПВ, але його вплив на корисний сигнал позначається сильно тільки на низьких частотах, менших за 1 кГц. Тепловий шум пропорційний до значення активного опору ПВ й істотно впливає головно лише в теплових детекторах – термопарах. Генераційно-рекомбінаційний шум властивий фотоелектричним ПВ з p-n переходами – фотодіодам.

Чутливість і виявну здатність ПВ визначають залежно від мінімального значення потоку випромінення, що сприймається ПВ, та характеризується відношенням сигнал/шум:

$$\frac{U_S}{U_N} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} Y(l)b(l,T,e)\partial l}{\sqrt{U_{Nf}^2 + U_{NT}^2 + U_{Nd}^2}} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} Y(l)b(l,T,e)\partial l}{\sqrt{\frac{A\cdot\overline{I^2 R_d^2}}{f}\cdot Df + 4\cdot k\cdot T_d\cdot R_d\cdot Df_{ef} + 2\cdot e\cdot\bar{I}\cdot R_d^2\cdot Df_{ef}}}, \qquad (2)$$

де U_s – сигнал напруги; A – стала, залежна від матеріалу ПВ ($A = 3\cdot10^{-12}\ldots3\cdot10^{-7}$; для сірчано-свинцевих фоторезисторів $A \approx 10^{-11}$); I – середнє значення струму ПВ; f – середнє значення частоти в смузі частот; R_d – опір ПВ; k – стала Больцмана ($k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$); T_d – температура ПВ; e – заряд електрона ($e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл).

Згідно з літературними джерелами чутливість ПВ випромінення повинна забезпечувати на виході ПВ відношення сигнал/шум, не менше за 3…5, при ефективній смузі пропускання електронного пристрою 10÷100Гц [2]. Умовою зменшення впливу шуму на корисний сигнал є

можливість виділення корисного сигналу на фоні сигналу шуму усередненням у певному часовому інтервалі вимірювання за умови стаціонарного характеру процесу вимірювання. Але за різних інтенсивностей потоку випромінення, зі зниженням нижньої границі вимірювання температури, вимоги до відношення сигнал/шум підвищуються, оскільки вимірювання температури відбувається за заданого значення похибки вимірювання. І тому значення шуму визначає нижню границю вимірювання температури та значення похибки вимірювання. І навпаки, задані нижня границя вимірювання температури і похибка вимірювання формують вимоги до величини співвідношення сигнал/шум ПВ.

Дослідження впливу шуму при калібруванні пірометра

Для визначення допустимого значення шуму ПВ за заданого значення похибки вимірювання доцільно розглянути калібраційну залежність та послідовність процедур калібрування пірометра при впливі шуму на результат вимірювання. Як було вказано вище, вимоги до точності зразкових засобів вимірювання повинні бути в кілька разів вищими, ніж робочих засобів вимірювання. Тому особливого значення набуває вплив шуму під час низькотемпературних вимірювань [3].

Для дослідження впливу шуму на похибку доцільно використовувати такий алгоритм. За дійсними значеннями температури об'єкта, вимірюваної пірометром, і відповідним значенням напруги на виході пірометричного перетворювача будується калібраційна залежність U=f(T) [4], якій відповідають крапки 1, 2, 3 на рис. 1. Далі в процесі практичних вимірювань за значеннями вихідного сигналу пірометричного перетворювача визначають вимірювану температуру. У ідеальному випадку це зворотна послідовність точок – 3, 2, 1. Але за наявності шуму ПВ значення вихідного сигналу пірометричного перетворювача $U_{вих}$ змінюється на значення $\Delta U=U_N$. Це приводить до того, що визначення температури за $U_{вих}$ відбувається за точками 4, 5, 6, що спричиняє інструментальну похибку вимірювання температури пірометром, викликану впливом сигналу шуму.

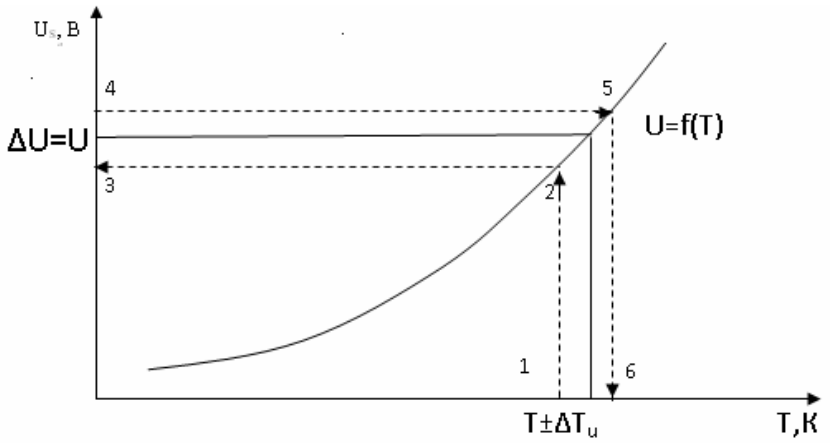

Рис. 1. Вплив шуму на значення вимірюваної температури, яке визначається за калібраційною кривою пірометричного перетворювача

Для знаходження допустимого значення шуму за заданого значення похибки для прецизійних засобів вимірювання пропонується використовувати таку методику. Залежність дійсної температури визначається як зворотна функція вихідного сигналу і може бути замінена поліномом (3), де n – степінь апроксимуючого полінома; a_i – коефіцієнти полінома; U_s – вихідний сигнал ПВ:

$$T = U^{-1}(T) = \sum_{i=0}^{n} a_i \cdot U_s^i \qquad (3)$$

За такої апроксимації абсолютна похибка вимірювання визначається згідно з (4). За умови $DU = U_N$ відносна похибка вимірювання температури внаслідок впливу шуму на сигнал ПВ під час калібрування для цього виду апроксимації температурної залежності має вигляд (5):

$$DT = \frac{\partial T}{\partial U} DU = \sum_{i=1}^{n} \left(i \cdot a_i \cdot U_s^{(i-1)} \right) \cdot DU \ ; \tag{4}$$

$$dT = \frac{DT}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(i \cdot a_i \cdot U_s^{(i-1)} \right) \cdot}{\sum_{i=0}^{n} a_i \cdot U_s^{\,i}} \cdot U_N \, . \tag{5}$$

Ці формули показують взаємозв'язок між похибкою вимірювання температури і залежністю між сигналом шуму і вихідним сигналом ПВ. Згідно з (5) ми також можемо визначити мінімальне значення температури, яке можна знайти за калібраційною кривою за заданого значення похибки вимірювання і наявного значення напруги шуму ПВ, а також за заданими значеннями температури і похибки підібрати приймач випромінення з певним рівнем шуму.

З метою визначення впливу шуму на точність вимірювання температури за випроміненням ми визначили формули відносної похибки вимірювання температури різними методами пірометрії, що подані в таблиці. У таблиці наведена узагальнена формула похибки вимірювання, яка показує взаємозв'язок між похибкою вимірювання температури та співвідношенням сигнал /шум для методів багатоканальної пірометрії. За цією формулою залежно від вибраного методу пірометрії та заданим значенням похибки вимірювання можна визначити допустиме значення шуму ПВ, який вибирають для реалізації цього методу пірометром.

Похибки вимірювання температури різними методами пірометрії

Методи пірометрії	Значення термодинамічної температури	Значення відносної похибки виімрювання температури
1	2	3
Метод одно-канальної пірометрії	$T = -\frac{C_2}{L} \frac{1}{ln(kU)}$	$dT = \frac{U_N}{U\, ln(kU)}$
Метод дво-канальної пірометрії спектрального відношення	$T = -\frac{C_2}{L\left[ln(k_1 U_1) - ln(k_2 U_2)\right]}$	$dT = \frac{C_2}{L} \frac{1}{\left[ln(U_1) - ln(U_2) + B_2\right]^2} \left(\frac{1}{U_1} - \frac{1}{U_2} \right) U_N$
Багатоканальні методи пірометрії (загальна формула)	$T = \frac{T_{ум} \cdot C_2}{C_2 - k_i T_{ум} \cdot L_{ум} \sum_{i=1}^{m} \left(b_i \, ln(e_i) \right)}$	$dT = \frac{C_2}{L} \frac{1}{\left\{ ln(U_1) + \left[\sum_{i=2}^{m} 2(-1)^{i-1} ln(U_i) \right] + (-1)^{m-1} ln(U_m) + B_m \right\}^2} \times$ $\times \left[\frac{1}{U_1} + \left(\sum_{i=2}^{m-1} (-1)^{i-1} \frac{2}{U_i} \right) + \frac{(-1)^{m-1}}{U_m} \right] U_N$

Примітки: $k = L^5 q^{-1} C_1^{-1}$ – стала; k_1, k_2 – сталі, $k_1 = f(L_1, q_1)$; $k_2 = g(L_2, q_2)$; $B_2 = ln(k_1) - ln(k_2)$ – сталі; L – стала, що визначає значення еквівалентної довжини хвилі методу пірометрії; $L = h(L_1, L_2)$; m – кількість спектральних каналів; B_m – стала для m каналів, $B_m = f(q_1, q_2 \ldots q_m, l_1, l_2 \ldots l_m)$.

Отже, формули з колонки 3 таблиці дають змогу визначити максимальне допустиме значення сигналу шуму за заданого значення шумової похибки вимірювання температури різними методами пірометрії.

Моделювання похибок вимірювання температури залежно від значення шуму ПВ

Отримані залежності є функціями вихідних сигналів окремих каналів пірометра та похибок вимірювання температури. За допомогою вибору ПВ, робочих спектральних інтервалів, параметрів електронного тракту можливо мінімізувати вплив шуму на результати вимірювання температури. Нами досліджено вплив шуму на відносну похибку вимірювання температури триканальним пірометром. З використанням трьох робочих спектральних каналів можна визначити температуру дев'ятьма різними методами пірометрії (одноканальними, двоканальними спектрального відношення та багатоканальними на трьох спектральних інтервалах), з яких вибрано окремі методи з огляду на фізичні властивості випромінення. Для моделювання взято пірометр, який має три спектральні канали з ПВ на основі InGaAs. Центральні значення довжин хвиль для окремих каналів становлять: l_1 = 1,5 μm; l_2 = 1,9 μm; l_3 = 2,3 μm. Ширина спектральних інтервалів становить до 100 нм та сформована з використанням інтерференційних фільтрів. У ході моделювання прийнято, що вплив шуму має бути незначним і не перевищувати ±0,1 %. З погляду максимального впливу шуму за мінімальних значень температури вибрано нижню границю досліджуваної температури T = 500 K.

Для одноканального пірометра допустимий відносний рівень шуму на виході окремих каналів ПВ залежно від значення заданої похибки подано на рис. 2, *а*. Як видно з рисунка, залежність між відносним рівнем шуму та похибкою вимірювання має лінійний характер. Сам допустимий рівень шуму є значним і для випадку пірометра з ефективною довжиною хвилі l_3 (2,3 μm) в понад 10 разів перевищує значення похибки вимірювання температури. Для двоканальних пірометрів згідно з (6) відповідний графік подано на рис. 2, *б* (U_i – вихідний сигнал напруги в *i*-му каналі пірометра):

$$IL_1 = \frac{U_1}{U_2}, \qquad IL_2 = \frac{U_2}{U_3}, \qquad IL_3 = \frac{U_1}{U_3} \tag{6}$$

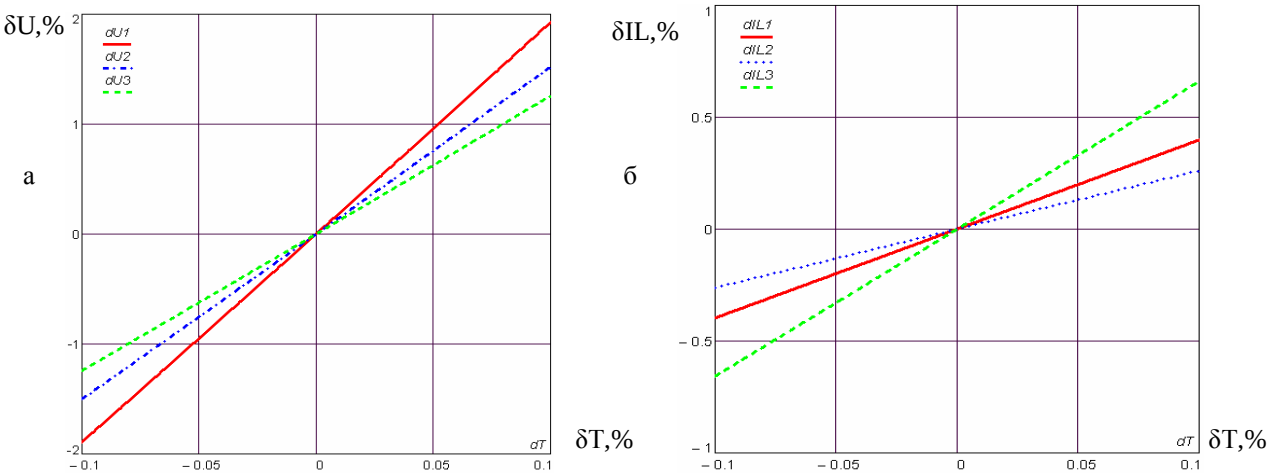

Рис. 2. Залежність відносної похибки вимірювання температури від:
а – похибки вихідного сигналу ПВ для трьох одноканальних пірометрів;
б – похибки відношення сигналів для двоканальних пірометрів спектрального відношення

На практиці з (6) використовуються лише перше та друге відношення, третє не має практичного значення, оскільки для нього може значно різнитися коефіцієнт випромінення. Ми

користувалися припущенням, що об'єкт є сірим тілом у заданому спектральному діапазоні, що є реальним для поверхонь за незначної різниці між l_1, l_2. Допустимий рівень зміни відношення вихідних сигналів є удвічі меншим, ніж самих вихідних сигналів. Найменші значення є для відношення IL_2.

Існує дві методики врахування залежності похибки та відношення сигналів. Перша – на основі порівняння потужностей випромінення, що сприймаються окремими каналами пірометра. Відповідні вагові коефіцієнти подано залежностями (7). Залежності (8) відповідають другій методиці – порівняння амплітуд сигналів обох каналів пірометра.

$$W_{sz2} = \frac{P_{optyczn1}}{P_{optyczn2}} \approx 0{,}058, \qquad W_{sz1} = 1 - W_{sz2}^2 \approx 0{,}942, \tag{7}$$

$$W_{sz2} = (0{,}5)^2 = 0{,}25, \quad W_{sz1} = 1 - W_{sz2}^2 = 0{,}75. \tag{8}$$

Графік допустимих значень шумів і відношень потужностей випромінення згідно з першою методикою зображено на рис. 3, *а*. Як видно, допустимий рівень того самого порядку, що й значення похибки вимірювання температури. Порівняно з одноканальним пірометром це означає, що необхідно збільшити значення відношення сигналу до шуму.

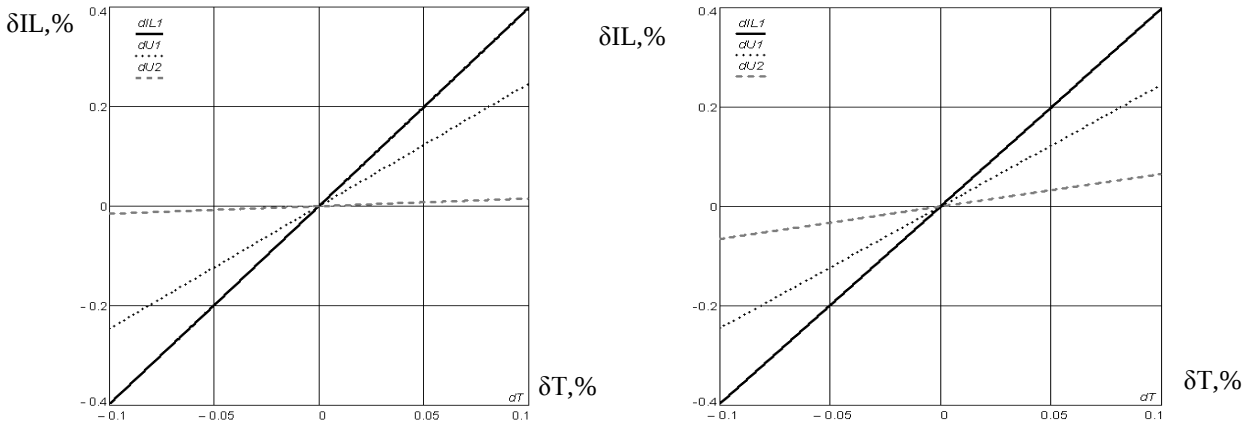

Рис. 3. Залежність похибки відношення сигналів від похибки вимірювання температури для двоканального пірометра від IL_1 згідно з (7) та (8)

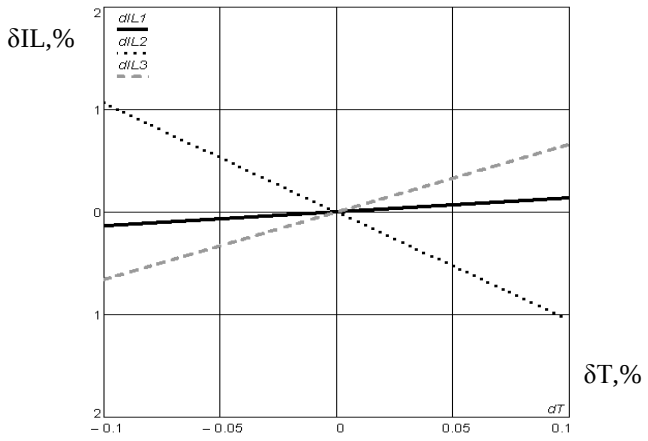

Рис. 4. Залежність похибки відношення сигналів IL_i від похибки вимірювання температури для триспектрального пірометра

Графік залежностей похибок вимірювання від відношення сигналу та шуму для триканального пірометра подано на рис. 4 згідно з виразами (9):

$$IL_1 = \frac{U_1 U_3}{U_2^2}, \quad IL_2 = \frac{U_1 U_2}{U_3^2}, \quad IL_3 = \frac{U_2 U_3}{U_1^2} \tag{9}$$

У формулах (9) подано різні комбінації відношень сигналів. На практиці використовують метод спектрального відношення за першим співвідношенням. Як видно з рис. 4, відбувається подальше зниження допустимого рівня шуму – у разі триканальної пірометрії допустимий рівень шуму має бути нижчим від відносного значення заданої похибки вимірювання температури.

Висновки

У разі збільшення спектральних каналів пірометра вплив шуму на точність вимірювання температури зростає. Вказані в літературі вимоги до відношення сигналу до шуму як 3…5 з використанням багатоканальних методів пірометрії не відповідають сучасним вимогам до точності вимірювань температури за випромінюванням. Отже, для багатоканальних вимірювань треба використовувати приймачі випромінення з високим, до десяти разів, відношенням сигнал/шум.

1. Гоц Н.Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии // Приборы +Автоматика. – Обнинск, Россия, 2007. – С. 35–50. 2. Ишанин Г.Г., Козлов М.Г., Томский К.А. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов. – СПб.: Береста, 2004. – 290 с. 3. IEC TS 62492 Radiation thermometers – Part 1: Specifications for Radiation Thermometers. 4. Дорожовець М.М., Мотало В.І., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. Інформаційно-вимірювальна техніка. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – Т. 1. – 455 с.