

Пошук шляхів підвищення метрологічної надійності засобів багатоканальної пірометрії

Брао І.

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 28а, 79013, Львів, Україна

Abstract. This article analyzes main errors sources of temperature measurement by contactless means and defines that the main errors source of multichannel temperature measurement tools is indirect dependence of temperature measurement result from emissivity index.

Key words: temperature, non-contact method, emissivity of rate, wavelengths, pyrometer .

Вступ

Розвиток різноманітних галузей народного господарства в Україні та світі значним чином залежить від контролю стану параметрів технічного устаткування, що визначає якість, конкуренто-спроможність та собівартість продукції, що виготовляється. Для контролю стану технічного устаткування необхідний постійний контроль режимів його роботи. Одним з найважливіших і найбільш впливаючих на технологічний процес параметрів є температура. У промисловому виробництві контроль температури та своєчасна інформація про температурний стан є запорукою зростання якості та зумовлення зниження собівартості виготовленої продукції. Тому точність, з якою буде виміряна температура, має важливе значення. Це говорить про необхідність постійного пошуку шляхів покращення відомих та створення нових методів та засобів вимірювання температури з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Як показує проведений аналіз, найбільшого розвитку та широкого впровадження заслуговують безконтактні методи вимірювання температури, з огляду на їх специфіку, оскільки вони мають, зокрема, одну дуже важливу особливість з поміж інших методів вимірювання температури – не спотворюють температурне поле об'єкта вимірювання. Що стосується безконтактної пірометрії, то прогрес фундаментальних наукових досліджень у цій галузі за останні кілька десятиріч є незначним. По сьогоднішній день існує ряд суттєвих невирішених проблем, вирішення яких дало б можливість підвищити точність та метрологічну надійність безконтактних засобів вимірювання температури.

Основні проблеми підвищення точності засобів вимірювання температури

Відомо, що існують два основних класи засобів вимірювання температури - контактні і безконтактні.

Принцип роботи контактних засобів вимірювання температури оснований на безпосередньому контакті первинного вимірювального перетворювача температури з досліджуванним об'єктом. На точність таких засобів вимірювання температури впливають такі недоліки, притаманні контактному способу вимірювання температури: спотворення температурного поля об'єкта при введенні в нього термоперетворювача;

відмінність температури термоперетворювача від істинної температури об'єкта; обмеження верхньої межі вимірювання температури, спричинене залежністю електрофізичних властивостей матеріалів, з яких виготовлені термоперетворювачі. Крім того, контактним способом не може бути вирішений ряд завдань вимірювання температури в недоступних об'єктах та таких, що рухаються.

Отже, джерелами похибок контактних засобів вимірювання температури можуть бути, зокрема, зміна температури об'єкта внаслідок зміни його температурного поля внесеним термоперетворювачем, а також неминуче відведення чи притік тепла, зобумовлені різницею температур термоперетворювача й об'єкта в результаті теплообміну термоприймача з навколишнім середовищем [1].

Безконтактним засобам вимірювання температури властиві, зокрема, похибки, пов'язані з тим, що фундаментальні фізичні закони, які лежать в основі їх роботи, справедливі лише для абсолютно чорного тіла (АЧТ), від якого за властивостями випромінювання відрізняються всі реальні випромінювачі (тіла і середовища) [2]. Згідно закону Кірхгофа будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше ніж АЧТ, нагріте до тієї ж температури. Тому безконтактні засоби для вимірювання температури, що проградуєвані за АЧТ, при вимірюванні температури реального об'єкта покажуть іншу температуру, аніж його дійсна термодинамічна. Таким чином, точність вимірювання температури, при цьому, значним чином залежить від адекватності відтворення умов градуєвання та експлуатації безконтактних засобів.

На підставі аналізу закону Планка можна виділити три основні напрями створення засобів визначення температури безконтактним способом. А саме: радіаційна або ж інтегральна (повного випромінювання) пірометрія, що ґрунтується на використанні закону Стефана-Больцмана [3]; оптична (за яскравістю) пірометрія, яка базується на аналізі енергетичних характеристик, зокрема, монохроматичного випромінювання; пірометрія спектрального відношення, в основі якої є співвідношення Віна [3]. Таким чином, як показує проведений аналіз, згадані вище напрями пірометрії ґрунтуються на використанні часткових випадків закону Планка для АЧТ.

Вибір конкретного типу пірометра для застосування диктується конкретним діагностичним завданням та вартістю устаткування. Наприклад, квазімонохроматичний пірометр є найбільш придатним для високотемпературної діагностики, тому що при $\lambda T < 2.876 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ (область Віна) спектральна інтенсивність випромінювання надзвичайно швидко зростає з температурою, що забезпечує високу точність вимірювань, а пірометри повного випромінювання, що

вимірюють так звану радіаційну температуру, є корисними для вимірювання відносно низьких температур.

Основні джерела виникнення похибок безконтактних засобів вимірювання температури

На відміну від багатьох інших галузей виміральної техніки пірометрія характеризується доволі великою кількістю систематичних похибок - як інструментальних, так і методичних. Інструментальні похибки є наслідком недоліків, властивих самим пірометрам. Вони можуть бути зменшені або й вилучені при удосконаленні засобів вимірювань: термостабілізації критичних до коливань температури вузлів, електромагнетним та терморадіаційним екрануванням, застосуванням більш чутливих первинних сенсорів, прецизійним калібруванням і т.д.

На відміну від інструментальних, методичні похибки - це ті похибки, котрі притаманні відповідному методу вимірювань. Вони виникають незалежно від того, наскільки добре калібровані засоби вимірювань. Методичні похибки можна вилучити шляхом вибору приладу з кращими метрологічними характеристиками, без зміни методики вимірювань. Адже в пірометрії вони є наслідком того, що вимірвальні сигнали, які генеруються приймачами випромінювання, визначаються не тільки температурою вимірюваної поверхні, але і її випромінювальною здатністю. Саме неврахування або неправильне врахування останньої призводить до появи великої кількості методичних похибок.

Проте, існують і інші, не менш вагомні чинники впливу на точність безконтактних засобів вимірювання температури. Що ж стосується *радіаційної пірометрії*, основними джерелами виникнення методичних похибок вимірювання температури радіаційним пірометром є те, що:

1) значення коефіцієнта випромінювальної здатності тіла $\epsilon(T)$ залежить від температури та стану поверхні і може змінюватись в часі внаслідок утворення оксидної плівки та інших процесів. Зазвичай для розрахунків дійсної температури використовують табличне значення $\epsilon(T)$, що може привести до значної похибки [4].

2) показник візування може не відповідати номінальному значенню (тобто зображення об'єкту дослідження не закриває повністю поле зору сенсора приладу), внаслідок чого виміряне значення температури може бути заниженим.

3) запиленість та загазованість проміжного між об'єктом та приймачем середовища (випромінювання об'єкту частково поглинається у повітрі парами води, вуглекислим газом і частинками пилу, тощо).

4) прилад може нагріватись в процесі вимірювання.

Похибки вимірювання температури *яскравісним пірометром* включають інструментальні: похибки і варіації показів пірометра в різних точках шкали; похибки внаслідок зміни номінальної статичної характеристики пірометричної лампи, а також внаслідок зміни характеристик елементів оптичного каналу, а також методичну - суб'єктивність оцінки пірометра ста при візуальному порівнянні яскравостей об'єкту та нитки пірометричної лампи [5].

Пірометрія спектрального відношення полягає у вимірюванні, знову ж таки, певної уявної температури, так званої «колірної температури» об'єкта за відношенням інтенсивностей потоку випромінювання в двох певних ділянках спектру, кожна з яких характеризується певною ефективною довжиною хвилі [6]. Такий принцип вимірювання температури дозволяє дещо зменшити негативний вплив на метрологічні характеристики пірометрів спектрального відношення згаданих вище недоліків, які притаманні радіаційним пірометрам.

Так, залежність сигналу від відстані до вимірюваного об'єкта однакова для обох приймачів пірометра спектрального відношення, тому на відношення сигналів вона не впливає; форма вимірюваного об'єкта, запиленість і загазованість проміжного середовища однаково впливають на сигнали з обох приймачів, залишаючи, при цьому, незмінним їх відношення [7]. Пірометри спектрального відношення нечутливі до бічного засвічення від великорозмірних об'єктів, наявності невеликих непрозорих об'єктів у полі зору пірометра, до наявності захисних стекол, наприклад стекол оглядових вікон у вакуумних камерах.

Основною перевагою пірометрів даного типу слід вважати те, що для прецизійного вимірювання термодинамічної температури немає потреби у точному визначенні значення показника випромінювальної здатності ϵ [8]. Іншими словами, оскільки відмінність значення ϵ вимірюваного об'єкта від одиниці найчастіше призводить до однакового зменшення сигналів від двох приймачів, і як уже було сказано вище, при цьому залишається незмінним їх відношення, що й не має негативного впливу на результат вимірювання.

Проте, слід мати на увазі, що при застосуванні засобів пірометрії спектрального відношення є ризик появи високого значення похибки в тих випадках, коли об'єкт вимірювання характеризується селективним випромінюванням, тобто значення показника випромінювальної здатності ϵ при одній і тій же температурі різко змінюється з довжиною хвилі.

Залежність точності багатоканальних засобів вимірювання температури від показника випромінювальної здатності

Вплив випромінювальної здатності вимірюваного об'єкта ϵ на точність вимірювання температури багатоканальними засобами, як вже зазначалось вище, може бути значним, хоч і не є безпосереднім. Точніше, результат вимірювання пірометра спектрального відношення залежить не стільки від абсолютного значення випромінювальної здатності чи від її зміни від об'єкта до об'єкта, скільки від спектральної залежності $\epsilon=f(\lambda)$ [9]. Для прикладу на рис. 2 наведені спектральні залежності випромінювальної здатності ϵ_λ для деяких металів: *Fe, Ni, Cu, Ag, Co* [10]. Слід відзначити, що вони характеризують більшість металів та їх сплавів.

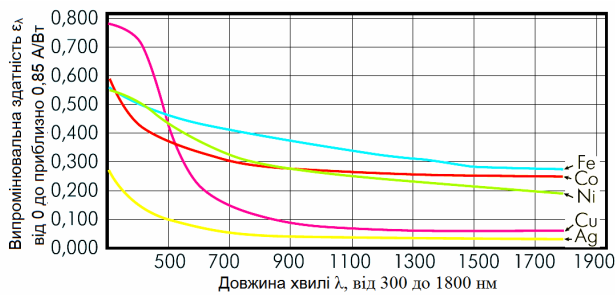


Рис. 1. Спектральні залежності випромінювальної здатності ϵ_{λ} від довжини хвилі для деяких металів

Проаналізувавши тип залежностей на рисунку Рис. 1, можна виявити їх однотипність - з ростом довжини хвилі спектральна випромінювальна здатність ϵ_{λ} знижується. Це призводить до того, що сигнал довгохвильового приймача пірометра спектрального відношення виявляється заниженим порівняно з короткохвильовим, що можна спостерігати на графіках спектральних залежностей випромінювальної здатності ϵ_{λ} від довжини хвилі типових пірометрів спектрального відношення, зображених на рис. 2.

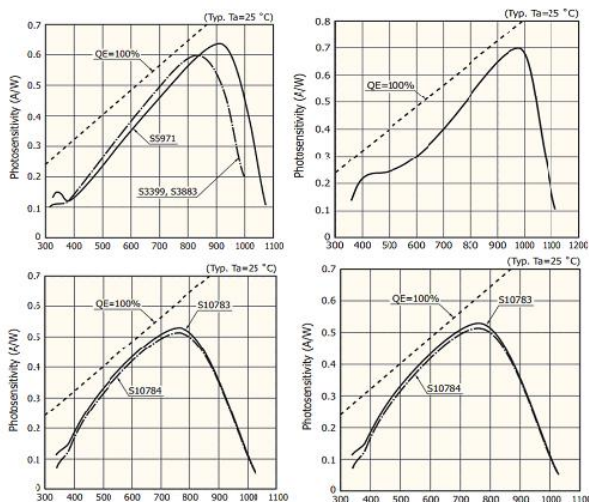


Рис. 2. Спектральні залежності випромінювальної здатності ϵ_{λ} від довжини хвилі типових пірометрів спектрального відношення

Внаслідок цього покази пірометра спектрального відношення виявляються завищеними нерідко більш ніж на 10 % [10]. Аналітично розрахувати значення похибки, викликані зниженням ϵ_{λ} , можливо лише у випадку, якщо смуги пропускання приймачів дуже вузькі, не більше 10-12 нм. Однак, останнім часом переважна більшість пірометрів спектрального відношення використовує двошарові фотодіодні структури, верхній шар яких має максимальну чутливість в короткохвильовій області спектра, нижній - в довгохвильовій. Смуги спектральної чутливості цих приймачів складають десятки і сотні нанометрів, що викликає похибку, яка обумовлена непостійністю ϵ_{λ} [10]. Слід додати, що інформація по ϵ_{λ} для більшості

матеріалів, температуру яких потрібно вимірювати, вкрай мізерна. Саме з цих причин питання про корекцію показів пірометрів спектрального відношення при вимірюванні температури об'єктів з випромінювальною здатністю, що залежить від довжини хвилі, досі залишається невирішеним.

З метою покращення метрологічних характеристик пірометрів спектрального відношення, в тому числі для вище згаданих випадків, пропонується розрахувати оптимальну кількість каналів (довжин хвиль), на яких має здійснюватись вимірювання, щоб вилучити, або суттєво знизити, вплив невизначеності значення показника випромінювальної здатності ϵ та інших неінформативних чинників, що мають негативний вплив на результат вимірювання температури.

Висновки

На основі проведеного аналітичного огляду та аналізу складових балансу похибок засобів контактного та безконтактного вимірювання температури, визначено, що пріоритет у подальшому дослідженні, прогресі та розвитку слід надавати безконтактним методам вимірювання температури. Проаналізувавши основні джерела похибок засобів безконтактного вимірювання температури, виокремлено пірометри спектрального відношення, у яких вплив основного чинника зниження точності вимірювання для засобів безконтактного вимірювання температури – показника випромінювальної здатності – суттєво знижений. Виявлено наявність впливу спектральної залежності $\epsilon=f(\lambda)$ на результат вимірювання пірометром спектрального відношення. Як варіант вирішення цієї проблеми запропоновано розрахувати оптимальну кількість довжин хвиль, на яких має здійснюватись вимірювання.

[1] Температурные измерения. Справочник/ Под ред. Герашенко О.А. Киев: Наукова думка, 1989.

[2] Dr. Alexander Dmitriyev. Laser pyrometry offers practical temperature measurement. Heat treating progress, may/june 2005.

[3] Куинн Т. Температура/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.

[4] Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., & McGhee, J. (2001). Temperature Measurement Second Edition.

[5] Рибо Г. Оптическая пирометрия. М. – Л.: ГТТИ, 1934.

[6] Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Т.1. –М.: Наука, 1964.

[7] Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор). Приборы и техника эксперимента, 2009, № 4.

[8] Бельский А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. и др. Измерение температуры: теория, практика. Справочное издание. Т.2 – М.: Теплотехник, 2007.

[9] Фрунзе А. Пирометры спектрального отношения. Преимущества, недостатки, пути их устранения. Фотоника 4/2009.

[10] Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под ред. Шейндлина А.Е. –М.: Энергия, 1974.