УДК 536.521

М.Д. Нагорний, студент гр. ПМ-21, к.т.н., доц. Муравйов О.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

СУЧАСНІ ЗАСОБИ БЕЗКОНТАКТНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

Анотація. У роботі розглянуто особливості безконтактного вимірювання температури за допомогою сучасних пірометрів. Проаналізовано принципи дії, переваги та недоліки яскравісних, радіаційних і пірометрів спектрального відношення. Визначено сфери їх ефективного застосування в промисловості, медицині та наукових дослідженнях. Описано архітектуру приладів, зокрема оптичні системи, детектори й засоби обробки сигналів. Висвітлено сучасні тенденції розвитку галузі: мультиспектральні вимірювання, інтеграцію з тепловізорами, IoT і предиктивний моніторинг.

Ключові слова: безконтактне вимірювання температури, інфрачервоне випромінювання, пірометр, термометричний контроль.

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості, енергетики та наукових досліджень вимагає впровадження високоточних систем контролю температури технологічних процесів виробництва, серед яких моніторинг температурних показників посідає одне з ключових місць. Температура є критичним параметром, що визначає якість продукції в металургії, стабільність хімічних реакцій, безпеку роботи обладнання та точність діагностики в медицині [1].

Традиційні методи вимірювання, що базуються на контактних датчиках, мають низку суттєвих обмежень: вони вимагають безпосереднього фізичного контакту з об’єктом, що призводить до спотворення температурного поля, швидкого зносу сенсорів у агресивних середовищах та унеможливлює вимірювання температури рухомих деталей або об’єктів під високою напругою. У випадках, коли об’єкт дослідження має низьку теплопровідність, знаходиться у важкодоступному місці або характеризується надвисокими температурами – контактні методи стають неможливими через технічний конструктив приладів [2]. Несвоєчасний або неточний контроль призводить до браку продукції, виходу з ладу агрегатів або аварійних ситуацій [3,4]. Впровадження безконтактних пірометрів стає стратегічним завданням для сучасної інженерії.

КЛАСИФІКАЦІЯ ПІРОМЕТРІВ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

Безконтактна термометрія базується на реєстрації власного теплового випромінювання тіл і дозволяє отримувати дані миттєво та на безпечній відстані, що підтверджує перевагу над іншими термометрами. Проте ефективність використання пірометрів залежить від правильного вибору спектрального діапазону, врахування випромінювальної здатності поверхонь та впливу навколишнього середовища. Технологічно пірометри поділяють на наступні 3 види: яскравісні, радіаційні та пірометри спектрального відношення (колірні).

1) Яскравісні пірометри були одними з перших інструментів серед безконтактних. Їх принцип дій базується на візуальному порівняння яскравості випромінювання нагрітого об’єкту з еталонним джерелом світла у вузькому спектральному діапазоні, найчастіше – в червоній частині видимого спектра. Оператор або автоматизована система поступово змінює струм розжарення нитки всередині приладу до моменту, коли її яскравість не зрівняється з яскравістю об’єкта контролю. Головною перевагою таких пристроїв є їхня

феноменальна здатність працювати з екстремально високими температурами, що робить їх незамінними в скловарінні та металургії. Проте прилад має недоліки: сильна залежність результату від випромінювальної здатності конкретного матеріалу та неможливість вимірювання відносно малих температур. Також перешкодою зняття замірів є наявність диму або пилу між приладом та об’єктом.

2) Радіаційні пірометри вирішують значну частину вищевказаних проблем, фокусуючи все доступне теплове випромінювання, як видиме, так і інфрачервоне (ІЧ), на спеціальному чутливому елементі. Вони здатні фіксувати суттєво нижчі за поріг людського зору температури, перевершуючи в цьому яскравісні пірометри. Ці прилади відзначаються надзвичайно високою швидкістю реакцій на зміни температури та відносною простотою конструкції, що робить їх масовими і фінансово доступними. Однак цей тип термометрів також має слабкі сторони, які проявляються, коли між приладом та об’єктом дослідження присутня щільна водяна пара або вуглекислий газ у повітрі.

3) Найбільш досконалим рішенням серед приладів безконтактної термометрії є пірометр спектрального відношення [5]. Замість того, щоб реєструвати абсолютну інтенсивність випромінювання, вони фіксують її одночасно на двох або більше різних довжинах хвиль. Аналізуючи співвідношення цих інтенсивностей, мікропроцесор приладу вираховує температуру об'єкта. Такий підхід є найкращим, оскільки дозволяє майже повністю нівелювати похибки, викликані частковим перекриттям об’єкта перешкодами (пилом, димом, брудними лінзами) або зміною коефіцієнту випромінювання матеріалу в процесі нагрівання. Основним фактором, що стримує глобальне розповсюдження цих пірометрів, є складність його конструктиву та значно вища вартість за попередні пристрої.

Таким чином, вибір конкретного типу пірометра завжди є компромісом між необхідною точністю, умовами експлуатації та наявним бюджетом.

АРХІТЕКТУРА ПІРОМЕТРА

Внутрішня архітектура сучасного пірометра базується на трьох взаємопов’язаних підсистемах: оптичному тракті, сенсорному блоці та електронній системі обробки сигналів [6].

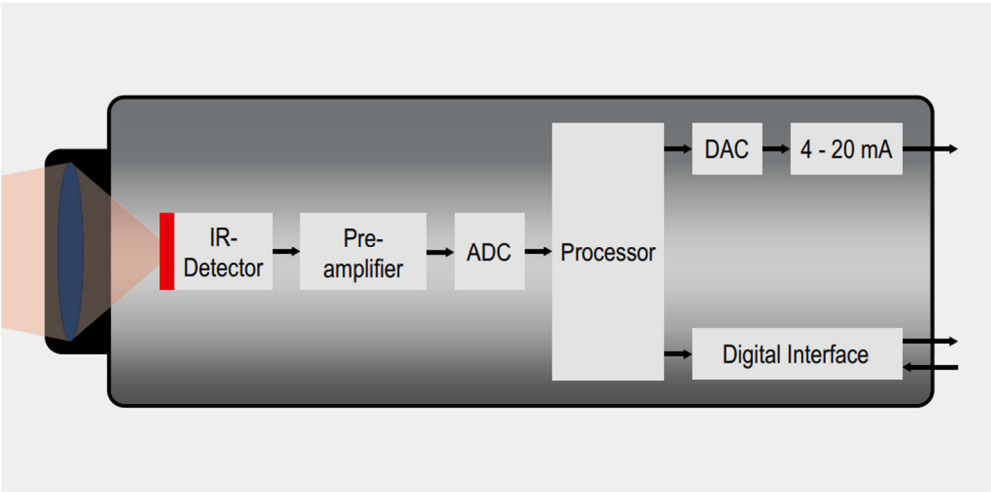

Рис.1. Основні компоненти пірометра

До основних елементів структурної схеми пірометра, що зображена на рис. 1, входять: IR-Detector – приймач ІЧ випромінювання; Pre-amplifier – попередній підсилювач; ADC – аналого-цифровий перетворювач; Processor – мікропроцесор; DAC – цифро-аналоговий перетворювач; 4 - 20 mA – струмова петля 4-20 мА (аналоговий вихід, де сила струму пропорційна виміряній температурі); Digital Interface – цифровий інтерфейс (порт для передачі даних у цифровому вигляді (наприклад, RS-485, USB або Bluetooth) на ПК чи контролер).

Оптична система збирає теплову енергію з поверхні об’єкта та фокусує її на детекторі, а також формує показник роздільної здатності – співвідношення дистанції до об'єкта та діаметра плями вимірювання.

За фізичним принципом дії детектори класифікують на теплові та квантові. Теплові детектори (термобатареї, мікроболометри) змінюють електричний опір при нагріванні. Вони стабільні у широкому діапазоні хвиль, але мають певну теплову інерційність. Квантові детектори (фотодіоди) реагують на бомбардування фотонами, фіксуючи зміни температури за лічені долі секунди.

Блок електроніки використовує високоточні аналого-цифрові перетворювачі для оцифрування нелінійного сигналу детектора. Далі мікроконтролер компенсує вплив температури корпусу приладу та розраховує фінальне значення температури об'єкта.

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІРОМЕТРІЇ

В епоху стрімкого розвитку електронних приладів та цифровізації промислового виробництва технології безконтактного вимірювання температури зазнали радикальних та інноваційних трансформацій. Одним із найважливіших досягнень останніх років у цій галузі стала розробка так званих мультиспектральних пірометрів [5]. На відміну від класичних двоколірних моделей ці передові пристрої аналізують теплове випромінювання одночасно на десятках різних довжин хвиль. Завдяки цьому система здатна в режимі реального часу самостійно визначати фізико-хімічний характер матеріалу, розпізнавати фазові переходи (наприклад, точний момент переходу металу з твердого у рідкий стан) і динамічно коригувати коефіцієнт емісії абсолютно без втручання людини.

Іншим потужним сучасним трендом є технологічна гібридизація, зокрема глибока інтеграція точкової високошвидкісної пірометрії з просторовою ІЧ термографією [7]. Тепловізори чудово справляються з побудовою температурної карти поверхні, виявляючи градієнти та локальні аномалії, проте вони часто поступаються вузькоспеціалізованим пірометрам в абсолютній точності вимірювань. Сучасні гібридні комплекси використовують пірометр як еталонний "якірний" датчик, який у фоновому режимі безперервно калібрує матрицю тепловізора. Такий синергетичний підхід дозволяє отримувати прецизійні дані про розподіл тепла навіть на об'єктах зі складною мінливою геометрією.

Величезний поштовх розвитку галузі надала загальна мініатюризація електронних компонентів та масове впровадження MEMS. ІЧ сенсори зменшилися до мікроскопічних розмірів, що дозволило інтегрувати їх у портативну електроніку, медичні прилади та компактні безпілотники для екологічного моніторингу. Пірометри стали невід'ємною частиною екосистеми

інтернету речей (IoT): оснащені бездротовими модулями зв'язку, вони безперервно транслюють масиви телеметричних даних у хмарні середовища. Там за допомогою предиктивної аналітики за найменшими коливаннями температурного фону прогнозується можливий вихід обладнання з ладу задовго до аварії, виводячи промислову безпеку на принципово новий рівень.

ВИСНОВКИ

Безконтактні пірометри є ефективним засобом вимірювання температури в умовах, де застосування контактних датчиків неможливе або небезпечне. Яскравісні прилади доцільні для надвисоких температур, радіаційні – для швидких універсальних вимірювань, а спектрального відношення – для середовищ із пилом, димом і змінною емісійною здатністю поверхні. Основні фактори, що впливають на точність вимірювання: якість оптики, тип детектора та алгоритм компенсації похибок. Перспективними напрямами розвитку технологій безконтактного вимірювання температури є мультиспектральні системи, інтеграція з тепловізорами та IoT-моніторинг обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Муравйов О. В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / О. В. Муравйов, О. О. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2017. – №1. – С. 124-131.

[2] Tan J. A novel temperature reconstruction method for acoustic pyrometry under strong temperature gradients and limited measurement points / J. Tan, L. Chen, N. Li, Q. Zhou, Z. Gao, J. Zhou // Applied Sciences. – 2025. – 15. – 4728. DOI: 10.3390/app15094728.

[3] Довбиш І.О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / Довбиш І.О., Муравйов О.В., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34(73) . – №5. – С. 16-21. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.5/04.

[4] Кучеренко О. К. Вплив температури на абераційні властивості ІЧ об’єктивів / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, Д. О. Остапенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – №1. – С. 99-105.

[5] Neupane S. Development of a multi-spectral pyrometry sensor for high-speed transient surface-temperature measurements in combustion-relevant harsh environments / S. Neupane, G. S. Jatana, T. P. Lutz, W. P. Partridge // Sensors. – 2022. – 23(1). – 105. DOI: 10.3390/s23010105.

[6] Basic principles of non-contact temperature measurement. – Режим доступу: https://optris.com/wp-content/uploads/2024/09/Infrared-Basics.pdf – 23.04.2026р.

[7] Zhang Z. Optical array-pyrometer for measuring temperature distribution of aero-engine turbine disk / Z. Zhang, H. Huang, Z. Zhang, W. Zhang, J. Xu, S. Gao, C. Wang, Y. Niu, J. Jiang // Infrared Physics & Technology. – 2026. – 155. – 106480. DOI: 10.1016/j.infrared.2026.106480.

Наук. керівник – к.т.н., доц. Муравйов О.В.