

Natalija HOTS¹, Tadeusz PIĄTKOWSKI²

¹ UNIWERSYTET NARODOWY „LVIVSKA POLITECHNIKA”, LWÓW, UKRAINA

² WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ZAKŁAD TECHNIKI PODCZERWIENI I TERMOWIZJI

Analiza czynników składowych błędów pirometrii radiacyjnej

Dr inż. Natalija HOTS

Ukończyła Wydział Automatyki Politechniki Lwowskiej. W 2003 uzyskała stopień doktora nauk technicznych. Aktualnie zatrudniona jest na stanowisku docenta w Katedrze Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Politechnika Lwowska”. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, metodami podnoszenia dokładności pirometrii radiacyjnej. Jest autorem i współautorem ponad 35 publikacji



e-mail: natalija.hots@wp.pl, natana@polynet.lviv.ua

Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej (1981) i Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1984). Od 1995 roku pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 roku. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się zdalnymi pomiarami temperatury, projektowaniem układów optycznych i elektronicznych oraz systemów mikroprocesorowych. Jest autorem i współautorem ponad 40 publikacji.



e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule zamieszczono analizę źródeł błędów pomiaru temperatury w jednopasmowej pirometrii radiacyjnej w zakresie temperatur od 0°C do 500°C. Wykonano pomiary zmian emisyjności w funkcji temperatury dla utlenionej stali z pieca cementowego oraz stopu aluminium. Przedstawiono algorytm obliczeń błędu pomiarowego w pirometrze. Wyznaczono za jego pomocą wpływ takich czynników jak błąd określenia emisyjności, wpływ promieniowania tła oraz emisyjność zmienną z temperaturą obiektu.

Słowa kluczowe: pomiary temperatury, pirometry, emisyjność.

Analysis of component factors of radiative pyrometry errors

Abstract

The paper describes error sources in non-contact, single band pyrometer temperature measurements within the range 0-500°C. The main causes of measurement errors are summarized in Table 1. The relation between the emissivity and temperature was measured for the oxidized steel interior of cement kiln and aluminum alloy. The measurement results are shown in Fig. 2. The algorithm of calibration procedure and approximation of the calibration curve are presented. The errors introduced by calibration (Fig. 3.) and the method for error estimation in a virtual pyrometer are given. The influence of physical parameters of the measured object and its surrounding on the radiative temperature measurement accuracy is discussed. The mentioned algorithm was also used to determine the influence of such factors as the emissivity assessment error (Fig. 4) and the error caused by temperature dependence of the object emissivity (Fig. 5). The magnitude of measurement error resulting from reflected background temperature was also determined (Fig. 6). The methods for diminishing the effect of the considered factors on the result of radiative temperature measurements are proposed.

Keywords: temperature measurements, pyrometers, emissivity.

1. Wstęp

Pomiary temperatury są częścią procesów opracowania, doświadczeń, produkcji, eksploatacji złożonych systemów technologicznych. Efektywność wykorzystania współczesnych technologii w wielu wypadkach jest bezpośrednio związana ze sposobem wykorzystania informacji o temperaturze. W ciągu ostatnich lat obserwowany jest intensywny rozwój pirometrii radiacyjnej. Istotnym czynnikiem mającym wpływ na rozwój tej dziedziny jest nieustanny wzrost wymagań na dokładność pomiarów temperatury w nauce i przemyśle. Aktualnie najczęściej wykonywane są pomiary temperatury w niskotemperaturowych procesach technologicznych. Zakres najczęściej mierzonych temperatur zawiera się w przedziale od 0°C do 500°C [1]. Dominującą metodą pomiarową jest pirometria jednopasmowa w zakresie spektralnym odpowiadającym oknu atmosferycznemu 8µm do 14 µm.

Procesy przemysłowe można scharakteryzować następującymi parametrami, które w sposób znaczący wpływają na dokładność pomiaru [1, 2]:

- zakres spektralny od 8 µm do 14 µm,
- zakres wartości współczynnika emisyjności od 0,1 do 1;
- efektywna temperatura tła od 0°C do 300°C;
- zakres wartość współczynnika tłumienia atmosfery wynosi od 0,8 do 1.

Celem tego artykułu jest określenie niekorzystnego wpływu różnych czynników na błąd pomiaru temperatury w procesach przemysłowych.

2. Podstawy fizyczne

Rozpatrzmy charakterystyki pirometru radiacyjnego mające wpływ na dokładność pomiaru temperatury. Dzięki postępowi w wytwarzaniu detektorów podczerwieni i scalonych układów elektronicznych osiągnięto poziom błędów związanych ze przyrządem mniejszy niż 0,1%. Jednak w praktyce dokładność pomiaru temperatury metodami radiacyjnymi jest znacząco niższa.

Przyczyną tego stanu rzeczy jest duży poziom błędów związany z samymi metodami pomiaru. Można określić czynniki mające wpływ na końcowy błąd pomiarowy. Czynniki te występujące w praktycznych warunkach pomiarowych zestawiono w tabeli 1 [2, 3]. Główne z nich dotyczą współczynnika emisyjności, wpływu promieniowania otoczenia na sygnał z pirometru oraz przepuszczania kanału optycznego uwarunkowanego widmową charakterystyką przepuszczania atmosfery.

Tab. 1. Źródła błędów metody pomiaru temperatury
Tab. 1. Sources of temperature measurement errors

Źródło	Czynniki wpływające na błąd metody
Wpływ właściwości promiennych obiektu	Nie znana wartość emisyjności danego obiektu
	Zależność emisyjności od temperatury oraz długości fali promieniowania
Wpływ atmosfery	Tłumienie promieniowania przez kanał transmisyjny
	Rozpraszanie promieniowania przez kanał transmisyjny
	Odbicie promieniowania
Wpływ otoczenia	Promieniowanie własne
	Odbicie promieniowania tła od powierzchni mierzonego obiektu
Teoretyczne założenia upraszczające	Nie uwzględnianie wielokrotnego charakteru odbić promieniowania tła
	Korzystanie z przybliżenia prawa Planka. Zależności Wiena i Rayleigha –Jeansa
	Zawężenie pasma pomiarowego
	Korzystanie z jednej długości fali promieniowania w pirometrii monochromatycznej
	Nie uwzględnianie złożonego charakteru temperatury i spektralnej zależności emisyjności

W przypadku idealnym, gdy badanym obiektem jest ciało doskonale czarne sygnał z odbiornika promieniowania zależy od temperatury obiektu, długości fali promieniowania oraz parametrów pirometru i w zakresie spektralnym od λ_1 do λ_2 może być określony wzorem:

$$U_z(T) = k_p R_{Max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_o(\lambda) R(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda, \quad (1)$$

gdzie:

- k_p - stała konstrukcyjna,
- $R_{Max} R(\lambda)$ - czułość spektralna detektora,
- $\tau_o(\lambda)$ - transmisja spektralna toru pomiarowego,
- C_1, C_2 - stałe.

Po uwzględnieniu wymienionych wcześniej czynników, sygnał z detektora można opisać równaniem:

$$U_R(T_o) = k_p R_{Max} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T_o) \tau_{Atm}(\lambda, T_{Atm}) \tau_o(\lambda) R(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_o}} - 1 \right)} d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [1 - \varepsilon(\lambda, T_o)] \tau_{Atm}(\lambda, T_{Atm}) \tau_o(\lambda) R(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{Amb}}} - 1 \right)} d\lambda \right] + U_n \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon(\lambda, T_o)$ - emisyjność obiektu, o temperaturze T_o ,
- $\tau_{Atm}(\lambda, T_{Atm})$ - transmisja atmosfery
- T_{Amb} - ekwiwalentna temperatura otoczenia
- T_{Atm} - temperatura atmosfery
- U_n - sygnał związany z szumem

Szczególnie istotny wpływ na wynik pomiaru temperatury mają czynniki zakłócające gdy mierzona temperatura jest poniżej 500°C. W celu analizy ilościowej należy zdefiniować parametry opisujące ich udział ilościowy.

Radiacyjne właściwości obiektu można opisać jego temperaturą termodynamiczną i wartością współczynnika emisyjności:

- o Obiekt przyjmuje temperatury z zakresu od 0 °C do 500°C,
- o Emisyjność obiektu może mieć cechy:

- Ciała szarego $\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon = const$;
- Ciała szarego temperaturowego $\varepsilon = f(T) = a \pm bT$;
- Ciała kolorowego $\varepsilon = f(\lambda) = a \pm b\lambda$.

W warunkach przemysłowych znaczący wpływ ma promieniowanie innych obiektów, odbite od obiektu pomiarowego [3, 7]. Przykładowo przy pomiarach na zewnątrz budynków takim silnym obiektem zakłócającym jest Słońce. Ze względu na promieniowanie cieplne Słońca można uznać za ciało czarne o temperaturze ok. 6000K. Wpływ Słońca jest istotny nawet w zakresie spektralnym (8÷14 μm) mimo, że natężenie promieniowania w tym zakresie jest ponad 100 razy mniejsze niż w pierwszym oknie atmosferycznym dla długości fal z przedziału (3÷5 μm).

Parametrami opisującymi wpływ otoczenia jest emisyjność ekwiwalentna oraz temperatura otoczenia T_{Amb} . [7]. Ze względu na wielokrotne odbicia promieniowania emitowanego przez wszystkie obiekty zakłada się, że emisyjność ekwiwalentna tła wynosi 1. Tym samym jedynym parametrem opisującym promieniowanie tła jest jego temperatura ekwiwalentna tak jak to założono w zależności (2).

3. Sposób wyznaczenie błędów pomiaru

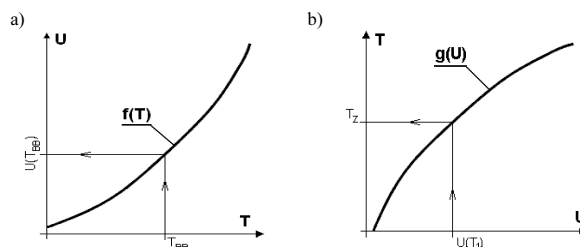
Każdy pirometr podlega kalibracji w warunkach laboratoryjnych, gdzie obiektem pomiarowym jest model techniczny ciała doskonale czarnego o temperaturze T_{BB} . Kalibracja polega na pomiarze odpowiedzi U_i pirometru na kolejne wymuszenia wynikające z ustalenia odpowiednich wartości temperatury T_{BBi} [4]. Na podstawie otrzymanych punktów pomiarowych definiowana jest wstępna krzywa kalibracyjna:

$$U_i = f(T_{BBi}). \quad (3)$$

Krzywą kalibracyjną wyznaczamy jako funkcję odwrotną do $f(T_{BBi})$ tak, że temperatura T jest funkcją U . Ustawione temperatury ciała czarnego opisane są funkcją:

$$T_{BBi} := g(U_i) \quad (4)$$

Przykładowe przebiegi krzywej pomiarowej zamieszczono na rys 1.a) a krzywej kalibracyjnej na rys. 1b).



Rys. 1. a) Krzywa pomiarowa, b) krzywa kalibracyjna
Fig. 1. a) Measurement curve, b) calibration curve

Funkcja $g(U)$ jest tworzona na podstawie danych pomiarowych. Jej charakter zależy od wielu czynników konstrukcyjnych i w ogólności nie znany jest typ funkcji ją opisującej. Natomiast z otrzymanych danych pomiarowych można wyznaczyć wielomian aproksymujący:

$$g(U) = a_0 + a_1 U^1 + a_2 U^2 + \dots + a_N U^N = \sum_0^N a_i U^i \quad (5)$$

Niech obiekt ma temperaturę rzeczywistą T_1 dla której sygnał wyjściowy pirometru wynosi U_{T1} . Sygnał ten uwzględnia całą złożoność sytuacji pomiarowej, w tym temperaturę i emisyjność obiektu oraz wpływ różnych czynników zakłócających. Na podstawie zależności (5) wyznaczana jest temperatura zmierzona:

$$T_z = g(U_{T1}) \quad (6)$$

Błąd pomiaru temperatury wyznaczamy z zależności:

$$\delta T = T_1 - T_z \quad (7)$$

Wyznaczanie błędów pomiarowych wymaga znajomości rzeczywistej temperatury obiektu. W przypadku symulacji komputerowych parametr ten jest jedną ze zmiennych zadawanych czyli jest znany. W przypadku rzeczywistych pomiarów należy temperaturę tą określić innymi dokładnymi metodami, na przykład metodą stykową.

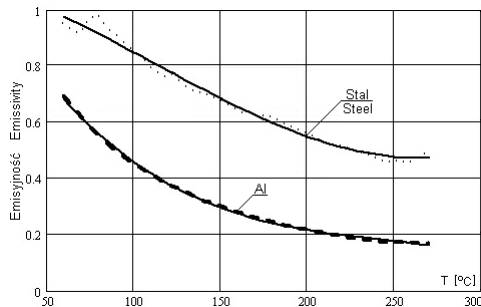
Przedstawiony sposób postępowania może być użyty dla pirometrów stosujących różne metody zdalnego pomiaru temperatury. Przykładowo dla metody dwupasmowej sygnał U_i (3) jest w rzeczywistości ilorazem sygnałów otrzymanych z dwu różnych kanałów spektralnych przyrządu [4].

4. Pomiary laboratoryjne

Wykonano pomiary laboratoryjne dwóch próbek będących fragmentami różnych obiektów przemysłowych. Pierwsza jest fragmentem stalowej powierzchni obrotowego pieca cementowego. Ze względu na wcześniejszą eksploatację jest to stal utleniona, pokryta cienką warstwą pyłu cementowego. Druga jest fragmentem pomocniczych elementów takiego pieca wykonanych z typowego stopu aluminium PA3. Pomiary dotyczyły zmian emisyjności materiałów w zakresie spektralnym 7μm÷14μm w funkcji temperatury.

W przemysłowych pomiarach temperatury zakłada się, że współczynnik emisyjności jest wielkością stałą dla danego mate-

riału. I tak dla materiałów, z których wykonano próbki zakłada się, że emisyjność wynosi odpowiednio $\varepsilon=0.8$ dla stali i $\varepsilon=0.3$ dla stopu aluminium. Ponieważ założono, że pomiary wykonywane są w zakresie drugiego okna atmosferycznego, zmierzono emisyjność obu próbek w funkcji temperatury. Otrzymane wyniki w postaci graficznej zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Emisyjność próbki stalowej i z duralu w funkcji temperatury
Fig. 2. Emissivity of steel and aluminum samples vs. temperature

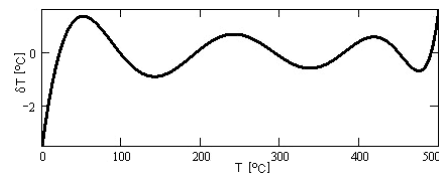
Wartość współczynnika emisyjności zmniejsza się w obu przypadkach. W zakresie temperatur od 50°C do 300°C emisyjność utlenionej stali zmienia się prawie dwukrotnie. W przypadku próbki z duralu jest nawet większa. Oznacza to, że jeżeli nawet znamy dokładnie wartość emisyjności dla danej próbki w danej temperaturze to wraz z jej zmianą pojawia się błąd pomiarowy. W przypadku procesów o zmiennej temperaturze wnoszone błędy mogą być znaczne. Z tego względu rozpatrzono przypadek błędu pomiarowego, wynikającego tylko z powodu zmian emisyjności w funkcji temperatury. Przed właściwymi obliczeniami aproksymowano funkcje emisyjności temperaturowej obu próbek wielomianami.

5. Wyznaczenie błędów pomiaru temperatury

W przemyśle najczęściej używanymi pirometrami są pirometry jednopasmowe o zakresie spektralnym odpowiadającym drugiemu oknu atmosferycznemu. Do dalszych analiz przyjęto, że pirometr testowy jest takim przyrządem. Jako obiekty testowe reprezentatywne dla realnych pomiarów temperatury w procesach technologicznych przyjęto przedmioty testowe o następujących właściwościach i odpowiadających im źródłach zakłócających:

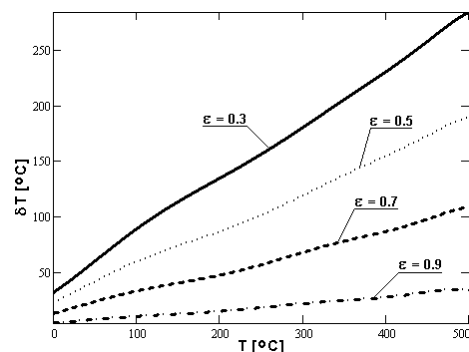
1. Ciała szare o emisyjnościach $\varepsilon = const$; $\varepsilon = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$. Źródłem błędów w tym przypadku jest tylko wartość emisyjności, zakłada się przy tym, że w pirometrze parametr ten ustalony jest na $\varepsilon = 1$.
2. Ciała szare o zmiennej z temperaturą wartości emisyjności. W ogólności emisyjność jest funkcją tylko temperatury $\varepsilon = f(T)$. Dla najczęściej spotykanego przypadku jest to zależność liniowa $\varepsilon = a \pm bT$. Do analiz przyjęto rzeczywiste obiekty opisane w pkt. 4. stalowy oraz z duralu. Dla tych obiektów źródłem błędów jest zmienna emisyjność.
3. Ciała szare o emisyjnościach $\varepsilon = const$, $\varepsilon = 0,3; 0,6; 0,9$. Ponadto dla tego przypadku pomiarowego uwzględniony został wpływ promieniowania tła. Zakres temperatur tła jest typowy. Zaczyna się od 20°C i zmienia się o 100°C. Pierwsza z tych temperatur (20°C) odpowiada temperaturze tła w pomieszczeniu bez silnych źródeł promieniowania. Temperatura 120°C jest to ekwiwalentna temperatura otoczenia gdy występują takie źródła.
4. Ciała szare o zmiennej z temperaturą wartości emisyjności. Również zakłada się przy tym promieniowanie zakłócające od otoczenia. Jest to najbardziej realny przypadek dla pomiarów przemysłowych, gdy nie tylko właściwości promienne obiektu zmieniają się ale, gdy występują silne źródła zakłóceń. Krzywa kalibracyjna pirometru testowego może być aproksymowana wielomianem. W trakcie obliczeń przyjęto stopień wielomianu 6.

Aproksymacja wielomianem szóstego stopnia wprowadza dodatkowy błąd numeryczny. Wykres tego błędu w funkcji temperatury zamieszczono na rys 3. W całym zakresie mierzonych temperatur błąd aproksymacji nie przekracza 0,3% co w sposób nieznaczny wpływa na dokładność analiz. Mimo, że wartości tego błędu są tak małe na etapie obliczeń stabilizowano je w punktach kalibracji. Pozwala to w prosty sposób wprowadzić korekcję przez odjęcie wartości błędu w wyrażeniu (6). Zostanie to uwzględnione także we wzorze na błąd pomiaru (7).



Rys. 3. Błąd aproksymacji krzywej kalibracyjnej
Fig. 3. Approximation of calibrate curve error

Ad. 1. Rozpatrmy dokładność pomiarów temperatury metodami radiacyjnymi dla najczęściej przyjmowanej sytuacji pomiarowej. Mierzony obiekt jest ciałem szarym o niezmiętej emisyjności, w związku z tym w pirometrze ustawiona jest emisyjność 1, brak jest innych źródeł wpływających na dokładność pomiarów. Na rys. 4 zamieszczono wykresy błędów dla czterech wcześniej zdefiniowanych ciał szarych.



Rys. 4. Błąd pomiaru temperatur dla obiektów szarych
Fig. 4. Measurement errors for gray objects

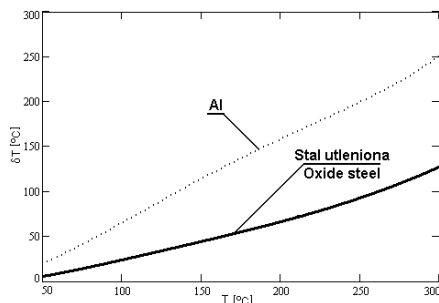
Jak jest widoczne na wykresie błąd pomiarowy szybko wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wartości emisyjności. W granicznych przypadkach błąd ten może osiągać wartości:

$$\delta T \approx (1-\varepsilon) \cdot T \quad (8)$$

Wskazuje to na konieczność wyznaczenia i wykorzystania informacji o właściwościach promiennych danego obiektu. Do wyniku pomiaru należy wprowadzić poprawkę albo skorzystać z pirometru dwupasmowego [3, 4].

Dokładność pomiaru temperatury obiektów metalowych, szczególnie niepokrytych warstwami wierzchnimi, np. tlenkami, których emisyjność jest poniżej $\varepsilon < 0,5$ może dochodzić do dziesiątek procent. Oznacza to, że użycie pirometrów jednopasmowych jest celowe nie tyle do dokładnych pomiarów temperatury, lecz tylko do kontroli temperatury w pewnych granicach temperatur.

Ad. 2. Innym źródłem błędów związanym z właściwościami promiennymi obiektów pomiaru jest zmienna emisyjność [5]. W przypadku ustalonego, jednego zakresu spektralnego pirometru istotna jest tylko emisyjność, która jest funkcją temperatury. Na rys. 5 zamieszczono wykresy błędu pomiaru temperatury dla dwu próbek - fragmentu obrotowego pieca cementowego i stopu aluminium PA3.



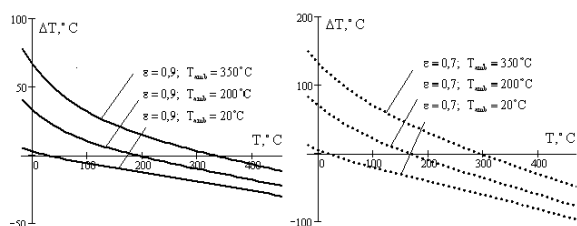
Rys. 5. Błąd pomiarowy dla ciał szarych z emisyjnością zależną od temperatury
Fig. 5. Temperature error for gray objects with emissivity dependent on temperature

Przy pomiarach temperatury powierzchni pieca cementowego (stal utleniona) wartość emisyjności materiału maleje z 0,99 do poniżej 0,50 (rys. 2). Powoduje to, że błąd pomiaru szybko rośnie i dochodzi do 30%. Przy wzroście temperatury próbki duralowej emisyjność zmienia się od $\varepsilon = 0,6$ do $\varepsilon = 0,3$ (rys. 2), co prowadzi do znaczących błędów pomiarowych powyżej 50%. Stawia to pod znakiem zapytania celowość takiego pomiaru. Dla klasy obiektów o takich właściwościach promiennych ustalanie jednej wartości emisyjności w szerokim zakresie mierzonych temperatur jest przyczyną znacznych błędów. Rozwiązaniem tego problemu może być podzielenie pełnego zakresu pomiarowego na podzakresy. Podzakresy te powinny być tak dobrane, aby zmiana emisyjności nie przekraczała wartości $\Delta\varepsilon$, a tym samym maksymalny błąd pomiarowy w tym podzakresie nie przekraczał założonej wartości δT_{\pm} . Dla tak określonych podzakresów należy używać średnią wartość emisyjności:

$$\varepsilon(T_n - T_{n+1}) = \varepsilon_{\text{średnia}}(T_n - T_{n+1}) = \text{const} \quad (9)$$

Dla tak przyjętych wartości emisyjności błędy pomiarów nie będą przekraczały kilku stopni.

Ad. 3. Rozpatrzmy wpływ promieniowania tła na dokładność pomiarów temperatury metodami radiacyjnymi. Wykresy błędów dla ciał szarych o emisyjnościach $\varepsilon = 0,7; 0,9$ podano na rys. 6.

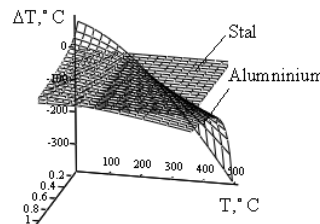


Rys. 6. Wpływ promieniowania tła na błąd pomiarowy
Fig. 6. Measurement error as a function of background temperature

Na podstawie zależności (2) widoczne jest, że współczynnikiem odpowiedzialnym za promieniowanie tła jest czynnik $(1-\varepsilon)$. Dla ciał nieprzezroczystych jest to współczynnik odbicia. Na podstawie rysunku 6 widoczne jest, że wraz ze zmniejszaniem wartości emisyjności wpływ promieniowania tła zwiększa się. Ogranicza to zastosowanie pirometrii do pomiarów temperatury obiektów o niskiej emisyjności do przypadku, gdy temperatura otoczenia znacznie się różni od temperatury obiektu. Zmiana współczynnika emisyjności od początkowej wartości 0,1 dwa razy powoduje zmianę dokładności o 10%. Ciekawym zjawiskiem jest stosunkowo mały błąd pomiarowy, gdy mierzona temperatura jest bliska temperaturze otoczenia. Wtedy dodatkowe promieniowanie tła kompensuje częściowo niedoszacowanie promieniowania od obiektu związane z przyjęciem zbyt wysokiej wartości emisyjności i w szczególnych wypadkach wartość błędu może być zerowa [6, 3]. W celu eliminacji wpływu promieniowania tła na wynik pomiaru celowe jest wstępne określenie T_{amb} . W dalszej kolejności należy wnieść poprawkę do wyniku końcowego [3, 7].

Ad. 4. W praktyce przemysłowej najczęściej obiektami pomiarowymi są ciała szare, których emisyjność zmienia się z temperaturą.

Występują również silne źródła promieniowania zakłócającego, co powoduje, że ekwiwalentna temperatura otoczenia jest znacząco wyższa niż temperatura powietrza, z którą jest utożsamiana. Na rys. 7 zamieszczono wykres błędów dla próbki z utlenionej stali i aluminium.



Rys. 7. Błąd pomiaru dla stali i aluminium z uwzględnieniem promieniowania tła
Fig. 7. Temperature measurement error for steel and aluminum samples with influence of background radiation

Błędy pomiarowe osiągają dziesiątki stopni, dlatego celowe jest określenie dopuszczalnych wartości temperatury otoczenia T_{amb} , dla których błąd pomiaru nie przekracza założonej wartości δT_A .

Możliwym sposobem podniesienia dokładności pomiarów temperatury za pomocą pirometrów jest ustalenie tablic temperaturowych podzakresów, w których przyjęte są stałe wartości emisyjności, gdzie jej zmiany nie przekraczają $\Delta\varepsilon$. Jednocześnie temperatura tła zawiera się w przedziale o szerokości ΔT_{amb} , co pozwala mierzyć temperaturę z błędem nie większym niż dopuszczalna, założona wartość δT_{\pm} . W podzakresach tych należy używać średnich wartości odpowiednich parametrów. Taki sposób postępowania wymaga wstępnego określenia właściwości promiennych badanego obiektu.

6. Wnioski

Pirometrami jednopasmowymi pracującymi w zakresie spektralnym od $8 \mu\text{m}$ do $14 \mu\text{m}$ można mierzyć dokładnie temperaturę obiektów o wysokim współczynniku emisyjności $\varepsilon < 0,9$, gdy w pobliżu nie występują silne źródła zakłócającego promieniowania tła. W przeciwnym przypadku należy liczyć się z błędami pomiarowymi rzędu dziesiątek procent.

Sposobem podniesienia dokładności pomiarów jest przygotowanie tablic dla mierzonych obiektów przemysłowych, gdzie w zależności od mierzonej temperatury można wybrać wartość współczynnika emisyjności i ekwiwalentnej temperatury tła.

Przedstawiona metodyka oceny dokładności pomiarów temperatury metodami radiacyjnymi pozwala ocenić ilościowo wartość temperatury przy projektowaniu urządzeń pomiarowych opartych na metodach pirometrycznych jedno i dwukanałowych.

7. Literatura

- [1] Gaussorgues G., La Thermographie Infrarouge: Principes-Technologie-Applications. Paris.-LAVOISIER.-1999,- 586p.
- [2] Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М: Наука, -1982, 296 с.
- [3] Гоц Н.С. Підвищення точності вимірювання температури за випромінюванням поверхні обертових об'єктів: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.04 / "Львівська політехніка". - Львів, 2003. - 20с.
- [4] Piątkowski T., Metoda bezkontaktowego pomiaru temperatury obiektów o dużej dynamice procesów termicznych, rozprawa doktorska, Biblioteka Główna WAT, III - 16277/A, W-wa 2003.
- [5] Sala A., Radiant properties of materials, PWN & Elsevier, 1986.
- [6] Minkina W.: „Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5.
- [7] Zissis G. J. et al., The infrared and electro-optical systems handbook, SPIE Optical engineering press, Bellingham, USA, 1993.