

Sposób bezdotykowego pomiaru temperatury będącej poza zakresem pomiarowym przyrządu, zwłaszcza kamery termowizyjnej

Przedmiotem wynalazku jest sposób bezdotykowego pomiaru temperatury, będącej poza zakresem pomiarowym przyrządu, zwłaszcza kamerą termowizyjną.

Termowizyjny pomiar temperatury polega na pomiarze strumienia energii promieniowania cieplnego emitowanego przez każde ciało mające temperaturę wyższą od temperatury 0,0 K, a następnie przetworzeniu otrzymanego sygnału na wartość temperatury stosownie do prawa Planck'a opisującego intensywność promieniowania cieplnego w funkcji długości emitowanej fali i temperatury emitera.

Strumień promieniowania cieplnego docierającego do detektora urządzenia pomiarowego zawiera strumień energii emitowany przez badaną powierzchnię, jest to strumień tzw. emisji własnej (Kostowski E.: Promieniowanie cieplne, Wyd. PWN, 1996). W oparciu o wymieniony strumień emisji własnej wyznaczana jest wartość mierzonej temperatury. Dodatkowo do detektora urządzenia pomiarowego dociera strumień cieplnego promieniowania otoczenia badanego obiektu po jego odbiciu od badanej powierzchni oraz promieniowanie warstwy powietrza zawartego pomiędzy badanym obiektem i obiektywem kamery. Wymieniona warstwa powietrza jest ciałem półprzezroczystym i przepuszcza większość promieniowania ale też częściowo je absorbuje. Dla ciała półprzezroczystego ilość przepuszczanego promieniowania jest proporcjonalna do współczynnika transmisji τ natomiast ilość pochłanianego promieniowania jest proporcjonalna do współczynnika absorpcji a . W myśl prawa Kirchhoffa emisyjność ciała ε jest równa jego absorpcyjności a , co można zapisać:

$$\varepsilon = a \quad (1)$$

Ogólnie, gdy na analizowane ciało pada radiacyjny strumień energii to część tego strumienia ulega odbiciu, co charakteryzuje współczynnik refleksyjności r , część przenika przez ciało (gdy współczynnik przepuszczalności $\tau > 0$), a reszta jest pochłaniana (gdy $a > 0$), co można wyrazić ogólną formułą:

$$r + \tau + a = 1 \quad (2)$$

Dla ciał nieprzezroczystych ($\tau = 0$), po zastosowaniu (1) jest:

$$r + \varepsilon = 1 \quad (3)$$

natomiast dla ciał częściowo przezroczystych i nie odbijających promieniowania jest:

$$\tau + \varepsilon = 1 \quad (4)$$

Dla układu pomiarowego "kamera termowizyjna - obiekt" (fig. 1) można zapisać równanie bilansu jasności (Kostowski E.: Promieniowanie ...), które ma postać:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{IR} \mathbf{d}F_{IR} = & \varepsilon_{IR} \dot{e}_{IR} \mathbf{d}F_{IR} + r_{IR} \varepsilon_o \dot{e}_o \tau_{at} F_o \varphi_{d,o-IR} + \\ & + r_{IR} \varepsilon_{am} \dot{e}_{am} r_o \tau_{at} F_o \varphi_{d,o-IR} + r_{IR} \varepsilon_{at} \dot{e}_{at} \mathbf{d}F_{IR} \end{aligned} \quad (5)$$

z którego po zastosowaniu oczywistych założeń dotyczących geometrii układu pomiarowego i warunków radiacyjnej wymiany ciepła w danym przypadku oraz prawa wzajemności otrzymuje się zależność (6):

$$\dot{h}_{IR} = \varepsilon_o \dot{e}_o \tau_{at} + \varepsilon_{am} r_o \tau_{at} + \varepsilon_{at} \dot{e}_{at} \quad (6)$$

gdzie:

- \dot{h} - jasność powierzchni, W/m²,
- F - pole powierzchni, m²,
- \dot{e} - emisja własna w zakresie pasma IR, W/m²,
- φ_d - lokalny stosunek konfiguracji,
- am - dotyczy otoczenia radiacyjnego,
- at - dotyczy powietrza atmosferycznego,
- IR - dotyczy przyrządu (kamery termowizyjnej),
- o - dotyczy badanego obiektu.

Przyrząd pomiarowy, zwłaszcza kamera termowizyjna, ma jednoznacznie określony przez producenta zakres pomiarowy temperatury w obszarze którego otrzymuje się wyniki z oczekiwaną dokładnością (Madura H. (red.): Pomiary termowizyjne w praktyce, Wyd. PAK, W-wa, 2004; Więcek B., De May G.: Termowizja w podczerwieni, Wyd. PAK, W-wa, 2011). Aby zapewnić wymaganą dokładność wskazań, przyrządy pomiarowe (zwłaszcza kamery termowizyjne), poddawane są procesowi kalibracji w czasie którego ustalone zostają wartości współczynników ujmujących i korygujących wpływ parametrów zastosowanego

detektora podczerwieni oraz cech materiałowych i konstrukcyjnych kamery na wynik pomiaru.

Znany jest z polskiego opisu patentowego PL201025 sposób bezkontaktowego pomiaru temperatury, polegający na tym, że po kalibracji urządzenia pomiarowego, podczas rzeczywistego pomiaru cały spektralny zakres pomiarowy pirometru dzieli się na trzy podzakresy. Promieniowanie emitowane przez badany obiekt i odebrane przez optyczny układ odbiorczy pirometru kieruje się na trzy detektory promieniowania. Elektryczny sygnał z wyjścia detektorów przetwarza się na sygnał cyfrowy. Dla każdego pomiaru określa się najpierw metodą stosowaną w pirometrach jednobarwnych temperatury luminancyjne odpowiadające każdemu z kanałów widmowych. Po tym sprawdza się zależności między tymi temperaturami i wybiera się odpowiednie równanie, z którego wylicza się temperaturę pomocniczą. Na podstawie tej temperatury wyznacza się z krzywej kalibracji temperaturę badanego obiektu.

W innym polskim opisie patentowym PL218754 przedstawiono sposób kalibracji kamer termowizyjnych, który polega na tym, że za pomocą kamery rejestruje się obrazy termowizyjne kamery dla minimum dwóch wartości temperatury ciała czarnego i za pomocą programu komputerowego najpierw obliczona zostaje dla każdego z dwóch uzyskanych punktów referencyjnych $IU(T_i)$, gdzie $i=1,2$, egzytancja widmowa (spektralna gęstość emisji) $s_{\Delta\lambda}(T_i)$, następnie z uzyskanych punktów referencyjnych $s_{\Delta\lambda}(IU(T_i))$, gdzie $i=1,2$ wyznaczona zostaje zależność liniowa między wartością egzytancji widmowej $s_{\Delta\lambda}(T_i)$ a sygnałem kamery IU_i dla danej wartości temperatury, po czym zakres temperatur $T_1 - T_2$ podzielony zostaje na m wąskich przedziałów T_j, T_{j+1} , gdzie $j=1,2,3,\dots,(m-1)$ i dla każdej temperatury granicznej T_j , wyznaczona zostaje wartość odpowiadającej jej egzytancji widmowej i utworzone zostają pary danych T_j, s_j , a następnie dla każdej wartości egzytancji widmowej s_j obliczona zostaje przewidywana wartość sygnału kamery w umownych jednostkach izotermicznych IU_j i na podstawie uzyskanych par danych T_j, IU_j zostaje wyznaczona krzywa kalibracji aproksymowana wielomianem określonego stopnia lub modelem RBF.

W procesie kalibracji wyznaczane są również zależności wyrażające związek pomiędzy temperaturą i intensywnością promieniowania cieplnego a sygnałem pomiarowym generowanym w układzie pomiarowym przyrządu (Minkina W.: Pomiary termowizyjne-przyrządy i metody, Wyd. Politech. Częstych., Częstochowa, 2004; Więcek B., De May G.: Termowizja w podczerwieni, Wyd. PAK, W-wa, 2011). Formuły te (nazywane też RBF, RBFA) mają indywidualny charakter i mogą być stosowane tylko dla kamer dla których

zostały opracowane. Na wynik pomiaru termowizyjnego mają także wpływ parametry pomiarowe takie jak emisyjność obiektu ε_o , radiacyjna temperatura otoczenia T_{am} i powietrza (w kamerach w czasie pomiaru przyjmowana jest równość tych temperatur), przepuszczalność (transmisyjność) warstwy powietrza τ_{at} dla promieniowania ciepłego zależna od odległości obiektu i zawartości pary wodnej w powietrzu. Wartości parametrów pomiarowych muszą być wprowadzone (wczytane) do systemu pomiarowego kamery w chwili pomiaru i rejestracji wyniku w postaci obrazu cyfrowego-termogramu. Ich wartości mogą być później modyfikowane w procesie opracowywania termogramów.

Jeśli mierzona wartość temperatury występuje poza zakresem pomiarowym wtedy otrzymuje się wynik ale z informacją, że leży on poza certyfikowanym zakresem, albo otrzymuje się stałą graniczną wartość niezależnie od temperatury badanego obiektu albo nie jest możliwy odczyt wyniku.

Celem wynalazku jest opracowanie technologii umożliwiającej wykonywanie pomiarów temperatury metodą podczerwieni, zwłaszcza za pomocą kamery termowizyjnej, której zakres pomiarowy ustalony przez jej producenta lub zakres działania nie obejmuje wartości mierzonej temperatury, zwłaszcza w przypadku temperatur leżących znacznie poniżej dolnego pomiarowego zakresu przyrządu.

Sposób według wynalazku polega na tym, że modyfikuje się w momencie pomiaru wartości parametrów pomiarowych dla otrzymania pozornej wartości badanej temperatury, która znajdzie się w obszarze zakresu pomiarowego stosowanego do pomiaru przyrządu następująco, w przypadku, gdy temperatura badanego obiektu jest niższa od dolnej granicy zakresu przyrządu pomiarowego, korzystnie kamery termowizyjnej, oraz gdy rzeczywista temperatura otoczenia jest wyższa od temperatury badanego obiektu, aby podwyższyć pozornie wartość zmierzonej temperatury modyfikuje się wartości parametrów pomiarowych i wprowadza do systemu pomiarowego kamery termowizyjnej pozorne wartości tych parametrów, w szczególności obniżoną wartość temperatury otoczenia lub podwyższoną wartość emisyjności badanego obiektu lub podwyższoną wartość współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego, natomiast gdy rzeczywista temperatura otoczenia jest niższa od temperatury badanego obiektu, aby podwyższyć pozornie wartość mierzonej temperatury modyfikuje się wartości parametrów pomiarowych i wprowadza do systemu pomiarowego kamery termowizyjnej pozorne wartości tych parametrów, w szczególności obniżoną wartość temperatury otoczenia lub obniżoną wartość emisyjności

badanego obiektu lub obniżoną wartość współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego, natomiast gdy temperatura badanego obiektu jest wyższa od górnej granicy zakresu przyrządu pomiarowego, korzystnie kamery termowizyjnej oraz gdy rzeczywista temperatura otoczenia jest niższa od temperatury badanego obiektu, aby obniżyć pozornie wartość mierzonej temperatury modyfikuje się wartości parametrów pomiarowych i wprowadza do systemu pomiarowego kamery termowizyjnej pozorne wartości tych parametrów, w szczególności podwyższoną wartość temperatury otoczenia lub podwyższoną wartość emisyjności badanego obiektu lub podwyższoną wartość współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego, następnie z równania (6) oblicza się strumień jasności zarejestrowany przez kamerę termowizyjną, z zależności (8) oblicza się rzeczywisty strumień emisji własnej, po czym z równania (9) wyznacza się rzeczywistą wartość mierzonej temperatury.

Proponowany sposób pomiaru temperatury leżącej poza fabrycznym zakresem pomiarowym urządzenia polega na odpowiedniej modyfikacji parametrów pomiarowych w momencie pomiaru celem otrzymania pozornej wartości mierzonej temperatury leżącej w zakresie pomiarowym kamery, a następnie w oparciu o otrzymany wynik obliczeniu rzeczywistej temperatury według zaproponowanej metody z użyciem uniwersalnego opisu radiacyjnej wymiany energii w przestrzeni pomiędzy kamerą i badanym obiektem (słusznego dla różnych kamer w odróżnieniu od indywidualnych formuł RBF).

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest możliwość pomiaru temperatury metodą termowizyjną w przypadku, gdy wartość mierzonej temperatury jest niższa od dolnej granicy zakresu pomiarowego (lub działania) przyrządu albo wyższa od górnej granicy zakresu pomiarowego (lub działania) stosowanego przyrządu. Dzięki tej metodzie możliwy jest pomiar wartości temperatury leżących poza pomiarowym zakresem posiadanego przyrządu, co jest zwłaszcza przydatne przy pomiarze temperatur leżących poniżej dolnego zakresu pomiarowego. Opracowana technologia bezdotykowego pomiaru temperatury zapewnia wystarczającą dokładność i jest przydatna zwłaszcza w przypadku pomiaru temperatur niskich, dla których nie są produkowane ogólnodostępne urządzenia pomiarowe.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania ujawniono na rysunku, na którym przedstawiono schemat radiacyjnej wymiany energii podczas pomiaru w układzie „badany obiekt - kamera termowizyjna”.

Sposób bezdotykowego pomiaru temperatury leżącej poza zakresem pomiarowym lub zakresem działania przyrządu, zwłaszcza kamery termowizyjnej, polega na modyfikacji

parametrów pomiarowych w momencie pomiaru celem otrzymania pozornej wartości mierzonej temperatury, która znajdzie się w obszarze zakresu pomiarowego przyrządu stosowanego do pomiaru. Poniżej przedstawiono przykłady wykonania dla przypadków, gdy temperatura badanego obiektu $\underline{T_o}$ jest niższa niż dolna granica zakresu przyrządu pomiarowego, a rzeczywista temperatura otoczenia $\underline{T_{am}}$ jest wyższa lub niższa od temperatury badanego obiektu $\underline{T_o}$.

W przypadku gdy $\underline{T_o} < \underline{T_{am}}$, chcąc podwyższyć pozornie wartość temperatury badanego obiektu zmierzonej za pomocą kamery termowizyjnej, do systemu pomiarowego kamery wczytuje się pozorne wartości parametrów pomiaru, w szczególności zaniżoną wartość temperatury otoczenia $\underline{T_{am}}$ lub zawyżoną wartość emisyjności $\underline{\epsilon_o}$ badanego obiektu lub zawyżoną wartość współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego $\underline{\tau_{at}}$.

W przypadku, gdy $\underline{T_o} > \underline{T_{am}}$, chcąc podwyższyć pozornie wartość temperatury badanego obiektu zmierzonej za pomocą kamery termowizyjnej, do systemu pomiarowego kamery wczytuje się pozorne wartości parametrów pomiarowych, w szczególności zaniżoną wartość temperatury otoczenia $\underline{T_{am}}$ lub zaniżoną wartość emisyjności $\underline{\epsilon_o}$ badanego obiektu lub zaniżoną wartość współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego $\underline{\tau_{at}}$.

W przypadku gdy temperatura badanego obiektu $\underline{T_o}$ jest wyższa niż temperatura górnej granicy pomiarowego zakresu przyrządu oraz gdy rzeczywista temperatura otoczenia $\underline{T_{am}}$ jest niższa od temperatury badanego obiektu $\underline{T_o}$, chcąc obniżyć pozornie wartość mierzonej temperatury modyfikuje się wartości parametrów pomiarowych poprzez wprowadzenie do systemu pomiarowego kamery termowizyjnej pozornych wartości tych parametrów, w szczególności podwyższonej wartości temperatury otoczenia $\underline{T_{am}}$ lub podwyższonej wartości emisyjności $\underline{\epsilon_o}$ badanego obiektu lub podwyższonej wartości współczynnika transmisyjności dla powietrza atmosferycznego $\underline{\tau_{at}}$.

Następnie z równania (6) lub równoważnego równania (7), oblicza się strumień jasności $\dot{h}_{IR,p}$ dla pozornych wartości parametrów pomiarowych oraz wskazanej przez kamerę w czasie pomiaru pozornej temperatury obiektu $\underline{T_{o,p}}$:

$$\dot{h}_{IR,p} = (\varepsilon_o \dot{e}_o \tau_{at})|_p + (\dot{e}_{am} r_o \tau_{at})|_p + (\varepsilon_{at} \dot{e}_{at})|_p \quad (7)$$

gdzie $\dot{e}_{o,p} = (\dot{e}_o)|_p = \dot{e}_o(T_{o,p})$.

Następnie korzysta się z warunku, że jasność \dot{h}_{IR} jest stała, a zatem taka sama dla warunków pozornych oraz rzeczywistych co można zapisać $\dot{h}_{IR,r} = \dot{h}_{IR,p}$.

W kolejnym kroku wykorzystuje się wymieniony warunek oraz wyraża się jasność $\dot{h}_{IR,r}$ dla warunków rzeczywistych za pomocą równania (6) skąd otrzymuje się wzór (8) wyrażający rzeczywistą emisję własną badanego obiektu traktowanego jako ciało czarne:

$$\dot{e}_{o,r} = \frac{\dot{h}_{IR,p} - (\dot{e}_{am} r_o \tau_{at} + \varepsilon_{at} \dot{e}_{at})|_r}{(\varepsilon_o \tau_{at})|_r} \quad (8)$$

W oparciu o znajomość rzeczywistej emisji własnej badanego obiektu wyznacza się rzeczywistą temperaturę badanego obiektu $T_{o,r}$ z zależności (9):

$$\dot{e}_{o,r} = \dot{e}_o(T_{o,r}) = \int_{\lambda'}^{\lambda''} \dot{e}_\lambda(\lambda, T_{o,r}) d\lambda \quad (9)$$

gdzie λ', λ'' są granicami zakresu spektralnego stosowanej kamery termowizyjnej, a $\dot{e}_\lambda(\lambda, T)$ jest spektralną gęstością emisji własnej ciała doskonale czarnego wyrażającą prawo Planck'a (Kostowski E.: Promieniowanie cieplne,). Poszukiwana temperatura $T_{o,r}$ w równaniu (9) występuje w postaci niejawnej.

Prof. dr hab. inż. Andrzej
Bogdan, Instytut Inżynierii
i Techniki, Politechniki
Wrocławskiej

